ISTITUTO LOMBARDO
ACCADEMIA di SCIENZE e LETTERE



Rendiconti

CLASSE DI SCIENZE MATEMATICHE E NATURALI

Vol. 148
(2014)

Istituto Lombardo di Scienze e Lettere

MILANO
pISSN 1974-6989
eISSN 2384-986X

ISTITUTO LOMBARDO - ACCADEMIA di SCIENZE e LETTERE

RENDICONTI

CLASSE DI SCIENZE MATEMATICHE E NATURALI

Vol. 148
(2014)

Istituto Lombardo di Scienze e Lettere

MILANO

ISTITUTO LOMBARDO - ACCADEMIA DI SCIENZE E LETTERE

RENDICONTI

CLASSE DI SCIENZE MATEMATICHE E NATURALI

Responsabile scientifico
Leone Corradi Dell'Acqua

Comitato di redazione
Gianpiero Sironi
Angelo Stella
Leone Corradi Dell'Acqua
Giuseppe Frasso

Pubblicato con il contributo di
Fondazione A. Baselli
Politecnico di Milano
Università degli Studi dell'Insubria, Varese
Università degli Studi di Milano
Università degli Studi Milano-Bicocca
Università degli Studi di Pavia

pISSN 1974-6989
eISSN 2384-986X
Copyright 2016



PAGEPress Publications
via G. Belli 7
27100 Pavia, Italy
T. +39.0382.1751762
F: +39.0382.1750481

VITAMIN B_{12} AND NORMAL PRIONS: TWO FIELDS APPARENTLY SO FAR, BUT IN REALITY SO NEAR

GIUSEPPE SCALABRINO (*) and DANIELA VEBER (**)

Nota presentata dal s.c. Giuseppe Scalabrino
(Adunanza del 27 febbraio 2014)

SUNTO. – La carenza cronica di cobalamina (Cbl) determina uno sbilanciamento di alcune citochine e fattori di crescita nel sistema nervoso centrale e periferico del ratto e nel siero e nel liquido cefalorachidiano di pazienti carenti in Cbl. Abbiamo recentemente ipotizzato che uno sbilanciamento dei livelli e/o della sintesi della proteina prionica normale (PrP^C) potrebbe essere coinvolto nella patogenesi della neuropatia da carenza di Cbl. Utilizzando dosaggi immunoenzimatici differenti e appropriati per le diverse molecole, abbiamo determinato i livelli di Cbl, tumour necrosis factor-α, epidermal growth factor, e PrP^C nel midollo spinale e nel liquido cefalorachidiano di ratti carenti in Cbl trattati o non trattati con alcune differenti molecole; nel siero, nel liquido cefalorachidiano di pazienti con carenza cronica di Cbl o sclerosi multipla; e in campioni post-mortem di midollo spinale prelevati da pazienti con sclerosi multipla e controlli. Abbiamo dimostrato che: (*i*) la carenza di Cbl determina un eccesso di PrP^C (soprattutto della regione octapeptide ripetuta (OR)) nel midollo spinale del ratto; (*ii*) l'aumento di PrP^C nel midollo spinale è mediato dall'aumento *in loco* di tumor necrosis factor-α mediato dalla carenza di Cbl e (*iii*) la concentrazione di PrP^C nel liquido cefalorachidiano e nel siero di pazienti carenti in Cbl sono significativamente aumentati rispetto ai controlli. I livelli di PrP^C nel liquido cefalorachidiano sono significativamente diminuiti nei pazienti con sclerosi multipla rispetto ai controlli. I livelli di Cbl, epidermal growth factor, and PrP^C sono significativamente diminuiti in campioni post-mortem di midollo spinale di pazienti con sclerosi multipla rispetto ai controlli.

(*) Department of Biomedical Sciences, Laboratory of Neuropathology, University of Milan, Via Mangiagalli 31, 20133 Milano, Italy
E-mail: giuseppe.scalabrino@unimi.it
(**) E-mail: daniela.veber@guest.unimi.it

***

ABSTRACT. – Cobalamin (Cbl) deficiency causes an imbalance in some cytokines and growth factors in the central nervous system and peripheral nervous system of the rat, and in the serum and cerebrospinal fluid (CSF) of adult Cbl-deficient (Cbl-D) patients. We hypothesized that an imbalance in normal prion (PrP^C) levels and/or synthesis might be involved in the pathogenesis of Cbl-D neuropathy. Using different appropriate enzyme-linked immunosorbent assays (ELISAs), we determined the levels of Cbl, tumour necrosis factor-α, epidermal growth factor, and PrP^C in spinal cord (SC) and CSF of Cbl-D rats treated or not with different molecules; in serum, CSF from Cbl-D or multiple sclerosis (MS) patients; and in post-mortem SC samples taken from MS patients and control patients. We have demonstrated that: (*i*) Cbl deficiency induces excess PrP^C regions (particularly octapeptide repeated (OR) region) in rat SC; (*ii*) the SC increase is mediated by a local Cbl deficiency-induced excess of tumour necrosis factor-α; and (*iii*) CSF and serum PrP^C concentrations in Cbl-D patients are significantly higher than in controls. CSF PrP^C concentrations are significantly lower in MS patients than neurological controls. The Cbl, EGF, and PrP^C levels were significantly decreased in post-mortem MS SCs in comparison with controls.

1. INTRODUCTION

It is well-known that normal cellular prions (PrP^Cs) have a fundamental role in maintaining the structure and functions of normal central nervous system (CNS) myelin [1,reviewed in 2], although they are not alone in doing this, and their task is far from being fully elucidated. Important evidence of PrP^C role in CNS myelin maintenance comes from studies of PrP^C knock-out (KO) mice lacking one or more parts of the PrP^C molecule [1,reviewed in 2]. Furthermore, transgenic (Tg) mice expressing PrP^C point mutations, insertions or deletions develop a spectrum of neuropathological pictures reminiscent those of transmissible spongiform encephalopathies [1,reviewed in 2]. More in detail, mouse strains lacking or overexpressing the PrP^C octapeptide repeated (OR) region show CNS myelin lesion [1,reviewed in 2]. The presence of redundant OR regions in the PrP^C molecule is causally related to some human prionopathies whose histopathological pictures include CNS spongiform vacuolation and astrocytic proliferation. All of the above studies highlighted that CNS myelin lesions may also be caused merely by local quantitative PrP^C abnormalities [1,reviewed in 2].

We demonstrated that the severity of lesions in the spinal cord (SC) white matter of cobalamin-deficient (Cbl-D) rats does not correlate with the accumulation of methilmalonic acid and homocysteine (*i.e.* the

two metabolites which accumulate when Cbl is lacking) in their SCs and sera, because no substantial increase in the severity of Cbl deficiency-induced lesions in the SC white matter was observed as methilmalonic acid and homocysteine accumulated in the SC [3]. Thereafter, we have identified new pathogenetic mechanisms of the myelin lesion of central Cbl-D neuropathy by demonstrating that the SC myelin lesions are caused not by mere Cbl withdrawal but by the Cbl deficiency-induced abnormalities in the SC and cerebrospinal fluid (CSF) of some myelin-related cytokines and growth factors [3]. Briefly, local tumour necrosis factor(TNF)-α levels and/or synthesis are abnormally high and local epidermal growth factor (EGF) levels and/or synthesis abnormally low in SC of Cbl-D rats [3]. In other words, TNF-α excess becomes myelinotoxic and simultaneous EGF lack deprives CNS of its myelintrophic action. Most of our findings concerning cytokine and growth factor derangements in CNS of Cbl-D rats were confirmed by us in human CSF of patients with Cbl-D neuropathy (subacute combined degeneration). The Cbl replacement treatment substantially corrected the above abnormalities in Cbl-D patients and Cbl-D rats [3].

On the basis of all the above, we posited the working hypothesis that there may be a link between Cbl and PrP^Cs and that this link is deranged in Cbl-D neuropathy because of the Cbl deficiency-induced imbalance in CNS cytokine and/or growth factor network. In particular, it should be emphasized that: *i*) PrP^C synthesis has been shown to be regulated *in vitro* by TNF-α and EGF; *ii*) TNF-α levels are markedly increased in the brain of scrapie-infected mice; and *iii*) myelin vacuolation, reactive astrocytosis, and microglial activation are neuropathological features common to Cbl-D central neuropathy and the CNS of most prionopathies [reviewed in 2].

2. Materials and Methods

2.1. In vivo *experiments*

We used non-inbred adult male albino rats (Sprague–Dawley strain) (Charles River Italia, Calco, Italy). The experimental groups consisted of: controls, laparotomized (LPT) rats, and Cbl-D rats (totally gastrectomized rats or rats on a Cbl-D diet). Some of these rats received different drugs by means of intracerebroventricular (i.c.v.) microinjections. CSF and SC samples were collected as previously described [2].

2.2. Patients

Patients with pernicious anaemia, amyotrophic lateral sclerosis or multiple sclerosis (MS), and controls were recruited from different hospital centers. Venous blood and CSF samples were collected as previously described [4]. The post-mortem SC samples from control and MS patients were supplied by the U.K. Multiple Sclerosis Tissue Bank, London [5].

2.3. Enzyme-linked immunosorbent assays (ELISA)

An home-made ELISA was used to determine PrP^C concentration [2,4]. CSF and SC TNF-α levels were determined using an ELISA kit (Rat TNF-α, Biosource, Carlsbad, CA; detection limit: < 4 pg/ml) [2].

3. Results

SC PrP^C levels had increased by the time local myelin lesions appeared. This increase was mediated by excess myelinotoxic TNF-α and prevented by repeated i.c.v. injections of EGF, which proved to be as effective as Cbl in preventing Cbl deficiency-induced SC myelin lesions [2]. Repeated i.c.v. injections of anti-OR region antibodies prevented the Cbl deficiency-induced lesions of SC myelin [2]. *In vivo* Cbl or EGF treatment significantly increased SC PrP^C mRNA levels in Cbl-D rats [2].

We have always considered our studies of equivalent animal models of acquired Cbl-D neuropathy as prolegomena to our studies of adult patients with clinically confirmed severe Cbl deficiency. We demonstrated that: *i*) CSF PrP^C levels were significantly higher in the therapy-free Cbl-D patients (*i.e.* with subacute combined degeneration) than in neurological controls [4]; *ii*) CSF PrP^C levels correlated significantly with CSF Cbl levels [4], and *iii*) CSF PrP^C levels were normal in the patients with amyotrophic lateral sclerosis [4] or Alzheimer's disease [6]. Instead, we found significantly decreased CSF PrP^C levels in MS patients (regardless of its clinical course) [4]. The PrP^C levels of post-mortem SC samples of MS patients were also decreased [5]. The decreased PrP^C availability in MS SC surely represents one of the causes of the remyelination failure in MS.

4. Conclusions

We were the first to demonstrate that an experimental myelinolytic neuropathy (Cbl-D central neuropathy) is also caused by a local excess of PrP^Cs [2,7,8] that do not show any conformational change like in the case of scrapie PrPs. Conversely, PrP^C levels are very low in CNS of a typical demyelinating disease, MS [4]. It should be also noted that SC is the CNS part most severely affected by Cbl deficiency and in MS. In other words, our findings are in agreement with the results of PrP^C KO-or PrP^C Tg-mice showing that any deregulation (excess or deficiency) in CNS PrP^C levels jeopardizes CNS normal myelin maintenance [reviewed in 7,8]. Finally, we demonstrated for the first time that the Cbl and EGF buffering of SC PrP^C levels is crucial for keeping SC myelin normal, because Cbl and EGF protect SC myelin against the myelin-damaging excess or lowering of SC PrP^C levels [7,8].

REFERENCES

[1] Chiesa R, Harris DA, Prion diseases: what is the neurotoxic molecule?, *Neurobiology of Diseases,* 2001: 8: 743-763.

[2] Scalabrino G, Veber D, Mutti E, Calligaro A, Milani S, Tredici G, Cobalamin (vitamin B_{12}) regulation of PrP^C, PrP^C-mRNA and copper levels in rat central nervous system, *Experimental Neurology,* 2012: 233: 380-390.

[3] Scalabrino G, The multi-faceted basis of vitamin B_{12} (cobalamin) neurotrophism in adult central nervous system: Lessons learned from its deficiency, *Progress Neurobiology* 2009: 88: 203-220.

[4] Scalabrino G, Veber D, Briani C, Milani S, Terralavoro A, Brenna S, Valenti L, Silani V, Morelli C, Peracchi M, Cobalamin as a regulator of serum and cerebrospinal fluid levels of normal prions, *Journal of Clinical Neuroscence* 2013: 20: 134-138.

[5] Scalabrino G, Veber D, De Giuseppe R, Roncaroli F, Low levels of cobalamin, epidermal growth factor, and normal prions in multiple sclerosis spinal cord, *Neuroscience*, 2015: 298: 293-301.

[6] Scalabrino G, Veber D, Myelin damage due to local quantitative abnormalities in normal prion levels: evidence from subacute combined degeneration and multiple sclerosis, *Journal of Neurology* 2014: 261: 1451-1460.

[7] Scalabrino G, Veber D, Cobalamin and normal prions: a new horizon for cobalamin neurotrophism, *Biochimie* 2013: 95: 1041-1046.

[8] Scalabrino G, Veber D, Tredici G, Relationships between cobalamin, epidermal growth factor, and normal prions in the myelin maintenance of central nervous system, *International Journal of Biochemistry & Cell Biology* 2014: 55: 232-241.

SEMICONDUTTORI NANOSTRUTTURATI PER APPLICAZIONI TERMOELETTRICHE: UN CONCETTO INNOVATIVO DIMOSTRATO AL COMPUTER

LUCIANO COLOMBO (*)

Nota presentata dal m.e. Giorgio Benedek
(Adunanza del 13 marzo 2014)

SUNTO. – In questa Nota discuterò le proprietà di trasporto termico in materiali nanostrutturati a base di lega silicio-germanio per applicazioni termoelettriche. Dimostrerò, tramite l'uso di simulazioni al computer, che è possibile progettare un nanocomposito con proprietà termiche tali da ottimizzare la figura di merito termoelettrica. In particolare, gli esperimenti computazionali qui discussi dimostreranno in modo quantitativo che il flusso di fononi (i mediatori microscopici del trasporto di calore) dalle regioni calde alle regioni fredde è ostacolato in modo controllabile dai bordi di grano presenti nel nanocomposito. Utilizzando la loro densità come parametro di ingegnerizzazione è possibile progettare il nanocomposito con le prestazioni ottimali.

***

ABSTRACT. – I will discuss the thermal transport properties of nanostructured silicon-germanium alloys for thermoelectric applications. By means of atomistic simulations, I will show that it is in fact possible to design a nanocomposite with optimal thermoelectric performances, *i.e.* maximizing its figure of merit. In particular, computer experiments provide quantitative evidence that the phonon flux from hot to cold regions (phonons are the microscopic heat carriers) is dramatically affected by the network of grain boundaries present in the nanocomposite.

(*) Dipartimento di Fisica, Università di Cagliari, Cittadella Universitaria, 09042 Monserrato (CA), Italy.
E-mail: luciano.colombo@unica.it

1. Introduzione e motivazioni

La nostra moderna società industrializzata è estremamente energivora, come ampiamente documentato in un recente rapporto pubblicato dalla Società Italiana di Fisica [1] e come anche riconosciuto dalla Unione Europea, che ha posto questo problema al centro del proprio programma di ricerca e sviluppo tecnologico "*Horizon 2020*". La necessità di soddisfare il crescente fabbisogno (e consumo) energetico rappresenta, pertanto, una delle più importante sfide poste alla comunità scientifica internazionale.

Da diversi anni la risposta si sta articolando in un massiccio sforzo di ricerca fondamentale (studio di nuovi materiali) e applicativa (sviluppo di nuove tecnologie di produzione energetica ad elevata efficienza e ridotto impatto ambientale). Nell'ambito di questo ampio panorama e da esso motivati, risulta utile condurre anche ricerche di carattere teorico-computazionale volte alla progettazione di nuovi materiali che, manipolati opportunamente alla scala spaziale dei loro costituenti fondamentali, offrano proprietà fisiche non riscontrabili in materiali naturali e tali da garantirne un efficiente sfruttamento in campo energetico.

In questa Nota discuterò, in particolare, il fenomeno del trasporto termico in leghe nanostrutturate a base silicio-germanio che, a mio avviso, rappresenta non solo un interessante problema di fisica dei materiali, ma offre anche la concreta prospettiva di una sua applicazione nel campo della produzione di energia tramite conversione termoelettrica.

Usando lo strumento delle simulazioni al computer, dimostrerò come un concetto teorico possa essere validato dalla simulazione, compreso nei suoi fondamenti microscopici e, quindi, reso concretamente operativo per le applicazioni di interesse.

2. Generalità sui materiali termoelettrici

I termoelettrici sono materiali capaci di convertire calore (o, meglio: gradienti di temperatura) in corrente elettrica [2]. L'efficienza di conversione termoelettrica (ad una data temperatura T) è riassunta dalla figura di merito $ZT=(S^2\sigma/\kappa)T$ (dove S è il coefficiente Seebeck, σ la conducibilità elettrica e κ la conducibilità termica). Essa definisce le proprietà fisiche intrinseche che deve possedere il materiale termoelettrico ideale: è necessario che esso sia un buon conduttore di elettricità, ma che sia al contempo anche un buon isolante termico [3].

Questa condizione, purtroppo, non è facilmente riscontrabile nei materiali naturali, stante la legge di Wiedemann-Franz che stabilisce che il rapporto κ/σ (a temperatura assegnata T) sia costante. Dunque: un buon conduttore di elettricità è anche un buon conduttore di calore, come dimostrato sperimentalmente dai metalli (è vero anche il contrario: in generale, un buon isolante termico è anche un buon isolante elettrico). Ne segue che, nella maggior parte dei materiali naturali, la figura di merito sia piccola e, dunque, sia bassa l'efficienza complessiva della trasformazione di calore in elettricità.

Questo risultato di fisica fondamentale è alla base dal limitato impiego pratico che sin qui hanno avuto i termoelettrici. Sebbene la fisica del processo sia nota da circa due secoli [4], le sue applicazioni tecnologiche sono ancora limitate a mercati di nicchia (tipicamente, quelli areonautico e spaziale), dove bassa efficienza, alti costi e limitata disponibilità dei materiali naturali sono fattori limitanti meno importanti della affidabilità e durata temporale del dispositivo termoelettrico con essi costruito [5]. Ove fossero, invece, disponibili nuovi materiali ad alta ZT si potrebbe immaginarne un uso a larga scala come, ad esempio, nell'industria automobilistica: sfruttando il calore estratto dai gas di scarico accumulati nella marmitta, si potrebbe generare gran parte della corrente necessaria ad alimentare tutte le servitù elettriche presenti nell'automezzo, con un significativo risparmio energetico. Lo stesso principio, poi, potrebbe essere esteso all'industria pesante (tipicamente, quella siderurgica) dove il calore risultante dal processo produttivo viene normalmente dissipato nell'ambiente, senza sfruttamento utile.

Il punto chiave, dunque, è quello di massimizzare ZT*,* ovvero: ridurre κ, pur mantenendo σ a valori opportunamente alti. Di recente [6], nell'ambito del paradigma *materials-by-design* (progettazione di nuovi materiali a partire dalla struttura atomistica, con proprietà fisiche ottimali per una certa applicazione) è stata proposto un nuovo concetto molto promettente che prevede di introdurre in un solido buon conduttore di corrente alcune caratteristiche strutturali artificiali tali da ridurne significativamente la capacità di sostenere un flusso termico (senza però alterare quello elettrico) [6].

Il concetto si basa sulla natura microscopica dei fenomeni di trasporto di corrente e calore, nonché sull'effetto che i difetti strutturali nel reticolo atomico che forma il solido hanno sui due fenomeni. Nel primo caso si tratta di un flusso di elettroni, accelerati da una differenza di potenziale elettrico; nel secondo caso si tratta di un flusso di pseudo-

particelle, dette fononi, descriventi il complesso dei moti di agitazione termica di un reticolo atomico [7] il cui flusso si instaura dalle regioni più calde verso quelle più fredde. Il moto di elettroni e fononi (rispettivamente, sotto l'azione di gradienti elettrici e termici) è ostacolato dalle interazioni mutue e da quelle con eventuali difetti strutturali presenti nel materiale. Si definisce *libero cammino medio* lo spazio in media percorso da un elettrone o da un fonone tra due eventi di interazione consecutivi: maggiore sarà tale cammino, maggiormente intensa risulterà la corrispondente corrente. Queste interazioni danno origine, dunque, ai fenomeni di resistenza elettrica e termica.

Acquisite queste nozioni, possiamo riassumere il nuovo concetto *materials-by-design* come segue: per aumentare il valore di ZT in un materiale si devono introdurre difetti strutturali tali da aumentare notevolmente la resistenza termica, senza alterare significativamente il flusso degli elettroni. Ciò può essere fatto introducendo ostacoli reticolari che, per loro distribuzione spaziale, siano distanziati in modo da interferire, riducendolo, con il libero cammino medio dei fononi (normalmente molto più grande della tipica distanza tra atomi in un reticolo), ma non con quello degli elettroni (il cui libero cammino medio è, normalmente, molto inferiore a quello dei fononi). Riassumendo: il problema è riformulato in termini di creazione di una distribuzione di difetti reticolari capaci di ridurre efficacemente il libero cammino medio fononico, lasciando quello elettronico praticamente inalterato.

3. I NANOCOMPOSITI SILICIO-GERMANIO

Si prestano ad implementare in pratica il concetto discusso nel precedente paragrafo i materiali semiconduttori, nella specie delle leghe silicio-germanio (un reticolo cristallino tipo zincoblenda, i cui siti sono occupati a caso da atomi delle due specie, in proporzione variabile e controllabile).

In tali materiali, infatti, la conduzione di elettricità è perfettamente sotto controllo, tramite il metodo del drogaggio chimico mutuato dalla microelettronica: in sostanza, possiamo generare una lega a stechiometria e drogaggio assegnati, tali da avere il valore di σ utile per l'applicazione termoelettrica di interesse. Al contempo, però, essi possono facilmente essere sottoposti a trattamenti di *routine* (tipicamente, micro-macinazione e successivo ricompattamento meccanico) che li rendono in forma

finale nanocristallina. In altre parole, a livello atomistico tali strutture consistono in una distribuzione di grani cristallini (quindi, a struttura reticolare ordinata) di dimensione nanometrica e orientati a caso nello spazio, interfacciati l'uno all'altro tramite superfici di contatto dette "bordi di grano". Un esempio è rappresentato in *Fig. 1* dove viene visualizzata la struttura atomistica di tre diversi nanocompositi che differiscono per granulometria, avvero per il diverso valore d_{ave} della dimensione media dei grani cristallini. Orbene, la griglia dei bordi di grano genera una altissima resistenza termica, che si traduce in una notevole riduzione della conducibilità κ. Al contempo, però, predeterminando il valore d_{ave} in modo opportuno è possibile selezionare un nanocomposito le cui dimensioni di grano siano maggiori del libero cammino medio elettronico, lasciando così immutata σ al valore della lega silicio-germanio definita dalla specifica stechiometria assegnata. Insomma: è possibile creare un "isolante fononico" che sia però un buon "conduttore elettronico", superando i limiti imposti dalla legge di Wiedemann-Franz.

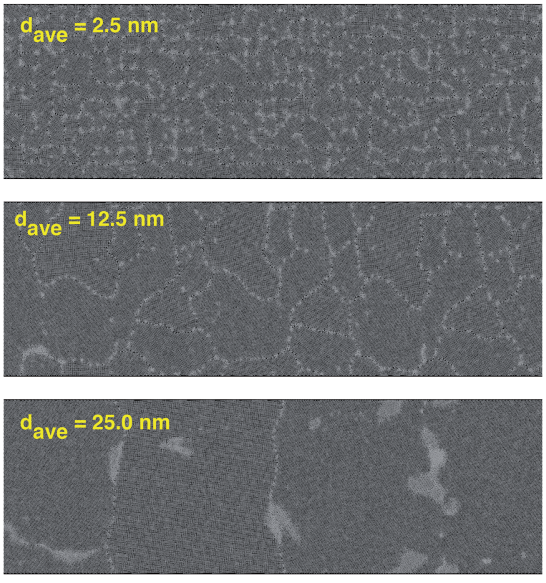


Fig. 1 – Rappresentazione della struttura di tre diversi nanocompositi di lega silicio-germanio, a differente granulometria (descritta dal parametro d_{ave}*), così come ottenuta da simulazioni al computer. La rete dei bordi di grano risulta in contrasto più chiaro e identifica le zone con alto disordine reticolare che contribuiscono maggiormente a limitare il libero cammino medio dei fononi. Esse agiscono come sorgente di resistenza termica.*

I primi esperimenti di laboratorio [8] hanno già dimostrato la bontà di questo concetto innovativo, ma hanno altresì lasciato aperte numerose questioni di carattere fondamentale, tra cui: (i) la determinazione di quale sia la migliore combinazione di stechiometria e granulometria che minimizzi in modo assoluto il valore di conducibilità κ e (ii) l'elucidazione del ruolo dei bordi di grano nell'ostacolare il flusso di fononi attraverso la struttura.

Per dare risposta a questi interrogativi, è stata progettata e realizzata una complessa ed onerosa campagna di simulazioni al computer, descritta dettagliatamente nel seguito, dove il fenomeno della conduzione termica in nanocompositi silicio-germanio è stato accuratamente studiato a livello atomistico.

4. Le simulazioni di dinamica molecolare

La dinamica molecolare (DM) è un metodo simulativo generale ed affidabile, capace di fornire predizioni quantitative sulle proprietà fisiche di un un materiale in qualsivoglia stato di aggregazione, composizione chimica e grado di ordine strutturale. In breve, la DM consiste nella soluzione numerica (cioè eseguita su *computer*) delle equazioni del moto di un insieme di atomi interagenti sotto l'azione di arbitrari vincoli termodinamici (cioè, in condizioni di temperatura, pressione, densità, … assegnate). Una volta fornito alla DM uno schema di interazione tra atomi (effettivamente dispobile per lo specifico sistema silicio-germanio di nostro interese), è possibile calcolare le loro traiettorie spazio-temporali, in modo da esplorare tutta la porzione dello spazio delle fasi accessibile al sistema simulato sotto i vincoli termodinamici assegnati [9]. Pertanto, questo dispositivo teorico-computazionale è in grado di calcolare una qualunque osservabile fisica come una media di insieme, secondo i dettami della meccanica statistica.

Lo schema DM fornisce, in particolare, un modo diretto e concettualmente semplice per il calcolo della conducibilità termica quando il sistema viene inizialmente preparato in una condizione di non equilibrio e, successivamente, ne viene simulata la naturale evoluzione verso l'equilibrio. La situazione è schematicamente riassunta in *Fig. 2*: un sistema è inizialmente preparato in modo che le sue metà destra e sinistra si trovino a temperatura diversa (ovvero: che il profilo di temperatura lungo la direzione z indicata in figura sia "a gradino"); a questo punto il sistema è

simulato in condizioni microcanoniche (ovvero: senza che sia imposto alcun vincolo termodinamico, se non la conservazione del numero di particelle, del volume e dell'energia totale) e, pertanto, tenderà ad evolvere spontaneamente verso la condizione di equilibrio, caratterizzata da una temperatura uniforme in tutto il sistema (pari al valore medio delle due temperature iniziali). Seguendo il sistema in questo suo approccio all'equilibrio, è possibile calcolare ad ogni istante di tempo t, durante la simulazione DM, la differenza $\Delta T(t)=\langle T_s\rangle - \langle T_d\rangle$ tra le due temperature medie $\langle T_s\rangle$ e $\langle T_d\rangle$, rispettivamente, delle metà di sinistra e di destra. Si osserva direttamente dai dati estratti dalla simulazione che questa differenza segue un'evoluzione temporale di tipo esponenziale decrescente. Ciò è diretta conseguenza della legge di Fourier: risolvendo l'equazione di diffusione del calore per un profilo iniziale di temperatura del tipo "a gradino" si dimostra infatti che $\Delta T(t)=\Sigma_n C_n \exp[-\alpha_n \lambda t]$, dove: $\lambda=\kappa/\rho c_V$ è la diffusività termica del sistema di cui si assumono noti (o calcolabili) la densità ρ ed il calore specifico (a volume costante) c_V. Invece, i coefficienti $\alpha_n=2\pi n/L_z$ e $C_n=8(\langle T_s\rangle - \langle T_d\rangle)\cos(\alpha_n L_z/2)-1]^2/(\alpha_n^2 L_z^2)$ sono matematicamente imposti dalle condizioni al contorno. Pertanto, la conducibilità termica κ è facilmente calcolata dai dati simulativi semplicemente calibrando il valore di λ sulla curva temporale $\Delta T(t)=\langle T_s\rangle - \langle T_d\rangle$ generata durante la DM.

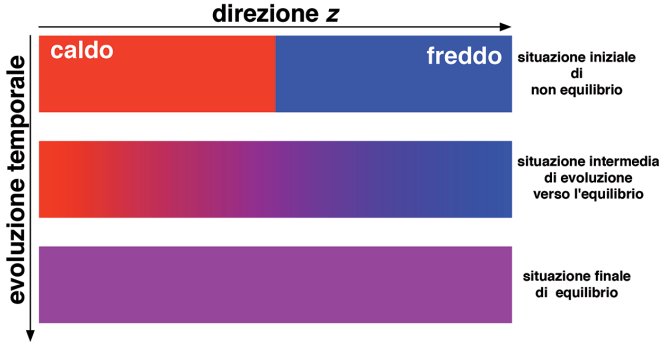


Fig. 2 – Rappresentazione grafica dello schema di simulazione descritto nel testo. In alto: un sistema si trova inizialmente in una condizione di non equilibrio in cui le due metà destra e sinistra sono preparate a due temperature differenti. Al centro: il sistema viene quindi simulato in condizioni microcanoniche e, dunque, si instaura un flusso di calore (fononi) dalla regione inizialmente più calda a quella inizialmente più fredda. In basso: al termine della simulazione, il sistema raggiunge una condizione di equilibrio termico caratterizzata da temperatura uniforme.

Questo schema di simulazione ha numerosi vantaggi pratici [10]. Innanzitutto è molto semplice da implementare e i risultati finali sono sostanzialmente stabili rispetto alla scelta arbitraria delle condizioni di esecuzione della simulazione (per esempio, non dipendono dal reale profilo iniziale di temperatura, nè dai valori di temperatura assegnati alle due metà del sistema). Esso, inoltre, comporta la necessità di seguire il sistema solamente durante il breve transiente temporale di sua evoluzione verso l'equilibrio. Ciò comporta che l'onere computazionale complessivo della simulazione (che dipende linearmente dalla lunghezza temporale della simulazione DM) è comparativamente molto ridotto rispetto ad altri metodi pure presenti e discussi in Letteratura. Questa caratteristica, a sua volta, è di fondamentale importanza, perché consente di applicare questa procedura a sistemi di grandi dimensioni (contenenti milioni di particelle), in realtà necessari per descrivere la complessità strutturale di un nanocomposito. Infine, sebbene i risultati sulla fisica del sistema siano estratti da una simulazione numerica, essa ha un robusto fondamento teorico (equazione di diffusione del calore) e, pertanto, posseggono un sicuro valore predittivo.

Nell'ambito dello schema descritto, il protocollo di simulazione adottato è in realtà molto semplice. Una volta realizzato un modello strutturale di nanocomposito con le volute caratteristiche [11], si provvede a prepararlo nella condizioni iniziale della simulazione, come illustrato in *Fig. 1*. A questo punto, la dinamica microcanonica del sistema è simulata al computer, fino al raggiungimento della condizione finale di equilibrio a temperatura uniforme. Durante questa fase viene calcolato numericamente il termine $\Delta T(t)=<T_s> - <T_d>$ dal quale si estrae, infine, il corrispondente valore di conducibilità termica κ. La procedura viene quindi ripetuta variando i parametri strutturali (granulometria) e chimici (stechiometria), generando in questo modo un complesso di informazioni che possono essere sottoposte a ulteriore analisi teorica sulla quale basare la nostra comprensione del fenomeno di trasporto termico.

5. Risultati e loro Discussione

Il primo punto importante da affrontare è determinare se, a parità di stechiometria, un nanocomposito abbia effettivamente una conducibilità termica inferiore della corrispondente lega omogenea (ovvero:

monocristallina, senza bordi di grano). Se così non fosse, il concetto stesso perderebbe di significato e sarebbe inutile sottoporre le leghe ai trattamenti di micro-macinazione e compattazione che, pur se ordinari, comportano comunque oneri di costo.

In *Fig. 3* si riportano i valori di κ, ottenuti per una lega omogenea e per un nanocomposito di granulometria d_{ave}=10.5 nm, al variare della loro stechiometria nell'intervallo di interesse tecnologico. La simulazione fornisce una chiara indicazione quantitativa: per ogni valore di contenuto di germanio nella lega, la condubilità termica del nanocomposito è inferiore di circa il 50% rispetto a quella della corrispondente lega omogenea. Questo risultato conferma e generalizza quanto già noto sperimentalmente, limitatamente al solo caso di concentrazione di germanio fissa al 20% [12,13] e dimostra in maniera inequivocabile che la figura di merito termoelettrica di un nanocomposito è circa doppia rispetto a quella della corrispondente lega.

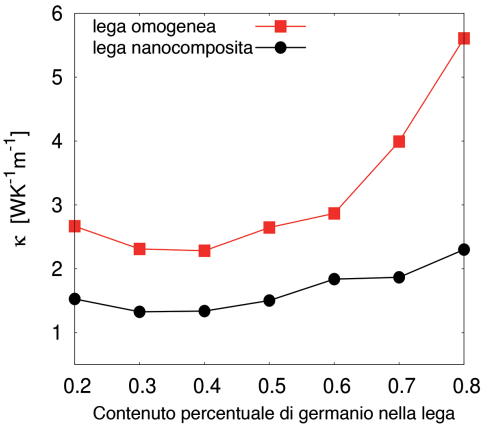


Fig. 3 – Confronto tra i valori calcolati tramite simulazione al computer della conducibilità termica κ in leghe omogenee e nanocomposite, al variare del contenuto percentuale di germanio.

Poichè questo risultato è valido ad ogni stechiometria, possiamo concludere che la rete di bordi di grano nel nanocomposito gioca un ruolo fondamentale nel determinare quanto osservato. Quest'affermazione è resa quantitativa tramite il calcolo della funzione di accumulazione termica $\kappa(L_z)/\kappa(\infty)$, definita dal rapporto tra i valori di conducibilità calcolati per un nanocomposito di lunghezza L_z ed uno

di lunghezza infinita. In pratica, la funzione di accumulazione termica fornisce la stima quantitativa del contributo alla conducibilità totale esclusivamente da parte dei fononi il cui libero cammino medio è inferiore (o, al più, uguale) ad L_z. In *Fig. 4* si dimostra che in una tipica lega nanocomposita al 50% di germanio circa ~80% della conducibilità è dovuta a fononi con libero cammino medio inferiore ai 100 nm. D'altro canto in una lega omogenea di identica stechiometria lo stesso contributo è fornito da fononi con libero cammino medio fino a ~1μm. È, dunque, del tutto evidente che i difetti reticolari tipo "bordo di grano" generano un importante fenomeno di resistenza termica: essi, infatti, troncano la lunghezza di diffusione dei portatori microscopici del calore (i fononi) ad un valore inferiore di circa un ordine di grandezza.

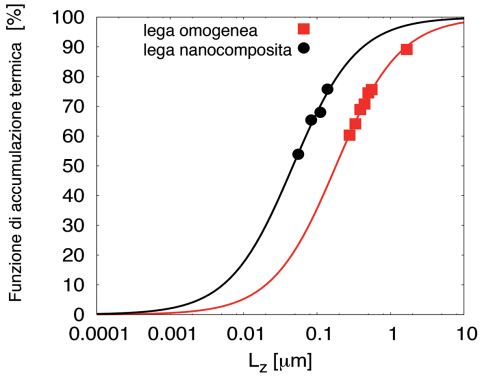


Fig. 4 – Funzione di accumulazione termica per una lega omogenea o nanostrutturata al 50% di contenuto di germanio.

Al fine di caratterizzare ancor meglio il ruolo della nanostruttura sulle proprietà di trasporto termico, possiamo studiare gli effetti della granulometria con un nuovo esperimento di alchimia computazionale. A tal fine, fissiamo la stechiometria al valore 50% di germanio e studiamo come varia la conducibilità al variare del parametro d_{ave}. I risultati sono riassunti in *Fig. 5*: la conducibilità aumenta in modo monotono con l'aumentare di d_{ave} e, per valori sufficientemente grandi, si ritrova il valore di conducibilità proprio della lega omogenea (di identica stechiometria). In conclusione, la simulazione chiaramente dimostra che è inutile l'impiego di nanocompositi a granulometria troppo grande perché la densità della corrispondente rete di bordi di grano è troppo bassa per assicurare un efficiente fenomeno di resistenza termica.

Un altro risultato interessante dalla simulazione è che la conducibilità termica è ridotta ai minimi valori per $d_{ave} \leq 15$nm. In particolare, stante quanto riportato in *Fig. 5*, il minimo assoluto di κ per un nanocomposito silicio-germanio è di ~1$WK^{-1}m^{-1}$, ottenuto per una granulometria di circa 2-3 nm. Questo valore è ben 3-4 volte inferiore a quello di lega, il che si riflette in un significativo aumento della figura di merito termoelettrica. Al di sotto questo valore non si può scendere, per motivi termodinamici: per dimensioni inferiori, infatti, i grani si trovano sotto la soglia di capillarità [14] e, dunque, tendono ad evaporare se lasciati a temperature sufficientemente alte, come in effetti accadrebbe in un dispositivo termoelettrico che normalmente funziona a molte centinaia di gradi (tra i 400 e i 800 gradi Kelivin). Questa predizione, dunque, può essere molto utile in pratica, al fine di definire le caratteristiche ottimali del materiale di impiego in un eventuale dispositivo.

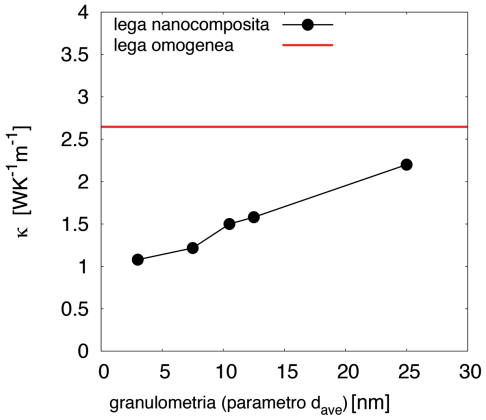


Fig. 5 – Valori di conducibilità termica in una lega nanocomposita (al 50% di contenuto di germanio) calcolati al variare della sua granulometria.

6. Conclusioni

In questa breve Nota ho sviluppato tre concetti in parallelo: (i) la simulazione al computer è in grado di fornire predizioni quantitative precise ed affidabili sulle proprietà fisiche di (nuovi) materiali per applicazioni tecnologiche avanzate e, pertanto, può guidare (ii) un paradigma *materials-by-design* tramite il quale, manipolando la materia alla scala dei suoi costituenti elementari, è possibile progettare nuovi

materiali nanostrutturati con proprietà non altrimenti riscontrate in Natura.

La combinazione di questi due concetti ha portato alla capacità di (iii) predire le condizioni ottimali di composizione chimica e nanostruttura in leghe silicio-germanio per un loro efficiente impiego come *energy materials* e, in particolare, per una efficiente conversione termoelettrica.

BIBLIOGRAFIA

[1] Società Italiana di Fisica (2008), "*Energy in Italy: problems and perspectives (1999-2020)*", documento disponibile sul sito: http://www.sif.it/attivita/energy/librobianco

[2] G.S. Nolas, J. Sharp, and H. Goldsmid, "*Thermoelectrics: Basic Principles and New Materials Developments*" (Springer, New York, 2001).

[3] D.K.C. McDonald, "*Thermoelectricity*" (Dover, New York, 2006).

[4] L. Anatychuk, J. Stockholm, G. Pastorino, "*On the discovery of thermoelectricity by A. Volta*", Proceedings of the 8th European Conference on Thermoelectrics (2010), pp. 10-15.

[5] G.J. Snyder and E.B. Toberer, "*Complex thermoelectric materials*", Nature Materials (2008) vol. 7, pp. 105 - DOI:10.1038/nmat2090.

[6] M. Dresselhaus, G. Chen, M.Y. Tang, R.G. Yang, H. Lee, D.Z. Wang, Z.F. Ren, J.-P. Fleurial and P. Gogna, "*New directions in low-dimensional thermoelectric materials*", Advanced Materials (2007) vol. 19, pp. 1043 - DOI:10.1002/adma.200600527.

[7] N.W. Ashcroft, N.D. Mermin, "*Solid state physics*" (Saunders College Publishing, Orlando, 1976).

[8] M. Zebarrjadi, K. Esfarjani, M.S. Dresselhaus, Z.F. Ren, and G. Chen, "*Perspectives on thermoelectrics: from fundamentals to device applications*", Energy & Environmental Science (2012), vol. 5, pp. 5147 - DOI:10.1039/C1EE02497C.

[9] D. Frenkel and B. Smit, "*Understanding molecular simulation*" (Academic Press, San Diego, 1996).

[10] C. Melis, R. Dettori, S. Vandermeulen, L. Colombo, "*Calculating lattice thermal conductivity in a transient conduction regime: theory and implementation*", Eur. Phys. J. B (2014), vol. 87, pp. 96 - DOI:10.1140/epjb/e2014-50119-0.

[11] C. Melis, L. Colombo, "*Lattice thermal conductivity in Si_xGe_{1-x} nanocomposites*" (2014), Physical Review Letters vol. 112, pp. 065901 - DOI:10.1103/PhysRevLett.112.065901.

[12] X.W. Wang, H. Lee, Y.C. Lan, G.H. Zhu, G. Joshi, D.Z. Wang, J. Yang, A.J. Muto, M.Y. Tang, J. Klatsky, S. Song, M. S. Dresselhaus, G. Chen, and Z. F. Ren, "*Enhanced thermoelectric figure of merit in nanostructured n-type silicon germa-*

nium bulk alloy", Applied Physics Letters (2008), vol. 93, pp. 193121 - DOI: 10.1063/1.3027060.

[13] G. Joshi, H. Lee, Y. Lan, X. Wang, G. Zhu, D. Wang, R.W. Gould, D.C. Cuff, M.Y. Tang, M.S. Dresselhaus, G. Chen, Z. Ren, "*Enhanced Thermoelectric Figure-of-Merit in Nanostructured p-type Silicon Germanium Bulk Alloys*", Nano Lett. (2008), vol. 8, pp. 4670 - DOI:10.1021/nl8026795.

[14] A. Mattoni, L. Colombo, "*Crystallization kinetics of mixed amoprhous-crystalline nanosystems*", Physical Review B (2008), vol. 78, pp. 075408 - DOI:10.1103/PhysRevB.78.075408.

THE DARK ENERGY EXPLAINED BY A SCHWARZSCHILDIAN COSMOLOGY - *ET CETERA*

Nota del m.e. ANGELO LOINGER (*) e di TIZIANA MARSICO (**)

(Adunanza del 13 marzo 2013)

SUNTO. – Nella prima parte della Nota si sviluppa una cosmologia schwarzschildiana, che, in virtù della repulsione gravitazionale scoperta da Hilbert, rende ragione sia dello spostamento verso il rosso delle righe spettrali delle galassie sia dell'esistenza dell'Energia Oscura. Nella seconda parte si discutono talune conseguenze – ignorate dalla letteratura relativistica – della metrica di Friedmann. –

***

ABSTRACT. – In a First Part we give a Schwarzschildian generalization of the Newtonian, and Friedmannian, models of universe. By virtue of the Hilbertian gravitational repulsion, our formulation explains the red-shifts of the galaxies and the existence of a DARK ENERGY. In the Second Part we discuss two ignored consequences of Friedmann's metrics: *i*) the existence of a time coordinate such that there is *no* expansion of Friedmann's universes; *ii*) a corollary of a theorem by Hönl (1949), which tells us that the physical meaning of the point-origin of the galaxy paths is very problematic.

Introduction. – **1.** The concept of a Schwarzschildian cosmology. – **2.** Some results of the Newtonian and Friedmannian models of universe. – **3.** Discussion of the properties of the Schwarzschildian galaxy trajectories. We prove that there exist values of the galaxy velocities which explain (without the intervention of the Lambda-term) the

(*) Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Milano, Italy.
E-mail: angelo.loinger@mi.infn.it
(**) Liceo Classico "G. Berchet", Via della Commenda 26, 20122 Milano, Italy.
E-mail: martiz64@libero.it

galactic red-shifts and the existence of a DARK ENERGY. – **4.** The concepts of inertial systems and inertial time according to the operational formulation by L. Lange. – **5.** The time coordinate *t'* for which there is no expansion of Friedmann's universe – and some consequences of this fact. – **5bis.** The Hubble's law as a first approximation of Friedmann's treatment. The geodesic null-lines of Friedmann's metrics. – **5ter.** A rèsumè of our results about galaxy red-shifts and Dark Energy. – **6.** A comparison of the expansion "mechanisms" in the Newtonian, Friedmannian, and Schwarzschildian cosmologies. – **7.** As a consequence of a theorem by Hönl, Friedmann's models of universe lose their physical meaning if $R \to 0$. – *Appendix*: Schwarzschildian models with a cosmological Lambda-term. –

INTRODUCTION. – The equations of motion of the Newtonian models [1] and of Friedmann's models (with zero pressure) [2] are mathematically isomorphic, as it is known (see, *e.g.*, [3]). However, while Friedmann's *metrics* explain the observational red-shifts of the galactic spectral lines, the Newtonian models give Doppler red-shifts that are in some accord with the observations only if we add to the Newtonian equations of motion the cosmological Λ-term (see, *e.g.*, [4]).

In the First Part of the present paper we develop a Schwarzschildian generalization of the Newtonian – and Friedmannian – models. Our results explain (*without* the Λ-term) the red-shifts of the galaxies and the *Dark Energy* : indeed, there exist (by virtue of Hilbert's gravitational repulsion [5]) innumerable galaxy trajectories which go to infinite with *increasing* galaxy velocities.

In the Second Part we discuss two consequences of Friedmann's metrics, which have not been considered in the relativistic literature: *i*) the existence of a *time* coordinate t' for which there is *no* expansion; *ii*) a remarkable corollary of a result by Hönl (1949), which tells us that it is very problematic to assign a physical meaning to the common point-origin of the galaxy trajectories.

FIRST PART

1. – As in the models cited in [1] and [2], in the following treatment the galaxies are represented by the particles of a (continuous) "dust" with a mass density $\varrho = \varrho(t)$. We start from the consideration of Schwarzschild's manifold created by a finite matter distribution about

a centre with radial symmetry. As it is well known, the metric external to this spherical distribution is given by the following ds^2 [6]:

$$ds^2 = \left(1 - \frac{\alpha}{\mathcal{R}}\right) c^2 dt^2 - \left(1 - \frac{\alpha}{\mathcal{R}}\right)^{-1} d\mathcal{R}^2 - \mathcal{R}^2 (d\vartheta^2 + \sin^2 \vartheta \, d\varphi^2) \ , \qquad (1)$$

where: $\mathcal{R} = \mathcal{R}(r)$ is any regular function of r such that the metric becomes Minkowskian at the spatial infinite; $\alpha \equiv 2m \equiv 2(G/c^2)M$, if M is the mass of the gravitating distribution.

Let us imagine an expanding "cosmic sphere" composed of the mentioned "dust" particles. Let the radial coordinate of the spherical-surface points at time t be $\mathcal{R}_S(t) \equiv \mathcal{R}_S[r(t)]$ – and denote with $\mathcal{R}_I = \mathcal{R}_I(t) \leq \mathcal{R}_s(t)$ the radial coordinate of the surface points of any concentric internal sphere I. Then, $V(\mathcal{R}_1)\varrho(t) = M(\mathcal{R}_I) = \alpha_I c^2/(2G)$, if $V(\mathcal{R}_1)$ is the volume of sphere I. In the sequel, *we shall omit the index I and write simply* $\mathcal{R}$, α.

The trajectories of the galaxy particles are (radial) *geodesics*, because the matter tensor of the dynamical system is $T^{jk} = \varrho u^j u^k$, ($j, k = 0, 1, 2, 3$), with u^j a radial four-velocity. These geodesics are *identical* to the radial geodesics of the test-particles of metric (1).

We have *a relativistic generalization of the Newtonian formulation* [1], which is also *more general than Friedmann's treatment* [2].

2. – In the Newtonian formalism the velocity of a particle is $v = dR/dt$, if $R = R(t)$ is its radial coordinate. In a "parabolic" motion we have $v(R \to \infty) = 0$; in a "hyperbolic" motion we have $v(R \to \infty) =$ a constant $\neq 0$; in an "elliptic" case the particle describes a finite trajectory, first in the positive and then in the negative direction.

Analogous results in Friedmann's formalism for dR/dt, where now $\xi/R^2(t)$ is the curvature of the space section t =constant ($\xi = 0; -1; +1$).

3. – We adapt to our treatment Hilbert's formulae for the radial geodesics of the test-particles of Schwarzschild's metric [5].

In lieu of his specific coordinate r, we employ the general coordinate $\mathcal{R}(r)$, denote with $-|A|$ his constant A (< 0), and write c for the light speed in lieu of 1. Then, Hilbert's eq. (54) becomes:

$$\dot{\mathcal{R}} \equiv \left(\frac{d\mathcal{R}}{d(ct)}\right)^2 = \left(\frac{\mathcal{R} - \alpha}{\mathcal{R}}\right)^2 \left[1 - |A|\left(\frac{\mathcal{R} - \alpha}{\mathcal{R}}\right)\right] , \qquad (2)$$

where $\mathcal{R}$ is the radial coordinate of a generic galaxy of the expanding sphere. If $|A| = 1$, we have the analogue of a "parabolic" trajectory: $\dot{\mathcal{R}}(\mathcal{R} \to \infty) = 0$.

If $|A| < 1$, we have the analogue of a "hyperbolic" trajectory: $\dot{\mathcal{R}}(\mathcal{R} \to \infty) = (1 - |A|)^{1/2}$, a constant. In the analogue of the "elliptic" case we have $|A| > 1$, and $\mathcal{R}$ cannot be greater than $|A|\alpha/(|A| - 1)$; the particle "ascends" as far as $\dot{\mathcal{R}}$ becomes zero (*i.e.*, when $\mathcal{R} = |A|\alpha/(|A| - 1)$), then it reverts its motion and travels again over the "ascensional" trajectory.

The acceleration $\ddot{\mathcal{R}}$ as a function of A can be computed by deriving eq. (2) with respect to t: $\mathrm{d}(\dot{\mathcal{R}}^2)/\mathrm{d}(ct) = 2\,\dot{\mathcal{R}}\ddot{\mathcal{R}}$; we obtain:

$$\ddot{\mathcal{R}} = \left(1 - \frac{\alpha}{\mathcal{R}}\right) \alpha \mathcal{R}^{-2} - \frac{3|A|}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{\mathcal{R}}\right)^2 \alpha \mathcal{R}^{-2} \ ; \tag{3}$$

if $\ddot{\mathcal{R}}(\mathcal{R}_*) = 0$, we have

$$|A| = \frac{2}{3} \frac{\mathcal{R}_*}{\mathcal{R}_* - \alpha} \quad ; \quad \mathcal{R}_* \equiv \frac{3|A|\alpha}{3|A| - 2} < \bar{\mathcal{R}} \equiv \frac{|A|\alpha}{|A| - 1} \ . \tag{4}$$

When $\mathcal{R} > \mathcal{R}_*$ there is *attraction*: $\ddot{\mathcal{R}} < 0$; when $\mathcal{R} < \mathcal{R}_*$ there is *repulsion*: $\ddot{\mathcal{R}} > 0$.

If $0 \leq |A| \leq 1$ no superior limit exists for the values of $\mathcal{R}$, and $\ddot{\mathcal{R}}(\mathcal{R} \to \infty) = 0$.

The substitution of $\dot{\mathcal{R}}^2$ of eq. (2) in Hilbert's eq. (53):

$$\ddot{\mathcal{R}} = \frac{3\alpha}{2\mathcal{R}(\mathcal{R} - \alpha)} \dot{\mathcal{R}}^2 - \frac{\alpha(\mathcal{R} - \alpha)}{2\mathcal{R}^3} \ , \tag{5}$$

gives

$$\ddot{\mathcal{R}} = \frac{3\alpha}{2\mathcal{R}(\mathcal{R} - \alpha)} \left\{ \left(1 - \frac{\alpha}{\mathcal{R}}\right)^2 \left[1 - |A| \left(1 - \frac{\alpha}{\mathcal{R}}\right)\right] \right\} - \frac{\alpha(\mathcal{R} - \alpha)}{2\mathcal{R}^3} \ , \tag{6}$$

and we see again that $\mathcal{R} \leq |A|\alpha/(|A| - 1)$ when $|A| > 1$.

Eq. (5) tells us that we have *attraction* when

$$|\dot{\mathcal{R}}| < \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\mathcal{R} - \alpha}{\mathcal{R}} \ , \tag{7}$$

and *repulsion* when

$$|\dot{\mathcal{R}}| > \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\mathcal{R} - \alpha}{\mathcal{R}} \ . \tag{7'}$$

Since $\ddot{\mathcal{R}}$ is zero when $\dot{\mathcal{R}}^2 = (1/3)(\mathcal{R} - \alpha)^2/\mathcal{R}^2$, if we write

$$\frac{1}{3} \left(\frac{\mathcal{R} - \alpha}{\mathcal{R}}\right)^2 = \left(\frac{\mathcal{R} - \alpha}{\mathcal{R}}\right)^2 \left[1 - |A| \left(\frac{\mathcal{R} - \alpha}{\mathcal{R}}\right)\right] , \tag{8}$$

we obtain obviously $\mathcal{R} = \mathcal{R}_* \equiv (3|A|\alpha)/(3|A| - 2)$.

If $0 \leq |A| \leq (2/3)$, the acceleration $\ddot{\mathcal{R}}$ is always different from zero and *positive*, there is *repulsion* for *all* the values of $\mathcal{R}$. The velocity $|\dot{\mathcal{R}}|$ is maximal at $\mathcal{R} = \infty$, where $|\dot{\mathcal{R}}(\infty)| = (1 - |A|)1/2$, *i.e.* $(1/3)\sqrt{3} \leq |\dot{\mathcal{R}}(\infty)| \leq 1$. (In particular, if $A = 0$ we have $|\dot{\mathcal{R}}(\infty)| = 1$.)

We see that there are values of the velocity which can explain the *observational red-shifts* of the galaxies by virtue of a Doppler effect. Of course, there are also galactic gravitational red-shifts, which are created by the mass M of the expanding sphere.

Last but not least, we emphasize that our results give a clear explanation (*without* the cosmological Λ-term) of the observational existence of a *Dark Energy* [7].

At the end of the paper, the reader will find some diagrams of *repulsion* trajectories.

SECOND PART

4. – It is interesting to compare the concepts of spatial reference-frames and of time-scale in Newtonian and Friedmannian cosmologies.

For Newton's theory (and also for the *special* theory of relativity) the formulation of these concepts given by L. Lange in 1886 is the best [8]. It is composed of two definitions and two empirical propositions:

Definition I. – An inertial frame is every spatial coordinate system such that with reference to it the paths of three mass-points, projected from the same space point in three different directions, not belonging to the same plane, and then left to themselves, are straight lines. –

Empirical proposition J. – With reference to an inertial system, the path of every other mass-point left to itself is straight line. –

Definition II. – Inertial time-scale means every time-scale with respect to which a mass-point left to itself traverses equal distances in equal time intervals in its inertial path. –

Empirical proposition II. – With respect to an inertial time-scale, every other mass-point also traverses equal distances in its inertial path in equal time intervals. –

With Lange's formulation, Newton theory and the Newtonian cosmology do not need any metaphysical assumption, in particular the assumptions of an absolute space and an absolute time. The usefulness of the Copernican system rests on the experimental validity of the propositions *I* and *II* .

5. – The fundamental formula of the Friedmannian red-shifts: $\nu(t)R(t)$ = constant, from which: $-\mathrm{d}\nu/\nu = \mathrm{d}R/R$, is usually demonstrated from the standpoint of *geometrical* optics, which is implicitly contained in the expression of the spatio-temporal interval ds.

However, there is also a proof based on *wave* optics, which is particularly interesting from a physical point of view. It was obtained in 1931 by v. Laue [9]. He made a time transformation $t = t(t')$, where t is Friedmann's time and t' is a suitable time such that with respect to it the homogeneous Maxwell equations assume a Minkowskian form. Thus, it is possible to write $F'_{jk} = F'^{(0)}_{jk} \exp(i\nu' t')$, where $F'^{(0)}_{jk}$ is the amplitude of the e.m. field F'_{jk} and ν' is a *constant* frequency. Then, v. Laue comes back to Friedmann's time t, and remarking that $R(t)$ changes slowly with respect to the e.m. oscillations, he can conclude that $\nu(t) = \nu' c/R(t)$, from which $\nu(t)R(t)$ = constant; *q.e.d.* –

Now, it seems to us that the equations $F'_{jk} = F'^{(0)}_{jk} \exp(i\nu' t')$ give an important conceptual information: there exists a time coordinate t' with respect to which we have *no* expansion of the universes. In reality, Friedmann's time coordinate t is – with a good approximation – relative to an observer residing in a given, but whatever, galaxy (*e.g.*, the Milky Way). (Remark that time t, by virtue of the Gaussian form of Friedmann's $\mathrm{d}s^2$ has a primordial character with respect to the proper times of the galaxies.) In conclusion, Friedmann's models of universe are, in a sense, "Ptolemaic", *i.e.* relative to the observational data recorded by galactic observers. And, of course, Friedmann's age of the universe has a value that is dependent on Friedmann's Gaussian frame, and therefore *it is devoid of an invariant meaning*.

5bis. – It was emphasized, in particular, by McVittie [10] that some commonly adopted quantities of Friedmann's formulation as: Hubble's parameter (or Hubble's "constant"), acceleration parameter, deceleration factor, *etc.*, are *approximate* notions, that can be properly defined by a suitable series expansion of $1/R(t)$.

If the indices o and s denote, resp., the observer and a light source, the fundamental formula of the cosmological red-shift: $\nu(t)R(t)$ = constant tells us that

$$\frac{\nu_o}{\nu_s} = \frac{R_s}{R_o} \ , \tag{9}$$

from which

$$z = \frac{R_o}{R_s} - 1 \ . \tag{9'}$$

Let us call: t_d the departure-time instant of light; τ , its travel-time; t_d, its arrival-time instant. We have: $R(t_d) = R(t_o - \tau)$; $R(t_o) \equiv R_o$, and the following series ($\dot{R} \equiv \mathrm{d}R/\mathrm{d}t$):

$$\frac{1}{R_s(t_d)} = \frac{1}{R_o} + \tau\frac{(\dot{R})_o}{R_o^2} + \frac{\tau^2}{2}\left[-\frac{(\ddot{R})_o}{R_o^2} + 2\frac{(\dot{R}^2)_o}{R_o^3}\right] + \dots \ ; \tag{10}$$

Hubbles's "constant":

$$h_1 := \frac{(\dot{R})_o}{R_o} \ , \tag{11}$$

acceleration parameter:

$$h_2 := \frac{(\ddot{R})_o}{R_o} \ , \tag{12}$$

deceleration factor:

$$q_o := -\frac{(\ddot{R})_o}{R_0}\left[\frac{R_o}{(\dot{R})_o}\right]^2 \ ; \tag{13}$$

from which:

$$z = h_1\tau + h_1^2(2 + q_o)\frac{\tau^2}{2} + \dots \ . \tag{14}$$

The first term gives the *Hubble's law*. –

Finally, we recall that the $\mathrm{d}s^2$ of Friedmann's metrics can be written, with generic dimensionless space-coordinates x^1, x^2, x^3, in the following way:

$$\mathrm{d}s^2 = c^2\mathrm{d}t^2 - R^2(t)\mathrm{d}o^2 \ , \tag{15}$$

$$\mathrm{d}o^2 := \gamma_{\alpha\beta}(x^1, x^2, x^3)\,\mathrm{d}x^\alpha \mathrm{d}x^\beta \quad , \quad (\alpha, \beta = 1, 2, 3) \ . \tag{16}$$

The equation $\mathrm{d}s^2 = 0$ of the null-geodesics tells us that

$$\left|\frac{\mathrm{d}o}{\mathrm{d}t}\right| = \frac{c}{R(t)} \ , \tag{17}$$

from which:

$$\left|\frac{\mathrm{d}o}{\mathrm{d}t}\right|_{(R\to\infty)} = 0 \quad ; \quad \left|\frac{\mathrm{d}o}{\mathrm{d}t}\right|_{(R\to 0)} = \infty \ . \tag{17'}$$

5ter. – In our approach the accord with the observations concerning the cosmological red-shifts is certainly assured by the Doppler effect of the speeds on repulsive trajectories – and also by a gravitational Schwarzschildian effect, created by the total mass of the moving galaxies. However, the very novelty of our models resides in their plain explanation of the *Dark Energy*, explanation that follows from a concept of general relativity (Hilbertian repulsion), *without* the intervention of the cosmological Λ-term.

6. – In the Newtonian and Schwarzschildian cosmologies the expansion of the universe is generated by radial motions of the galaxies. In Friedmannian cosmology the galaxies have time-independent spatial coordinates, but the three-dimensional space is subjected to progressive dilatations (or contractions). The equations of motions of Newtonian and Friedmannian formulations are mathematically equivalent. Our formulation is more general, and *contains them as approximations*.

7. – We shall now expound a simple theorem by Hönl [11], that has an interesting consequence regarding the meaning of the origin, $R(t = 0) = 0$, of Friedmann's expansion of the universe.

Let us write the $\mathrm{d}o^2$ of eq. (16) in angular coordinates ϑ, φ, and Θ ($0 \leq \Theta \leq \pi$):

$$\mathrm{d}o^2 = \mathrm{d}\Theta^2 + \left\{ \begin{array}{l} \sin^2\Theta \\ \sinh^2\Theta \\ \Theta^2 \end{array} \right\} (\mathrm{d}\vartheta^2 + \sin^2\vartheta \mathrm{d}\varphi^2) \ , \tag{18}$$

where $\sin^2\Theta$, $\sinh^2\Theta$, Θ^2 correspond, respectively, to positive, negative, zero spatial curvature. The trajectories of the galaxies are geodesic lines characterized by Θ =const, ϑ =const, φ =const.

Hönl considers a geodesic of a test-particle such that ϑ =const, φ =const, $\Theta = \Theta(t)$. From

$$0 = \delta \int \frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}\,\mathrm{d}t = \delta \int \left[1 - \left(\frac{R\mathrm{d}\Theta}{c\mathrm{d}t}\right)^2\right] \mathrm{d}t \tag{19}$$

we obtain the following Lagrange equation ($\dot{\Theta} = \mathrm{d}\Theta/\mathrm{d}t$):

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left\{\frac{\partial}{\partial\dot{\Theta}}\left[1-\left(\frac{R\dot{\Theta}}{c}\right)^2\right]\right\}=0\ , \tag{20}$$

from which:

$$\frac{R^2\dot{\Theta}}{\left[1-\left(\frac{R\dot{\Theta}}{c}\right)^2\right]^{1/2}}=\text{constant}\ . \tag{21}$$

Now, the changes with time of the distance $R\Theta$ of the test-particle from point $\Theta = 0$ are equal to $R\dot{\Theta} + \dot{R}\Theta$; but $\dot{R}\Theta$ is the speed of a point with a constant Θ, which goes far from $\Theta = 0$. Therefore the speed of the test-particle is $R\dot{\Theta}$, and its linear momentum P is

$$P=\frac{\varepsilon R\dot{\Theta}}{\left[1-\left(\frac{R\dot{\Theta}}{c}\right)^2\right]^{1/2}}\ , \tag{22}$$

if ε is the very small mass of the particle.

Eq. (21) tells us that

$$PR=\text{constant}\ . \tag{23}$$

It follows from this equation that $P \to \infty$, if $R \to 0$. And it follows from Friedmann's equations that

$$\varrho R^3=\text{constant}\ , \tag{24}$$

from which we see that the mass density ϱ of the galaxy "dust" goes to infinite if $R \to 0$. But with a very great mass density the momentum P of the test-particle must be very small – as it is physically clear –, and not very great as it would follow from eqs. (23), (24). In conclusion, Friedmann's models of universe *lose their physical meaning when* $R \to 0$.

APPENDIX

As it is known, the perfect equivalence between the equations of motion of the Newtonian and Friedmannian models holds also with the addiction of the cosmological Λ-term.

Our formulation too allows the addiction of the Λ-term. Indeed, we can start from the following $\mathrm{d}s^2$, which is due to Weyl (1919) and Trefftz (1922) [12]:

$$\mathrm{d}s^2=\left(1-\frac{\alpha}{\mathcal{R}}-\frac{1}{3}\Delta\mathcal{R}^2\right)c^2\mathrm{d}t^2-\left(1-\frac{\alpha}{\mathcal{R}}-\frac{1}{3}\Delta\mathcal{R}^2\right)^{-1}\mathrm{d}\mathcal{R}^2-\mathcal{R}^2(\mathrm{d}\vartheta^2+\sin^2\vartheta\,\mathrm{d}\varphi^2)\,, \tag{A1}$$

and then proceed as in sect. **1**.

Remark that if $\alpha = 0$, eq. (A1) gives the $\mathrm{d}s^2$ of De Sitter's model (1917). –

LEGENDA concerning the following diagrams; putting $x := \mathcal{R}/\alpha$, and $y := [\mathrm{d}\mathcal{R}/(\mathrm{d}ct)]^2$, (eq. 2) can be rewritten as follows:

$$y(x) = \left(\tfrac{x-1}{x}\right)^2\left(1-|A|\tfrac{x-1}{x}\right)$$

The six figures give diagrams of $y(x)$ for the following values of $|A|$: 2/3; 0.5; 10^{-1}; 10^{-3}; 10^{-6}; 0. (*Fig. 6* gives $y(x)$ for light-rays, $A = 0$).

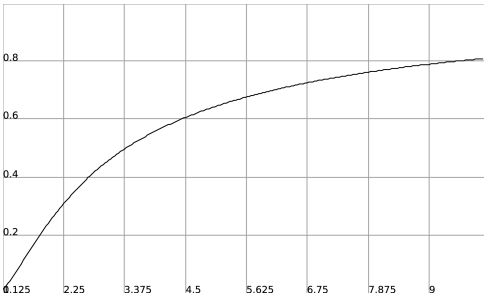


Fig. 1 – Diagram of $y(x) = [(x-1)/x]^2\,[1-(2/3)_*\,(x-1)/x]$ for some values of x; $(9/8) \leq x < +\infty$; $\max(+\infty,\ 1/3)$; $[y(9/8)]^{1/2} = 0.106917$.

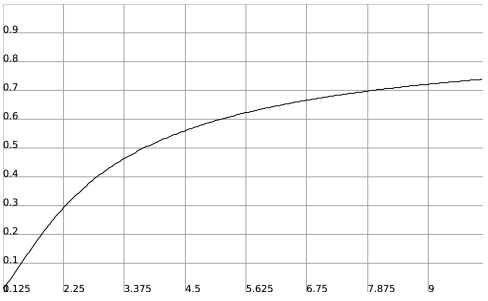


Fig. 2 – Diagram of $y(x) = [(x-1)/x]^2[1-0.5_*\,(x-1)/x]$ for some values of x; $(9/8) \leq x < +\infty$; $\max(+\infty;\ 0.5)$; $[y(9/8)]^{1/2} = 0.107981$.

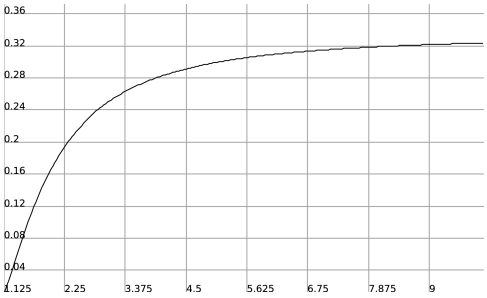


Fig. 3 – Diagram of $y(x) = [(x - 1)/x]^2[1 - 10^{-1} * (x - 1)/x]$ for some values of x; $(9/8) \leq x < +\infty$; $\max(+\infty; 0.9)$; $[y(9/8)]^{1/2} = 0.110492$.

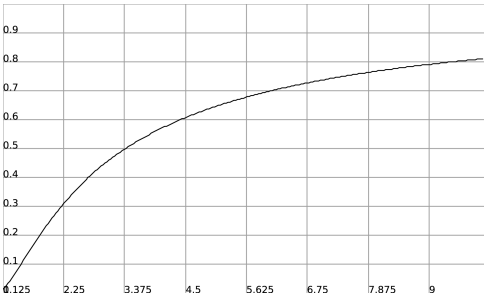


Fig. 4 – Diagram of $y(x) = [(x - 1)/x]^2\ [1 - 10^{-3} * (x - 1)/x]$ for some values of x; $(9/8) \leq x < +\infty$; $\max(+\infty; 1 - 10^{-3})$; $[y(9/8)]^{1/2} = 0.111105$.

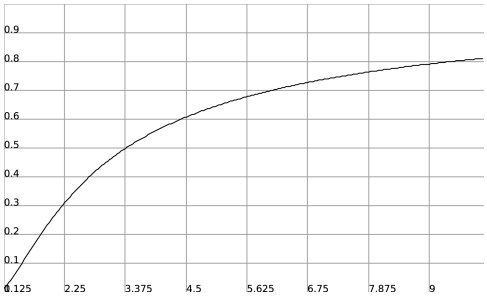


Fig. 5 – Diagram of $y(x) = [(x - 1)/x]^2\ [1 - 10^{-6} * (x - 1)/x]$ for some values of x; $(9/8) \leq x < +\infty$; $\max(+\infty; 1 - 10^{-6})$; $[y(9/8)]^{1/2} = 0.111111$.

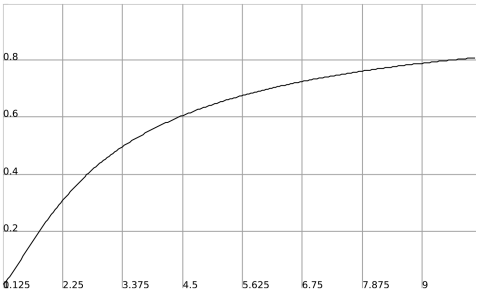


Fig. 6 – Diagram of $y(x) = [(x - 1)/x]^2$ for some values of x; $(9/8) \leq x < +\infty$; $\max(+\infty; 1.0)$; $[y(9/8)]^{1/2} = 1/9$.

REFERENCES

[1] E.A. Milne, *Quart. J. Math*, **5** (1934) 64; W.H. McCrea and E.A. Milne, *ibid.*, **5** (1934) 73; W.H. McCrea, *A.J.*, **60** (1955) 271.

[2] A. Friedmann, *Z. Phys.*, **10** (1922) 377; A. Einstein, *The Meaning of Relativity*, Fifth Edition (Princeton University Press, Princeton, N.J.) 1955, App. for the Second Edition; M. v. Laue, *Die allgemeiune Relativitätstheorie*, 4. neubearbeitete Auflage (Friedr. Vieweg und Sohn, Braunschweig) 1956, sect. **51**; G.C. McVittie, *General Relativity and Cosmology* (The University of illinois Press, Orbana) 1965, Chapt. **8**. – And references therein.

[3] A. Loinger, *arXiv:physics/0504018* (3 Apr. 2005).

[4] H. Karttunen *et alii*, *Fundamental Astronomy*, Fourth Edition (Springer-Verlag, Berlin, *etc.*) 2003, p. 386.

[5] D. Hilbert, *Math. Annalen*, **92** (1924) 1; also in *Ges. Abh.*, Dritter Band (J. Springer, Berlin) 1935, p. 258.

[6] See, *e.g.*, T. Levi-Civita, *The Absolute Differential Calculus (Calculus of Tensors)* – (Dover Pubblications, Inc., Mineola, N.Y.) 2005, Chapt. XII, sects. **11**, **12**, **13**. – (First published by Blackie and Son Lim. – London and Glasgow, 1926.)

[7] See, *e.g.*, L. Guzzo *et alii*, *Nature*, **451** (2006) *doi710.1038/06555* ; L.J.M. Davies *et alii*, *arXiv:1306.2634 v2* [astro-ph-CO] 4 Jul 2013; D. Burd *et alii*, *arXiv:1309.5380 v1* [astro-ph-CO] 20 Sep 2013; L. Amendola *et alii*, *Living Revs. – Relativity*, **16** (2013) > Irr 20/3-6.

[8] See M. v. Laue, *Die spezielle Relativitätstheorie*, 6., neubearbeitete Auflage (Friedr. Vieweg u. Sohn, Braunschweig) 1955, sect. **1**; and references therein.

[9] M. v. Laue [2].

[10] G.C. McVittie [2].

[11] H. Hönl, *Ann. Physik*, **6**(1949) 169; M. v. Laue [2].

[12] M. v. Laue, book quoted in [2], sect. **43**; and references therein.

THE PERCEPTION OF AMBIGUOUS IMAGES AS A QUANTUM INFORMATION PROCESS

GIUSEPPE CAGLIOTI (*), GIORGIO BENEDEK (**),
LUIGI COCCHIARELLA (***)

Nota presentata dal m.e. Giuseppe Caglioti
(Adunanza dell'8 maggio 2014)

SUNTO. – Viene formulata una simulazione della percezione dinamica del cubo Necker in termini di un sistema quantistico a due livelli – ad esempio un qubit realizzato da una giunzione Josephson o da un elettrone (spin ½) controllato da campi magnetici –. L'analogia così stabilita indica che la trasformazione neurofisiologica che conduce, mediante una riduzione simmetria, all'inversione percettiva delle due facce del cubo è controllata dai principi della meccanica quantistica. Un valore dell'ordine di 0,32 $mJ \cdot s$ è stimato per l'azione neuro-fisiologica elementare che simula la costante di Planck a livello mesoscopico. In questo studio interdisciplinare sono utilizzati concetti chiave: la simmetria, la riduzione simmetria, l'auto-organizzazione, il principio di sovrapposizione e l'ambiguità.

***

ABSTRACT. – A simulation of the dynamic perception of the Necker cube in terms of a two level quantum system – *e.g.* a qubit realized by a Josephson junction or by an electron of spin ½ controlled by magnetic fields – indicates that the neuro-physiological

(*) Dipartimento di Energia, Politecnico di Milano, Campus Leonardo, Via Ponzio 34, 20133 Milano, Italy.
E-mail: giuseppe.caglioti@polimi.it
(**) Dipartimento di Scienza dei Materiali, Università di Milano-Bicocca, Via R. Cozzi 55, 20125 Milano, Italy.
E-mail: giorgio.benedek@unimib.it
(***) Dipartimento di Architettura e Studi Urbani, Politecnico di Milano, Via Bonardi 3, 20133 Milano, Italy.
E-mail: luigi.cocchiarella@polimi.it

transformation leading, through a symmetry reduction, to perceptual reversal is controlled by the principles of quantum mechanics. A value of the order of 0,32 $mJ \cdot s$ is estimated for the elementary neuro-physiological *action* simulating the Planck constant at a mesoscopic level. In this interdisciplinary study key concepts are utilized: symmetry, symmetry reduction, self-organization, superposition principle and ambiguity.

Igitur impossibile est de aliqua re cognoscere
quod fit natura, non cognoscendo motum

Ioannes Duns Scotus
Physicorum Aristotelis Quaestiones,
Tom. II, Lib. III – 4 (ed. L. Durand, Lyon 1639)

1. Introduction

It is through dynamics that we can learn about the nature of anything. The visual perception of ambiguous images, apparently endowed with some form of oscillatory dynamics, may represent vividly similar physical processes occurring in brain neural networks [Mai05]. Actually an image which induces a dynamical process can be considered as a graphical representation of that process, and may help elucidating the physiology (physics + logic) at the base of perception. The most intelligent living organisms rely on visual perception in order to map and to memorize the objects and movements within their habitat. Information is carried to the vision organs by electromagnetic waves emitted or diffused by the surrounding bodies. Our visual system is based on a combination of (optical) *projection* and (intelligent) *cognition*. The *cognitive* need of extracting the maximum of information from whatever is around us is an existential feature of our nature [CC14]. This need is challenged by ambiguous figures which have two or more possibilities of being interpreted as 3D objects. In this case the perception can enter a loop, *i.e.*, an oscillatory state with some characteristic frequency. It is argued that these oscillations correspond to a similar dynamic state of the brain neural system involved, and therefore are suitable to shed light on the logic of perception.

Classical paintings of the kinetic art such as those by Franco Grignani and Victor Vasarely stimulate the process of three-dimensionalization via binocular vision. After the pioneering experimental works by the team of A. Borsellino [B72,B77,B82] and the contributions by

G. Caglioti since the eighties [C83,C86,C94,C95a-c,C02,C14,C15], these processes have been elucidated by numerous experiments on a wide variety of ambiguous two-dimensional (2D) figures. For instance we refer to the illuminating works by Kleinschmidt *et al.* [Kle98], Vetter *et al.* [Vet00], Hesselmann *et al.* [He08], Kornmeier and Bach [Kor12], Conte, Khrennikov, *et al.* [Con09,Khr10], just to mention a few. We quote in particular H. Atmanspacher *et al.* [Atm08] who dedicated special attention to the dynamic perception of the *Necker cube* (NC) [N1832]. In what follows it is shown, with a sequence of elementary examples based on the Necker cube, that the perception of ambiguous graphs can be represented with the tools of quantum logic, which leads to the suggestion that neural networks, in their response to external stimuli, follow as well – though at a mesoscopic level – a quantum logic.

2. Ambiguous figures

The Necker cube (*Fig. 1a*) is the best known example of planar graph with an inversion symmetry centre which can be perceived as a 3D object in two different equally probable ways, depending on whether the lower or the upper square is viewed in front and the other in the rear. The two perceptive ways are shown in *Fig. 1d* and are obtained by removing either the pair of segments or the pair (*Fig. 1b*). The operations transforming the NC into the new cubes providing an axonometric representation of two 3D objects is actually a symmetry reduction: the new graphs have lost the original inversion symmetry and acquired an orientation. They symbolically represent the two possible ways of perceiving the NC and will be represented by two orthogonal quantum states $|0\rangle$ and $|1\rangle$ normalized to unity. Note that the NC acquires one of the two possible meanings via the reduction of symmetry. On the contrary the removal of the pairs or yields two graphs of hard interpretation (*Fig. 1c*), which maintain the inversion symmetry and are not discernible in the original NC. The symmetry reduction brings in information.

In general terms we can say that perceptual *ambiguity* is equivalent in the microscopic world to the *superposition of quantum states.* A possible analytical description of an ambiguous image as a superposition of two graphs is illustrated in *Fig. 2*: the gradual fading (described

by sine/cosine factors) of either the (β,γ) or the (α,δ) pair leads to the polarized quantum states $|0\rangle$ and $|1\rangle$.

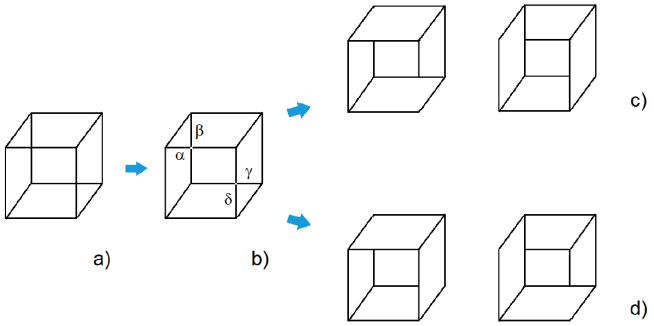


Fig. 1 – (a) The Necker cube (NC) is a planar (2D) graph with inversion symmetry with respect to its center. It can however be perceived as a 3D cube with two equivalent orientations, between which a spontaneous perception oscillation occurs. The equivalent orientations are made after removing the segment pairs (β,γ) or (α,δ) shown in (b): the resulting graphs, shown in (d), have clearly lost the inversion symmetry and are very stable. The NC is viewed as a superposition of two quantum states represented by the two graphs of panel (d). (c) The inversion symmetry is preserved if the segment pairs (α,γ) or (β,δ) are removed in (b), but in this case the resulting graphs are visually quite unstable and cannot be discerned in the original NC.

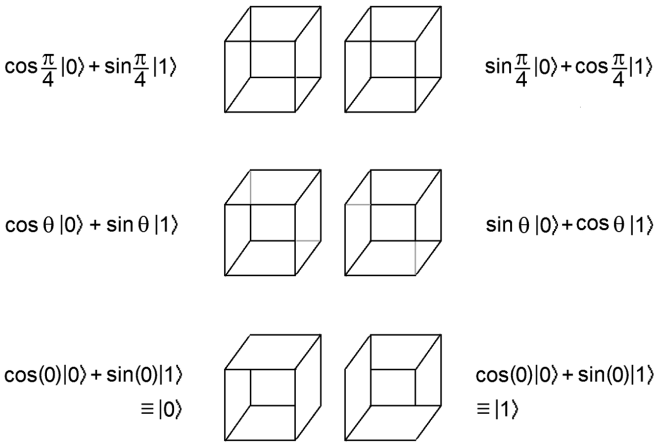


Fig. 2 – Illustration of the superposition of two quantum states $|0\rangle$ and $|1\rangle$ (bottom), leading to the perceptually ambiguous Necker cube (top) via the variation of the mixing angle (co-latitude) θ.

Another classical example of bistable image is that of vase/face profiles, largely diffused in 18th-19th century prints, and re-edited by the Danish psychologist Edgar Rubin in his thesis (1915) [Rub15], shown in *Fig. 3* in the original version and its black/white complement. The image clearly represents the superposition of two largely inequivalent quantum states.



Fig. 3 – Edgar Rubin's vase/faces ambiguous image shown in two complementary versions which exemplify the prevalent perception of face profiles or that of the vase [Rub15].

There is of course an infinity of ambiguous figures where a plane symmetric figure is perceived as a tridimensional object in two or more different ways. An example, perhaps the simplest one, is a plane representation of a dihedron which can be perceived as either a convex or a concave 3D figure. A sequence of such dihedra, forming, *e.g.*, the Schroeder staircase [Sc858], represented in *Fig. 4* in the artistic rendering by Marcello Morandini [Mor15]. The possibility of viewing it as a staircase or as an undulated roof is quite transparent, although the oscillation frequency may be considerably slower than that of a simple Necker cube.



Fig. 4 – The Schroeder staircase [Sc858] in an artistic rendering by Marcello Morandini [Mor15].

3. A QUANTUM REPRESENTATION

The two states, representing the alternative ways of viewing the NC of *Fig. 1* (or each of the two dihedra of *Fig. 2*), and the oscillations produced by the act of observation find several analogies in the quantum mechanics of two-level systems. The simplest case is that of a particle in a symmetric double well (*Fig. 5a*), with a tunnel-induced splitting (*Fig. 5b*) between the eigenvalue E_+ of the symmetric ground state $(|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$ and the eigenvalue E_- of the upper anti-symmetric state $(|0\rangle - |1\rangle)/\sqrt{2}$. When the observation action puts the system in an initial state, say $|0\rangle$, an oscillation of frequency proportional to $E_- - E_+$ between $|0\rangle$ and $|1\rangle$ sets up. The amount of neural energy involved in the perception provides a meaning to the energy splitting, and the proportionality constant C (hereafter called *elementary neuro-physiological action*) between that physiological energy E_r and the observed oscillation frequency is considered as an intrinsic property of the neural system. We consider the Hamiltonian

$$\hat{\mathrm{H}} = \begin{vmatrix} E_0 & E_r \\ E_r & E_0 \end{vmatrix} \tag{1}$$

with $E_0 = \langle 1|\hat{\mathrm{H}}|1\rangle = \langle 0|\hat{\mathrm{H}}|0\rangle$ the eigenvalue for a single well. The time-dependent Schrödinger-like equation for the double well

$$iC\frac{\partial}{\partial t}|\pm\rangle = \hat{\mathrm{H}}|\pm\rangle \tag{2}$$

has eigenvalues $E = E_0 \pm E_r$ and eigenfunctions

$$|\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle \pm |1\rangle)\exp[-i(E_0 \pm E_r)t/C] \tag{3}$$

The perception act consists in reducing the symmetry by putting the perceived image in an initial state $|\psi_\pm(0)\rangle$ evolving like:

$$|\psi_+(t)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|+\rangle + |-\rangle\right) = \exp\left(-iE_0t/C\right)\left[\cos\frac{E_rt}{C}|0\rangle + i\sin\frac{E_rt}{C}|1\rangle\right] \tag{4}$$

$$|\psi_-(t)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|+\rangle - |-\rangle\right) = \exp\left(-iE_0t/C\right)\left[\cos\frac{E_rt}{C}|0\rangle - i\sin\frac{E_rt}{C}|1\rangle\right] \tag{5}$$

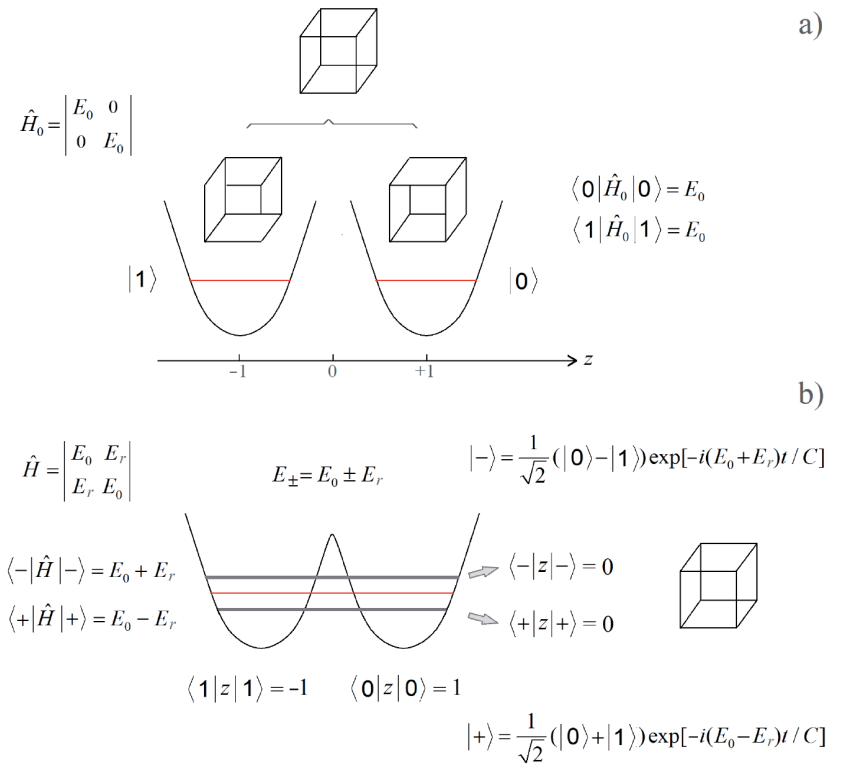


Fig. 5 – (a) A double-well quantum representation of the two degenerate states $|0\rangle$ and $|1\rangle$ in which the NC can be perceived. (b) When the two wells are communicating through a finite barrier, the degeneration is lifted by $2E_r$ yielding two eigenstates $|+\rangle$ and $|-\rangle$ which are symmetric and anti-symmetric superpositions of the original states. When the observation of the NC puts it in the state $|0\rangle$ or $|1\rangle$, an oscillation of frequency $2E_r/C$ starts between these two states.

The perceived configuration at time t is then given by the expectation value $\langle \psi_\pm(t)|z|\psi_\pm(t)\rangle$, where the coordinate z has the expectation values

$\langle 0|z|0\rangle = 1$ corresponding to  , (6)

$\langle 1|z|1\rangle = -1$ corresponding to  , (7)

$\langle +|z|+\rangle = \langle -|z|-\rangle = 0$ corresponding to  . (8)

With these definitions it is found:

$$\langle \psi_{\pm}(t)|z|\psi_{\pm}(t)\rangle = \pm\cos\frac{2E_r t}{C} \tag{9}$$

Thus the oscillation between the two equivalent non-stationary states occurs with a frequency $\omega = 2E_r / C$ (period $T = \pi C / E_r$). The expectation value of the energy for this time-dependent non-stationary state is of course constant and given by

$$\begin{aligned}\langle \psi_{+}(t)|\hat{\mathrm{H}}|\psi_{+}(t)\rangle = \langle 0|\hat{\mathrm{H}}|0\rangle\cos^2\frac{E_r t}{C} + \langle 1|\hat{\mathrm{H}}|1\rangle\sin^2\frac{E_r t}{C} \\ -\frac{i}{2}[\langle 0|\hat{\mathrm{H}}|1\rangle - \langle 1|\hat{\mathrm{H}}|0\rangle]\sin\frac{2E_r t}{C} = E_0\end{aligned} \tag{10}$$

and the same for $\psi_{-}(t)$.

Another quantum system providing a useful analogy with the NC representation if a Josephson junction, where the oscillation in the ring is set up by the application of a constant electric bias *V* across the junction. In the case of a Josephson junction the oscillation frequency is equal to $2eV/h$, whereas for the perception case the proportionality constant is again *C*, provided the applied bias energy is interpreted as the physiological energy, *i.e.*, $E_r = eV$.

4. The elementary neuro-physiological action *C*

The elementary neuro-physiologic action *C* depends of the perception mechanism and, to some extent, on the observer (specifically of the visual balance between the right eye and left eye). It can be defined as the minimum value of the product of the switching time of the perceptual reversal, t_r , by the physiological energy E_r. This energy is twice the energy spent for the initial transition from the initial perception of the 2D symmetric graph, *Fig. 1a* (ground eigenstate), to the perception of one of the two polarized states, *Fig. 1d*, from which the

oscillation starts. Jürgen Kornmeier and Michael Bach [Kor12] in their comprehensive revue assign to the "disambiguation of ambiguous visual information" a typical duration t_r of about 50 ms, although "the decision about the perceptual outcome has taken place at least 340 ms before the observer is able to indicate the consciously perceived reversal manually".

More demanding is the estimation of E_r. We believe that, to this end, the current research on the spatio-temporal mapping of brain activity [Dal01], integrated by multiple imaging modalities, such as the functional magnetic resonance imaging (fMRI), the electro-enchephalography (EEG), or the magneto-enchephalography (MEG) [Hal05], could provide acceptable answers. An estimation of E_r can be obtained from measurements of the visual cortex metabolism (~7 mg glucose/min for 100 g of tissue [Phe81]) referred to an estimated functionally activated mass of the visual area V5/MT (~1 g) [Wal03]: this gives an absorbed power of 0.02 W. When multiplied by the disambiguation time t_r = 50 ms it gives E_r = 1 mJ. Considering now a typical oscillation period T between oriented graphs of the order of 2 s, the elementary neuro-physiological action parameter turns out to have an order of magnitude of

$$C = E_r T / 2\pi \approx 0.32 \text{ mJ s}. \tag{11}$$

4.1 Necker cubes and qubits

The analogy of ambiguous figures with quantum two-level systems suggests that the pair of degenerate states ($|0\rangle$, $|1\rangle$) representing the alternative ways of viewing the NC of *Fig. 1* (or each of the two dihedra of *Fig. 2*) can be chosen to define the elementary quantum of information, *i.e.*, a *qu-bit*. A question consequential to this analogy is whether the logic governing visual perception is a quantum logic [BCS04,Nie11]. A possible approach is to study the propagation of a NC qubit (*current*) along an indefinite NC chain (*Fig. 6*), thus introducing another time scale, the one describing the run of the observation focus from left to right along the NC chain.

Once the orientation of the starting NC on the chain extreme left is chosen, then the NC chain can be rapidly covered with no change in orientation due to the close entanglement of the adjacent NCs. When the chain is closed at the extremities by NCs of opposite

orientations (reflector, *Fig. 6*) and the observation focus runs forth and back along the chain, the reflection at each extremity causes a flip of the orientation.

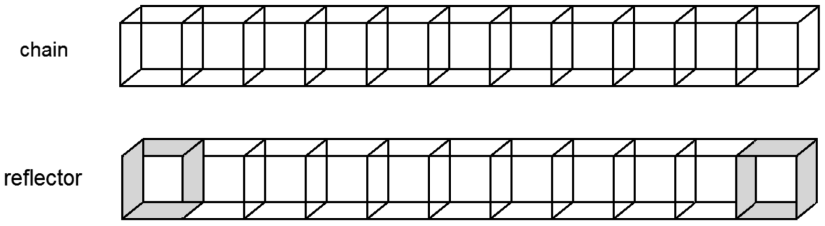


Fig. 6 – Attention runs forth and back along a NC chain introduce another time scale besides that of the oscillation between two opposite perceipts. A NC chain closed by two oriented NCs produces reflections at the extremities with an orientation flip (reflector).

The insertion into a NC chain of an oriented cube, of either $|0\rangle$ and $|1\rangle$ polarization (*Fig. 7*), transforms an unpolarized current carrying a qubit into a current of either $|0\rangle$ or $|1\rangle$ polarization. The original undefined quantum state represented by one qubit precipitates in one of the two oriented states.

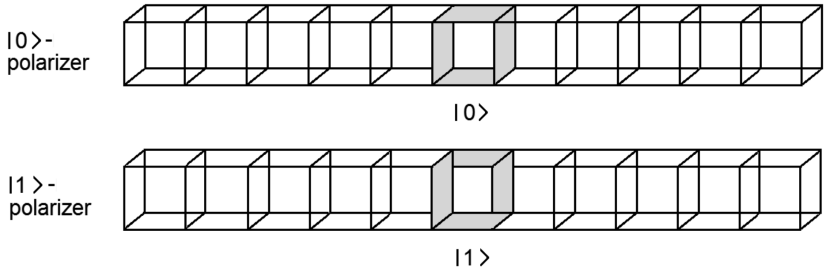


Fig. 7 – As attention, running along a chain, passes through an oriented NC (polarizer) the polarization, originally undetermined, precipitates in one of the states $|0\rangle$ and $|1\rangle$.

The opposite transformation of a polarized current, either $|0\rangle$ or $|1\rangle$, into a current (qubit) of undefined polarization can occur at the interface (shadowed walls in *Fig. 8*) between a polarized chain (left) and a NC chain (right). In this way a qubit is generated in the chain, which mimics the function of a Hadamard gate.

A local misfit in the NC period (*Fig. 8*, phase shift) introduced by a compressed (or elongated) NC, can cause a polarization flip depend-

ing on the speed of the running attention (current speed defined as the number of NCs scanned per unit time). Ideally it may be argued that a speed of about ½, 1+½, … times the oscillation frequency ω induces a polarization flip.

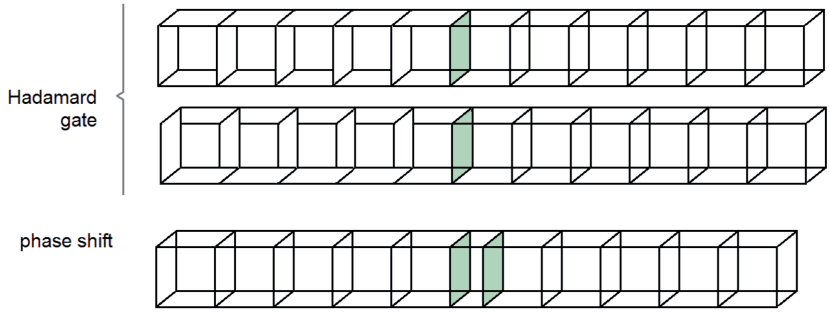


Fig. 8 – The Hadamard gate (shadowed wall), located where a polarized chain turns into a NC chain of undefined polarization, generates a qubit. A local misfit in the NC periodicity (phase shift) can induce a polarization flip depending on the ratio of the two time scales.

Referring to *Fig. 9*, consider now a given wall in a NC chain which is made either transparent, as any other wall of the chain (labeled by 0), or opaque so as to hide segments of the internal horizontal rails of the chain (shadowed area in *Fig. 9*, labeled by 1). In the first case the current, whatever is its polarization, goes through the wall 0 unchanged, whereas in the second case the wall 1 produces a flip of the polarization: depending on the state of the wall, |0> or |1>, the qubit crossing the wall is either unchanged or reversed. This corresponds to the function of a C-not gate.

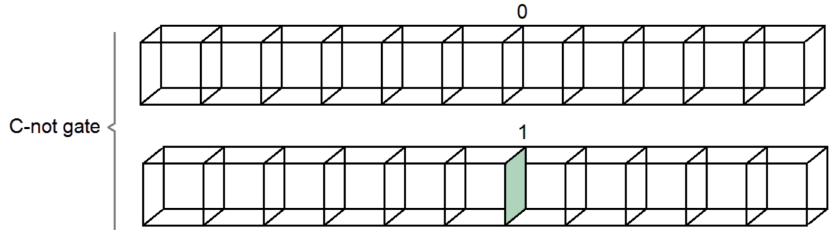


Fig. 9 – A given wall, made either transparent (0) or opaque (1) to the horizontal rails, can work as a C-not gate, leaving unchanged or flipping the predetermined polarization of the running attention.

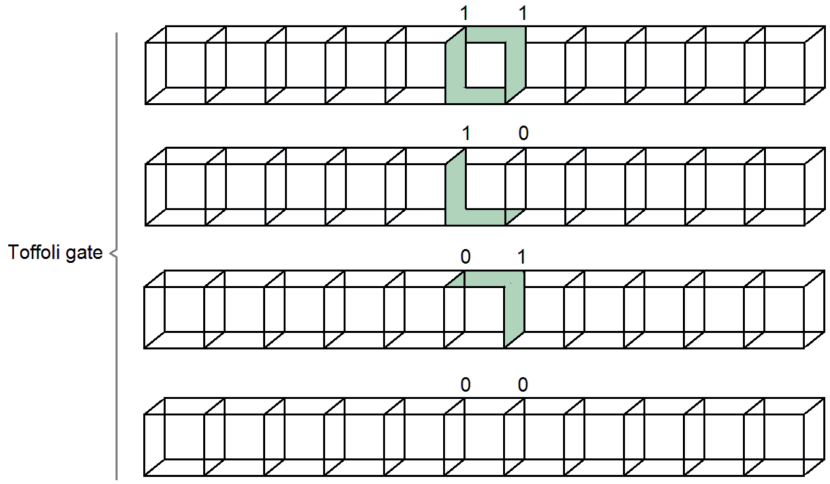


Fig. 10 – L- or reverse L-shaped opaque elements (shadowed areas, labeled 1) are combined with transparent L- or reverse L-shaped elements (labeled 0) to form a two qubit gate for three qubit operations. The three combinations |0,1>, |1,0>, |0,0> leave the qbit crossing the gate unchanged, while the combination |1,1> produces a flip of the crossing qubit. This corresponds to the function of a Toffoli gate.

A possible realization of a three qubit Toffoli gate is illustrated in *Fig. 10.* The wanted effect on any arbitrary polarization (qubit) running across the gate is realized with an L- and a reverse L-shaped element forming the walls of a cube. An opaque (shadowed) element represents a state |1>, while a transparent element represents the state |0>. In this way the state of the gate is defined by two qubits. *Fig. 10* illustrates the four possible states of the gate |1,1>, |1,0>, |0,1>, |0,0>: while the first state produces a flip of the qubit crossing the gate, the other three leave it unchanged.

The above simple realizations of logic functions which alter the perceptual state running along the NC chain are to be considered as a class of possible experiments. There is a virtually infinite number of possible, more complex graphics which could eventually, and more precisely mimic the logic functions. The examples produced above should be considered no more than suggestions, which could however stimulate a new research area having as a goal the demonstration that the visual perception and therefore the related neural network are governed by a quantum logic. It should be noted that the response in the above dynamic experiments, Figs. 6-10, may be largely subjective,

depending on previous experience or simply on a preliminary information/intuition of what the effect of each gate should be. In the latter case the experiments are a form of learning, *i.e.*, an ad-hoc generation of a quantum-logical software.

5. Conclusions

Under our eyes the Necker cube, internalized in the mind, behaves like a two level quantum system, *e.g.*, as a particle in a double well or a superconducting Josephson ring under a dc bias. Its dynamic perception – an outcome of the mental activity of our many-body neuro-physiological system – culminates in a dynamic instability leading, through a symmetry reduction, to a transformation of the internalized image controlled by the principles of quantum mechanics. On the basis of experimental data obtained from functional NMRI, EEG and MEG we attributed an order of magnitude of 320 μJ s to the elementary neurophysiologic action *C*. This is a mesoscopic action which has the same meaning and physical dimensions as the Planck constant: it depends on the individual and promotes the symmetry reduction responsible for the perceptual unitary transformation of the two-dimensional Necker graph into an oscillating state between two equivalent 3D percepts.

Nowadays the Schrödinger's sentence [Sch52]: "*... we never experiment with just one electron or atom or (small) molecule. In thought experiments, we sometimes assume that we do; this invariably entails ridiculous consequences . . .*" doesn't hold anymore. As remarked by David J. Wineland in his Nobel lecture, these days "*we can in fact experiment with individual or small numbers of quantum systems, deterministically preparing superpositions and entangled superpositions*" [Win12]. In the present context we tried to demonstrate that the mathematical formalism of quantum mechanics allows to elucidate the neurophysiological process of the dynamic perception of ambiguous images. Moreover suitably organized sets of ambiguous (bistable) graphs may be used for a perceptual simulation of some basic logic functions of the quantum computation. In this way it is hoped that some light may be shed on the logic governing visual perception at the neuro-physiological level. The consequences of applying elementary quantum-mechanical concepts to complex systems like those involved in visual percep-

tion, where reduction to simplicity relies on coherence, may not be so *ridiculous* as it was feared by a father of quantum mechanics.

We are aware that our proposed model of quantum-like perception – based essentially on ambiguity and symmetry reduction – should be taken *cum grano salis*. Regardless of its limits of validity, it is undeniable that our personal mood and our behaviour in society are influenced by our perception. Therefore, with some *mixed feeling*, we dare to wonder whether, to what extent and in what circumstances our model of a quantum-like perception could be extended, *mutatis mutandis*, to the way we act and react. Leaving creatures and their communities are much more complex than Helium atoms, photons, Cooper pairs and their boson condensates. However, situations evoking boson statistics and boson condensation can occur in critical situations, *e.g.* when the survival instinct, a tightly shared objective of vital importance and the tendency of imitation (most likely promoted by the mirror neurons) control, re-orient and unite individuals, damping temporarily their individualism and triggering their solidarity. Think for instance to a shoal of fishes that, at the sudden irruption of a predator, improvise a correlated streaming, think of the shouting of slogans in the political demonstrations or to the emergence of a synchronized, rhythmic applause by an audience that wants to get an encore at the end of an exciting concert. To deepen these topics at this time would expose us to the risk of going beyond the purpose of this work.

REFERENCES

[Mai05] K. Mainzer, *Symmetry and Complexity, The Spirit and Beauty of Nonlinear Science*, World Scientific Publishing Co., Singapore, 2005.

[Nie11] M.A. Nielsen and I.L. Chuang, *Quantum Computation and Information* (Cambridge Univ. Press, 2011).

[BCS04] G. Benenti, G. Casati and G. Strini, *Principles of Quantum Computation and Information*, Vol 1: Basic Concepts, World Scientific (2004).

[B72] A. Borsellino, A. de Marco, A. Allazetta, S. Rinesi, and R. Bartolini, "Reversal time distribution in the perception of visual ambiguous stimuli", Kybernetik, vol. 10, pp. 139-144, 1972.

[B77] A. Borsellino, F. Carlini, A. De Marco, P. Penengo, A. Trabucco, M. Riani, M.T. Tuccio, *Stochastics Model and Fluctations in Reversal Time of Ambiguous Figures",* in "Perception" n. 6 (1977), p. 645.

[B82] A. Borsellino, F. Carlini, M. Riani, M.T. Tuccio, A. De Marco, P. Penengo, A. Trabucco "*Effects of Visual Angle on Perspectives Reversal for Ambiguous Patterns",* in "Perception" n. 11 (1982), p. 263.

[C83] G. Caglioti. *The Dynamics of Ambiguity*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1992 [available also online]; *Symmetriebrechung und Wahrnehmung*, with preface by H. Haken. Vieweg, Braunschweig, 1990; Russian Edition, with preface by I. Prigogine. MIR, Moscow, 1997; Japanese Edition, with preface by K. Husimi. Kodansha, Tokyo, 1997; Italian original: *Simmetrie infrante nella scienza e nell'arte*, with preface by P. Fenoglio, CLUP, Milano, 1983; 2nd Edition, with preface by H. Haken. CittàStudi, Milano, 1994.

[C95a] G. Caglioti. *Eidos e Psiche. Struttura della materia e dinamica dell'immagine*. Ilisso, Nuoro, 1995; Japanese Edition, Yakuyosha Co. 2001.

[C86] G. Caglioti. The World of Escher and Physics. In *M.C. Escher: Art and Science*, (H.S.M. Coxeter, M. Emmer, R. Penrose and M.L. Teuber eds), North Holland, Amsterdam, 287 1986.

[C95b] G. Caglioti. *Perception of Ambiguous Figures: A Qualitative Model Based on Synergetics and Quantum Mechanics,* (P. Kruse and M. Stadler, eds). In *Ambiguity in Mind and Nature: Multistable Cognitive Phenomena*, p. 463. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1995.

[C95c] G. Caglioti. From perception to thought, A nonequilibrium dynamic instability implying symmetry reduction. In *Katachi* U *Symmetry,* Springer-Verlag, Tokyo, 1995.

[C02] G. Caglioti. *Optical art: "illusions" and paradoxes of symmetry and quantum mechanics*. In *Symmetry 2000* – part 2, I. Hargittai and T.C. Laurent, Eds, pp. 457-466. Portland Press, London, 2002.

[C94] G. Caglioti. *The tertium non datur, in Aristotle's Logic and in Physics*. J. Mech. Behaviour of Materials, 5, 3: 217-223, 1994. Hills, MI 48331-3535, 2004.

[C15] G. Caglioti. *Cognitive Power of Visual Images*. In L. Cocchiarella (editor), *The Visual Language of Technique: Heritage and Expectations in Research*. Vol. 2, Springer (2015, to appear).

[C14] G. Caglioti, L. Cocchiarella, *A Eulogy of Ambiguity between Visual Perception and Quantum Mechanics*, 16th International Conference on Geometry and Graphics, 4-8 August, 2014, Innsbruck, Austria.

[Con09] E. Conte, A.Y. Khrennikov, O. Todarello, A. Federici, L. Mendolicchio, J.P. Zbilut, *Mental states follow quantum mechanics during perception and cognition of ambiguous figures*. Open Systems and Information Dynamics **16**, 1-17 (2009).

[Khr10] A.Y. Khrennikov, *Ubiquitous Quantum Structure: From Psychology to Finance*, Springer 2010 (also online).

[Atm08] H. Atmanspacher, M. Bach, T. Filk, J. Kornmeier, H. Römer. *Cognitive time scales in a Necker-Zeno model for bistable perception*. Open Cybernetics and Systemics Journal 2, 234–251 (2008).

[Kle98] A. Kleinschmidt, C. Büchel, S. Zeki, R.S. Frackowiak, *Human brain activity during spontaneously reversing perception of ambiguous figures*, Proc. R. Soc. Lond. **265,** 2427-2433 (1998).

[Vet00] G. Vetter, J.D. Haynes, and S. Pfaff, *Evidence for multistability in the visual perception of pigeons,* Vision Research **40** (2000) 2177-2186.

[Hes08] G. Hesselmann, Ch. A. Kell, E. Eger, and A. Kleinschmid, *Spontaneous local*

variations in ongoing neural activity bias perceptual decisions, PNAS **105**, 10984-10989 (2008).

[Kor12] J. Kornmeier and M. Bach, *Ambiguous Figures – What Happens in the Brain When Perception Changes But Not the Stimulus*, Front. Hum. Neurosci. **6**, 51 (2012).

[Sch52] E. Schrödinger, *Are there Quantum Jumps? Part II*, British Journal for the Philosophy of Science 3 (11), 233, (1952).

[Win12] D.J. Wineland, *Superposition, Entanglement, and Raising Schrödinger's Cat,* Nobel Boulder Lecture, December 8, 2012 (published by National Institute of Standards and Technology, Boulder, CO, USA; University of Colorado, Boulder, CO, USA).

[Rub15] E. Rubin, *Visual perception of figures: studies in psychological analysis* (Gyldendal, Copenhagen 1915); see also (in French): http://figuresambigues.free.fr/ArticlesImage/rubin1. html#ixzz3nW1D9Drl.

[N1832] L.A. Necker, "*Observations on some remarkable optical phaenomena seen in Switzerland; and on an optical phaenomenon which occurs on viewing a figure of a crystal or geometrical solid*". London and Edinburgh Philosophical Magazine and Journal of Science **1** (5), 329-337 (1832). *doi:10.1080/14786443208647909.*

[Dal01] A.M. Dale and E. Halgren, *Spatiotemporal mapping of brain activity by integration of multiple imaging modalities,* Current Opinion in Neurobiology, **11,** 202–208 (2001).

[Hal05] Y.O. Halchenko, S.J. Hanson, and B.A. Pearlmutter, *Multimodal Integration: fMRI, MRI, EEG, MEG*, in L. Landini, V. Positano and M.F. Santarelli (eds) *Advanced Image Processing in Magnetic Resonance Imaging*, p. 223-265, (Dekker Ser. on Signal Processing and Communications, ISBN 0824725425, 2005).

[Phe81] M.E. Phelps, D.E. Kuhl, and J.C. Mazzotta, Science 211, 1445 (1981).

[Wal03] N.B. Walters, G.F. Egan, J.J. Kril, M. Kean, P. Waley, M. Jenkinson, and J. Watson, PNAS 100, 2981 (2003).

[Sc858] H.G.F. Schroeder (1858). Reproduced in: A.M. Colman, *Oxford Dictionary of Psycology,* 4th edition (Oxford Univ. Press, 2015) p. 674; and discussed in: A. Scott, *Stairway to the Mind: The Controversial New Science of Consciousness* (Springer Verlag, 1995) p. 95.

[Mor15] M. Morandini, *Sculptures* (Aug – 25 Sept 2015 Exhibition at Cortesi Gallery, London): the poster shows a more elaborate version incorporated into a complex multi-ambiguous spiral staircase; see also www.morandinimarcello.com/it/home

DALL'EPISTOLARIO DI CARLO ERMES VISCONTI, NOTE SU VICENDE DI MONUMENTI MILANESI

MICHELA MARISA GRISONI (*)

Nota presentata dal m.e. Amedeo Bellini
(Adunanza dell'8 maggio 2014)

SUNTO. – Le inedite lettere dell'epistolario di Carlo Ermes Visconti (1834-1911) stimolano un riesame di alcune questioni edilizie milanesi discusse negli ultimi decenni dell'Ottocento ed in particolare quelle relative al Lazzaretto e al restauro del Castello Sforzesco. La corrispondenza del nobiluomo, tra gli altri con Luca Beltrami, Gaetano Negri, Giovanni Celoria, mostra la natura dei suoi legami con l'ambiente culturale e politico coevo, contribuendo a definirne il profilo, non solo biografico. I contenuti e le correlazioni suo tramite individuate tra i soggetti, i fatti e le circostanze, consentono quindi di proporre alcune precisazioni ma anche talune prospettive interpretative intorno al pensiero di Visconti sul restauro e sulla tutela dei monumenti nonché al suo contributo nella formazione delle civiche raccolte municipali; due aspetti che si ritengono saldamente correlati.

***

ABSTRACT. – The unpublished letters of Carlo Ermes Visconti (1834-1911) goad a further investigation on the architectural events discussed in Milan during the last decades of the nineteen century, especially, referring to the *Lazzaretto* and the restoration of the Sforza Castle. The correspondence of the marquis Visconti, with Luca Beltrami, Gaetano Negri and Giovanni Celoria, at least, shows the nature of his relationship with the cultural and political milieu he attended supporting a deeper analysis of his profile, not only the biographic one. Contents and correlations singled out throught this documents among figures, actions and circumstances allow a few remarks and some new perspectives about his opinion on restoration and preservation of the ancient buildings and, furthermore, the role he played in the settlement of civic collections and museums, being these topics different part of a same goal.

(*) Politecnico di Milano, Italy.
E-mail: michela.grisoni@polimi.it

1. Un decennio tra gli amministratori della città (1882-1893)

Carlo Ermes Visconti si approssima ai cinquant'anni quando, nel giugno 1882, è tra gli eletti al consiglio municipale di Milano.[1] Nobiluomo, formatosi nelle scienze giuridiche presso l'ateneo pavese, è un possidente dedito alla gestione di rassicuranti rendite fondiarie e finanziarie oltre che un carismatico protagonista dei più noti salotti cittadini.[2] E' al suo secondo mandato; ma se nel primo, risalente al quinquennio 1863-68, pare assumere impegni politici legati all'estrazione sociale e conseguenza del sostegno garantito agli ambienti patriottici negli anni risolutivi dell'unificazione del Regno, in questo mostrerà una più matura coscienza politica, una più grande carica di intenti.[3] Consigliere nel primo biennio, il 25 aprile 1884 accetta la nomina di assessore per il riparto VI, dedicato all'istruzione.[4] Tra rinnovi e rielezioni manterrà l'incarico fino al 1889;[5] sebbene candidato, non verrà infatti rieletto anche se, conservando l'ufficio di soprintendente scolastico, di fatto rimarrà in commissione studi almeno fino al 1894.[6]

---

1 Entra ultimo in elenco con 3075 preferenze, Atti del Municipio di Milano, (1882/83), I, VIII.

2 Esponente di un'antica casata milanese che ha costruito saldi legami parentali con i Vimercati - Sanseverino e i Casati e coltiva solide relazioni amicali con i Visconti-Venosta e i D'Adda Salvaterra, tra i frequentatori del salotto di Clara Maffei e tra i protagonisti della Milano del Risorgimento è per questo che è stato perlopiù ricordato; cfr. Barbiera 1901, 200 e Visconti Venosta 1904, 647. Recentemente se ne è indagata l'attività nel campo del restauro e della tutela dei monumenti rivelando anche precoci azioni a favore delle 'bellezze naturali', cfr. Grisoni 2014b con bibliografia precedente; vi corre parallela l'analisi dell'operato a favore delle collezioni e dei musei cittadini, cfr., in particolare, Basso 2014.

3 Nel primo mandato (1863-1868), risalente alla Giunta di Antonio Beretta di cui supera le dimissioni, assume per breve tempo la carica di assessore supplente (nomina del 18 luglio 1867 dimissioni del successivo 7 agosto), Atti del Municipio di Milano, (1867), 388-403 e *ibidem*, 404.

4 Atti del Municipio di Milano, (1883-1884), I, VIII; 413.

5 Nelle due elezioni generali precedenti (11 gennaio 1885 e 8 maggio 1887) invece era stato rieletto e varie erano state anche le riconferme in Giunta, Atti del Municipio di Milano, (1884-1885), IX; XI; *ibidem*, (1885-1886), VIII; XI; *ibidem*, (1886-1887), VIII; XI; *ibidem*, (1887-1888), VII; XI; *ibidem*, (1888-1889), VIII-IX; XI; 2.

6 cfr. Guida di Milano, *ad annum*; i rinnovi trovano puntuali conferme in Archivio Visconti di San Vito di Somma Lombardo (d'ora innanzi AVSV), cas. 116,

La permanenza di Visconti tra gli amministratori della città copre quindi più di un decennio. Si svolge nel succedersi delle giunte di Giulio Belinzaghi (1868-1884; 1889-1892), Gaetano Negri (1884-1889) e Giuseppe Vigoni (1892-1899); anche se si documentano corrispondenze più fitte con il secondo della terna, vicino a Visconti anche per un'affinità di interessi che accosta entrambi a quell'ambiente tecnico-scientifico milanese che gravita intorno al Museo di Storia Naturale e al suo direttore, l'abate e paleontologo Antonio Stoppani, al Regio Istituto Tecnico Superiore e a Francesco Brioschi, il celebre matematico nonché direttore della scuola e presidente del Consorzio degli istituti di istruzione superiore.[7] Può dunque definirsi una presenza di un certo spessore, per durata e continuità; rivelatrice, per legami e corrispondenze, di un attaccamento agli ambienti dei conservatori milanesi, dove gli accenti progressisti, quando condivisi, assumono toni moderati e il liberalismo, pure ben presente, esprime radicate eredità illuministe.

Il suo secondo mandato, in particolare, e si tratta dell'aspetto che più interessa, si confronta con la definizione del volto 'moderno' di Milano. E' in questi anni che si edificano le aree di espansione, con il conseguente ridisegno della trama urbana e delle rendite di posizione; che si promuove il potenziamento delle infrastrutture e dei servizi e si interviene sull'immagine del centro cittadino. Il tutto si affronta attraverso la redazione di uno strumento, il piano regolatore, destinato a disciplinare la progettazione urbana. Prodotto tra 1884 e 1889 dall'ufficio tecnico municipale, il cosiddetto 'piano Beruto', notoriamente il primo predisposto per Milano, fu lo strumento consapevolmente voluto dal Sindaco e dalla Giunta che subentrarono a Belinzaghi dopo le sue roboanti dimissioni.[8] E' stato sagacemente additato il rapporto di dipendenza tra scandalo e decisioni urbanistiche che pervade il clima della Milano post-unitaria in base al quale il piano regolatore sarebbe stato uno strumento di difesa dell'amministrazione pubblica: il mezzo con cui ricondurre sul piano della legalità e dell'interesse collettivo il progetto urbano; anche se i risultati si giudicano meno eclatanti delle premesse.[9]

---

fasc. 1892 e fasc. 1894. Per il significato della Commissione studi in rapporto alla legge Casati (13 novembre 1859) e nel mandato di Belinzaghi, cfr. Finocchi 1978.

7 Grisoni 2012.

8 Rossari 1997 e Boriani, Rossari 1992.

9 Vercelloni 1991, 153. L'autore sottolinea la qualità dell'originaria proposta di

Per quanto Visconti paia semplicemente assistere alla messa a punto del piano, garantendo una presenza costante alle sedute del consiglio ma trattenendosi in un riserbo pacato nelle discussioni che più direttamente lo riguardano, egli appartiene alla Giunta che ne approva la messa in atto. Accertare le sue effettive responsabilità, nel lungo percorso di gestazione, è un obbiettivo temerario per molte ragioni, non ultima l'impossibilità di accreditare responsabilità individuali alle decisioni sostenute da un gruppo politico sostanzialmente compatto; quello che si vuole tentare è di integrare le rare e pacate esternazioni istituzionali del marchese con le inedite corrispondenze epistolari che ne svelano le relazioni e le confidenze.

La redazione del primo piano regolatore cittadino inoltre interseca il tema del restauro dei monumenti ed egli, in particolare, si confronta con le responsabilità pubbliche nella gestione dei luoghi storici della città e dei suoi 'avanzi' monumentali.

Per Visconti la tutela dei monumenti è un'attività alimentata da un forte senso civico; l'espressione coerente e diffusa dell'accostarsi degli uomini colti al patrimonio storico e artistico come simbolo di identità nazionale e strumento di elevazione sociale. Persiste, inoltre, la convinzione della funzione didattica delle opere del passato per quelle presenti, retaggio della cultura positivista in cui egli è cresciuto.[10] Senza esprimersi in elaborazioni teoriche (che mancano nei suoi scritti e sostanzialmente non appartengono alla natura del suo profilo) questo pensiero affiora riesaminando, attraverso le sue carte, alcune note vicende edilizie cittadine.

2. In risposta ai nuovi quartieri al Lazzaretto (1878-1881)

All'arrivo di Visconti in Consiglio comunale, nel giugno del 1882,

---

Cesare Beruto definendolo un piano colto e rilevando nella bocciatura del consiglio l'incapacità di capirne se non di accettarne l'impronta ideologica sottoponendolo, attraverso la revisione del consigliere Giovanni Battista Pirelli, ad uno 'svilente' depauperamento dei contenuti di maggior pregio.

[10] Prima di accedere agli studi universitari in giurisprudenza presso l'Ateneo pavese, Carlo è istruito da precettori privati sotto la vigile tutela della madre, Leopolda Isimbardi, e di Paolo Taverna. Si ricorda inoltre che egli è il nipote del letterato Ermes Visconti, fratello di suo padre Giuseppe. Alcune lettere dello zio al nipote in AVSV, cas. CC.

la 'questione' del Lazzaretto è già stata dibattuta[11] e oramai irrimediabilmente orientata verso la soluzione tendente a soddisfare le parti coinvolte mosse dalla redditività dell'operazione immobiliare che è alla base. E' stato osservato che l'amministrazione comunale sembrò assistere alla trattativa con piatta rassegnazione; senza curarsi, o avvalersi, del titolo di edificio monumentale assegnato al Lazzaretto nel 1875.[12]

Nelle dinamiche urbane questa architettura subì infatti gli effetti dell'inclusione, entro i confini della città, del comune dei Corpi santi in cui si trovava fatalmente a ricadere. La rivalutazione dei valori di rendita fondiaria delle aree prima appartenenti alla cintura esterna della città incrementò la loro appetibilità in un mercato immobiliare i cui operatori reagirono con prontezza e determinazione, ansiosi di recuperare questo suolo per sostituire al vasto quadrilatero quattrocentesco che ne disegnava il perimetro (e in parte già compromesso dal tracciato ferroviario), una volumetria più densa, da elevarsi su una trama viaria più fitta. Quella del Lazzaretto «lasciato al suo destino tra deboli rimostranze, non appena una società finanziaria ne propone la distruzione e la lottizzazione»[13] è considerata pertanto dalla storiografia una vicenda esemplare delle contraddizioni presenti nella cultura urbana di secondo Ottocento: indicativa della difficoltà di conciliare progresso e tradizioni, principi economici e valori culturali.

Esaminando la vicenda al 1882 si vedrà quindi che per il Consiglio in cui siede Visconti si tratta oramai di indirizzare e convalidare le proposte dei tecnici esterni chiamati a redigere il progetto degli edifici che l'amministrazione si è riservata come traguardo di pubblica utilità nell'ambito di un'operazione finanziaria tra privati di manifesto carattere speculativo; si tratta della realizzazione delle scuole elementari di via Tadino, tuttora esistenti.[14] Come assessore alla pubblica istruzione Visconti interverrà nella questione a questo proposito: per esprimersi sulla qualità del noto disegno di Angelo Savoldi, contribuendo peraltro a difenderlo alle critiche del consigliere De Cristoforis.[15]

Questo ruolo, dal carattere apparentemente incidentale, muta quando si riesamini la vicenda da un altro punto di vista, anche cronologico.

---

11 Atti del Municipio di Milano, (1882-1883), 125: Seduta del 2 gennaio 1882.

12 Treccani 1992, 250.

13 Boriani 1992, 393.

14 Giustina 1991, 198.

15 Atti del Municipio di Milano, (1885-1886), I, 358-361: Seduta del 25 febbraio 1886.

Membro della Commissione conservatrice dall'aprile del 1878,[16] Visconti infatti è tra coloro che avevano respinto un progetto, presentato dal proprietario, tendente a modificare il fronte dell'edificio verso il corso Loreto. Tra coloro cioè che, edotti dalla relazione dell'architetto Angelo Colla, altro (ed influente) dei membri della commissione, avevano deciso di accogliere «per ogni parte» il parere negativo già espresso dal Municipio e di appoggiarlo non solo con «una deliberazione identica» ma insistendo «a tutto potere sulla necessità di non lasciar più oltre deturpare un Monumento storico di tanta importanza com'è il Lazzaretto».[17] Schierati su un compatto fronte comune, amministrazione municipale e commissione conservatrice, nel dicembre del 1878 si erano infatti irrigiditi su una posizione di stretta conservazione dell'intero edificio.[18]

Le circostanze erano mutate quando, nel 1880, il Consiglio degli istituti ospedalieri (proprietario dell'immobile) non si faceva più promotore di un progetto di trasformazione ma si era risolto a cedere la proprietà ad altri e di questo informava la commissione la quale non aveva mezzi per opporsi al diritto di un privato di alienare un proprio bene. Commissione e Comune si erano dunque trovati a fronteggiare le pressioni di un grosso operatore finanziario (la Società del Credito Italiano) il cui progetto avrebbe peraltro contribuito a riqualificare un'area urbana degradata. Tale infatti appariva il Lazzaretto nel 1880; ed è aspetto non irrilevante per la successiva risoluzione della vicenda. Affacciata sul corso Loreto ma posta a ridosso dei caselli di Porta Venezia (e quindi al viale di accesso orientale al centro città), vicina ai giardini pubblici (e quindi alla sede dell'imminente Esposizione Nazionale), l'architettura anticamente progettata per ricoverare gli appestati e ora occupata da botteghe artigiane e modesti alloggi in affit-

16 Atti del Municipio di Milano, (1877-1878), I, 160: Seduta del 19 aprile 1878. Visconti è eletto con voti 27 su 45. Per l'elenco delle sedute cui ha partecipato e degli incarichi conferiti si rimanda a Grisoni 2008.

17 *Atti* I 1880, 58: Seduta del 21 dicembre 1878, punto 14 cui si riferiscono tutti i virgolettati del paragrafo.

18 Approvate le conclusioni proposte dall'architetto Colla nella sua relazione, i commissari si erano infatti associati «al Municipio nel concetto di impedire che per l'avvenire si permettano modificazioni e costruzioni, le quali deturpino o alterino il carattere storico di quel vasto edificio», *ivi*. Compongono la commissione Isaia Graziadio Ascoli, Michele Caffi, Carlo Casati, Pompeo Castelfranco, Angelo Colla, Felice De Maurizio, Tullo Massarani, Giuseppe Mongeri e Carlo Ermes Visconti; al voto sono tutti presenti.

to, appariva fuori luogo: sacrificabile a fronte delle legittime aspirazione economiche di entrambi i contraenti e delle positive ricadute di decoro pubblico perseguibili con l'abbattimento.

E' in questo scenario che operò la sotto-commissione, nominata in seno alla Commissione Conservatrice, incaricata di riesaminare il caso e di riferirne «un motivato parere».[19] Composta da Giuseppe Colombo, Carlo Casati, Angelo Colla e dallo stesso Visconti essa si espresse nella seduta del 14 dicembre 1880 (quella in cui i commissari accettarono la demolizione dell'edificio con quella prosaica rassegnazione sottolineata dalla critica).[20] Nella decisione, posta al di fuori della conservazione dell'immobile nel suo complesso, è già stato colto l'affidarsi ad un criterio di selezione delle parti da conservare fondato sulla ripetitività degli elementi architettonici (il sistema edilizio porticato verso l'interno del recinto) e basato sull'accertamento di qualità artistiche (i rilievi in cotto delle aperture e le decorazioni pittoriche eventualmente rinvenute). L'architettura del Lazzaretto fu considerata tale cioè per cui si potevano conservare alcuni elementi tipici (qualche arcata esemplificativa), magari riuscendo ad includerli nella costruzione dei nuovi edifici (proposta di Tullo Massarani) e (qualora si fossero ritrovate) recuperando le pitture votive menzionate nei documenti d'archivio (avvertimento di Carlo Casati). Si conservò invece la chiesa centrale la cui importanza fu sottolineata da Massarani, condivisa da Giuseppe Colombo e sottoscritta dallo stesso Visconti. Motivazioni di carattere spirituale concorsero infatti a garantirne la sopravvivenza che, sul piano pratico, comportava minori vincoli alla nuova edificazione.[21]

Si è ricordato che la demolizione del Lazzaretto dimostrerebbe la debolezza dei coevi organismi di tutela, la carenza di un'efficace normativa che fosse loro di supporto nel fronteggiare le pressioni esercitate sugli operatori dalle forze locali. Rivelerebbe, soprattutto, la difficile

---

[19] *Atti* II 1881, 17-18: Seduta del 14 dicembre 1880, punto 8.

[20] Nell'occasione Visconti è incaricato, con Casati e Colombo, di prendere in esame la proposta vendita del castello di Trezzo, AVSV, cas. 115: Il prefetto di Milano, Achille Basile, a Carlo Ermes Visconti. Lettera del 7 dicembre 1880 su carta intestata Prefettura della Provincia di Milano.

[21] Aggiunta all'edificio quattrocentesco, parzialmente riconfigurata come monumento dei milanesi scampati alla peste, poi dedicata alla memoria di San Carlo, è un'architettura di dimensioni più contenute, *Atti* II 1881, 17-18: Seduta del 14 dicembre 1880, punto 8.

conciliazione, tra diritto pubblico e privato; dunque l'urgenza di intervenire per aumentare l'autorità degli organismi di tutela, allora ancora a carattere consultivo, e forse per alcuni l'intuizione dell'importanza di regolare la prevalenza degli interessi economici a fronte di valori di altra natura. E' di un certo interesse capire in quale misura ne fossero consapevoli i protagonisti e, in particolare, quanto questa vicenda abbia influito sul percorso di Visconti e sulla decisione della sua candidatura politica.

Occorre quindi ricordare che durante lo svolgersi dei fatti la composizione della commissione muta e notare che alla seconda occasione di discussione parteciparono alcune delle personalità già presenti nel 1878, ma non tutte. Tra gli allontanamenti volontari spicca quello di Giuseppe Mongeri, 'maturo' storico e critico dell'arte, manifestamente espressosi con disappunto anche su questi argomenti, le cui dimissioni vengono presentate proprio nel giorno della discussione.[22] Nel marzo successivo giungeranno anche quelle di Visconti. Si giustificano in rapporto all'incompatibilità dei suoi numerosi incarichi;[23] ma le ripetute presentazioni, i relativi rinvii e le dense minute conservatesi tra le sue carte, confessano un disagio più profondo. E' sostenuto da sostanziali divergenze di vedute; da rileggere, si crede, richiamando i pregressi conflitti che avevano opposto la Consulta del Museo Patrio alla nascente Commissione conservatrice milanese (1876-77) e, soprattutto, la contestata nomina dell'ispettore onorario (1875) e quindi questioni quali l'autorità e titolarità dei rispettivi membri, la gestione del Museo Patrio, il progetto, già latente in quegli anni, dell'aggregazione di quest'ultimo a quello artistico (1879-1881).[24] Seguiranno quelle di Massarani (che quella confessione aveva ricevuto); poi di Angelo Colla e Isaia Graziadio Ascoli. La rosa dei rimanenti

[22] *Atti* II 1881, 11: Seduta del 14 dicembre 1880, punto 1.

[23] Per giustificare le proprie dimissioni Visconti, da poco subentrato al defunto Paolo Belgiojoso tra gli amministratori della Veneranda Fabbrica del Duomo, avanza il motivo dell'incompatibilità dei due ruoli, cfr. AVSV, cas. 115.

[24] Per una ricognizione della carte relative al progetto di aggregazione, significativamente giunto, al 5 novembre 1881, alla proposta di radunare i due musei, archeologico ed artistico, al Castello ma anche per le pressioni esercitate da Pompeo Castelfranco, a più riprese, sia presso le sedi ministeriali che sullo stesso Visconti e tendenti alla creazione di un museo paletnologico di cui si candida direttore, cfr. La Guardia 1989, 10-14 ma anche La Guardia 1983, n. 75.01/1-3. L'epistolario privato spinge infatti ad approfondire le intese tra i soggetti coinvolti fin dal 1877. Si veda per questo anche Basso 2014, 171.

mostra le figure emergenti.[25] I fatti successivi dimostreranno che non si tratta di insanabili fratture ma dell'avvio di un radicale ripensamento trasversale tanto alla teoria del restauro dei monumenti che alla gestione della loro tutela.

Mentre maturavano questi nuovi indirizzi, il destino del Lazzaretto si era però dovuto decidere, sotto la pressione degli interessi in gioco, nel rispetto degli strumenti di tutela disponibili. La commissione conservatrice si era quindi risolta a formulare collegialmente il proprio parere consultivo con un'espressione favorevole all'alienazione, ponendo però alcune condizioni. La 'conservazione' del Lazzaretto fu cioè riposta nelle pieghe delle clausole contrattuali che suggerivano cautela nelle demolizioni[26] e che, prima di tutto, chiedevano il rilievo dell'edificio[27] come noto, affidato a Luca Beltrami.[28]

---

[25] Sulla cosiddetta 'ondata dimissionaria' cfr. Savare' 1994, 244-246. Si nota che ai dimissionari Mongeri e Visconti subentreranno Giuseppe Bertini e Camillo Boito, Atti del Municipio di Milano, (1880-1881), I, 268: Seduta del 13 aprile 1881.

[26] Del Lazzaretto di Milano oggi, lo si ricorda, rimangono *in loco* la chiesa centrale dedicata a S. Carlo (un poco trasformata) e un tratto del muro esterno nord-est con relativo porticato interno lungo la via S. Gregorio; persiste inoltre il toponimo ad identificare la strada che con le attuali vie S. Gregorio, corso Buenos Aires e viale Vittorio Veneto consente di riconoscerne il recinto. Frammenti degli apparati decorativi giunsero invece al Museo Patrio di Archeologia, come si deduce dall'inventario dell'archivio del museo (La Guardia 1989), e precisamente due lapidi, depositate nel luglio del 1882 (*ivi*, n. 558), un busto raffigurante la Carità acquistato nel corso delle demolizioni e ceduto dagli acquirenti al Museo nell'ottobre del 1886 (*ivi*, nn. 633 e 635), una lapide in cotto rinvenuta durante le demolizioni nel 1890 e donata al museo nel 1894 dall'antiquario Carlo Clerici (*ivi*, n. 1109).

[27] «La Commissione risponderà al Consiglio Ospitaliero, che essa, non opponendosi alla vendita del Lazzaretto, lo prega di voler far eseguire e trasmettere alla Commissione stessa l'Icnografia generale, la Sciografia e l'ortografia del Lazzaretto, come si trova attualmente; e inviterà l'opera pia a riservarsi rimpetto all'acquirente il diritto di esportare una lapide esistente sulla parte interna della porta del Lazzaretto, verso la circonvallazione, e altri cimelj che si potessero rinvenire nella demolizione, allo scopo di poi trasmettere tutti codesti cimelj, come anche qualche saggio delle decorazioni del portico, al Museo Patrio di Archeologia. La Commissione raccomanda infine, che nelle opere di demolizione si proceda con la massima cautela, perché consta che in alcune camere del Lazzaretto esistono pitture del tempo», cfr. *Atti* II 1881, 18: Seduta del 14 dicembre 1880, punto 8. Nella seduta del 19 aprile 1881, la commissione, ormai mutata nella sua composizione, visionerà i disegni presentati dal segretario Fossati, cfr. *Atti* II 1881, 27-38: Seduta del 19 aprile 1881, punto 6.

[28] Oltre ai rilievi per il Lazzaretto, conclusi entro la fine del 1881, Beltrami

3. Da consigliere ad assessore del riparto VI - istruzione (1882-1884)

Nel 1881 Beltrami è un giovane ma già conosciuto architetto da poco rientrato a Milano da un soggiorno parigino professionalmente formativo che si presenta alla pratica professionale da vincitore di un celebre concorso cittadino e si appresta ad assolvere compiti didattici presso l'Accademia di Brera dalle quale formalmente giunge l'incarico del rilievo del Lazzaretto.[29] All'anagrafe lo separano vent'anni dal più anziano marchese Visconti;[30] ma negli anni Ottanta dell'Ottocento tale distanza si contrae e a Milano, ove entrambi risiedono, gli ambienti frequentati e le relazioni comuni offrono occasioni di incontro, rafforzate dalla corrispondenza epistolare. I contatti documentati richiamano titoli, luoghi e temi che riconducono distintamente al mandato del «caro Visconti» cui Beltrami si rivolge non solo come ad un collega ma perlopiù come ad un confidente che raggiunge in ufficio per «bagolare un poco» dei suoi affari;[31] si possono cioè fondatamente ricondurre all'ambito di un comune impegno politico le relazioni tra Visconti e Beltrami, ugualmente presente in Consiglio Comunale, ma dal gennaio del 1885,[32] e soprattutto ugualmente giuntovi con il sostegno dell'Associazione costituzionale.[33]

Gruppo politico cui Visconti si accosta fin dal 1870, l'Associazione costituzionale era favorevole ad un modello liberale monarchico di gestione dello Stato. A Milano contò sull'appoggio de 'La Perseveranza'; ma per le elezioni dell'82, quelle che riportarono Visconti in Consiglio comunale, il consenso si era decisamente allargato e tutti, dal 'Corriere

---

compose il testo descrittivo dell'edificio da includere nella guida di Milano pubblicata per l'Esposizione del 1881, cfr. Beltrami 1881. I disegni, con un corredo testuale più ricco, sono riprodotti in Beltrami 1882, 425-426.

29 Per un profilo sulla figura di Luca Beltrami, tra i molti contributi dello stesso autore, si indica il più recente Bellini 2014 ove si deduce anche la bibliografia precedente. Per i compiti didattici si veda anche Ricci 1997, 146.

30 Visconti nasce il 25 novembre 1834, Beltrami il 13 novembre 1854.

31 in Appendice, doc. 3.

32 Atti del Municipio di Milano, (1884-1885), I, XIII. E' eletto il giorno 11 gennaio 1885.

33 Beltrami è incluso, insieme ad altri - tra i quali lo stesso Visconti - nella celebre Lista Unica proposta dal Circolo della Costituzionale, La Perseveranza, 4 gennaio 1885.

della Sera' fino a 'Il Pungolo', concordarono nel sottoscrivere la lista presentata da Francesco Brioschi. Visconti vi era stato incluso: segnalato agli elettori come un cittadino stimato, affidabile e, precisava l'illustre professore, già molto coinvolto nelle «questioni edilizie della città».[34] I moderati de 'La Perseveranza' vi riconoscevano l'interprete degli interessi dei possidenti.[35] Cauto progressista e conservatore avveduto, Visconti quindi aveva goduto di un'ampia base di appoggio.

Passati due anni dal suo ingresso in Consiglio e, soprattutto, dopo tre roventi giorni di discussione sui progetti per i nuovi quartieri alla piazza d'Armi, il 18 aprile 1884, Sindaco e Giunta come noto si dimisero. Il discorso di insediamento dell'assessore anziano, Gaetano Negri, oltre a mostrare gli elementi di continuità con i predecessori, chiarendo lo scenario politico-finanziario di sfondo alla crisi, aveva fissato l'ordine delle priorità stabilito dalla sua Giunta.[36] Si deriva da quel discorso che si trattava di un trasferimento di mansioni, un passaggio di mandato più che un avvicendamento, in cui Negri subentrava a Belinzaghi e Visconti, in particolare, a Negri nel ruolo di assessore all'istruzione e soprintendente scolastico.

---

[34] Per presentare agli elettori Visconti, Francesco Brioschi disse: «Il marchese Visconti Ermes è una delle individualità più spiccate della classe alla quale appartiene. La sua dottrina artistica ed archeologica lo designava già ad amministratore della fabbrica del Duomo, a socio onorario residente dell'Accademia di Belle Arti, a commissario pel nostro Museo artistico Municipale. In questi uffici, senza parlare di altri che non hanno rapporto colla questione edilizia, il marchese Visconti Ermes si dimostrò sempre collaboratore attivo ed intelligente. Proponendovi la sua candidatura, abbiamo voluto onorare in lui il cittadino che modestamente pone a servigio del proprio paese i suoi studi ed il suo tempo, senz'altro compenso che la soddisfazione di aver adempiuto ad un dovere, e nello stesso tempo esplicare sempre più dei criteri adottati inviando al Consiglio un uomo che ha già tanta parte in questioni edilizie della nostra città». Oltre al nome di Visconti, la lista della Costituzionale includeva: Tommaso Bertarelli, Gerolamo Chizzolini, Francesco Lovati, Giovanni Battista Pirelli, Edoardo Porro, Archimede Sacchi, Paolo Manusardi, La Perseveranza, 7 giugno 1882.

[35] «A tutto ciò che nella Relazione [Brioschi] è detto della candidatura dell'Ermes Visconti, si deve aggiungere che egli è anche possidente nella nostra città, e come tale rappresenterà anche questa parte capitale dei contribuenti che sono i possessori di case. C'è una soverchia e dannosa tendenza a dimenticare che le rappresentanze amministrative sono essenzialmente rappresentanze d'interessi; è bene correggerla», La Perseveranza, 10 giugno 1882.

[36] Atti del Municipio di Milano, (1883-1884), 417-421: Seduta del 12 maggio 1884.

Legati da un rapporto di stima reciproca, risalente di qualche decennio e riconducibile al circolo dei naturalisti e degli scienziati milanesi, Visconti e Negri condividono il progetto di una nuova sede per il museo di storia naturale che è una delle priorità indicate; un progetto che Visconti aveva visto maturare accostandosi a quegli ambienti fin dagli anni sessanta.[37] Nei programmi della Giunta guidata da Negri, mentre si frenava lo sviluppo dell'area nord-ovest anteponendovi come pregiudiziale la redazione del piano regolatore, si affrontava direttamente la questione. Non si trattava solo di un progetto edilizio (peraltro in quel momento ancora da definirsi attraverso un lungo percorso di affinamento) ma più estesamente culturale. Si è ipotizzato che mentre si ordinavano razionalmente le collezioni naturalistiche municipali, concentrandole nel settore urbano gravitante intorno ai giardini pubblici dove si trovavano gli istituiti di istruzione superiore destinati a servirsene, si favoriva la discussione sulla dislocazione dell'intero patrimonio collezionistico cittadino;[38] di quello artistico, storico e archeologico, in particolare, allora diviso tra il Salone (dove si trovavano il Museo Artistico e quello, nascente del Risorgimento) e i locali di Brera (dove era stato sistemato il Museo Patrio di Archeologia).[39] Questa discussione e la ricognizione delle risorse edilizie di proprietà pubblica più adatte allo scopo sono argomenti sui quali Visconti, giunto in Consiglio comunale, si esprimerà con interventi rari ma mirati, a conferma delle parole di Francesco Brioschi.

4. Per molti anni a servizio delle civiche raccolte (1863-1900)

Il Museo Artistico Municipale era stato inaugurato nel giugno 1878. Giuseppe Mongeri, puntuale cronista dei fatti culturali cittadini, non aveva risparmiato alcune critiche osservando che le sette sale del piano superiore del Salone ai Giardini Pubblici, ove erano stati disposti gli oggetti, non avevano consentito quella disposizione richiesta «da una rigorosa razionalità artistica» anche se, avvertiva, la natura del pro-

[37] Grisoni 2012.

[38] Grisoni 2014a.

[39] Sull'istituzione del Museo del Risorgimento si veda Zatti 2012 che ne mostra la genesi come prodotto dell'Esposizione Nazionale Italiana del 1884; si osservi, inoltre, la presenza di Visconti tra i componenti della commissione milanese.

blema non risiedeva solo nella sede - cui si era giunti consapevoli della provvisorietà della scelta - ma anche nella genesi delle collezioni pubbliche. Scriveva infatti l'affermato e noto storico dell'arte:

> Quando una collezione com'è questa, altro non sia che il portato di quattro o cinque eredità, domandare un ordine logico, sistematico preciso è richiedere quello che solo il caso potrebbe dare per miracolo. Qui, l'ha proprio negato; ma la Commissione ordinatrice ha fatto del suo meglio.[40]

«Più che un museo fatto, un museo da creare» avrebbe ammesso poco dopo Carlo Ermes Visconti proprio dall'interno di quella citata Commissione ordinatrice.[41] Egli aveva lavorato personalmente, nell'inverno e nella primavera del 1878, all'ordinamento dei materiali completando il catalogo di «alcune classi» e portando «a discreto punto», o almeno iniziando, quelli delle rimanenti ma era cosciente di offrire «embrioni di collezioni» (salvo le ricche collezioni numismatiche, il medagliere e preziose opere di grandi maestri che già potevano formare una significativa pinacoteca dello svolgersi dell'arte antica). Mostrava tuttavia un certo compiacimento (la cui enfasi è certamente strumentale alla sede e alle veste in cui si trovava ad esprimerlo) nel vedere finalmente radunati, dalle sedi più disparate, quel dono e quei legati che sono notoriamente l'origine delle civiche raccolte milanesi (la Raccolta Marchesi, i legati di Antonio Guasconi e di G.G. Bolognini Attendolo, quelli di Giuseppe Sormani e di Carlo Taverna e, infine, di Malachia De Cristoforis) e quanto nel frattempo vi si era aggiunto.[42] Mentre si rendeva il dovuto onore ai donatori, si incitavano infatti altri privati ad emularli; con una precisazione sobillatrice di Visconti in merito all'importanza delle collezioni pubbliche a fronte di quelle private (ritenute di difficile sopravvivenza perché più soggette a dispersione per effetto dei nuovi quadri normativi). Si rivela così la sua attenzione per una forma di tutela del patrimonio storico ed artistico che, riconosciutone l'interesse collettivo, invoca responsabilità pubbliche. Vi si affianca un'esortazione al senso civico dei cittadini, di cui egli darà prova in prima persona con doni e legati.[43]

---

[40] Mongeri 1878.

[41] Visconti 1880.

[42] Mongeri 1878.

[43] Al Museo del Risorgimento, ad esempio, dona un ritratto dello zio Ermes Visconti e un autografo di Garibaldi , AVSV, cas. 115, fasc. 1886.

Illuminato da questi principi, Visconti si accollò un impegno di raccolta e catalogazione che lo travolse; documentato come tale dai contemporanei,[44] amplificato oltre misura dalla satira, confermato dalle sue carte personali le quali rivelano l'abilità di intercettare le collezioni dei privati arginando smembramenti ed esportazioni,[45] di dialogare con i mercanti[46]

[44] In «quegli anni che andarono dal 1877 al 1880 [...] il marchese Visconti ed il museo Artistico si identificavano: egli era tutto: esercitava le funzioni di direttore e di segretario, di restauratore e di scrivano», Novati 1912.

[45] Visconti è il 'tramite' che presenta il legato Ponti al Comune di Milano, cui era stato destinato, AVSV, cas. 116, fasc. 1896 ma anche cas. CC, fasc. 2: Gustavo Frizzoni a Carlo Ermes Visconti, lettera del 7 settembre 1895. Nel 1899 coopera con Giuseppe Vigoni per assicurare al Comune il lascito della marchesa Stampa-Soncino, cfr. Consulta, 1284 e ss.. Più articolato il ruolo in rapporto alla collezione Passalaqua, Giunta al Comune di Milano a più riprese anche per interessamento di Visconti. Per questo si veda ora Amadini 2013, 40-48. Si aggiunge che alla morte dell'amico Passalaqua, Lodovico Pogliaghi informa Visconti che l'erede, Alessandra Negrotto, è intenzionata a privarsi di poche cose. Scrive infatti: «Ho sentito moltissimo la perdita di Passalaqua. Ella sa come gli fossi amico e conserverò sempre con riconoscenza la sua memoria. Sono contento che il Suo nome sarà bene ricordato dai pochi oggetti che ha lasciato al Museo. Ella ricorderà certamente l'arazzo fiammingo e la cassetta scolpita e il bassorilievo di P. da Vinci state esposte e fotografate nell'81 - ma non so se conosce un gran mobile costrutto con legni vari da un Quintilio Passalaqua del 1600 - e con mille accessori interessanti - fra gli altri alcuni diaspri dipinti dal Morazzone. L'erede - marchesina Alessandra Negrotto - ha intenzione di conservare intatta la villa di Moltrasio - privandosi solo dei quadri di Luino - di qualche oggetto troppo speciale da museo e, crede - della libreria», in AVSV, cas. CC, fasc. autografi. La lettera, non datata, si può trattenere tra la data di morte del conte (5 gennaio 1890) e l'accettazione del lascito, comprensivo degli oggetti indicati, da parte del comune (24 febbraio 1890).

[46] Nel dicembre del 1888 Visconti partecipa alla vendita pubblica della collezione Baslini gestita dalla Casa d'Asta Sambon acquistando, per il Museo Patrio, un'ara mitriaca e due iscrizioni, cfr. La Guardia 1989, n. 193/1-4: Lettera di Carlo Ermes Visconti a Giulio Carotti del 10 dicembre 1888. Pochi mesi dopo chiede di essere autorizzato a partecipare alla vendita all'asta della collezione De Amici per assicurarsi l'acquisto di un oggetto già nella collezione Passalaqua (un bassorilievo in marmo di scuola lombarda del secolo XVI rappresentante la Madonna col Bambino e due angeli con strumenti musicali), *ivi*, n. 208. E' frequentemente interpellato da librai, antiquari e generici venditori. Il 10 settembre 1896, ad esempio, il librario Ulrico Hoepli, informandolo di avere acquistato un'importante biblioteca in Roma, la propone a Visconti per il Museo del Risorgimento, in AVSV, cas. CC, fasc. 2. I contatti con il mercato riguardano ovviamente anche affari privati; trattative per l'acquisto dello stemma Visconti già nel castello di Pandino, e proposto dal venditore per quello di Somma, in AVSV, cas. CC, fasc. 1872: Giovanni Ballerini, antiquario a Carlo Ermes Visconti, lettera da Lodi del 25 marzo 1872.

e i collezionisti,[47] di vigilare sul patrimonio ecclesiastico indirizzando gli oggetti verso 'asili' sicuri;[48] favorendo dunque forme di pubblica raccolta ma anche di pubblica fruizione. Per Visconti la funzione didattica è infatti inscindibilmente legata al ruolo di un moderno museo; un aspetto che si riconosce non solo in rapporto alle Accademie d'arte ma anche ai luoghi di formazione degli artigiani e di produzione delle arti minori. Allenatosi nel silente lavoro, svolto nei primi anni sessanta, per Giorgio Jan prima e per Emilio Cornalia poi, nel riallestimento del Museo Civico in Palazzo Dugnani,[49] interpellato per valutare i pezzi della raccolta Marchesi;[50] coinvolto nella discussa acquisizione della collezione archeologica Giani-Uboldi,[51] delegato al catalogo del medagliere del

[47] Emblematica la proposta di acquisto, per conto del Museo Artistico, avanzata a Laura D'Adda Salvaterra e relativa ad un certo 'letto', cfr. Biblioteca Comunale di Grosio, Archivio Visconti Venosta, busta 96, fasc. 3: Carlo Ermes Visconti a Laura d'Adda Salvaterra, lettera del 29 settembre 1883 e soprattutto la successiva in cui, a rinforzare la proposta, riferisce all'amica gli entusiasti parere di Giuseppe Bertini e Luigi Cavenaghi, *ivi,* lettera del 18 ottobre 1893.

[48] Su indicazione di Emilio Seletti interpella per questo la fabbriceria della chiesa di S. Babila (La Guardia 1989, n. 1525). Prove della sua sollecita vigilanza anche in AVSV, cas. CC, fasc. 1872: Antonio Caimi, segretario dell'Accademia di Brera, a Carlo Ermes Visconti, lettera da Milano del 5 dicembre 1872, in cui lo ringrazia di avere avvisato il presidente, Carlo Belgiojoso «circa la cessione che si va trattando della tavola di scuola leonardesca di spettanza della parrocchiale di Mezzana». Si tratta, verosimilmente, del polittico raffigurante *La Vergine Assunta, San Giovanni Battista e Santo Stefano* attribuiti a Marco d'Oggiono e ora al Museo diocesano di Milano, inv. MD 2001089.001.

[49] Jan 1863.

[50] Visconti è incluso «come [persona] cognita e studiosa delle arti belle» nella «nuova» commissione (composta da Giuseppe Balzaretti, Giovanni Strazza e Giuseppe Mantegazza) cui la Giunta Municipale, pressata dal donante, Salvatore Fogliani, bisognoso di liberare lo studio dello scultore per il successivo 15 settembre, affida il compito di provvedere all'urgenza del trasporto e alla dislocazione dei pezzi non destinati a far parte della collezione artistica, in AVSV, cas. 115, fasc. 1864: Lettera del Sindaco di Milano, Antonio Beretta, in data 9 luglio 1864. Al documento si accompagnano la distinta, su carta intestata della Consulta del Museo Patrio, firmata Antonio Caimi e Giuseppe Bertini in data 21 settembre 1864, degli oggetti scelti per il Museo Patrio e un *Inventario degli oggetti artistici costituenti la Raccolta Marchesi*, suddiviso per Categorie, recante le misure, annotato in diversa grafia e non datato; i due documenti integrano significativamente quelli indicati in Fratelli 2012.

[51] AVSV, cas. 115. La corrispondenza risale al 1867; sono allegate due lettere risalenti al 1840.

conte Taverna,[52] per il cui tramite non è infondato credere si siano configurati i primi compiti istituzionali nel settore delle raccolte storico-artistiche cittadine,[53] Visconti svolgerà tenacemente e per un lungo arco di anni un lavoro di cernita, raccolta e acquisizione di materiali, favorendo equamente le istituzioni storico-artistiche cittadine attraverso i cui cataloghi si muoverà con confidenza e competenza crescenti. Legittimato dall'autorità degli uffici assunti, arriverà anche a proporre, mosso da esigenze conservative e giustificato da logiche di pertinenza, il trasferimento di oggetti dall'una all'altra.[54] La natura di queste considerazioni mostrano fecondo lo studio della sua figura di conservatore quando non di collezionista.[55]

5. «Cosa dobbiamo dunque fare del Castello?» (1886-1894)

Nel 1886, quando, scongiurata la demolizione, per il castello di Milano si tratta di perfezionare il progetto di restauro, Visconti è dunque l'interlocutore istituzionale, come assessore alla pubblica istruzione e soprintendente scolastico ma è anche all'apice della sua attività di conservatore come presidente delegato del Museo Patrio di Archeologia, presidente della commissione amministratrice del Museo Artistico, e membro della commissione ordinatrice per il Museo del Risorgimento.

---

[52] AVSV, cas. 115, fasc. 1871. Già nel febbraio del 1871 Visconti è incaricato dell'ordinamento del legato del medagliere Taverna.

[53] Alla morte del conte Paolo Taverna, il 20 luglio 1871, Visconti ne prende il posto nella commissione incaricata dell'ordinamento di archivio storico, musei e biblioteche. L'incarico risale al 23 febbraio 1871, in AVSV, cas. 115.

[54] Emblematica, al proposito, la richiesta di depositare il quadro raffigurante la Zecca di Milano al Gabinetto Numismatico ove avrebbe costituito valido documento di contesto al medagliere, plausibile alternativa quindi all'ostensione nella pinacoteca del Museo Artistico dove non vi era spazio per la grande tela, cfr. La Guadia 1989, nn. 1136, 1164, 1174.

[55] Oltre all'apprezzata raccolta di materiali preistorici, Visconti radunò oggetti che documentano una varietà di interessi sconfinante nel mondo dell'artigianato (come, ad esempio, i bacili da barba tuttora esposti nel castello di Somma), del documento storico, della bibliofilia. Le poche ma accorate parole di cordoglio espresse nel giorno della morte dall'assessore anziano, Emanuele Greppi, ricordano anche «una magnifica e ricchissima collezione di carte geografiche della vecchia Milano», Atti del Municipio di Milano, (1910-1911), I, 502: Seduta del 30 maggio 1911.

A questa data il dialogo con Beltrami è serrato e sebbene i frequenti incontri abbiano dissipato le loro parole, restano alcune lettere che l'architetto usava scrivere quando era fuori città o prossimo ad esserlo. E' in una di queste circostanze che scrive non solo al collega e assessore ma all'amico per anticipare alcune delle importanti novità che riguardano il castello.[56] Spiega che il Governo ha richiesto un rapporto contenente le clausole da includere nel contratto di formale cessione dell'edificio al Municipio, che la Commissione conservatrice ha quindi nominato una sotto-commissione, che egli stesso, con altri colleghi, vi è stato incluso; in sostanza lo rassicura scrivendo che il lavoro della Commissione non si è spinto a dare «imposizioni di restauri» che saranno piuttosto da «discutere a norma delle circostanze». Nella lettera, che illustra a Visconti i contenuti della nota relazione presentata da Celeste Clericetti precisandone le circostanze,[57] riferisce le clausole da inserire nel contratto concordate in commissione: nessun ostacolo alla demolizione della ghirlanda, sgombro di tutte le costruzioni aggiunte al concetto primitivo, riadattamento dei locali secondo le disposizioni primitive.

Il progetto di restauro si doveva ancora definire: puntualizzando le scelte artistiche solo parzialmente configurate nei disegni approntati nel 1884 per includervi quell'interpretazione 'civile' del monumento che andava maturando, perfezionando gli aspetti pratici (gli oneri finanziari e le tempistiche) e, soprattutto, indicando la destinazione d'uso da assegnare all'edificio. Queste scelte si preciseranno mentre si percorre il complesso *iter* di cessione dell'immobile al Comune, si implementano il rilievo e lo studio dell'edificio, si iniziano le prime demolizioni selettive.[58] Il ruolo di Visconti è già emerso proprio in questa fase: a scongiurare, in particolare, il pericolo di adattare il castello a nuova sede del museo civico (1888).[59]

Nel novembre del 1889, però, Visconti decade dalla carica di assessore lasciando il compito a Giovanni Celoria.[60] E' probabilmente

---

[56] In appendice doc. 3.

[57] Di Biase 1997, 50-51. Per il testo della relazione, datata 28 giugno 1886, cfr. Raccolta Beltrami, C III, 25.

[58] Di Biase 1997, 51-53. Per il fondamento storico del progetto, cfr. Bellini 1997a, 10-11; 17-20.

[59] Di Biase 1997, 49.

[60] Su questo cordiale 'passaggio di consegne' si veda in Appendice doc. 13. Un commento in rapporto alla contemporanea e connessa questione del Museo di Storia Naturale in Grisoni, 2012, 101.

nell'occasione di questo avvicendamento che, costretto dal risultato elettorale a lasciare, tra le altre cose anche la delega alla presidenza della Consulta (da cui deriva la conduzione del Museo Patrio di archeologia tra il 1884 e il 1889),[61] compila un lungo memoriale, una cronologia di quanto si è fatto per il Castello dal 18 marzo 1887 al 21 giugno 1889. Scritto nelle finissima, inconfondibile grafia del marchese, compilato con una precisione ossessiva nella resa di particolari, dettagli, date, numeri di protocollo precisa ruoli, circostanze e compiti personalmente assunti nell'estenuante e non ancora compiuta storia di questo grande progetto in cui il restauro dell'architettura si vuole saldamente congiungere alla funzione che essa dovrà assolvere. Al documento si trova unita una grata lettera di Giovanni Celoria che, restituendo il plico (agosto 1894) ammette:

> poco potei conchiudere, ma se gli assessori passano, resta il Castello e restano gli uomini che ad esso dedicarono studii e cure; fra essi lei. Con tali uomini il Castello trionferà di tutti gli ostacoli che passioni o verità di parte potranno creare.[62]

Il memoriale riflette, con particolare riguardo alla tutela del Castello, quella vitalità che è già stata assegnata all'assessore Visconti nel lavoro svolto in Consulta anche per il suo rilancio.[63] L'uscita dalla Giunta tuttavia non frenerà l'intraprendenza del marchese che lasciata la Consulta del Museo Patrio conserverà i propri compiti al Museo Artistico - seguendo in particolare con Guido Cagnola il confluirvi del patrimonio della Società del Museo d'Arte industriale ceduto al Comune[64] - e del Risorgimento. Le due istituzioni ancora coabitano nei

---

[61] La Guardia 1989, n. 2389/1-3 per il Verbale di adunanza del 16 novembre 1889 in cui Visconti saluti i colleghi. Per le lettere di ringraziamento, una firmata da tutti i membri della Consulta (Emilio Belgiojoso, Emilio Visconti Venosta, Luca Beltrami, Felice Calvi, Cesare Cantù, Antonio Caimi, Gustavo Frizzoni, Emilio Seletti) e l'altra del solo segretario Giulio Carotti, disposte nella seduta del 4 marzo 1890, *ivi*, n. 2393/1-3. Le minute di risposta si ritrovano in AVSV, cas. 116, fasc. 1890. Visconti rientrerà in Consulta nel 1895 a sostituire il defunto Cesare Cantù, AVSV, cas. 116, fasc. 1895, Lettera del 6 maggio 1895.

[62] In appendice doc. 31. Il Memoriale, manoscritto in grafia di Carlo Ermes Visconti, consta di fogli ripiegati e legati a formare un quaderno di 26 pagine scritte.

[63] La Guardia 2012, 366.

[64] AVSV, cas. 115, fasc. 1889.

pochi locali del Salone ai Giardini Pubblici la cui demolizione è però inevitabile ora che vi si addossa l'erigendo nuovo palazzo del Museo Civico, inaugurato nell'aprile del 1892. Così, quando il successivo 30 giugno, il Regio Commissario straordinario convoca la commissione speciale istituita pochi giorni prima dalla Giunta Comunale per studiare l'uso più opportuno del castello di Milano, riattivando gli studi sull'edificio oramai pressati da più fronti, Visconti non solo è tra i convocati ma è designato a presiederla, in qualità di conservatore del Museo artistico municipale e della Scuola Superiore d'arte ma anche di membro della Commissione del Museo del Risorgimento.[65]

Dalla minuta di risposta trapelano entusiasmo, gratitudine e compiacimento perché, risponde, si tratta di

> un progetto che accarezzo da parecchi anni e che ha subito nel mio pensiero tutte le fasi delle cose fortemente amate e desiderate.[66]

Dopo avere inizialmente rifiutato di presiederla, desiderando per sé la libertà di esprimersi libero dai vincoli che il ruolo avrebbe potuto imporre, poi accetterà assolvendo abilmente proprio questo compito.

La commissione inizia i propri lavori, dopo l'estate, il 15 novembre, riunendosi nell'ufficio del sindaco, ora Giuseppe Vigoni.[67] La domenica seguente, giorno 20, i commissari visitano i locali del castello, muniti di uno speciale lasciapassare fornito dall'Autorità militare che ancora dispone dei locali.[68] Nei giorni successivi si acquisiscono i rilievi dell'intero edificio che sono custoditi dall'ufficio Regionale.[69] Visconti dirige con precisione le operazioni, vigila sul passaggio di queste carte, spesso semplicemente siglandole. E' assistito infatti dal segretario comunale, Giuseppe Luini, le cui mansioni si estendono alla commissione per il castello. Compare inoltre anche Gaetano Moretti, scrupoloso *alter ego* di Beltrami all'Ufficio Regionale. Questi, già deputato del Parlamento, si trattiene per alcuni brevi periodi a Roma; dunque i lavori della commissione non si arrestano, anzi accelerano, nelle vacanze natalizie quando Beltrami, rientrato a Milano, personalmente avvisa

65 In appendice doc. 14.
66 In appendice doc. 14.
67 In appendice doc. 16
68 In appendice doc. 17
69 In appendice doc. 18 e doc. 19.

Visconti perché ne approfitti per convocare la commissione.[70] L'amico presidente risponde con una sollecita convocazione a palazzo Marino, nella sala della Soprintendenza scolastica, per il 3 di gennaio del 1893.[71] Il 5 gennaio Beltrami, nuovamente in partenza per Roma, chiede a Visconti di incontrarsi, includendo nella ristretta riunione anche l'architetto Arcaini cui, scrive, devono darsi istruzioni.[72]

Gli incontri e i sopralluoghi al castello si svolsero dunque a ritmo piuttosto serrato in quei mesi: per rilevare le misure dei locali e verificarne la praticabilità, per valutare le opere da eseguirsi ma anche per discutere e contenere la 'ridda' delle possibili destinazioni[73] anche se, come noto, nemmeno questa volta si giungerà ad una definitiva assegnazione.[74]

Sul riuso del castello si ritrovano alcuni appunti nell'archivio del marchese. Perfettamente convergenti agli intenti del progettista, permettono di qualificare l'apporto di Visconti come esponenziale all'obbiettivo perseguito dal gruppo, tenace nella funzione di coordinamento.[75]

Visconti infatti si identifica in quel «manipolo piccolo, pur troppo, ma compatto di amanti delle memorie patrie» che da lungo tempo perseguono il desiderio della cessione del castello al municipio. E' testimone dei fatti che è in grado di rievocare ripercorrendo dettagliatamente le pregresse proposte di riuso: quella di accogliere uffici pubblici o la sede comunale (naufragata esaminando la posizione dell'edificio, «alquanto eccentrica», e la fisica disposizione degli ambienti, «enormi ed illuminati da spaziosissime finestre ma poco numerose»), ma anche quella, «fortunatamente» abbandonata, di collocarvi il museo di storia naturale. E' conquistato dalla particolarità del caso che offre l'opportunità di riscoprire il valore storico del monumento e di attualizzarne il significato ed il ruolo per i milanesi. E' dunque consapevole delle novità insite nell'approccio di restauro che, tradotto in parole sue, consiste nella volontà di esibire al pubblico non solo l'esterno ma anche «gli arti-

---

70 In appendice doc. 21.

71 In appendice doc. 22.

72 In appendice doc. 23.

73 In appendice doc. 18.

74 cfr. Di Biase 1997, 50.

75 Si tratta di dieci fogli sciolti manoscritti al *recto* in grafia di Visconti, muti al verso. Conservati in AVSV, cass. CC.. Ad essi si riferiscono i virgolettati del titolo e i seguenti nel testo.

stici particolari dei suoi ambienti» esaltando il ruolo simbolico del monumento e assimilando dunque l'idea che esso non possa che accogliere, per rigida coerenza, solo funzioni strumentali allo scopo, rispondendo così alla domanda che si era posto, all'inizio del suo discorso, sul destino del castello. Inizia per questo una rassegna che passando attraverso la Pinacoteca, la Biblioteca e il Gabinetto numismatico, quindi la Pinacoteca Ambrosiana e la Fondazione artistica Poldi-Pezzoli (realtà che, per ragioni diverse, hanno già la loro sede opportuna) circoscrive il gruppo delle quattro istituzioni che sono espressione della cultura storica artistica cittadina: l'Archivio storico municipale, il Museo patrio di archeologia, il Museo municipale d'arti e il Museo del Risorgimento nazionale. Quindi descrive lo stato di quei luoghi, mostrando di conoscere a fondo la consistenza delle collezioni e, per il Museo Artistico e del Risorgimento in particolare, anche dell'architettura che li ospita. La relazione si interrompe in questa disamina che giunge alla conclusione di dovere assegnare a questi quattro istituti - cui si aggiungeranno la Società Storica Lombarda (depositaria dei medesimi valori) e la Scuola d'arte applicata all'industria (inscindibilmente legata al Museo Artistico e testimone della finalità didattica connessa allo studio della storia e dell'arte) - le sale restaurate del castello. Il manoscritto non è datato ma taluni riferimenti inclusi nel testo consentono di trattenerlo entro i primi mesi del 1893 e di ricondurlo ad un discorso tenuto in una qualche seduta della Commissione o forse, per la pungente ironia che lo vivacizza, destinato a stuzzicare con brio l'opinione pubblica.[76]

Nel frattempo, sincronizzati sulla presenza in città di Beltrami, gli incontri rivelano i nomi dei collaboratori e quello di Ranieri Arcaini, in particolare, l'architetto cui è delegato il compito di seguire i rilievi e la protezione delle opere di demolizione. Iniziano infatti i primi lavori così, nel mese di gennaio del 1893 l'autorità militare concede ad uso della commissione il locale n. 54 (in realtà due locali, uno grande e uno piccolo) che è situato al piano terreno del gran cortile, a sinistra, entrando.[77] Il 31 di quello stesso mese Arcaini informa il presidente, Visconti, che occorre imporre d'ufficio all'impresa appaltatrice dei lavori «di risparmiare nelle demolizioni del Muraglione N-O la parte antica ora

[76] Il documento annuncia per il successivo mese di maggio la definitiva cessione del castello al Comune. Il passaggio avverrà tra il 25 ottobre e il 9 novembre 1893.

[77] In appendice doc. 26.

scoperta, e che Ella ben conosce».[78] L'allarmante lettera allude ai lavori di demolizione delle ghirlanda nel corso dei quali si trovano parte viscontee che si vogliono prudenzialmente risparmiare. Arcaini non è solo diligente ma anche indispettito; vorrebbe meno burocrazia, meno passaggi di carte, più autorità individuale in ragione del ruolo assunto di rappresentante dell'ufficio regionale. I contenziosi con l'impresa Bonomi sono noti;[79] come è noto Arcaini, tanto per zelo che per puntiglio;[80] la piccata lettera ne conferma il ruolo e le relative ricadute tanto sulla conduzioni dei lavori che nei rapporti con l'impresa, fin dall'esordio nel lungo cantiere di restauro del castello.

Il 19 febbraio 1894 Beltrami interpella Visconti.[81] Sono in corso i lavori al torrione sud-est (come noto riconvertito a serbatoio per l'acquedotto cittadino). Si sta rimarginando la cortina esterna, riconfigurandone il profilo che viene elevato ad una maggiore altezza (anche in considerazione degli effetti che questo avrà nella ricomposizione del discusso fronte verso la città) e sagomandone la cresta con il disegno di una merlatura di coronamento. L'architetto chiede a Visconti di «esaminare da vicino i lavori della merlatura del torrione»: vuole che «si provveda a fare un lavoro un poco più decente» ed è certo che la voce dell'amico sarà più convincente della sua presso il sindaco Vigoni.[82]

Nell'autunno del 1894, finalmente smantellati i padiglioni dell'Esposizione Nazionale,[83] i lavori riprendono e lo studioso tedesco Paul Müller-Walde prosegue gli 'assaggi' delle murature della Sala della Torre e di quella del Tesoro. I 'rinvenimenti' sono di eccezionale importanza. Beltrami ne parla a Visconti in due lettere. La prima, datata 28 novembre 1894, è la conferma dell'esistenza di pitture nella Sala della

---

[78] In appendice doc. 28.

[79] Di Biase 1997, 51-52.

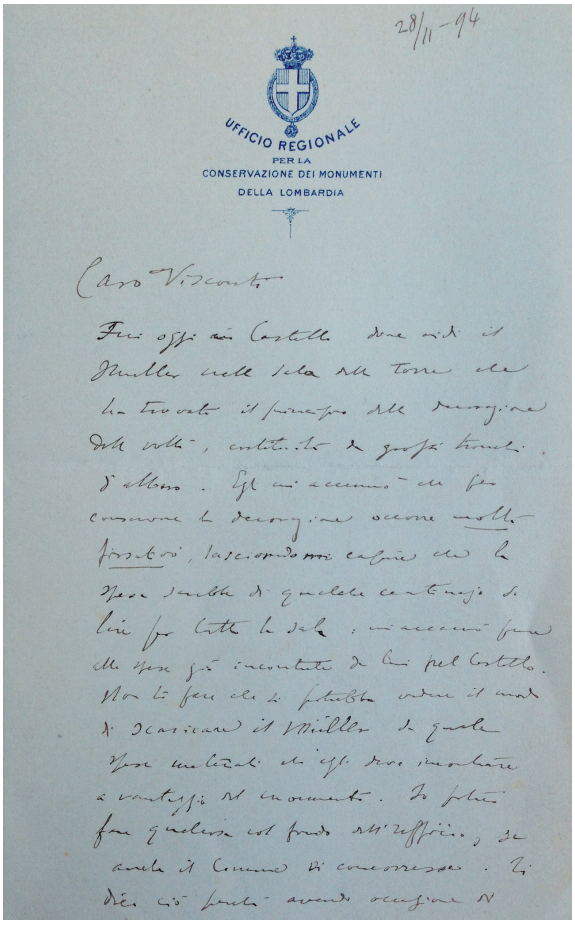
[80] Si allude all'apporto, tanto in fase di progetto che di conduzione dei lavori, per la costruzione della torre Umberto I, cfr. Raccolta Beltrami, A IV, 5. Per il ridondante riconoscimento dei suoi meriti si veda anche Raccolta Beltrami, Op. 315.

[81] In appendice doc. 30.

[82] Sulle interferenze, ostative, di Vigoni e sul suo 'ravvedimento' cfr. Di Biase 1997, 53.

[83] Visconti rifiutò la proposta di presiederne il comitato promotore, in AVSV, cas. 116, fasc. 1894. Si è portati a credere che sia una manifestazione di contrarietà alla sede scelta per l'allestimento dei padiglioni, notoriamente avversata radicalmente da Beltrami e quindi circostanza di ulteriore solidarietà tra i due.

Torre ove appare «il principio della decorazione della volta costituito da grossi tronchi d'albero»[84] (*Fig. 1*). La seconda, che giunge, con gli auguri, il 26 dicembre successivo, è per condividere l'inaspettata comparsa di «tracce importanti di pitture nella Sala del Tesoro (Rocchetta)» che nell'immediato giudica «anteriori a Lodovico il Moro - maniera di V. Foppa»[85] (*Fig. 2*).


28/11-94

UFFICIO REGIONALE
PER LA
CONSERVAZIONE DEI MONUMENTI
DELLA LOMBARDIA

Caro Visconti

Fig. 1.

[84] In appendice doc. 34.
[85] In appendice doc. 35.

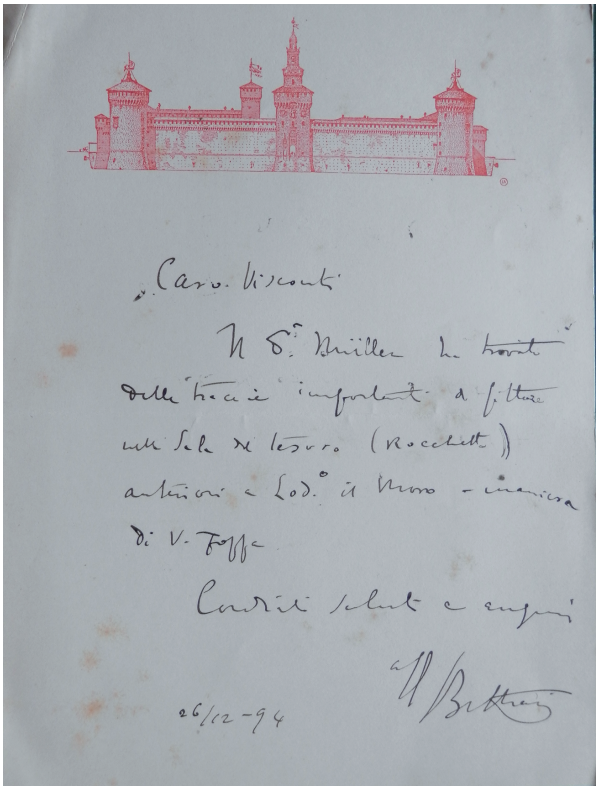


Fig. 2.

Mentre dunque condivide con l'amico le importanti novità e confida le proprie impressioni sulla maniera e l'epoca delle pitture emerse, manifesta anche preoccupazioni di carattere tecnico e d'ordine pratico in merito alla loro conservazione. Beltrami infatti avverte Visconti che, soprattutto nella Sala della Torre (la Sala delle Asse), a detta di Müller-Walde, occorre «molto fissativo»; il che si traduce, pragmaticamente, in «qualche centinajo di lire per tutta la sala». Chiede quindi un sostegno, di natura economica, «per scaricare il Müller da quelle spese materiali» che, aggiunge, in parte ha già sostenute.

Sulla Sala delle Asse persistono tuttora molti dubbi determinati dalla frammentarietà delle fonti finora rintracciate. La questione non riguarda solo la realizzazione dell'opera ma anche la sua durata nel tempo e soprattutto la fase tardo ottocentesca di riscoperta del linguag-

gio leonardesco e bramantesco e di restauro delle pitture superstiti.[86] Tra il 1893 e il 1895 la descrizione di quanto riemergeva dai fortunati assaggi di Müller Walde fu come noto condizionata dal riserbo con cui, a tutela della paternità della scoperta, si volle diffondere la notizia, soprattutto all'interno della comunità scientifica.[87] E' stato osservato che deriva probabilmente da questa 'riserva' l'inaspettata carenza di materiale iconografico e di precise descrizioni; così come pare che pochi ebbero accesso ai quei luoghi prima dei restauri dove, peraltro, si immagina difficile la lettura di una decorazione affiorante a frammenti al di sotto di sovrapposti strati di finitura. Le inedite espressioni utilizzate da Beltrami per descrivere a Visconti quanto visto sembrano ora dimostrarlo; soprattutto se poste a confronto con le sue successive descrizioni e pur tenendo conto del contesto in cui furono amichevolmente espresse e della immediatezza della suggestione.

Nell'attesa di capire non tanto se Visconti, avutane notizia, abbia visitato le sale (cosa peraltro assai probabile) ma, soprattutto se ne abbia in qualche modo trattenuto un ricordo (cosa assai più utile), le lettere finora rintracciate sollevano piuttosto un interrogativo relativo ai lavori precauzionali da condursi. Lo stato di conservazione evidentemente non era buono perché la precisazione che occorresse 'molto' fissativo, soprattutto nella sala delle Asse, sia che la si consideri in rapporto alla vastità della superficie che alla consistenza del degrado, comunque denuncia l'importanza del lavoro urgente da compiersi. La preoccupazione per le spese già affrontate, oltre a quelle da affrontarsi, impongono di valutare anche quale fu il limite dato alla rimozione dei sovrapposti strati di finitura e al consolidamento preventivo dei sottostanti e di considerare per questo plausibile l'ipotesi che, almeno in alcune parti, vi siano stati interventi preventivi precedenti all'opera di Ernesto Rusca. Conducono anche in questa direzione le più recenti acquisizioni d'archivio.[88] Si tratta di questioni di carattere tecnico che riguardano le procedure di restauro e che esulano, fatta esclusione delle ricadute economiche, le questioni che più direttamente sembrò affrontare Visconti.

---

86 Si veda Fiorio 2006 e Fiorio, Lucchini 2007.

87 Tali cautele sono dettagliatamente illustrate da Beltrami stesso in Beltrami 1897a e Beltrami 1897b. Per le minute di entrambi questi due articoli, Raccolta Beltrami, C III, 27.

88 Catturini 2013.

6. Verso l'apertura dei musei del castello (1895-1900)

Nei successivi cinque anni è facile invece documentarne il ruolo nel trasporto e nell'ordinamento dei musei al castello; poiché davvero molte, e puntuali, sono le testimonianze. Nel 1896 il Museo del Risorgimento si trasferisce al piano primo del cortile della Rocchetta i cui ambienti di fatto aveva già opzionati in occasione dell'Esposizione Nazionale dell'anno precedente; Visconti è chiamato ad occuparsene.[89] Nell'estate del 1897 si iniziano a muovere alcuni materiali del Museo Patrio; egli è in corrispondenza per questo con Giulio Carotti, segretario di Brera e, per regolamento, anche del museo.[90] Nel giorno della consegna della medaglia d'oro a Beltrami 'La Perseveranza' annoterà i nomi e renderà lodi a coloro che lavorarono all'ordinamento: per il museo patrio Emilio Seletti, Alfonso Garovaglio, Gustavo Frizzoni, Luca Beltrami e Giulio Carotti; per il Museo artistico Giovanni Battista Vittadini, Giulio Pisa e Carlo Bazzero. Il nome di Visconti è l'unico che figura per entrambi.[91] A sostegno dell'amico, Giuseppe Vigoni vorrà che sia anche scritto che

> negli ultimi cinque anni, sempre lavorando nel silenzio, che ne rispecchia la modestia, dedicandovi studio, fatiche e tutta la sua speciale competenza, compì il trasporto nel Castello e l'ordinamento artistico-scientifico della numerosa e preziosa raccolta.[92]

Nel corso di questa aggregazione la gestione del catalogo si era complicata. Occorreva smontare e rimontare gli insiemi architettonici, radunare materiali di una medesima collezione, magari di un medesimo museo, sparsi in più sedi o ricoverate nei depositi. Bisognava inoltre decidere la disposizione degli oggetti, definire i percorsi, congiungere le collezioni generatrici delle diverse raccolte in un museo le cui sale dovevano ancora essere completate e restaurate.

Beltrami descriverà molto bene la complessità e la delicatezza della questione in un lungo esaustivo resoconto in cui il nome di Visconti, oramai deceduto, ricorre più volte; non solo ad indicarne il noto supporto garantito all'architetto per «far prevalere il concetto di

---

89 AVSV, cas. 116, fasc. 1896.
90 Cfr., ad esempio, La Guardia, nn. 2640 e 2642.
91 La Perseveranza, 18 dicembre 1900.
92 *Lettera di Giuseppe Vigoni alla redazione*, La Perseveranza, 18 dicembre 1900.

una razionale utilizzazione del castello», ma anche a ricordarne, con i nomi dei consultori Biondelli, Ceriani, Cantù, Mongeri, Bertini, Brocca, Carlo ed Emilio Belgiojoso, Calvi, Carcano, Caimi, Garovaglio, i risultati raggiunti dalla Consulta del Museo Patrio «nel momento in cui il rinnovamento edilizio di Milano disperdeva tante memorie storiche ed artistiche». Infine a precisare che la compilazione dello schedario degli oggetti del Museo Artistico era stata sua «precipua cura», affermando quindi a chiare lettere che

> il ritiro del marchese Carlo Ermes Visconti, conseguente dall'insediamento dell'Amministrazione Mussi, aveva privato i due musei che si erano compenetrati nelle sale della Corte Ducale, di quella lunga pratica ed esperienza, che il Visconti aveva accumulato in un trentennio di assidua prestazione personale a vantaggio del patrimonio artistico del Comune.[93]

A gennaio del 1900 Visconti aveva infatti dovuto lasciare la direzione del Museo.[94] Questa circostanza, seguita dalle spiacevoli accuse mosse anche nei suoi confronti nell'ambito dell'inchiesta municipale avviata per verificare presunti ammanchi nel patrimonio artistico comunale,[95] ne determineranno il duro distacco, persistente anche dopo il chiarimento,[96] dagli ambienti della politica culturale cittadina.[97]

---

[93] Beltrami [1912].

[94] Rassegna le proprie dimissioni il 21 dicembre 1899. Sul passaggio di consegne si veda ora Basso 2012. Per il rinnovo delle cariche direttive cfr. anche Atti del Municipio di Milano, (1899-1900), I, 292: Seduta del 3 luglio 1900.

[95] Atti del Municipio di Milano, (1904-1905), I, 250: Seduta del 18 aprile 1905 per la consegna del cosiddetto plico Sinigaglia e *ivi*, 287-294: Seduta del 28 aprile 1905, per l'interrogazione di Ernesto Bazzero e, soprattutto, per le parole di Beltrami e Gabba in sua difesa.

[96] Per la discussione conclusiva e i risultati dell'inchiesta che «consacrano ancora una volta la fama della illibata onestà e della diligenza dei benemeriti cittadini cui era commessa la custodia delle collezioni comunali e di quelle di proprietà dello Stato affidate al Comune», Atti del Municipio di Milano, (1905-1906), I, 223-233: Seduta del 13 febbraio 1906 e *ivi*, II, IX.

[97] Informato della decisione presa dal Consiglio Comunale nella seduta del 11 aprile 1905 con cui lo si nomina membro del Consiglio direttivo della Galleria d'Arte Moderna, Visconti rifiuta. Più d'una le minute di risposta allegate alla lettera di nomina: esternano gratitudine «per coloro che mi hanno dato il loro suffragio» e riconoscenza «per chi ha pensato a questo atto di riparazione oggi però ancora prematuro», dimostrando, con diverse gradazioni di stizza, la ferma volontà di estraniarsi dagli incarichi municipali nel mutato scenario politico, AVSV, cas. 116, fasc. 1905.

Non può non rilevarsi, però, che in questa ultima fase la corrispondenza tra Visconti e Beltrami tende ad attenuarsi. Pur considerandosi una fatale dispersione delle carte o, all'inverso, un infittirsi degli incontri, si deve ricordare il fatto oggettivo che in quegli stessi ultimi cinque anni, la loro amicizia, era stata messa alla prova dagli esiti del concorso di secondo grado per il completamento della facciata del Duomo.

Ringraziamenti

Il presente lavoro è parte di un più estensivo esame dell'epistolario di Carlo Ermes Visconti che si conserva presso il Castello Visconti di San Vito di Somma Lombardo, proprietà della Fondazione Visconti di San Vito. Devo profonda gratitudine al presidente della Fondazione stessa, avvocato Gaetano Galeone, che ha permesso lo studio di queste carte.

BIBLIOGRAFIA

AFD, VII. *Annali Fabbrica del Duomo di Milano*, VII (1885).

Amadini 2013. P. Amadini, *Arti dell'Asia Orientale tra pubblico e privato: due raccolte esemplari. Dal 1870 cent'anni di collezionismo cinese e giapponese a Milano*, Tesi di dottorato, Ca' Foscari, Venezia, 2013.

Atti I 1880. *Atti della Commissione Conservatrice dei monumenti e oggetti d'arte e d'antichità nella provincia di Milano. Puntata prima che abbraccia il periodo dall'istituzione a tutto il luglio del 1880 annessi al volume VII dell'archivio storico lombardo*, ASL, 7 (1880).

Atti II 1881. *Atti della Commissione Conservatrice dei monumenti e oggetti d'arte e di antichità nella provincia di Milano. Puntata seconda in cui si comprendono le discussioni dall'agosto del 1880 al luglio del 1881 annessa al volume VIII dell'Archivio Storico Lombardo*, ASL, 8 (1881).

Atti parlamentari, 1900. *Atti parlamentari, Senato del Regno, Discussioni*, 1900-1902, 197, 22 novembre 1900.

Barbiera 1901. R. Barbiera, *Il salotto della contessa Maffei e Camillo Cavour*, Milano, Fratelli Treves, 1901.

Basso 2012. L. Basso, *18 gennaio 1900. Un documento e qualche nota per il museo artistico municipale*, in Libri & Documenti, 38 (2012), 117-131.

Basso 2014. L. Basso, *Insieme a Luca Beltrami per i musei del Castello Sforzesco: Giulio Carotti, Emilio Seletti, Carlo Ermes Visconti*, in *Luca Beltrami (1854-1933). Storia, arte e architettura a Milano,* Milano, Castello Sforzesco, 27 marzo - 29 giugno 2014, Catalogo della mostra a cura di Silvia Paoli, Cinisello Balsamo, Silvana editoriale, 2014, 169-189.

Bellini 1997a. A. Bellini, *Luca Beltrami, tesi sul restauro: l'esempio del Castello di Milano*, in *Luca Beltrami e il restauro dei castelli, 1893-1993. Nel centenario dell'acquisizione del Castello da parte del Comune,* Quaderni della Sezione Lombardia dell'Istituto Italiano dei Castelli, 7 (1997), 9-20.

Bellini 1997b. A. Bellini, *Luca Beltrami architetto restauratore*, in *Luca Beltrami architetto. Milano tra Ottocento e Novecento*, Triennale di Milano 10 novembre - 31 dicembre 1997, Catalogo della mostra a cura di Luciana Baldrighi, Electa, 1997, 92-140.

Bellini 2014. A. Bellini, *Un borghese esemplare della Milano dell'Ottocento*, in *Luca Beltrami (1854-1933). Storia, arte e architettura a Milano,* Milano, Castello Sforzesco, 27 marzo - 29 giugno 2014, Catalogo della mostra a cura di S. Paoli, Cinisello Balsamo, Silvana editoriale, 2014, 15-45.

Beltrami 1881. L. Beltrami, *Il Lazzaretto di Milano*, in G. Ottino, *Milano e i suoi dintorni*, Milano 1881, 263-266.

Beltrami 1882. L. Beltrami, *Il Lazzaretto di Milano*, ASL, 9 (1882), 403-441.

Beltrami, Forcella 1889. L. Beltrami, V. Forcella, *Di alcune lapidi e frammenti di scultura recentemente trovati in Milano*, in ASL, 15 (1889), 951-965.

Beltrami 1897a. L. Beltrami, L., *Il Mercurio del Castello di Milano*, I, La Perseveranza, 25-26 dicembre 1897.

Beltrami 1897b. L. Beltrami, L., *Il Mercurio del Castello di Milano*, I, La Perseveranza, 30-31 dicembre 1897.

Beltrami [1912]. L. Beltrami, *La sistemazione dei musei nel castello sforzesco nel ventennio 1892-1911*, in Raccolta Beltrami, B II, 69.

Boffi 1886. L. Boffi, *Il palazzo Vitelleschi in Corneto Tarquinia*, Hoepli, Milano, 1886.

Boriani 1992. M. Boriani, *«Il popolo intende ed ama naturalmente le antiche memorie purchè le sieno evidenti». Uso e abuso dei monumenti nella costruzione della Milano ottocentesca*, in *La Milano del Piano Beruto (1884-1889). Società, urbanistica e architettura nella seconda metà dell'Ottocento*, I, a cura di R. Rozzi, Milano, Guerini, 1992, 385-404.

Boriani, Rossari 1992. M. Boriani, A. Rossari, *Urbanistica milanese nella seconda metà dell'Ottocento. Tra* '*savia economia*'*, 'giuste esigenze dell'arte*' *e 'insormontabili ostacoli nella mania di guadagno*', in *La Milano del piano Beruto (1884-1889). Società, urbanistica e architettura nella seconda metà dell'Ottocento*, II, a cura di M. Boriani, A. Rossari, Milano, Guerini, 1992, 1-76.

Bortolotto, Massari 1992. Bortolotto, S., Massari, G., *I monumenti e la città. Cronologia delle fonti ufficiali*, in *La Milano del Piano Beruto (1884-1889). Società, urbanistica e architettura nella seconda metà dell'Ottocento*, I, a cura di R. Rozzi, Milano, Guerini, 1992, 428-431.

Casati 1876. C. Casati, *Vicende edilizie del castello di Milano*, Milano, Libreria editrice Brigola, 1876.

Catturini 2013. C. Catturini, La *Sala della Asse di Luca Beltrami: alcune novità documentarie sull'attività di Ernesto Rusca decoratore e restauratore, con qualche nota sull'allestimento di questo ambiente nella prima metà del Novecento*, Rassegna di Studi e Notizie, 40, 36 (2013), 63-76.

Costa 2006. P. Costa, *The Sala delle Asse in the Sforza Castle in Milan*, tesi Ph.D. Pittsburgh University, Pittsburgh 2006.

Di Biase 1997. C. Di Biase, *Luca Beltrami e il progetto per il Castello Sforzesco di Milano. Note sul metodo e sul cantiere di restauro*, in *Luca Beltrami e il restauro dei castelli, 1893-1993. Nel centenario dell'acquisizione del Castello da parte del Comune,* Quaderni della Sezione Lombardia dell'Istituto Italiano dei Castelli, 7 (1997), 35-83.

Favole 1969. P. Favole, *Boffi, Luigi*, in DBI, (11) 1969, 166-167.

Finocchi 1978. L. Finocchi, *Edilizia scolastica a Milano dal 1860 al 1885*, Storia Urbana, II, 6, (1978), 85-129.

Fiorio 2006. M. T. Fiorio, 'Infra le fessure delle pietre': *la sala delle Asse al castello Sforzesco*, in *Il Codice di Leonardo da Vinci nel Castello Sforzesco*, catalogo della mostra (Milano, Castello Sforzesco, 24 marzo - 21 maggio 2006) a cura di P. C. Marani, G.M. Piazza, Milano, Electa, 2006, 21-29.

Fiorio 2007. M.T. Fiorio, A. Lucchini, *Nella Sala delle Asse, sulle tracce di Leonardo*, Raccolta Vinciana, 32 (2007), 101-140.

Fratelli 2012. M. Fratelli, *Dal legato Marchesi Fogliani all'istituzione della Galleria d'Arte Moderna*, in *Musei nell'Ottocento. Alle origini delle collezioni pubbliche lombarde*. *Giornate di studio* (Milano, Palazzo Moriggia, 7 - 8 ottobre 2010), a cura di M. Fratelli, F. Valli, Torino, Allemandi, 2012, 391-410.

Gazzetta 1893. *Gazzetta Ufficiale del Regno d'Italia*, 94 (1893).

Giustina 1991. I. Giustina, *Istruzione, cultura, assistenza. La nuova architettura pubblica della città*, in *Milano nell'Unita nazionale* (1860-1898), a cura di G. Rumi, A.C. Buratti, A. Cova, Milano, Cariplo, 1991, 193-228.

Grifoni 1992. P. Grifoni, *Gli operatori*, in Bencivenni, M., Dalla Negra, R., Grifoni, P., *Monumenti e istituzioni*, II,Alinea, Firenze, 1992, 278-312.

Grisoni 2008. M.M. Grisoni, *Carlo Ermes Visconti: tra privato collezionismo e tutela dei monumenti patri*, Rivista della Società Storica Varesina, 25 (2008), 117-158.

Grisoni 2012. M.M. Grisoni, *Carlo Ermes Visconti e la cultura tecnico scientifica milanese ottocentesca: appunti intorno al carteggio con Antonio Stoppani conservato nel Castello di Somma Lombardo*, Rivista della Società Storica Varesina, 29 (2012), 85-108.

Grisoni 2014a. M.M Grisoni, *1882-1892. Milano si progetta*, in *Il palazzo del Museo di Storia Naturale. Un'architettura della Milano Belle Époque*, a cura di P. Livi, Milano, Silvana editoriale, 2014, 17-43.

Grisoni 2014b. M.M. Grisoni, *Il Cipresso di Somma Lombardo: un precoce caso di tutela*, Rivista della Società Storica Varesina, 31 (2014), 145-164.

Guida di Milano, *ad annum Guida di Milano*, *ideata e compilata da G. Savallo*, Milano, 1882-1900.

Jan 1863. G. Jan, *Allocuzione del direttore Giorgio Jan pronunciata il giorno della solenne inaugurazione della nuova sede del Civico Museo (7 giugno 1863)*, Milano, Pirola, 1863.

Janiro 1979. N. Janiro, *Celoria, Giovanni*, in DBI, 23 (1979), 464-469.

La Guardia 1983. R. La Guardia, *L'archivio privato di Pompeo Castelfranco nelle civiche*

raccolte archeologiche del Comune di Milano, Comune di Milano Settore cultura e spettacolo, Milano, 1983.

La Guardia 1989. R. La Guardia, *L'archivio della Consulta del Museo Patrio di archeologia di Milano (1862-1903)*, Comune di Milano Settore cultura e spettacolo, Milano 1989.

La Guardia 2012. R. La Guardia*, I depositi delle collezioni del Gabinetto numismatico e del Museo Patrio di Archeologia di Brera a Castello Sforzesco nei fondi dell'archivio del CASVA - Centro di alti studi sulle arti visive del Comune di Milano*, in *Musei nell'Ottocento. Alle origini delle collezioni pubbliche lombarde. Giornate di studio* (Milano, Palazzo Moriggia, 7-8 ottobre 2010), a cura di M. Fratelli, F. Valli, Torino, Allemandi, 2012, 355-369.

Mongeri 1878. G. Mongeri, *Il nuovo museo artistico municipale*, ASL, 5 (1878), 517-535.

Novati 1912. F. Novati, *Atti della Società Storica Lombarda*, ASL, 17 (1912), 198-202.

Occhipinti 2012. C. Occhipinti, *Milano nei progetti dei giovani architetti civili*, in *Architettura a Milano negli anni dell'Unità*, a cura di Maurizio Grandi, Milano, Libraccio 2012, 183-202.

Ricci 1997. G. Ricci, *Luca Beltrami allievo e docente*, in *Luca Beltrami architetto. Milano tra Ottocento e Novecento,* Triennale di Milano 10 novembre - 31 dicembre 1997, catalogo della mostra a cura di L. Baldrighi, Milano, Electa, 1997, 142-151.

Rossari 1997. A. Rossari, *Luca Beltrami e l'urbanistica milanese tra Ottocento e Novecento*, in *Luca Beltrami architetto. Milano tra Ottocento e Novecento,* Triennale di Milano 10 novembre - 31 dicembre 1997, Catalogo della mostra a cura di Luciana Baldrighi, Milano, Electa, 1997, 76-91.

Savare' 1994. G. Savare', *La Commissione milanese (1877-1890)*, in *Del restauro in Lombardia. Procedure, istituzioni, archivi 1861-1892*, a cura di G. P. Treccani, Milano, Guerini, 1994, 235-266.

Treccani 1992. G. P. Treccani, *Strumenti normativi e pratica della tutela monumentale*, in *La Milano del piano Beruto (1884-1889). Società, urbanistica e architettura nella seconda metà dell'Ottocento*, vol. I, a cura di M. Boriani, A. Rossari, Milano, Guerini, 1992, 245-259.

Vercelloni 1991. V. Vercelloni, *Le trasformazioni urbane*, in *Milano nell'Unita nazionale* (1860-1898), a cura di G. Rumi, A.C. Buratti, A. Cova, Milano, Cariplo, 1991, 137-163.

Visconti 1880. C.E.V. [Carlo Ermes Visconti], *Museo artistico municipale*, in *Gli istituti scientifici, letterari ed artistici di Milano*, Milano, Pirola, 1880, 713-721.

Visconti Venosta 1904. G. Visconti Venosta, *Ricordi di gioventù. Cose vedute o sapute. 1847-1860*, Milano, Tipografia Cogliati, 1904.

Zatti 2012. P. Zatti, *Un «visibilio di visioni». Torino 1884 e la nascita delle raccolte storiche milanesi*, in *Musei nell'Ottocento. Alle origini delle collezioni pubbliche lombarde. Giornate di studio* (Milano, Palazzo Moriggia, 7-8 ottobre 2010), a cura di M. Fratelli, F. Valli, Torino, Allemandi, 2012, 281-287.

Appendice

Nota. – L'elenco è cronologico. La numerazione progressiva è strumentale al richiamo dei documenti nel testo. I documenti si conservano presso l'Archivio Visconti di San Vito di Somma Lombardo (d'ora innanzi AVSV); nell'indicare la posizione d'archivio la fonte è pertanto ovunque sottintesa. Si omette inoltre la trascrizione, riducendola a poche righe riassuntive, per quelle lettere i cui contenuti appaiono perlopiù di circostanza o meno pertinenti al tema.

doc. 1 - s.d. ma 1886:[1] Luca Beltrami a Carlo Ermes Visconti, cas. CC, fasc. 1886

Saluta e anticipa l'occasione di un prossimo incontro.

doc. 2 - s.d. ma 1886:[2] Luca Beltrami a Carlo Ermes Visconti,[3] cas. CC, fasc. 1886

Nel contesto di una nomina non esplicita nel testo, segnala i nomi, concordati con Boito e Pirovano,[4] di G. Pagani,[5] G. Landriani[6] e G. Boffi.[7]

doc. 3 - s.d. ma 1886: Luca Beltrami a Carlo Ermes Visconti, cas. CC, fasc. 1886

---

[1] Per la lettera, non datata, si indica l'anno scritto in grafia dello stesso Visconti sulla camicia del mazzo in cui è stata rinvenuta all'atto della consultazione (aprile, 2011).

[2] *Idem*

[3] Su carta intestata 'Società degli Artisti e patriottica/Milano/via S. Giuseppe n. 4'.

[4] Si tratta di Camillo Boito e Giuseppe Pirovano.

[5] Verosimilmente Gentile Pagani.

[6] Verosimilmente il fratello di Gaetano, Giuseppe, direttore de La Perseveranza.

[7] Luigi Boffi (1846-1904), architetto formatosi alla Scuola Superiore di architettura di Brera, noto per alcuni progetti di ville partecipò, distinguendosi, non solo ad importanti concorsi cittadini ma anche di portata nazionale e internazionale (dal monumento alle Cinque Giornate alla facciata del Duomo fino al Monumento a Vittorio Emanuele II); cfr. Favole 1969. Il rilievo del palazzo Vitelleschi, cui allude Beltrami nella lettera, premiato dal Collegio degli ingegneri ed architetti di Torino, fu occasione, per l'autore, di comporre una breve monografia (Boffi 1886); le tavole, in particolare, apprezzate da Camillo Boito, divennero strumento didattico per gli allievi architetti di Brera; cfr. per questo, in particolare, Occhipinti 2012, 190.

Caro Visconti

Ho ricevuto i due firmari e ti ringrazio in scritto per ora, riserbandomi di ringraziarti a voce appena che sarò di ritorno, fra quattro o cinque giorni, dal lago d'Orta dove mi reco domattina: verrò a bagolare un poco in ufficio. Riguardo alla notizia che mi chiedi ti dico intanto che il Governo ha sollecitato dalla C.C. una specie di rapporto contenente le clausole che si ritenessero necessarie per la Conservazione del Castello all'atto della cessione formale. La Comm. C. nominò una sottocommissione Clericetti, Castelfranco, Frizzoni, Guidini, Beltrami:[8] io ho cercato di tenere le clausole nel senso più generico e semplice e cioè: nessun ostacolo demolizione ghirlanda - sgombro di tutte le costruzioni aggiunte al concetto primitivo - riadattamento dei locali secondo le disposizioni primitive man mano che si venisse a utilizzare detti locali. Il Clericetti relatore voleva perdersi in dettagli e in imposizioni di restauri che io credo prematuri e da discutere in seguito a norma delle circostanze. C'è stato da fare e sudare per conservare il rapporto ai giusti limiti senza toccare a chi spettasse la spesa dei restauri e in quali periodi si avessero a fare questi. Il cons. Zerbi mi disse poi che il Prefetto intendeva di metterci anche lui, a sua volta, lo zampino, ma non ne so nulla. In conclusione il compito della Sotto Commissione non è stato menomamente di fare studii di restauro. Ne parleremo più estesamente a voce, tuo aff. Luca Beltrami.

doc. 4 - s.d. ma 1887 circa,[9] Luca Beltrami a Carlo Ermes Visconti, cas. CC, fasc. Autografi

Accordi per la visita del campanile di S. Gottardo a Milano.

doc. 5 - 1888, marzo 18: Luca Beltrami a Carlo Ermes Visconti,[10] cas. CC, fasc. 3

[8] Si tratta della sotto-commissione nominata in seno alla Commissione Conservatrice (che scioglie le cifre C.C.) e composta, per l'esattezza, da Celeste Clericetti, Pompeo Castelfranco, Gustavo Frizzoni, Augusto Guidini, Luca Beltrami. Sui lavori della Commissione dedicata alla studio delle possibili destinazioni d'uso del castello cfr. Di Biase 1997, 49. Sulla cosiddetta 'relazione Clericetti' in rapporto alle proposte di Beltrami, *ivi*, 50-51; si deduce da questa analisi che la lettera, non datata, è comunque da trattenersi entro l'ottobre 1886. La relazione cui allude Beltrami è datata 28 giugno 1886, cfr. Raccolta Beltrami, C III, 25.

[9] La lettera, non datata, riconduce tuttavia al restauro del campanile di S. Gottardo in cui Beltrami è coinvolto, come commissario provinciale nel 1887 e cui dedica, in quello stesso anno, un breve scritto, cfr. Raccolta Beltrami, B III, 15; D III, 36.

[10] Su biglietto intestato 'Architetto/Luca Beltrami/Milano/via Cernaia, 5'.

Commenta la sospensione della pubblicazione della Raccolta Vinciana.[11]

doc. 6 - 1888, luglio:[12] Luca Beltrami a Carlo Ermes Visconti, cas. CC, fasc. 3

> Caro Visconti
> Sono stato a S. Satiro: interessanti assai quelle tracce di pittura e di architettura, e spero se ne faranno i rilievi esatti e minuti per poter decidere riguardo al restauro il quale si va un poco complicando,[13] Intanto ti ringrazio di avermi messo al corrente: ora mi assento per 4 o 5 giorni da Milano, ma ritornando mi affretterò a visitare nuovamente i lavori. Intanto credimi tuo aff. Luca Beltrami.

doc. 7 - 1888, ottobre 21: Luca Beltrami a Carlo Ermes Visconti,[14] cas. CC, fasc. 3

---

[11] Si tratta della Raccolta Milanese di Storia, Geografia ed Arte che si pubblica a Milano, ove è fondata dallo stesso Beltrami, per soli due anni (1887-1888) sotto la direzione di Gentile Pagani, direttore dell'archivio storico civico.

[12] L'indicazione del giorno è mancante nel documento.

[13] Nel febbraio del 1888 il parroco della chiesa di S. Satiro, Carlo Locatelli, promuove presso i milanesi una sottoscrizione per il restauro della cappella ottagonale progettata da Bramante; ad integrare i membri della Fabbriceria, cui è delegata la cura dell'edificio, viene istituita una commissione che include, oltre agli avvocati Gaetano Agnelli e Natale Zucchi, lo stesso Visconti, cfr. AVSV, cas. 115, fasc. 1888. Si apprende da qui che la commissione aveva il compito di vigilare sui restauri «del lato esterno della cappella della B.V. Addolorata» secondo il progetto dell'architetto ingegnere Enrico Strada, fabbriciere, e la vigilanza dell'architetto Augusto Guidini. Beltrami viene interpellato; assolve un compito istituzionale come Delegato Regionale per i Monumenti della Lombardia alimentato da interessi di studio sulle figure di Bramante, Bramantino e Bergognone. Nel suo archivio sono state censite non solo la copia della circolare di sottoscrizione ma anche appunti autografi sull'edificio, sulle pitture ivi presenti e annotazioni, anche di molto successive, delle consultazioni d'archivio sul tema, Raccolta Beltrami, B III, 33; B IV, 1; C III, 27.

[14] Su carta intestata 'Ministero dell'Istruzione. Direzione Generale delle Antichità e Belle Arti'. Beltrami in quel momento è Delegato Regionale per i Monumenti della Lombardia, cfr. Grifoni 1992, 282.

Caro Visconti

Leggo nei giornali di costì la relazione del banchetto dato in onore del Brentano e il riassunto del discorso da te pronunciato in tale circostanza. Delle parole gentili a mio riguardo ti ringrazio di cuore, perché mi sono di conforto nel faticoso compito che mi sono imposto di digerire nel silenzio e con cristiana rassegnazione il verdetto del Giurì.[15] Credimi sempre tuo aff. Luca Beltrami.

doc. 8 - 1889, novembre 9: Luca Beltrami a Carlo Ermes Visconti,[16] cas. CC, fasc. 3

Chiede notizie sul trasporto della porta di Corso Magenta[17] e avvisa di 'ritrovamenti' alle Grazie.

doc. 9 - s.d. ma ante 1890, febbraio 2,[18] Luca Beltrami a Carlo Ermes Visconti, cas. CC, fasc. Autografi

Chiede che, come lui, anche l'amministrazione della Fabbrica del Duomo respinga la richiesta di illuminare il Duomo nel periodo di Carnevale.[19]

doc. 10 - 1890, febbraio 2: Luca Beltrami a Carlo Ermes Visconti, cas. CC, fasc. Autografi

---

15 Si tratta ovviamente del Giurì del concorso di 2° grado per il completamento della facciata del Duomo di Milano il cui verdetto è reso pubblico il 27 ottobre 1888. La lettera ufficiale con cui gli Amministratori della Veneranda Fabbrica, Carlo Ermes Visconti, Cesare Ajroldi ed Emilio Borromeo, informeranno Beltrami dell'esito è del 14 novembre 1888, cfr. Raccolta Beltrami, A IV, 33. La lettera trascritta conferma l'immediata reazione di Beltrami; il banchetto dato in onore di Brentano e il discorso di Visconti risalgono infatti al precedente giovedì, 18 ottobre, cfr. La Perseveranza, 20 ottobre 1888. Visconti a sua volta risponderà a Beltrami il successivo 1° novembre, cfr. Raccolta Beltrami, A IV, 33.

16 Su carta listata a lutto.

17 Tra il 1881 e il 1904 l'area intorno alla chiesa delle Grazie è interessata da un intervento di isolamento che include l'apertura di via Caradosso ad est dell'edificio, cfr. Bortolotto, Massari 1992. Nel corso dei lavori si rinvenne un canale di fognatura realizzato con marmi e lapidi antiche. Beltrami studiò con Vincenzo Forcella i pezzi pubblicando, in particolare, proprio i rilievi del presunto lavabo citato nella lettera; Beltrami, Forcella 1989, 959-965.

18 Si data in rapporto al successivo doc. 23.

19 cfr. AFD, VII, 548 per la risposta, negativa, che daranno anche gli Amministratori della Veneranda Fabbrica.

Sull'illuminazione del Duomo nel periodo di Carnevale conferma il diniego prefettizio.

doc. 11 - s.d. ma ante 1890, novembre 18:[20] Luca Beltrami a Carlo Ermes Visconti,[21] cas. CC, fasc. 3

Raccomanda il figlio di Bardeaux[22] candidato ad un posto presso la Cassa di Risparmio e chiede di intercedere presso Annoni.[23]

doc. 12 - 1892, febbraio 9: Luca Beltrami a Carlo Ermes Visconti, cas. CC, fasc. 2

Allude alla 'resurrezione' di un una certa Commissione.

doc. 13 - 1892, aprile 8: Giovanni Celoria a Carlo Ermes Visconti,[24] cas. CC, fasc. 1

Ringrazia per le informazioni ricevute sul Museo di Storia Naturale.

doc. 14 - 1892, giugno 30: Milano**,** Giunta Municipale del Comune di Milano a Carlo Ermes Visconti - Lettera circolare n. 44006-515 Rip. VI, cas. CC, fasc. 5

[20] La datazione è dedotta dall'intestazione della carta. Vedi nota seguente.

[21] Al verso del cartoncino è presente la dicitura 'Arch. Luca Beltrami/Professore presso il R. Istituto Tecnico Superiore'. Si ricorda che Beltrami subentra ad Archimede Sacchi (deceduto il 21 luglio 1886) nel ruolo di professore Straordinario di architettura pratica con decreto regio 4 novembre 1887; già nel corso del 1886 però lo suppliva. Rassegnerà le dimissioni dal Politecnico il 18 novembre 1890; Ricci 1997, 149.

[22] Verosimilmente Carlo Bardeaux, economo della Consulta del Museo Patrio di Archeologia.

[23] Il conte Aldo Annoni (1831-1900), Senatore del Regno, era in quel momento presidente del Consiglio di Amministrazione della Cassa di Risparmio oltre che consigliere municipale, cfr. *Atti parlamentari* 1900.

[24] Giovanni Celoria (1842-1920) è da poco assessore del riparto VI subentrato a Visconti nel 1889, cfr. Janiro 1979.

Illustrissimo Signore

Nella imminenza della consegna al Comune, per parte dell'Autorità militare, dell'intero fabbricato costituente il Castello si rende manifesta la necessità nell'Amministrazione municipale di provvedere per tempo alle diverse destinazioni a darsi a quel vasto e istorico edificio, epperò la Giunta è venuta nell'avviso di costituire una nuova ed unica Commissione nella quale concentrando anche gli elementi delle diverse che prima d'ora erano state a tale scopo create, avesse per iscopo [sic] di studiare:

I. In quali modi utilizzare l'edificio del Castello col destinarne le varie sue parti ad accogliere:
a) L'Archivio storico municipale e la Società Storica Lombarda;
b) Il Museo patrio d'archeologia;
c) Il Museo artistico municipale con l'annessa Scuola superiore d'arte applicata all'industria;
d) Il Museo civico del Risorgimento;
e) Il Corpo di musica municipale e le annesse Scuole Popolari di musica.
II. Se il ristauro [sic] interno ed esterno delle diverse parti costituenti il Castello possa svolgersi ed attuarsi parallelamente alla utilizzazione graduale delle singole parti.

Nella sua seduta del 27 corrente la Giunta municipale deliberava la costituzione della Commissione colle persone seguenti:

Marchese Carlo Ermes Visconti, conservatore del Museo artistico municipale e della Scuola superiore d'arte e membro della Commissione del Museo del Risorgimento, quale Presidente;

Architetto Luca Beltrami, Deputato del Parlamento, Ispettore[25] Regionale dei monumenti nazionali in Lombardia;

Nobile Carlo D'Adda, Presidente della Commissione del Museo del Risorgimento;

Colonnello Enrico Guastalla, membro della Commissione suddetta;

Conte Emilio Belgiojoso, membro delegato della Consulta del Museo archeologico;

Marchese Emilio Visconti Venosta, Presidente della Regia Accademia di belle arti;

Nobile Felice Calvi, Vice Presidente della Società storica lombarda e membro della Commissione del Risorgimento;

Avvocato Emilio Seletti, Segretario della Società storica lombarda;

Cavaliere Antonio Besana, Direttore del Consiglio d'amministrazione del Corpo di musica municipale;

Cav. Gaetano Frizzoni, storico dell'arte;

---

[25] Erroneamente indicato poichè l'esatta qualifica è Direttore (Delegato) compito di cui è incaricato il 31 ottobre 1885. Fuorviante, più avanti nel testo, anche l'indicazione del nome di Frizzoni, più correttamente da intendersi Gustavo.

conte Aldo Annoni, Senatore del Regno, Consigliere comunale;
Comm. Tullo Massarani, Senatore del Regno, Consigliere Comunale;
Nobile Gerolamo Sala, Consigliere comunale;
Quale Segretario il Nob. Dr. Giuseppe Luini, Segretario municipale.
+ Rosmini avv. Comm. Enrico

Nel dare communicazione [sic] alla S.V. Illustrissima della di Lei nomina a Presidente della Commissione in discorso, la Giunta nutre viva lusinga che V.S. sarà per accettare cortesemente tale ufficio ed in tale fiducia si riserva di farle conoscere quando avrà luogo e dove la prima convocazione della Commissione.

Aggradisca, Illustrissimo Signore, l'attestato del mio distinto ossequio. Pel Sindaco Fano.

Minuta di risposta in data 1 luglio 1892

Illustrissimo Signor Sindaco

Ho accolto con gioia l'annuncio ~~che~~ ~~Ella~~ ~~ha~~ datomi dalla S.V.I. colla nota 30 giugno n. 44006-515 Rip. VI. che l'On. Giunta Municipale mi ha chiamato a fare parte di una Commissione per la destinazione dei locali del Castello a scopo scientifico ed artistico, vedendo in tale atto della rappresentanza comunale un primo e serio passo alla realizzazione di un progetto che accarezzo da parecchi anni e che ha subito nel mio pensiero tutte le fasi delle cose fortemente amate e desiderate. E però accetto non solo senza reticenza ma con vera gratitudine tale nomina. ~~Ma~~ Altrettanto non posso dire per la designazione della Presidenza di detta Commissione nella mia persona, ~~innanzi tutto~~ prima perché ~~non solo alcuni ma~~ tutti gli egregi membri che mi furono ~~designati~~ dati compagni mi soverchiano per posizione e per competenza ~~ed anche perché~~ poi - Lo confesso perché nella parte assegnatami di regolatore delle opinioni altrui ~~mi~~ vedo preclusa la via ad ~~far valere~~ esprimere le mie nell'argomento. Colla maggiore considerazione. Devot.o C. E. Visconti.[26]

doc. 15 - 1892, novembre 8: Giovanni Celoria a Carlo Ermes Visconti,[27] cas. CC, fasc. 1

Accordi per convocare la commissione per il Castello.

[26] Le cancellature sono nel testo.

[27] Su carta intestata 'Municipio di Milano'.

doc. 16 - 1892, novembre 9: Milano, Il Sindaco del Municipio, Giuseppe Vigoni a Carlo Ermes Visconti. Lettera n. 44006/515 Rip. VI,[28] cas. CC, fasc. 5

Convocazione della commissione per il Castello.

doc. 17 - 1892, novembre 17: Milano, Il Sindaco del Municipio, Giuseppe Vigoni a Carlo Ermes Visconti. Lettera n. 44006/515 Rip. VI,[29] cas. CC, fasc. 5

Invia lascia passare per accedere al Castello.

doc. 18 - 1892, novembre 22: Milano, D. Luini a Carlo Ermes Visconti, cas. CC, fasc. 5

Illustrissimo Presidente

Ho mandato stamane a Brera per ritirare i disegni del Castello, ma venne risposto da quelli dello studio Beltrami[30] che non avevano ordine, che però indicando loro quali disegni occorrevano al Municipio avrebbero procurato di farli avere. Cosa faccio? Non sarebbe miglior partito scrivere direttamente al Deputato a Roma?[31]

Attendo i tuoi pregiati ordini e mi dico Devotissimo D.G. Luini.

[E' allegata la seguente nota in altra grafia]

Locali occorrenti per la sede del Corpo di musica e per le Scuole popolari di musica.
n. 1 locale per la direzione da m. 4x4 circa
n. 1 locale per la Cancelleria e Copisteria da m. 4x5 circa
n. 1 locale per l'archivio e Biblioteca da m. 7x8 circa
n. 1 locale grandissimo per le ripetizioni del Corpo di musica da m. 12x12 circa
n. 5 locali per le scuole d'istrumenti da m.3x4 cad. circa
n. 3 locali per le scuole di canto corali da m. 10x12 circa cadauno
n. 12

[28] Su carta intestata 'Municipio di Milano'.
[29] Su carta intestata 'Municipio di Milano'.
[30] Si tratta dell'Ufficio Regionale che Beltrami dirige dal 1 ottobre 1891 e il cui nome evidentemente basta ad identificare l'ufficio, cfr. Bellini 1997b, 100.
[31] Il Deputato in questione è Luca Beltrami, cfr. Bellini 1997b, 110.

N.B. Nel locale della Direzione si potrebbe collocare la Biblioteca ed in quello della Cancelleria e Copisteria l'Archivio, purché siano più grandi delle misure segnate sopra. Il locale per la ripetizione del Corpo di musica potrebbe servire per un corso sia maschile che femminile della Scuola di canto corale. Percui anziché 12 locali potrebbero essere sufficienti 9 locali, senza tener conto dei locali occorrenti per il portiere - custode e per il magazzeno che in tutto ce ne vorrebbero altri 4 da circa m. 4x4 cadauno. Allievi ed allieve delle Scuole n. 375. Musicanti e coristi 60. [Totale] 435.

doc. 19 (289) -1892, dicembre 2: Milano, Gaetano Moretti a Carlo Ermes Visconti,[32] cas. CC, fasc. 5

Accusa ricevuta delle tavole planimetriche del Castello.

doc. 20 (270) - 1892, dicembre 16: Luca Beltrami a Carlo Ermes Visconti, cas. CC, fasc. 1

Ricorda un quadro raffigurante il Castello in possesso del commendatore Fuzier,[33] ora deceduto, e già riprodotto da Carlo Casati[34] e chiede di interessarsi per l'acquisto da parte del Municipio.

doc. 21 - 1892, dicembre 24: Luca Beltrami a Carlo Ermes Visconti, cas. CC, fasc. 5

Caro Visconti

Sono a Milano da jeri e sino al 10 gennaio non ho alcun impegno d'importanza per cui tu potrai disporre liberamente per la convocazione della Commissione del Castello. Auguri sinceri a te e a tutta l'egregia tua famiglia dall'aff. L. Beltrami.

[a margine:] Ho visto che l'eredità Fuzier è in mano dell'avv. Cologna e avv. Garavaglia per cui sarà possibile assicurare il quadro del Castello.[35]

---

[32] per esteso: Gaetano Moretti p. il Direttore dell'Ufficio Regionale per la conservazione dei Monumenti di Lombardia all'Ill.mo Signor Visconti marchese Carlo Ermes, Presidente della Commissione Municipale per il Castello di Milano.

[33] Si tratta del commendatore Luigi Fuzier deceduto il 13 dicembre 1892, La Perseveranza, 15 dicembre 1892.

[34] Si allude a Casati 1876. Per i contenuti del volume, anche in rapporto alla storiografia sul castello, cfr. Di Biase 1997, 37.

[35] Con testamento 15 dicembre 1888 in atti del notaio Stefano Allocchio di Milano, Luigi Fuzier aveva espresso la volontà «che tutti gli oggetti di arte antica e

doc. 22 - 1892, dicembre 28: Il Presidente Carlo Ermes Visconti a Carlo Ermes Visconti da Milano - Lettera circolare n. 91536-953 Rip. VI,[36] cas. CC, fasc. 5

La Commissione istituita per gli studi di collocamento nel Castello di varie istituzioni cittadine viene convocata in adunanza pel giorno di Martedì 3 Gennaio p.v. alle ore 3 pom. al civico palazzo Marino nella Sala della Soprintendenza Scolastica.

La S.V. Ill.ma qual'altra dei componenti la Commissione suddetta è pregata del suo intervento a detta adunanza. Il Presidente C.E.Visconti.

doc. 23 - 1893, gennaio 5: Luca Beltrami a Carlo Ermes Visconti da Milano,[37] cas. CC, fasc. 5

Caro Visconti

Siccome probabilmente dovrò fare una corsa a Roma presto, così sarebbe bene che prima di partire ci trovassimo coll'arch.o Arcaini[38] per dare a questi le istruzioni. Se quindi domani, venerdì o sabato verso le 10 ant. ti fa comodo di passare all'Ufficio qui a Brera ci troverai: oppure fissaci un'altra ora di tuo comodo. Aff.o Beltrami.

doc. 24 - 1893, gennaio 11: D.G. Luini a Carlo Ermes Visconti da Milano, cas. CC, fasc. 5

Informa che l'autorità militare intende concedere spazi in Castello ad uso della commissione incaricata di valutare la prossima destinazione d'uso dell'edificio.

---

moderna da lui posseduti in Milano fossero venduti, per asta pubblica, entro un anno dalla sua morte, e il ricavo netto destinato in parti eguali a quattro Istituti da lui designati». Tra i beneficiari del lascito vi fu la Società d'Incoraggiamento d'arti e mestieri di Milano che fu autorizzata ad accettare la somma ricavata il 19 marzo 1893, in *Gazzetta* 1893, 1674.

[36] Su carta intestata 'Municipio di Milano'.

[37] Su carta intestata 'Ufficio Regionale per la conservazione dei monumenti della Lombardia'.

[38] Si tratta di Raineri Arcaini 'rappresentante' dell'Ufficio Regionale, la cui presenza nell'ufficio è registrata, come disegnatore, solo a partire dal 1896, cfr. Grifoni 1992, 293. Il documento dunque chiarisce già da questa data oltre a questo ruolo, anche quello, se pure ufficioso, di vigilanza dei lavori.

doc. 25 - 1893, gennaio 18: D. Luini a Carlo Ermes Visconti da Milano,[39] cas. CC, fasc. 5

Trasmette convocazione del Sindaco per discutere di una parziale occupazione di locali in Castello.

doc. 26 - 1893, gennaio 21: D. Luini a Carlo Ermes Visconti da Milano,[40] cas. CC, fasc. 5

Informa degli avvenuti accordi con l'autorità militare per occupazione locali del castello ad uso della Commissione.

doc. 27 - 1893, gennaio 25: D.S. Luini a Carlo Ermes Visconti da Milano, cas. CC, fasc. 5

Avvisa che ha preso possesso, ad uso della commissione, del locale n. 54 in Castello.

doc. 28 - 1893, gennaio 31: Rainieri Arcaini a Carlo Ermes Visconti da Milano,[41] cas. CC, fasc. 5

> Egregio Signore
>
> E' necessario avvertire d'urgenza e d'ufficio l'Imp.a Bonomi[42] di risparmiare nelle demolizioni del Muraglione N-O la parte antica ora scoperta, e che Ella ben conosce. Per conto nostro ordinaj all'Ass.e dell'Impresa di puntellare tosto le mensole spezzate per evitare che cadano per gli effetti delle prossime mine. Il rappresentante dell'Ufficio Regionale a cui fu fin d'ora affidata l'operazione dei rilievi e la protezione delle opere antiche che si rinvengano nelle demolizioni, dovrebbe avere facoltà di ordinare l'immediata sospensione delle demolizioni delle parti che si devono conservare; e questo per evitare qualunque indugio che potrebbe compromettere l'esistenza di una preziosa costruzione; se si deve tener conto anche che queste demolizioni vengono eseguite a cottimo da operai che torna lor conto di celare qualunque indizio che possa loro incagliare il procedere del lavoro. Con distinta stima. Dev. R. Arcaini arch.to.

---

[39] Per esteso: D.r. Luini, segretario, all'illustrissimo sig. Marchese Carlo Ermes Visconti. Su carta intestata 'Comune di Milano. Soprintendenza Scolastica'.

[40] Su carta intestata 'Municipio di Milano'.

[41] Su carta intestata 'Ufficio Regionale per la conservazione dei monumenti della Lombardia'.

[42] Si tratta della ditta Bonomi appaltatrice delle opere di demolizione. In merito ai contenziosi insorti con la ditta, alle rimostranze di Arcaini e ai commenti di Beltrami stesso nella successiva costruzione della torre Umberto I, cfr. Biase 1997, 51-52 e Raccolta Beltrami, A IV, 5.

doc. 29 - 1893, marzo 27: Luini, segretario della [...][43] a Carlo Ermes Visconti Milano,[44] cas. CC, fasc. 5

Lo convoca ad una prossima seduta della Commissione per l'assegnazione dei locali in Castello.

doc. 30 - 1894, febbraio 19: Luca Beltrami a Carlo Ermes Visconti, cas. CC, fasc. 3

Caro Visconti

Desidererei che tu avessi ad esaminare da vicino i lavori della merlatura del torrione: la mia voce vale poco presso il Sindaco: forse tu potresti ottenere che si provveda a fare un lavoro un poco più decente. Ti saluto aff. Beltrami

doc. 31 - 1894, agosto 4: Giovanni Celoria a Carlo Ermes Visconti, cas. CC, cronologia castello

Rende, ringraziando, i manoscritti riguardanti pratiche e studi sul Castello.

doc. 32 - 1894, ottobre 16: Luca Beltrami[45] a Carlo Ermes Visconti, cas. CC, fasc. 3

In merito ad una richiesta di locali avanzata dalla Regia Accademia di Brera esprime anch'egli parere favorevole.

doc. 33 - 1894, ottobre 26: Il Com. straordinario del [...] a Carlo Ermes Visconti Milano, cas. 116.

Approssimandosi la chiusura delle Esposizioni Riunite chiede di convocare la Commissione per il Castello.

doc. 34 - 1894, novembre 28: Luca Beltrami a Carlo Ermes Visconti,[46] cas. CC, fasc. 3 (*Fig. 1*)

---

[43] Mancante nel documento.

[44] Su carta intestata 'Municipio di Milano. Ufficio Commissione Castello'.

[45] Su carta intestata 'Ufficio Regionale per la conservazione dei monumenti della Lombardia'.

[46] Su carta intestata 'Ufficio Regionale per la conservazione dei monumenti della Lombardia'.

Caro Visconti

Fui oggi in Castello dove vidi il Müller[47] nella Sala della Torre che ha trovato il principio della decorazione della volta, costituito da grossi tronchi d'albero. Egli mi accennò che per conservare la decorazione occorre molto fissativo,[48] lasciandomi capire che la spesa sarebbe di qualche centinajo di lire per tutta la sala: mi accennò pure alle spese già incontrate da lui pel Castello. Non ti pare che si potrebbe vedere il modo di scaricare il Müller da quelle spese materiali che egli deve incontrare a vantaggio del monumento. Io potrei fare qualcosa col fondo dell'Ufficio, se anche il Comune vi concorresse. Ti dico ciò perché avendo occasione di andare in Castello potresti tu pure discorrerne col Müller e poi vedere in che modo provvedere. Cordiali saluti aff. L. Beltrami.

doc. 35 - 1894, dicembre 26: Luca Beltrami a Carlo Ermes Visconti,[49] cas. CC, fasc. 3 (*Fig. 2*)

Caro Visconti

Il D.r Müller ha trovato delle tracce importanti di pitture nella Sala del Tesoro (Rocchetta) anteriori a Lod.o il Moro - maniera di V. Foppa. Cordiali saluti e auguri aff. L. Beltrami.

doc. 36 - s.d.: Luca Beltrami a Carlo Ermes Visconti, cas. CC, fasc. 2 Accordi per sopralluogo in Castello con Gaetano Moretti.

47 Paul Müller-Walde (1858-1931) per la cui figura si veda Costa 2006. Per il restauro della Sala della Asse cfr. ora Catturini 2013 con bibliografia precedente tra cui, in particolare, Fiorio, Lucchini, 2007.

48 Sottolineato nel testo.

49 Su carta recante la riproduzione del disegno del fronte del Castello di Milano.

PREVISIONI INCERTE DECISIONI DIFFICILI

ELISA GUAGENTI GRANDORI (*)

Nota presentata dal m.e. Giannantonio Sacchi Landriani
(Adunanza del 22 maggio 2014)

SUNTO. – Si considerano rischi con piccole e incerte probabilità di accadimento e gravi possibili danni conseguenti. Si espone a grandi linee un criterio utile a giudicare la credibilità di un modello previsionale e a vagliarne il confronto con altri possibili modelli in competizione. Si mettono in evidenza le principali componenti del processo conoscitivo-decisionale da mettere in atto per la difesa dai suddetti rischi, con particolare attenzione alla procedura decisionale. Si accenna alla efficacia della previsione a breve termine e alla scelta del rischio accettabile. Si danno esempi applicativi per alcuni casi di terremoti, frane, inquinamento.

***

ABSTRACT. – This work focuses on decision problems concerning risk reduction in the case of catastrophic events, which are scarsely predictable but associated to severe expected damage. A cryterium is outlined in order to judge the relative credibility of competing models. The knowledge-decision process is dissected in its components. The steps of the procedure from knowledge to final decision are analyzed. The effectiveness of short-term prediction and the choice of the acceptable risk are also discussed. A few case studies, related to earthquakes, landslides and pollution, are exposed.

Ho condiviso la vita con Giuseppe Grandori e anche parecchi passi della ricerca scientifica. Desidero ripercorrerne qualche pensiero, che ancor oggi può contenere utili indicazioni per le difficili decisioni che devono basarsi su previsioni molto incerte.

(*) Politecnico di Milano, Italy.
E-mail: elisa.guagenti@polimi.it

Il titolo, al fine di esprimere non solo aspetti problematici, dovrebbe essere più lungo: "Ricerche esistono, utili anche a livello operativo, per accordare un certo grado di credibilità a previsioni incerte, e per rendere sostanzialmente accettabili decisioni difficili". L'argomento: i grandi rischi.

Il rischio e le strategie di difesa

L'argomento da noi affrontato riguarda specificamente la difesa dal rischio sismico. Ma le caratteristiche del problema sono comuni alla difesa da tanti rischi cui oggi siamo esposti e di cui poco sappiamo. Si tratta di grandi rischi dovuti a eventi che hanno piccole probabilità di manifestarsi, per di più incerte, ma che possono provocare ingenti danni.

La nostra società, cosiddetta post-industriale, è così attanagliata da simili problemi da essere addirittura definita come "società del rischio" (1). Rischi che tipicamente sono implicati dai problemi complessi nati con le potenti tecnologie. Basti pensare all'uso del nucleare o alle trivellazioni nel profondo degli oceani cui in tempi recenti si sono accompagnate tragedie di enorme portata come la tragedia nucleare del Giappone o il gravissimo inquinamento delle acque e delle coste oceaniche. Ma sono anche rischi antichi, oggi aggravati dagli interventi umani, come quelli implicati da terremoti, frane, inondazioni, storicamente accettati come catastrofi naturali e oggi faticosamente entrati nel dominio dell'approccio razionale della ricerca scientifica.

Le decisioni inerenti sono estremamente difficili. Esse infatti coinvolgono aspetti di ricerca e di raccolta di informazioni, storiche e attuali, tipicamente in campi poco esplorati; scelte discrezionali di pesatura di diversi obiettivi tra diversi possibili corsi d'azione.

Cosicchè facilmente può accadere che i dibattiti attorno alle possibili decisioni avvengano secondo pregiudizi piuttosto che secondo analisi argomentate. Sovrapponendo e mescolando conoscenze e decisioni, quando non addirittura opinioni e decisioni.

Intento di questo scritto è, appunto, porre in evidenza la diversa natura delle varie componenti del processo conoscitivo-decisionale concernente i grandi rischi, e i metodi per una loro ragionata e affidabile integrazione.

Parte essenziale di tale processo è il calcolo del rischio. Esso, nella sua stessa definizione, implica le probabilità. Detto in parole, il rischio

è *la possibilità* che il sistema sia esposto a eventi più violenti di quelli che esso può sopportare. Espresso come calcolo, il rischio consegue alla trattazione congiunta della *pericolosità* del fenomeno catastrofico e della *vulnerabilità* del sistema esposto. La modellazione di entrambe le componenti si avvale di conoscenze fisiche che non sono in generale esaustive e che comunque non escludono situazioni estreme con piccolissime probabilità di accadimento. Particolarmente complessa e affetta da incertezze è perciò la modellazione di pericolosità, generalmente nota come *hazard assessment*. Essa fornisce la previsione dell'accadimento, cercando di rispondere alle domande: dove, quando, con che violenza si produrranno i prossimi eventi? Con quali caratteristiche locali, e come se ne diffonderanno gli effetti? La modellazione di vulnerabilità fornisce la risposta del sistema (in termini di danno) all'evento catastrofico. Il calcolo del rischio consiste nella valutazione della probabilità di un dato livello di danno al sistema, in un certo periodo di tempo; danno atteso, secondo la previsione dell'accadimento e la vulnerabilità del sistema esposto. Calcolo affetto, inevitabilmente, da incertezze.

E' senz'altro questa, ora descritta, la prima importante fase del processo conoscitivo-decisionale, fase che nel suo insieme chiameremo di modellazione (a volte semplicemente modello). Ma altre due essenziali componenti si riconoscono nel processo: la procedura decisionale, che valuta, accanto al rischio, le incertezze di modellazione, altre informazioni di contorno, costi e benefici per diverse alternative decisionali e per diversi obiettivi; e, solo infine, la terza componente: la decisione a tutela dal rischio. Le prime due, modellazione e procedura decisionale, di carattere analitico-conoscitivo; la terza, la decisione che viene assunta a tutela dal rischio, di carattere politico, nel senso di scelta fra alternative possibili.

Ricorriamo a un banale e famigliare esempio di processo decisionale in cui riconoscere le tre componenti suddette. Decidere se prendere o no l'ombrello in caso di pioggia prevista. La parte analitico-conoscitiva è affidata alle osservazioni da satellite, alla modellazione matematica del movimento dei venti e delle nuvole, al complesso di studi meteorologici che porta alla definizione di probabilità di pioggia (il calcolo del rischio è palesemente inessenziale nel caso di normali piogge). La procedura decisionale, pur non esplicitata, consiste in effetti nella consapevolezza di sé, se siamo prudenti nel volerci cautelare da un raffreddore oppure se siamo poco vulnerabili o addirittura tipi da

"Singing in the rain", felici di bagnarci sotto la pioggia; nell'interpellare forse per consiglio un familiare con un "che ne dici?"; nell'accordare maggiore o minore credibilità alla previsione. La decisione infine, se prendere l'ombrello oppure no, è una scelta, non direttamente implicata dal bollettino meteo.

Si è voluto mettere in particolare evidenza la seconda componente, la procedura decisionale, che pur di solito decorre implicitamente, proprio perché la decisione dipende da tale procedura, dalle sue valutazioni, tenuto conto dell'informazione meteorologica. Ed è proprio quella che manca come sostegno alle direttive ufficiali. E' ben vero che oggi, nel caso di rischi prodotti dall'uomo, vengono assegnate soglie ammissibili per l'accettazione del livello potenzialmente dannoso, cioè della pericolosità. Ma, in assenza di giustificazione decisionale, tali soglie son quello che Ulrich Beck chiama "l'imbroglio dei valori massimi consentiti". Secondo le sue parole, per l'emissione di sostanze tossiche nell'aria nell'acqua negli alimenti, i legislatori "ammettono le emissioni e, nello stesso tempo, le legittimano all'interno dei limiti stabiliti". E l'Autore aggiunge parole severe a proposito della mancanza di criterio decisionale: "Le piante, gli animali e gli uomini tollerano un poco grande o un poco piccolo di veleno? Cosa significa tollerare? Sono questi i simpatici problemi da incubo prodotti dal calderone tossico della civiltà progredita, i problemi con cui si ha a che fare quando si stabiliscono i valori massimi consentiti".

Anche nelle trattazioni tecniche la procedura decisionale non viene usualmente esplicitata. Esse giungono alla previsione e, nemmeno sempre, alla valutazione esplicita del rischio. Ciò favorisce l'errore di considerare la valutazione del rischio, a volte solo la previsione, come esaustiva ai fini della decisione. Peraltro, anzi vorrei dire come conseguenza, il giudizio sulla decisione che viene adottata è sovente polemica fra posizioni contrapposte: nucleare sì, nucleare no; tav sì, tav no; idem per l'allerta sismico e per altre analoghe situazioni.

Si potrebbero invece formulare giudizi argomentati alla luce della procedura decisionale che esplicitasse costi e benefici in funzione della vulnerabilità del sistema esposto e degli obiettivi da privilegiare, come si è voluto evidenziare nel banale esempio della pioggia. Se ne farà riferimento relativamente a problemi reali.

Tornando intanto al caso della pioggia, si riscontra che non abbiamo elementi per giudicare isolatamente la decisione finale. Non giudicheremo per esempio di per sé errata la decisione "non ombrello in

caso di pioggia". Se infatti l'individuo considera se stesso poco vulnerabile o se addirittura ama cantare sotto la pioggia, ha perseguito bene il suo obiettivo.

Questa banale osservazione vorrebbe sottolineare l'importanza della procedura decisionale esplicitata per capire e giudicare se una decisione sia *giusta* o no, cioè coerente con le analisi e argomentazioni svolte. Favorirebbe, nel caso di protezione dai grandi rischi, l' adozione di decisioni che siano capite e condivise. Quel che fornisce elementi per giudicare una decisione è proprio la procedura decisionale. Non è la decisione in sé, con il senno di poi, da giudicarsi giusta o sbagliata. Il giudizio va spostato all'indietro*, dalla decisione alla procedura che la sostiene*.

Infine, sempre nell'intento di analizzare e capire la responsabilità delle varie fasi del processo, l'affermazione "previsione smentita dai fatti", che pur accade di sentire, non andrebbe usata. La previsione infatti non afferma se l'evento accadrà oppure no. Ne misura la probabilità di accadimento. Non esclude quindi che un evento previsto con alta probabilità in effetti non accada. Ed è anche per questo che le decisioni, specialmente quelle implicanti alti costi sociali, vanno argomentate.

Veniamo alla protezione dai grandi rischi. Pensiamo a terremoti, frane, inquinamento di cui sono in grado di accennare a qualche esempio applicativo nel senso: modellazione-procedura decisionale- decisione.

A differenza dai fenomeni meteorologici, oggi ben prevedibili con sistemi di equazioni e osservazioni da satellite, per altri fenomeni, tipicamente per gli eventi sismici, la dinamica del loro accadimento è talmente complessa da non poter essere imbrigliata nelle equazioni predittive di un sistema dinamico. La modellazione è affidata all'interpretazione probabilistica sia delle conoscenze fisiche disponibili, sia delle informazioni storiche. Tali interpretazioni comportano inevitabili, anche notevoli, incertezze. Peraltro piccole sono generalmente le probabilità di accadimento del fenomeno, mentre sono gravissimi i danni possibili al sistema esposto. Per quanto riguarda la seconda componente del processo decisionale, che abbiamo chiamato procedura decisionale, di rado essa viene esplicitamente trattata, mentre sarebbe particolarmente utile a giustificare la decisione che verrà adottata, viste le incertezze su cui la decisione si dovrà basare. Per quanto riguarda la terza componente del processo decisionale, l'adozione di una strategia di difesa, mancando la sua giustificazione e implicando essa stessa disagi e sofferenze (si pensi alle decisioni di evacuazione), spesso non viene accettata senza contrasti, sia fra gli esperti che fra la cittadinanza.

Nascono con ciò due questioni tipicamente connesse al tema dei grandi rischi, che riguardano proprio la procedura decisionale.

1) Il tema è discorso strettamente scientifico o da aprirsi a pubblico dibattito?
2) Le incertezze possono essere misurate? O, in termini complementari, può essere definito un grado di credibilità alle previsioni?

La dimensione dei danni coinvolti è a volte spaventosa. I danni sono spesso sofferti da tutta la popolazione negli aspetti ordinari e quotidiani dell'esistenza. Che la popolazione si senta coinvolta è fatto ben comprensibile, ma è anche auspicabile che lo sia, secondo il parere argomentato e gli studi di molti autorevoli scienziati (2,3,4,5). È anche parere di chi scrive. Tali problemi di rischio, e soprattutto la messa in atto di strategie di difesa preventiva, necessitano della partecipazione e della consapevolezza della cittadinanza. Ciò sia perché in mancanza di una completa conoscenza, è proprio la cittadinanza che può fornire una rete di prezioso monitoraggio minuto e diffuso che affianchi e arricchisca il monitoraggio tecnico, sia perché le strategie da mettere in atto possono, sì, essere razionalmente e scientificamente affrontate, ma sono tutt'altro che oggettivamente e univocamente conseguenti a teorie certe e a informazioni esaustive. Per esse la scelta discrezionale è ampia. Si presenta, pertanto, anche il compito non facile ma necessario di una corretta divulgazione informativa. Compito particolarmente difficile perché occorre far capire che qualunque decisione non può annullare il rischio, ma solo ridurlo: questo significa "mettere in sicurezza". Difficile perché occorre anche saper diffidare da consensi non basati su conoscenza (6). Difficile perché occorre inevitabilmente implicare concetti probabilistici, purtroppo non familiari alla nostra cultura, che, neppure in ambito alto, è sempre disposta a accettarli, quasi che solo il metodo deterministico possa ottenere effettiva conoscenza, o che un'analisi causale e fisica di un fenomeno sia alternativa a una formulazione probabilistica. Le conoscenze fisiche sono invece prezioso elemento da inglobare nell'analisi probabilistica, operando sinergicamente con degli ***e,*** anziché separando polemicamente con degli ***o***.

Difficile non significa ovviamente che non si possa, vorrei dire non si debba, intraprendere un'opera di informazione-formazione-consultazione diffusa. Nella descrizione che qui si è data del processo conoscitivo-decisionale, tale lavoro costituisce una componente della procedura decisionale, analoga (anche se decisamente meno sbrigativa) alle considerazioni che l'individuo della pioggia svolge su di sé e chiedendo il parere del famigliare.

La seconda esigenza, la trattazione delle incertezze, è anch'essa componente della procedura decisionale. Come l'uomo della pioggia, cerchiamo di misurare, in modo meno soggettivo, il grado di fiducia da accordare alle previsioni.

Nella prassi corrente della modellazione probabilistica sono definiti dei livelli di significatività che consentono di giudicare la attendibilità dei risultati (stime, previsioni) prodotti da un modello. Quel che purtroppo spesso accade è che essi giudichino pariteticamente i risultati, anche molto diversi fra loro, provenienti da diversi modelli. Che fare?

Dice G. Grandori: "A volte è stato suggerito di usare un certo numero di modelli e poi adottare come misura dell'incertezza un coefficiente di variazione inteso a includere sia le incertezze statistiche che di modellazione. Questo modo di procedere deve essere pazientemente ma fermamente confutato e scoraggiato. Va notato, innanzitutto, che i risultati ottenuti con diversi modelli non costituiscono un campione casuale di cui abbia significato stimare valor medio e varianza. Inoltre la dispersione dei valori stimati dipende dalla scelta soggettiva dei possibili modelli, e così pure il loro valor medio. Perciò la procedura è formalmente non corretta."

Quel che si può proporre è invece spostare l'attenzione, anche qui all'indietro, *dalla validazione dei risultati alla credibilità del modello* che li produce. L'argomento da noi affrontato ha riguardato i terremoti, ma il metodo si può enunciare in termini generali (7).

Piuttosto che voler "validare" i risultati, si costruisca un banco di prova per il modello. Si metta per così dire sotto processo il modello, nei panni di interprete di una "verità" congetturale. Produca, quella verità congetturale, supposta nota, tramite il modello e il metodo Monte Carlo, un ricco insieme di campioni sintetici, ciascuno di alta numerosità. Così non abbiamo più un solo campione a disposizione, costituito dagli eventi reali, e con pochi eventi, ma tanti campioni e della numerosità desiderata. Possiamo allora costruire la distribuzione campionaria di quella grandezza, chiamiamola A, l'incertezza della cui stima ci assilla; possiamo calcolare la probabilità di errore nella sua stima, secondo il modello adottato. Nell'ipotesi, per ora, che la verità sia proprio quella congetturata. E', questa probabilità, una misura di *credibilità del modello* nei confronti di quella verità. La sua forma analitica è

$$\Delta_r^0 = \Pr\left\{ A^0 - kA^0 < \hat{A}_r < A^0 + kA^0 \right\}$$

dove A^0 è il valore di A nella verità congetturale, $\hat{A}_r$ il suo valore stimato secondo il modello r, k una significativa soglia di errore percentuale. Si ripeta il procedimento con un altro modello, misurando la sua credibilità. Si viene così a instaurare un confronto fra modelli in competizione, che può decidere il vincitore, sempre che la verità sia quella ora presa in considerazione. Il guaio è che l'effettiva verità è sconosciuta. E allora? Che ne facciamo? Ripetiamo il procedimento nei confronti di altre verità congetturali, nel ragionevole panorama su cui al momento la ricerca indaga. Si costruisce così un criterio capace di discernere quale modello, in quali ipotesi, e a quali fini, sia preferibile a un altro. Senza entrare in dettagli sottolineo che tale indagine tiene conto sia delle incertezze statistiche che di quelle epistemiche e valuta la robustezza del modello. Si viene a definire un grado di credibilità per il modello, non in assoluto, ma per la stima di una particolare grandezza, e limitatamente al panorama, pur vasto ma non esaustivo, delle verità scandagliate.

Infine un cenno al problema forse più difficile della procedura decisionale: "how safe is safe enough?" In questa forma è ormai universalmente riconosciuto il problema della scelta del rischio accettabile (8,9,10). A che livello diventa accettabile il rischio residuo, che per quanto piccolo qualsiasi strategia di difesa comporta? Non è ovviamente possibile giungere a regole definitorie, ma è possibile formulare argomenti per scegliere ragionevoli livelli di sicurezza.

Una importante grandezza che serve come primo orientamento è il costo totale di una strategia, comprensivo della sua realizzazione e del costo dei danni futuri che quella strategia comporterà, in senso probabilistico, per via del suo rischio residuo. E' ragionevolmente questa una grandezza da confrontare con l'analogo costo totale della "strategia di non intervento". Ed è utilissimo il confronto, perché spesso si constata che la situazione di fatto è talmente malsicura che addirittura converrebbe, in soli termini finanziari, intervenire a favore della sicurezza. Confronto che lascia quasi in secondo piano la difficile domanda di quale livello di sicurezza perseguire. Ma, deprecabile fermarsi all'analisi economica. Quel che è grandezza principale da valutare è la perdita in vite umane. Si è a volte purtroppo pensato di porre fra i costi anche la perdita di vite umane. Che tale approccio vada accettato o rifiutato non è questione tecnica, ma scelta di impostazione. Val la pena sottolineare l'importanza di tale questione cruciale: "quali variabili siano da analizzare e quali fra esse siano monetizzabili oppure no" non è questione di modellazione o di calcolo. E' preliminare scelta per qualunque strategia.

Sembra molto criticabile la tendenza a voler tutto monetizzare. Gli Economisti stessi hanno speso autorevoli parole sull'argomento.

E mi piace segnalare a questo proposito un fatto minore, che fa sperare in una più estesa sensibilità sull'argomento. Nel mese di febbraio è apparso sul quotidiano *la Repubblic*a a firma Salvatore Settis un articolo che critica, appunto, la tendenza a voler tutto monetizzare (come aveva appena fatto il governo italiano a proposito della cultura), e cita in alternativa un rapporto esemplare, commissionato dal Ministero francese dell'Economia, dal titolo "L' economie de l'immateriel", il quale esegue, sì, valutazioni economiche, ma per analizzare le positive conseguenze di interventi nel campo culturale non certo per monetizzare direttamente la cultura.

Negli esempi che seguono la vita umana è un intangibile, non monetizzabile. La sua salvezza è obiettivo della strategia. Gli effettivi costi monetari fungono da vincoli o da considerazioni collaterali.

Quanto finora esposto ha cercato di inquadrare i problemi che tipicamente si incontrano nell'affrontare il tema dei grandi rischi. Vediamone qualche esempio applicativo.

I TERREMOTI

La credibilità della previsione

Vediamo dapprima come sia stato applicato il citato criterio per superare le incertezze. Per esempio era in discussione se credere o no al modello di "terremoto caratteristico". Secondo tale modello ci sarebbe, da parte della faglia sismica, una certa preferibilità per generare uno specifico terremoto di alta intensità; in tal caso non sarebbe valido il modello esponenziale, che di solito si assume, e che fornisce probabilità di accadimento sempre decrescenti al crescere della magnitudo. Grazie al banco di prova introdotto si è potuto asserire la maggior credibilità del modello di terremoto caratteristico piuttosto che del modello esponenziale. Si è potuto asserirlo, non in assoluto, ma limitatamente alla stima di una particolare preoccupante grandezza (in questo caso un valore critico dell' accelerazione al suolo che interviene nella normativa antisismica). Conclusione limitata, ma importante perché comporta maggior aspettativa di pericolo e suggerisce maggior severità nella normativa antisismica (11).

Analogamente si è proceduto per altri importanti argomenti gra-

vati da incertezze, trattati e risolti con lo stesso metodo: meglio una distribuzione spaziale uniforme degli epicentri zona per zona, o seguire le difformità da catalogo? o ancora: quale numerosità del campione, cioè quanti anni di osservazioni, sono necessari per ottenere un certo grado di credibilità?

La scelta del rischio accettabile

Strumento fondamentale per la difesa dai terremoti è la normativa antisismica. Grazie a essa la vulnerabilità delle costruzioni è drasticamente ridotta. Infatti nelle ultime decadi la ricerca strutturale ha raggiunto un così alto livello di conoscenza del comportamento delle costruzioni in risposta al terremoto da consentire una progettazione con rischio residuo ridottissimo, anche in paesi molto sismici. L'esempio del Giappone è eloquente. Durante terremoti anche molto violenti, gli edifici subiscono vistosi effetti dinamici, ma non crollano. In Italia, la cui situazione sismogenetica comporta terremoti di minor violenza, le costruzioni antisismiche, ma anche costruzioni in cemento armato correttamente costruite secondo la consueta normativa, e perfino diverse costruzioni in muratura hanno dato buona prova, come testimoniato anche a L'Aquila in occasione del terremoto del 2009 (e si potrebbe valutare il rischio, altissimo, del cattivo costruire!).

Alla normativa si è giunti per il progredire della conoscenza del terremoto e dei suoi effetti sugli edifici, non certo per adozione diretta di una soglia di rischio giudicato accettabile. Ma la lettura a posteriori del rischio residuo, che implicitamente viene accettato nella normativa, è preziosa come termine di confronto per operare con opportune strategie di rafforzamento su edifici che non sono a norma. Che in Italia sono molti, sia per la presenza di antichi nuclei abitativi, sia per non corrette pratiche costruttive o per dannose modifiche eseguite su edifici esistenti. Queste situazioni sono note. Esiste anche un accurato lavoro di censimento di tutti gli edifici pubblici in Italia, catalogati con il loro grado di vulnerabilità. Tali conoscenze permettono strategie di adeguamento giustificate da una esplicitata procedura decisionale, e secondo priorità temporali, suggerite dai modelli previsionali cui si è fatto cenno. Questa procedura decisionale, che costituisce importante esempio di quanto si è prima esposto, è stata effettivamente applicata negli anni 90 in Italia per una dettagliata programmazione di interventi in Emilia Romagna (12). Purtroppo non ha ancora avuto esito applicativo.

Un'indagine volta alla scelta di un rischio accettabile si fonda sul *costo marginale di una vita salvata,* concetto introdotto da Grandori negli anni 60. Esso consente non già di scegliere direttamente l'accettabile livello di rischio, bensì di leggere e di confrontare, fra le scelte adottate e adottabili, quanto esse contengano come somma che siamo disposti a pagare per *salvare una vita umana in più* rispetto alla prassi corrente. Grazie a tale concetto, Grandori costruisce un mezzo, applicato già nella prima mappa sismica italiana del 1980, per orientare le scelte e diminuire disomogeneità fra normative esistenti (13).

Previsione a breve termine

La componente previsionale nella difesa dai terremoti ha compito essenziale, se pur non unico, nelle politiche di emergenza da attivare in occasione di un terremoto giudicato imminente. Infatti, la probabilità di un terremoto distruttivo nei prossimi pochi giorni, che normalmente è dell'ordine di 0.0002 nelle regioni sismiche Italiane, si innalza in presenza di certi fenomeni detti appunto precursori. Il più conosciuto fra essi è costituito dal verificarsi di scosse medio-deboli. Si tratta di un precursore debole, con alta probabilità di falso allarme. Perciò la probabilità di terremoto distruttivo a valle del suo verificarsi, pur innalzandosi di circa 100 volte, rimane piccola come valore assoluto. Si dimostra però che si innalza poi di ben 3000 volte in presenza di un secondo fenomeno indipendente dal primo, pur debole anch'esso (14). Un secondo precursore di questo tipo sembra essere costituito da emissioni anomale di gas radon. Un elenco di fenomeni ufficialmente candidati è stato pubblicato nella "Decade of natural hazard reduction" (1990-2000), ma per il decennio successivo la ricerca sui precursori è stata negletta. Solo negli ultimi anni sembra ridestare attenzione (15,16).

A proposito della previsione dei terremoti si sono sviluppate infruttuose polemiche, anche recentemente.

Una critica ricorrente dice "saranno pure precursori le scosse medio-deboli, peccato che lo sapremo dopo il verificarsi o meno del terremoto; non si può a priori dire se siano precursori". La critica non sta in piedi per almeno due motivi: 1) contiene un "si può" che non ha cittadinanza scientifica se non precisando il campo di validità dell'affermazione; 2) in campo probabilistico non ha senso: la probabilità non dice se un evento accadrà oppure no, ne fornisce la probabilità di accadimento. Se la probabilità si può calcolare e se la probabilità di un terremoto forte nei prossimi giorni,

dato l' indizio, è maggiore di quella in mancanza di indizio, allora l'indizio *è* precursore (in senso probabilistico). Analogamente mal posta l'affermazione che si è tanto sentita circolare "i terremoti non si possono prevedere". Dipende: deterministicamente è vera, probabilisticamente no. Del resto tutti gli studi di hazard assessment e anche la normativa esistente si avvalgono proprio di modelli di previsione, come si è detto.

Altra critica "La probabilità è piccola. Impossibile prendere decisioni che sarebbero spesso inutilmente allarmanti". Questo è proprio un esempio diretto della confusione fra conoscenze e decisione e della mancanza di una procedura decisionale che, sulla base di questa pur piccola ma ben aumentata probabilità, valuterà costi sociali, vulnerabilità delle costruzioni, altri possibili indizi, si avvarrà della consapevolezza dei cittadini…condurrà a una decisione accettabile pur se difficile.

Le frane

Prevedere per progettare

Non occorre richiamare alla mente come sia pressante il rischio idrogeologico in Italia. Proprio mentre queste pagine vengono scritte, i notiziari sono un susseguirsi di annunci drammatici: frane, allagamenti, crolli di caseggiati, distruzione di aziende, morti. Il dissesto idrogeologico è stato favorito negli ultimi decenni da un dissennato uso del territorio, ormai largamente riconosciuto.

La pericolosità è nota da tempo. Le frane sono censite e quelle attive si contano a migliaia. Dettagliati studi quantitativi esistono che possono guidare decisioni per un corretto uso del territorio.

Assenti invece, per gli interventi operati nel nostro paese, le procedure decisionali che li abbiano sostenuti. O meglio, forse presenti e sottaciuti, criteri speculativi incuranti di un rischio che, per essere ridotto in casi palesemente rischiosi, non avrebbe neppure necessità di modelli interpretativi. Che invece sono indispensabili come guida per razionali decisioni in situazioni di incertezza interpretativa.

Esistono modelli di hazard che misurano l'instabilità di un terreno e prevedono l'innesco di frane. Giungono anche a definire termini di rischio come probabilità di lesioni indotte sulle strutture, specialmente in occasione di attività sismica che produca notevoli spostamenti del terreno. Per situazioni ben monitorate il modello può consistere

nella diretta lettura delle registrazioni e suggerire con ciò criteri decisionali di emergenza in condizioni di aumentata pericolosità.

Nelle trattazioni più attente di previsioni incerte, diversi possibili modelli vengono messi a confronto affinchè possa essere giudicato quale sia il più credibile per lo specifico scopo progettuale. Cito come esempio di tale procedura decisionale in condizione di incertezza lo studio, pionieristico nel campo (seppur riferito a una problematica ambientale non specificatamente correlata alle frane), per la progettazione di un canale attorno alla laguna cagliaritana (17).

Ai fini della pianificazione urbana si possono anche usare modelli probabilistici per la definizione di aree esposte a rischio. Sarebbe quindi possibile progettare, per non piangere col senno di poi, procedendo secondo modellazione-procedura decisionale-decisione.

Cito come esempio di questo tipo una mappatura che definisce quali zone siano soggette a rischio frane nell'Oltre Po Pavese, mappatura che è stata approntata ai fini della pianificazione regionale nell'area (18).

Più complicata si presenta la modellazione previsionale per la progettazione di opere che si estendano sul territorio, incontrando terreni con diversi livelli di stabilità. Per questi casi l'innesco di frana è dovuto a un complesso di movimenti interdipendenti, anche non vistosi localmente. Ma anche per tali casi modelli interpretativi esistono. Per esempio, un raffinato modello neurale è stato messo a punto per la progettazione di un gasdotto (19).

La modellazione disponibile è quindi ormai fruibile anche a livello operativo, e potrebbe avere un notevole positivo impatto sul governo del territorio. Essa infatti permetterebbe un confronto fra diverse possibili scelte progettuali la cui efficacia possa essere misurata nei confronti di obiettivi dichiarati.

Potrebbe in particolare essere usata sia per allerta in condizioni di aumentato rischio, sia per una corretta collocazione di nuovi insediamenti, sia per stabilire la priorità d'urgenza nel *mettere in sicurezza* situazioni gravemente esposte a rischio frana, purtroppo numerose sul nostro territorio.

L'INQUINAMENTO

L'imbroglio dei valori massimi ammissibili

Sull'argomento si sono riferite le critiche di Ulrich Beck. In effetti

la definizione di soglie sarebbero giustificate a valle di considerazioni che, come si è cercato di argomentare, formino una attenta procedura decisionale. Altrimenti può facilmente accadere che l'imposizione di soglie possa risultare inefficace rispetto all'obiettivo che si voglia perseguire.

E' quanto mostra il seguente esempio, studiato per il caso del fiume Lambro (20), il cui deplorevole stato reale si voglia migliorare.

La legge ministeriale 319/76 e la successiva modifica 650/79 imponevano valori limite di accettabilità al contenuto inquinante dei reflui lungo il decorso dei fiumi.

Se ne può valutare l'efficacia operando come si è cercato di descrivere.

Si proceda alla fase previsionale del fenomeno. Esso è studiato e conosciuto sia nel comportamento fluidodinamico delle acque sia nella loro capacità di svolgere un lavoro da reattore chimico. L'hazard assessment può perciò esprimersi secondo una modellazione (addirittura deterministica in questo caso) capace di fornire il contenuto di inquinante lungo tutto il percorso del fiume, note le sorgenti inquinanti e le caratteristiche del fiume stesso. Si configuri uno scenario in cui tutti i reflui in immissione lungo il corso del Lambro presentino un carico inquinante pari a quello ammesso dalla legge. Si ottiene con ciò la situazione la situazione del fiume *legale.* La si confronti con la situazione reale. Ebbene, la situazione reale, che si vorrebbe migliorare, risulta del tutto compatibile con la normativa imposta! Il fiume è legalmente inquinato. Con ciò si constata l'inefficacia, in questo caso, dei valori massimi imposti.

Per ottenere indicazioni utili a scelte giustificate occorre almeno porsi domande basilari: "Il carico inquinante (l'hazard, in questo caso) quale rischio comporta? A quale sistema, di quale vulnerabilità?" avremo risposte diverse a seconda che si voglia ridurre l'inquinamento per proteggere l'agricoltura, piuttosto che il rimpinguamento della falda o la balneazione.

Le ricerche eseguite consentirebbero non solo di rimediare a situazioni esistenti, ma anche, come si è indicato per il caso delle frane, progettare limitando danni conseguenti. Segnalo per esempio la valutazione di impatto che un insediamento urbano avrebbe sull'inquinamento fluviale (20) e il confronto che viene eseguito fra alternative con diverse dimensioni dell'insediamento. Ciò fornisce criteri orientativi per una progettazione consapevole dell'aumento di hazard in essa contenuto.

Considerazioni conclusive

Oggi è crescente la drammaticità di grandi rischi che affliggono l'umanità. Difficili le decisioni, molti i settori disciplinari di ricerca e le istituzioni amministrative che non possono dichiararsene estranei. Faticosamente cominciano a convergere sforzi di indagine. Ma il lavoro sarà immane. Ricorro per concludere alle parole dello studioso Paul Slovic (21):

> "Giudicare quale sia il rischio è operazione fallibile……Poiché cittadini non specialisti, anche se ben informati, hanno difficoltà a giudicare accuratamente il calcolo del rischio, si è tentati di escludere la cittadinanza dai processi decisionali. Tale azione sembra non giustificata per diverse ragioni. Primo, un attento esame mostra che i cittadini capiscono bene alcuni fatti, anche se la loro prospettiva può spesso essere diversa da quella degli esperti. Secondo, in molti se non moltissimi casi, l'effettivo governo dell'hazard richiede la cooperazione di un gran numero di non esperti…che devono obbedire alle regole sulla sicurezza e usare consapevolmente il sistema legislativo…..In alcuni casi la forte paura e la resistenza dei cittadini alle rassicurazioni degli esperti può essere fondata sulla loro sensibilità ai potenziali eventi catastrofici, sulla consapevolezza del disaccordo fra gli esperti a proposito delle probabilità e del livello di tali eventi, e sulla conoscenza di seri errori compiuti in passato dagli esperti….
>
> In casi difficili, quali il conflitto sul nucleare, un'atmosfera di fiducia e un riconoscimento che sia gli esperti sia i profani cittadini hanno contributi da fornire possono permettere scambi di informazioni e approfondimento di prospettive…
>
> Anche se gli esperti fossero giudici molto migliori dei profani cittadini, dare solo agli esperti la esclusiva franchigia per la gestione del rischio significherebbe sostituire un'efficienza di breve termine a uno sforzo su lungo periodo per creare una cittadinanza informata.
>
> Per i non esperti ciò pone una serie di sfide: essere più informati, affidarsi meno a giudizi non documentati o non ben argomentati, essere consapevoli dei fattori che possono alterare il giudizio sul rischio, essere più aperti a nuove evidenze; in breve, realizzare il potenziale per ricevere correttamente le informazioni conoscitive. Per gli esperti e per i decisori ciò pone sfide forse più difficili: ammettere i limiti delle proprie conoscenze, tentare di educare, non di propagandare, riconoscere la legittimità delle preoccupazioni del pubblico, e far sì che esse trovino espressioni in decisioni collettive senza che, nel processo, si generi più calore che luce."

Sembra azzardato associare categorie come il calore (dei sentimenti) e la luce (della ragione). Eppure, come può spiegarsi una specie di insensibilità di fronte a rischi che vanno assumendo la dimensione di

stragi planetarie? Grandi rischi vanno crescendo. Proprio il calore di sentimenti e la luce della ragione sembrano affievolirsi. Tentando spiegazioni, nuove categorie comportamentali vengono studiate e definite, proprio ricorrendo anche a considerazioni considerate finora estranee a impostazioni razionali: psychic numbing, collapse of compassion, irrational economy…..(22).

Argomenti morali e analisi rigorose vengono riconosciuti indispensabili per vincere questa specie di intorpidimento e proporre strategie di prevenzione. Ma queste non verranno messe in atto se non se ne costruiranno i "pilastri" (23): strutture di buon governo, uso delle conoscenze per educare i bambini, i giovani, i leaders politici…. Occorreranno anche strumenti legislativi internazionali. Ma occorrerà soprattutto avviare un profondo processo culturale in mancanza del quale non giungeremo a decisioni assennate.

BIBLIOGRAFIA

[1] Beck U., 2000. "La società del rischio. Verso una nuova modernità". Carocci.

[2] Schwing R.C. *et al.* (eds), 1980. "Societal Risk Assessment. How safe is safe enough?". Plenum Press.

[3] Ross L. *et al.*, 1977. "Social roles, social control, and biases in social perception processes". Journal of personality and social psycology.

[4] Kahneman D., 2003. "A perspective on judgment and choice: Mapping bounded rationality". American Psycologist.

[5] Slovic P., 1980. "Who shall decide?" in "Societal Risk Assessment" loc. cit.

[6] Miller B., 2013. "When is consensus knowledge based? Distinguishing shared knowledge from mere agreement". Synthese n. 190.

[7] Grandori G. *et al.*, 1998. "A proposal for comparing the rerliabilities of alternative seismic hazard models". Journ. of Seismology n. 2.

[8] Fischhoff B., Slovic P. *et al.*, 1978. "How safe is safe enough?" "A psychometric study of attitudes towards technological risks and benefits". Policy Sciences.

[9] Grandori G. e Benedetti D., 1973. "Problemi connessi con la scelta del rischio accettabile". Ist. Lomb. Accademia di Scienze e Lettere v. 106.

[10] Fischoff B. *et al.*, 1981. "Acceptable risk". Cambridge Univ. Press.

[11] Grandori G. *et al.*, 2006. "Earthquake catalogues and modelling strategies. A new testing procedure for the comparison between competing models". J Seismol.

[12] Petrini V., 1993. "Rischio sismico di edifici pubblici". GNDT-CNR.

[13] Grandori G. *et al.*, 1973. "On the choice of acceptable risk. A new approach". 5th WCEE Roma.

[14] Grandori G. *et al.*, 1988. "Alarm System Based on a Pair of Short Term Precursors". Bulletin of Seismological Society of America.

[15] Johnson B.F., 2009. "Earthquake prediction- Gone and back again". EARTH.
[16] Kamiyama M. *et al.*, 2012. "Precusors of crustal movements before the 2011 great east Japan earthquake". Proc of the Int Symp Eng Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, Tokyo, Japan.
[17] Crespellani T. *et al.*, 1985. "A decision model for optimal design under uncertain soil conditions". Riv. It. Geot. n. 2.
[18] Luzi L. *et al.*, 1999. "Slope instability in static and dynamic conditions for urban planning: the Oltre Po Pavese case history (Regione Lombardia-Italy)". Natural Hazard n. 20.
[19] Binaghi E. *et al.*, 2004. "Prediction of displacements in unstable areas using a neural model". Natural Hazard n. 32.
[20] Garavaglia E., 1998. "Il linguaggio dei modelli. Un caso applicativo: il fiume Lambro". Territorio, Franco Angeli.
[21] Slovic P., 1980. in "Societal risk assessment. How safe is safe enough?" loc cit.
[22] Slovic P. "The collapse of compassion" in press.
[23] Hamburg D.A., 2008. "Preventing genocide: pratical steps toward early detection and effective actions". Boulder CO: Paradigm.

SU ALCUNE CINQUECENTINE SCIENTIFICHE DELLA BIBLIOTECA DELL'ISTITUTO LOMBARDO

Nota dei mm.ee. FIORENZA DE BERNARDI (*) e
GIANNANTONIO SACCHI LANDRIANI (**)

(Adunanza del 22 maggio 2014)

SUNTO. – Delle 96 cinquecentine di carattere scientifico, presenti nella Biblioteca dell'Istituto Lombardo e recanti segnatura Luini vengono presentate alcune opere di "scienze naturali", scelte sia per le particolarità iconografiche che per l'originalità del testo. Il trattato di anatomia di Andrea Vesalio è presente nella prima edizione del 1542. Le opere di medicina di Jean François Fernel, di Antonio Fracanzani, di Girolamo Fracastoro, il trattato di botanica di Pier Andrea Mattioli e il trattato geografico di Giovan Battista Ramusio sono presenti in edizioni successive, ma sono comunque tutte opere di grande interesse per valutare le conoscenze del tempo come episodi evolutivi della scienza. Alcune sono piuttosto rare e meritano adeguata valorizzazione. I testi meriterebbero un approfondimento critico per rendere accessibili i contenuti oscurati da un tardo latino o da un italiano spesso latinizzante.

***

ABSTRACT. – We introduce some of the 96 books of scientific content, published in the 16th century and belonging to the Istituto Lombardo library. We chose some books in the field of the "natural sciences" both for iconographic peculiarities and for the original content. The library owns the first edition of the anatomy treatise of Andrea Vesalio. The medical books of Jean Francois Fernel, Antonio Fracanzani, Girolamo Fracastoro, the botanical treatise of Pier Andrea Mattioli and the geographical treatise of Giovan Battista Ramusio although in further edition are of great interest in order to evaluate the state of the art and the evolutionary steps of the science. Some books are

(*) Dipartimento di Bioscienze, Università degli Studi di Milano, Italy.
E-mail: fiorenza.debernardi@unimi.it
(**) Professore Emerito del Politecnico di Milano, Italy.
E-mail: giannantonio.sacchi@polimi.it

rather rare and precious and deserve to be accurately exploited. Also the texts should be worthy of a critical investigation, overcoming the linguistic difficulties, both for the latin and for italian texts.

1. Introduzione

Le cosiddette "Cinquecentine", opere a stampa del XVI secolo e dei primi anni del XVII secolo, conservate nella Biblioteca dell'Istituto Lombardo sono in gran parte raccolte nella sala LUINI.

In segnatura Luini sono catalogati 863 titoli, dei quali 96 cinquecentine di carattere scientifico.

Una parte di queste sono traduzioni in latino di testi greci.[1]

La classificazione differisce dall'attuale, anche perché molte opere hanno carattere multidisciplinare. Possiamo tuttavia con buona approssimazione collocare tali opere nei seguenti settori: 60 opere riguardano la Medicina e la "farmacologia" (intesa come indicazione di rimedi per la cura di patologie e descrizioni di anatomia umana), 14 opere riguardano la descrizione di piante (soprattutto medicinali), di animali e resoconti di esplorazioni di terre sconosciute, 6 opere riportano argomenti di Astronomia e cosmografia, 9 opere trattano di Matematica e geometria e 7 opere trattano argomenti che, con interpretazione estensiva, potremmo chiamare di Ingegneria e architettura.

Il carattere generale delle opere è «prerinascimentale». La rappresentazione di esseri viventi e non viventi si sofferma con molta attenzione sugli aspetti descrittivi, con solo qualche timido tentativo di elaborazione teorica. Le opere a carattere medico trattano per lo più della cura delle patologie allora più diffuse e temute (sifilide, peste e podagra), mentre sulle cause di queste malattie e sulle modalità di diffusione delle stesse non viene manifestato interesse.

Quasi tutti i libri hanno frontespizi arricchiti dalla cosiddetta "marca" del tipografo e illustrazioni preziose, disegnate ed incise con

[1] L'attenzione ai testi antichi di argomento medico nel secolo XVI era infatti molto forte. Le traduzioni contenevano spesso aggiunte ed emendamenti realizzati dall"interprete, spesso nominato nel titolo. Alcuni di questi interpreti erano veri specialisti, come Teodoro Gaza o Cesare Odonus, ai quali va il merito di aver divulgato i testi greci. Tutti questi libri sono privi di illustrazioni. Vedi in bibliografia *"Edizioni latine da testi greci"*.

grande accuratezza ed eleganza. Nei volumi divisi in "libri" l'ultima pagina presenta spesso le righe scalate e la dicitura "finis".

2. Gabriele Falloppio ed altri testi di medicina

2.1 De morbo gallico liber absolutissimum

De morbo gallico liber absolutissimum (1565) è un interessante testo, costituito da quattro libri legati insieme, stampati in diversi luoghi, tre contemporanei e uno precedente (IT\ICCU\BVEE\002421). Vuole evidentemente riunire tutte le conoscenze e soprattutto le cure della sifilide (così denominata da Girolamo Fracastoro nel 1530) che nei primi anni del '500 ebbe una spaventosa diffusione (*Fig. 1*).

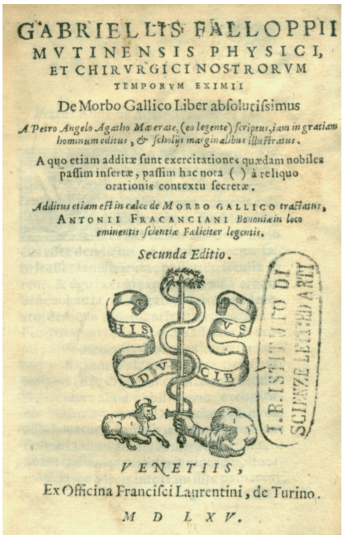

GABRIELIS FALLOPPII
MVTINENSIS PHYSICI,
ET CHIRVRGICI NOSTRORVM
TEMPORVM EXIMII
De Morbo Gallico Liber absolutissimus
A Petro Angelo Agatho Mæreate (eo legente) scriptus, iam in gratiam hominum editus, & scholijs margin alibus illustratus.
A quo etiam additæ sunt exercitationes quædam nobiles passim insertæ, passim hac nota ( ) à reliquo orationis contextu secretæ.
Additus etiam est in calce de MORBO GALLICO tractatus, ANTONII FRACANCIANI Bononiæ loco eminentis scientiæ Faliciter legentis.
Secunda Editio.
R. ISTITUTO DI SCIENZE LETTERE ED ARTI
VENETIIS,
Ex Officina Francisci Laurentini, de Turino.
M D L X V.

Fig. 1 – Gabriele Falloppio De morbo gallico liber absolutissimum. *Frontespizio.*

2.2 De morbo gallico fragmenta quaedam elegantissima ex lectionibus anni 1563

Il secondo dei quattro libri legati insieme è: *De morbo gallico fragmenta quaedam elegantissima ex lectionibus anni 1563* di Antonio

Fracanciani o Fracanzani (1506-1567), pubblicato a Padova nel 1563 in appendice all'omonima opera di Gabriele Falloppio (*Fig. 2*) e più volte ristampato (Bologna 1563, 1564, 1574; Padova 1564; Venezia 1566), come risulta anche dal catalogo SBN (IT\ICCU\BVEE\ 002421). Redatta in uno stile stringato, l'opera affronta tutti gli aspetti della diagnosi e cura della sifilide e propone l'uso di medicamenti a base di mercurio, nonostante la conoscenza dell'alta tossicità. Fracanzani frequentò l'Università di Padova, dove si laureò in arti e medicina nel 1529; nello stesso anno iniziò la carriera accademica nell'ateneo patavino come professore di logica per poi passare, nel 1538, all'insegnamento della medicina teorica come lettore straordinario. Ricordato dai contemporanei come uno dei più brillanti medici dell'epoca, il Fracanzani fu spesso chiamato al capezzale di principi e di illustri personaggi; di lui si lodava la rapidità e l'esattezza nelle diagnosi, nonché l'efficacia delle cure. La fama raggiunta fu certamente all'origine dei riconoscimenti accademici grazie ai quali nel 1546 fu nominato professore ordinario di medicina pratica.

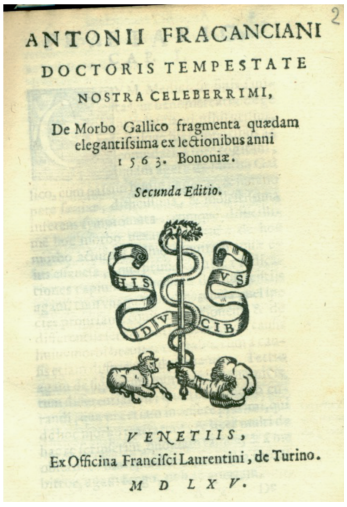

ANTONII FRACANCIANI
DOCTORIS TEMPESTATE
NOSTRA CELEBERRIMI,
De Morbo Gallico fragmenta quædam elegantiſsima ex lectionibus anni 1563. Bononiæ.
Secunda Editio.
VENETIIS,
Ex Officina Franciſci Laurentini, de Turino.
M D L X V.

Fig. 2 – Antonio Fracanzani: frontespizio dell'appendice al libro di Falloppio.

2.3 Mali galeci sanandi

Il terzo libro, di Tommaso Giannotti Rangoni, detto Thomae Ravenna, ha il promettente titolo "*Mali galeci sanandi*" (IT\ICCU\

UBOE\073342) (*Fig. 3*). Nacque a Ravenna nel 1493 da una famiglia borghese e probabilmente agiata, si laureò a Bologna in medicina e arti e portò per tutta la vita il *nomen* "Philologus" probabilmente per sottolineare la sua formazione umanistica. Esercitò come medico e insegnante di filosofia e astrologia a Roma e Modena, acquisì grande notorietà per la medicina astrologica e i *"pronostici diluviali"*. Morì a Venezia nel 1577.

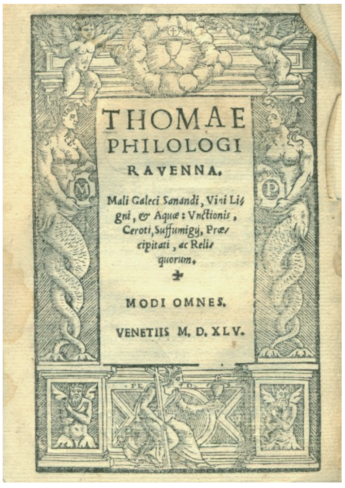

THOMAE
PHILOLOGI
RAVENNA.
Mali Galeci Sanandi, Vivi Liq
gni, & Aquæ: Vnctionis,
Ceroti, Suffumigij, Præ
cipitati, ac Relis
quorum.
MODI OMNES.
VENETIIS M. D. XLV.

Fig. 3 – Tommaso Giannotti Rangoni: Mali galeci sanandi *frontespizio del libro legato insieme ai precedenti.*

2.4 De lue hispanica sive morbo gallico

Il quarto libro, di Ferrerio Tolosatis (Auger Ferrier 1513-1588), medico di Caterina de' Medici, reca il curioso titolo "*De lue hispanica sive morbo gallico*", nuova denominazione della malattia (IT\ICCU\MILE\030890) (*Fig. 4*). Ferrier fu medico, astrologo e matematico. Studiò anche giurisprudenza e divenne esperto in astrologia giudiziaria, disciplina all'epoca molto in voga. Questi due libri non risultano nel catalogo SBN come appendici dei precedenti: probabilmente sono stati legati insieme in epoca successiva alla pubblicazione forse per praticità oppure per riunire fisicamente in un unico testo tutte le conoscenze dell'epoca su questa temutissima malattia.

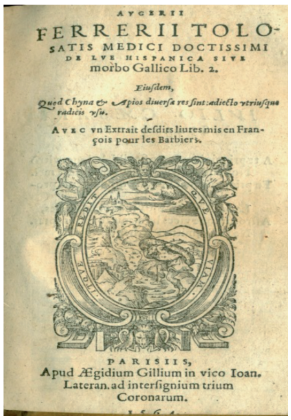

AVGERII
FERRERII TOLO-
SATIS MEDICI DOCTISSIMI
DE LVE HISPANICA SIVE
morbo Gallico Lib. 2.
Eiusdem,
Quid Chyna & Apios diuersa res sint: adiecta veritisque radicis vsu.
AVEC vn Extrait des dits liures mis en François pour les Barbiers.
PARISIIS,
Apud Ægidium Gilliun in vico Ioan.
Lateran. ad interfignium trium
Coronarum.

Fig. 4 – Auger Ferrier: De lue hispanica sive morbo gallico*, frontespizio del libro legato insieme ai precedenti.*

2.5 *Opera Genuina Omnia in tres tomos distributas*, *III edizione, postuma, del 1606*

Di Gabriele Falloppio (Modena 1523- Padova 1562) la biblioteca conserva anche l'*Opera Genuina Omnia in tres tomos distributas*, III edizione, postuma, del 1606 (IT\ICCU\UFIE\ 000445) (*Fig. 5*).


GABRIELIS
FALLOPPII
MVTINENSIS.
Physici, ac Chirurgi toto orbe clarissimi,
OPERA GENVINA OMNIA.
TOMVS PRIMVS.
CVM PRIVILEGIIS.
VENETIIS. MDCVI.

GABRIELIS
FALLOPPII
MVTINENSIS.
Physici, ac Chirurgi toto orbe clarissimi.
OPERVM GENVINORVM
TOMVS SECVNDVS
CVM PRIVILEGIIS.
VENETIIS. MDCVI.

GABRIELIS
FALLOPPII
MVTINENSIS.
Physici, ac Chirurgi toto orbe clarissimi,
OPERVM GENVINORVM
TOMVS TERTIVS
CVM PRIVILEGIIS.
VENETIIS. MDCVI.

Fig. 5 – Gabriele Falloppio Opera Genuina Omnia in tres tomos distributas*, III edizione, postuma, 1606.*

E' costituita per lo più da una serie di lezioni tenute a Padova, nelle quali dà esempio della sua competenza come medico, chirurgo e

splancnologo e delle sue conoscenze di botanica, farmacologia e idrologia. Sono note infatti le sue descrizioni degli organi riproduttivi femminili (le tube uterine note come tube del Falloppio). La descrizione dell'anatomia dei feti e dei neonati, posta in relazione con quella degli adulti, costituì il prodromo dell'embriologia. Le numerose dissezioni e descrizioni anatomiche di animali furono il fondamento dell'anatomia comparata. Il suo allievo Fabrizio d'Acquapendente è considerato infatti uno dei fondatori dell'embriologia (molto nota è la *borsa di Fabrizio* degli uccelli).

Il primo volume di questa terza edizione postuma (1606) è preceduta da una *Medici intimi Epistola (1585)* di Giovanni Crato von Krafftheim, medico ed umanista tedesco di grande fama, molto legato a Martin Lutero (*Fig. 6*). In essa si danno consigli su medicamenti, acque termali, metalli e fossili, per curare malattie endemiche come la peste (della quale fu tra i primi a riconoscere la contagiosità) il catarro, la podagra. Sembra che l'autore abbia richiesto l'illustre presentazione (caso non infrequente) per accreditare ulteriormente la sua opera, già molto importante.

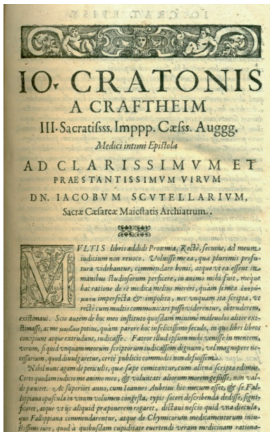

IO. CRATONIS
A CRAFTHEIM
III. Sacratisss. Imppp. Cæſs. Augg.
Medici intimi Epiſtola
AD CLARISSIMVM ET
PRAESTANTISSIMVM VIRVM
DN. IACOBVM SCVTELLARIVM,
Sacræ Cæſareæ Maieſtatis Archiatrum.,

Fig. 6 – Giovanni Crato von Krafftheim Medici intimi Epistola *1585.*

2.6 Universa medicina

Il trattato "*Universa medicina*" di Jean François Fernel (1485-1558) è presente nel fondo Belloni e contrassegnato da un prezioso "ex libris" (IT\ICCU\MILE\014705); la prima edizione fu stampata a Parigi nel 1554, questa dovrebbe essere una edizione successiva e

porta la data, scritta a mano, del 1619 (*Fig. 7*). Sebbene la data, la marca e la città coincidano, il nome del tipografo, *apud Petrum & Iacobum Chouet*, non è quello riportato nel catalogo SBN: Stephanus Gamoetus. Si sa che il trattato di patologia e terapia fu ristampato più volte. Fernel studiò a Parigi medicina, matematica e astronomia,fu uno dei più dotti rappresentanti della medicina galenica modificata dalle dottrine arabe. Diede contributi molto importanti alla medicina e introdusse nel lessico medico il termine "fisiologia" per descrivere lo studio funzionale del corpo. La sua straordinaria erudizione generale, l'abilità e il successo con cui ha cercato di far rivivere lo studio delle opere dei medici dell'antica Grecia, gli procurarono una grande reputazione, e infine l'ufficio di medico di corte di Enrico II di Francia.



Fig. 7 – Jean François Fernel Universa Medicina *con data scritta a mano 1619 e relativo ex libris e numero di inventario dal Fondo Belloni.*

2.7 Opera quae extant, veterum codicum collectione restituta

Il testo di Girolamo Mercuriale (Forlì 1530-1606) laureato a Padova, cultore delle opere di Ippocrate, è una riedizione dell'opera di Ippocrate in greco ed in latino: *Opera quae extant, veterum codicum collectione restituta*, pubblicata da Giunta a Venezia nel 1588 (IT\ICCU\BVEE\004554) con un bellissimo frontespizio formato da 12 piccoli quadri che raffigurano il medico, in abiti cinquecenteschi, nell'esercizio della sua arte. L'edizione latina presenta aggiunte originali del Mercuriali, il quale fu professore di medicina pratica a Padova e a

Bologna e per primo teorizzò l'uso della ginnastica e della balneoterapia su base medica.

3. Testi di anatomia

3.1 De humani corporis fabrica libris septem

Una preziosità della biblioteca è "*De humani corporis fabrica libris septem*" di Andrea Vesalio (Bruxelles 1514-Zante 1564), prima edizione stampata a Basilea nel 1542 (IT\ICCU\BVEE\008547). Contiene descrizioni molto accurate di muscoli e ossa umane. E' corredato da più di 300 illustrazioni in xilografia opera di van Calcar, un disegnatore e pittore che lavorava nella bottega di Tiziano. Vesalio è considerato il fondatore dell'anatomia moderna, realizzata grazie alle numerose dissezioni di cadaveri a cui si dedicò a Padova e Bologna, dove insegnò (*Fig. 8*). Nel frontespizio a tutta pagina (*Fig. 9*) è infatti raffigurata la scena della dissezione del cadavere di una donna nel teatro anatomico, con molti particolari, anche inquietanti, che ricordano la precisione descrittiva dei pittori fiamminghi. Vesalio stesso è raffigurato in una illustrazione (*Fig. 10*), così come sono raffigurati, ordinati su un tavolo di legno molto simile ad un banco di officina, gli strumenti dello studioso di anatomia: forbici, coltelli, pinze, martelli etc. (*Fig. 11*).


ANDREAE VESALII
BRVXELLENSIS, DE HVMANI CORPORIS FABRICA LIBER PRIMVS, IIS QVAE
uniuersum corpus sustinent ac sufflciunt, quibus q omnia
stabiliuntur & adnascuntur dedicatus.
QVID OS, QVISQVE IPSIVS VSVS
& differentia. Caput I.
S CAETERARVM hominis partium est durissi
mum, & aridissimũ, maximeq terrestre & frigidum,
& sensus denique prætor solos dentes expers. Huius
enim temperamenti summus rerum opifex Deus
substantiã merito efformauit, corpori uniuerso fun
damenti instar subijciendam. Nam quod parietes &
trabes in domibus, & in tentoriis palı, & in nauibus
carinæ simul cum costis præstant, id in hominis fa
brica ossium præbet sublatitia. Ossium siquidem
alia roboris nomine tanquam corporis fulcra pro
creantur, é quorum numero sunt tibiarum & femo
rum ossa, & dorsi uertebræ, ac omnis ferè ossium con
textus. Alia reliquis partibus ueluti propugnacula,
tutissimiq uallı & muri à natura obijciuntur, quem
admodum caluaria, uertebrarum spinæ, & tranluerli earundem processus, pectoris os, costæ.

Fig. 8 – Andrea Vesalio: De humani corporis fabrica *prima pagina del libro primo, con un'annotazione a mano.*



Fig. 9 – Andrea Vesalio: De humani corporis fabrica *frontespizio raffigurante la dissezione del cadavere di una donna in un teatro anatomico.*



Fig. 10 – Ritratto di Andrea Vesalio.



Fig. 11 – Andrea Vesalio: gli strumenti dello studioso di anatomia.

3.2 Opera omnia di Girolamo Fracastoro

L'*Opera omnia di Girolamo Fracastoro* (Verona 1476-1553) (IT\ICCU\TO0E\003410) medico, filosofo, umanista, fu stampata postuma nel 1555, pubblicata dai Giunta di Venezia con successive ristampe del 1574 e del 1584. Il testo conservato nella biblioteca porta l'indicazione "Ex Tertia Editione". Fracastoro è forse più noto come astronomo e geografo, fu amico di Paolo Ramusio (padre di Giovan Battista, il quale gli dedicò la sua opera). Di lui si ricorda anche che fu amico di Copernico e che progettò un cannocchiale, realizzato molto più tardi da Galileo. Fracastoro è un esempio dell'uomo colto dai molteplici interessi, letterari e scientifici: scrisse un poemetto in esametri (*Syphilis sive morbus gallicus*) nel quale narrava elegantemente del pastore Sifilo affetto da questa terribile malattia, che poi prese da lui il nome.

4. Piante medicinali e non solo

4.1 *Historia Plantarum et Vires ex Dioscoride, Paulo Aegineta, Theophrasto, Plinio et recentioribus greci iuxta elementorum ordinem*

Interessante opera con reminiscenze antiche è la "*Historia Plantarum et Vires ex Dioscoride, Paulo Aegineta, Theophrasto, Plinio et recentioribus greci iuxta elementorum ordinem*" di Konrad von Gessner,

(Zurigo 1516-1565) professore di greco e archiatra. E' un catalogo di piante in ordine alfabetico molto interessante per chi voglia osservare, conoscere e classificare. Merito del Gessner è di avere attirato l'attenzione sul fiore e sul frutto come caratteri diagnostici. Si ha notizia di molte figure, non presenti nella nostra biblioteca. Fu un grande erudito, tentò di fondare una biblioteca con tutti i libri esistenti (da collezioni della biblioteca vaticana, da cataloghi di stampatori e venditori di libri, una specie di database del XVI secolo. Curiosamente l'opera di Gessner è legata insieme ad un'edizione del volume di Teofrasto (IV sec a.c.), tradotto in latino da Teodoro Gaza, (Tessalonica 1415-1475) umanista ed insegnante di greco a Palermo, Pisa, Pavia, Ferrara. Gaza si specializzò nella traduzione di testi scientifici, spesso emendandoli, ma facendo conoscere le opere zoologiche di Aristotele e le opere botaniche di Teofrasto. Il legare insieme le due opere può avere un duplice significato: una specie di avallo da parte del riconosciuto maestro greco e un confronto con la classificazione di Teofrasto in erbe, frutti, suffrutici.[2]

4.2 Commentarii in VI libros Pedacii Dioscoridis Anarzabei de Medica materia

A Dioscoride si rifà anche l'opera di Pietro Andrea Mattioli (Siena 1501-Trento 1578) *Commentarii in VI libros Pedacii Dioscoridis Anarzabei de Medica materia* in 2 volumi (IT\ICCU\BVEE\014932). In realtà si tratta di una traduzione con molte aggiunte dell'opera di Dioscoride, medico greco attivo a Roma nel I secolo dopo Cristo (*Fig. 12*).

Fu scritto in italiano (1544): Mattioli scelse la lingua italiana, (anzi toscana, come l'autore stesso dichiara) per mettere alla portata di medici e speziali, che per lo più ignoravano le lingue classiche, le conoscenze degli antichi. Una decina di anni più tardi fu tradotto in francese, boemo, tedesco, latino. Grande novità, che spiega la grande diffusione dell'opera, fu l'aggiunta di figure disegnate da Giorgio Liberale, sotto la vigile guida del Mattioli stesso.

Il volume, datato 1583, è una delle 6 ristampe postume, divise in due volumi, che l'editore Valgrisi fece autorizzato dagli eredi *Mattioli*,

[2] Il libro è privo di frontespizio. Anno e luogo di pubblicazione non sono chiaramente definibili.

riutilizzando le xilografie eseguite da una équipe di artigiani boemi. Si tratta di una summa delle nozioni di medicina naturale del tempo, integrata dalle nozioni da lui stesso apprese nell'attività terapeutica e da notizie sulle virtù di piante importate dalle Indie Orientali e Occidentali e di altre da lui raccolte in Val di Non e sul Monte Baldo. Infatti, opportunamente il Mattioli scrive nel frontespizio stesso *"Ab ipso autore recogniti et locis plus mille aucti"*. Anche se l'intento del Mattioli medico era sicuramente quello di descrivere le proprietà medicinali delle piante, il testo è diventato il più importante libro di Botanica fino al *Systema naturae* di Linneo (1735).

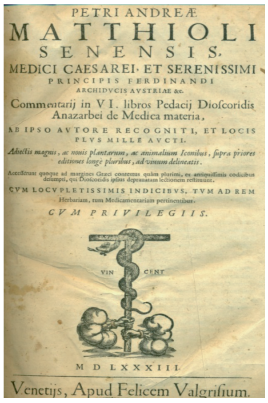

PETRI ANDREÆ
MATTHIOLI
SENENSIS.
MEDICI CAESAREI ET SERENISSIMI
PRINCIPIS FERDINANDI
ARCHIDVCIS AVSTRIAE &c.
Commentarij in V I. libros Pedacij Dioscoridis
Anazarbei de Medica materia,
AB IPSO AVTORE RECOGNITI, ET LOCIS
PLVS MILLE AVCTI.
Absolutis magnis, ac omnis Plantarum, ac animalium Iconibus, supra priores editiones longe pluribus, ad vivum delineatis.
Accedunt quoque ad margines Graci contextus quàm plurimi, ex antiquissimis codicibus descripti, cui Dioscoridis genio dignissimum lectorem restituant.
CVM LOCVPLETISSIMIS INDICIBVS, TVM AD REM
Herbariam, tum Medicamentariam pertinentibus.
CVM PRIVILEGIIS.
VIN CENT
M D LXXXIII.
Venetijs, Apud Felicem Valgrisium.

Fig. 12 – Pietro Andrea Mattioli: Commentarii... *frontespizio del primo volume.*

Nelle figure viene spesso privilegiata la rappresentazione artistica, a discapito della precisione scientifica; ad esempio, il portamento della chioma viene spesso esaltato con simmetrie improbabili; la forma e gli intrecci delle radici vengono accentuati secondo l'ispirazione dell'artista più che secondo il rigore descrittivo (*Figg. 13, 14*). Il Mattioli fu oggetto di polemica da parte dell'illustre botanico prussiano Melchior Wieland detto il Guilandino, che lo accusò di errori nell'identificazione di specie botaniche (1557). L'illustre botanico Konrad Gessner, però, lo difese e, tre anni dopo, Giovanni Crato von Krafftheim, il già ricordato autorevole medico ed umanista tedesco, pose fine alla diatriba sostenendo in via definitiva che gli errori non sminuivano il valore dell'opera ed inviò una lettera consolatoria al Mattioli. La polemica ebbe ancora qualche strascico fino al 1562 e può essere assunta come esempio della vivacità polemica e della velocità di diffusione dei libri e delle idee, non-

ché della rete di connessione tra gli eruditi, favorevole ad attiva comunicazione.



Fig. 13 – Pietro Andrea Mattioli: Commentarii... *pianta di genziana.*

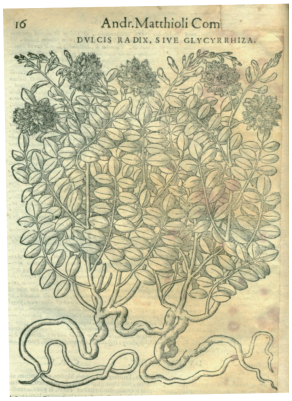


Fig. 14 – Pietro Andrea Mattioli: Commentarii... *pianta di liquirizia.*

Nel secondo volume sono riportate immagini e descrizioni di animali selvatici e domestici, e tecniche di allevamento di questi ultimi. Sono inoltre descritte proprietà curative, piuttosto curiose, di sostanze tratte da animali, ne presentiamo due esempi (*Figg. 15,16*):



Fig. 15 – Pietro Andrea Mattioli: Commentarii... *volume secondo: favo di api.*

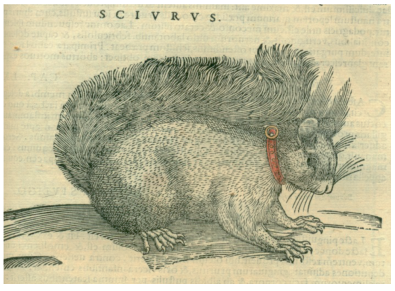


Fig. 16 – Pietro Andrea Mattioli: Commentarii... *volume secondo: scoiattolo.*

Il miele è utile, mescolato al salgemma, per curare tonsille, tosse, veleni di funghi e di cani rabbiosi, ferite varie e anomalie cutanee.

Il grasso di scoiattolo, mescolato con aceto, riduce la caduta dei capelli. La carne è cibo utile e per "palati non volgari".

5. Le grandi scoperte geografiche

Di grandissimo interesse storico è il trattato "*Delle navigazioni et viaggi*" di Giovan Battista Ramusio: è il primo trattato geografico dell'età moderna, dedicato a Girolamo Fracastoro, amico del padre: fu pubblicato tra il 1550 e il 1606 in varie edizioni (quella dell'Istituto Lombardo è del 1563; IT\ICCU\PUVE\ 000097); riunisce una cinquantina di memoriali di viaggi ed esplorazioni dall'antichità classica fino al suo tempo, che coprono tutto i mondo allora conosciuto. Particolarmente interessanti sono le descrizioni e le raffigurazioni di piante, animali e manufatti sconosciuti, che gli esploratori trovarono nelle terre visitate. Ramusio era un umanista, geografo e raffinato diplomatico della Repubblica Veneta, venne inviato come ambasciatore presso parecchie corti europee. Tramite le sue amicizie diplomatiche ottenne i resoconti di vari esploratori e, su queste basi, fu molto abile nel disegnare le mappe di territori che non aveva mai visitato, come la mappa, qui raffigurata, dell'Isola Spagnuola, su cui mise piede Cristoforo Colombo dopo aver attraversato l'Atlantico. La *Fig. 17* è tratta dalla *Storia delle Indie Occidentali di Gonzalo Fernando Doviedo* nel volume terzo.



Fig. 17 – Giovan Battista Ramusio: Delle navigazioni et viaggi. *Volume terzo: mappa dell'isola Spagnuola.*

Nel primo volume sono riportati viaggi in Africa, Indie Occidentali, Perù, e nei territori scoperti da Cristoforo Colombo, Fernando Cortese, Francesco Pizzarro, IndieOrientali, Calcutta, Giapan, Terra di Prete Ianni.

Nel secondo volume*: Istoria delle cose de Tartari e diversi fatti de loro Imperatori descritta da M. Marco Polo gentilhuomo venetiano*. Nel terzo volume sono riportate relazioni *Su le navigazioni al Mondo Nuovo agli antichi Incognito fatto da don Cristoforo Colombo Genovese……in diverse parti delle Indie occidentali*. Nel terzo volume sono anche belle illustrazioni che raffigurano piante, animali e manufatti che gli esploratori trovarono nell'isola Spagnuola e descrissero.

E' interessante leggere le brevi frasi che aprono alcuni paragrafi e che fanno da didascalia alle figure (*Figg. 18-21*).

"Del pane degli Indiani chiamato Mahìz, e come questo frumento si semina e si raccoglie… (mais a 8 file) *…. Nasce il Mahiz in certe canne, che nascono e pullulano, con mazzocche d'un palmo….e sono piene di granelli grossi come ceci, ma non tondi del tutto"*. La descrizione è piuttosto accurata ed è seguita da una parimenti accurata descrizione di come gli abitanti seminano i granelli nel terreno dopo averli lasciati in acqua per due giorni.

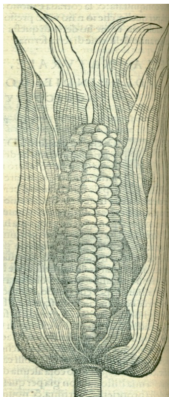


Fig. 18 – Giovan Battista Ramusio: Delle navigazioni et viaggi. *Volume terzo: spiga di Mahiz.*

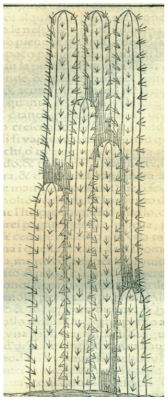


Fig. 19 – Giovan Battista Ramusio: Delle navigazioni et viaggi. *Volume terzo: Cereus, cactacea.*

Di certi cardi alti e diritti, come picche lunghi, quadri e spinosi, chiamati Cery dai cristiani, perché paiono ceri o torchi di cera, fuori che nelle

spine… (Nella sistematica attuale le cactacee comprendono il genere *Cereus*, mentre la figura si riferisce probabilmente alla specie *Pachycereus pringlei,* la più alta delle cactacee).

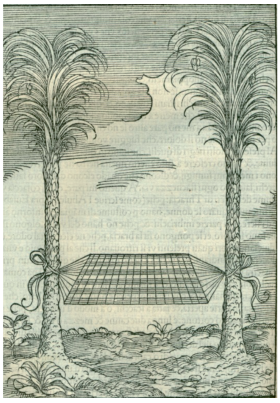


Fig. 20 – Giovan Battista Ramusio: Delle navigazioni et viaggi. *Volume terzo: amaca.*



Fig. 21 – Giovan Battista Ramusio: Delle navigazioni et viaggi. *Volume terzo: iguana.*

…che maniere di letto hanno in questa isola (Spagnuola). Un lenzuolo in parte tessuto, a modo di una rete, che più fresco sia.

Delle Iuana serpentes il quale si tiene neutrale, cioè in dubbio se carne o pesce perché va per li fiumi e per gli alberi medesimamente.

6. Osservazioni e congetture

Le opere presentate consentono la valutazione comparativa tra le conoscenze del XVI secolo e quelle dei secoli che seguono. Nel loro insieme *contengono una magia.* Sono l'*inizio* del travolgente successo della nascente editoria quale diffusore del sapere e preludono all'intensa evoluzione del pensiero scientifico. Uno sguardo superficiale a quanto prodotto nel secolo successivo consente di sottolineare il passaggio dalla descrizione anatomica alla morfologia funzionale, per esempio dall'osservazione empirica dell'utilità di un medicamento alla sperimentazione basata su ipotesi logiche.

Gli autori del tempo, spesso anche letterati e scrittori, possedevano una vasta cultura umanistica. La conoscenza del greco antico era indispensabile per esaminare, riportare ed emendare gli antichi testi ai quali

molti facevano riferimento. Non pochi si fregiavano del titolo di "Philosophus" per poi dedicarsi alla medicina, alla descrizione di piante medicinali, ai metodi di estrazione dei principi medicamentosi. Alcuni erano anche astronomi sostanzialmente d'impostazione tolemaica.

L'astrologia era loro compagna di viaggio quale mezzo empirico e seducente per misurare il tempo. Gli orologi si sarebbero affermati e perfezionati soltanto nei secoli successivi.

Tutti i libri presentati mostrano una veste editoriale di grande bellezza: gli editori manifestano un gusto sopraffino nella scelta delle marche, spesso elaborate e cariche di simbologia, nella composizione dei frontespizi, nella composizione delle ultime pagine dei libri. Attenzione particolare meritano le illustrazioni. Splendide e pensate come quadri sono le figure in xilografia di Jan Stephan Calcar per il testo anatomico di Vesalio. Di notevole precisione, non disgiunta da ricerca artistica, sono le xilografie boeme dell'opera botanica di Mattioli. La bellezza della veste grafica contribuì a rendere quell'opera il più grande classico di botanica. Gli studiosi attribuiscono parte del merito della diffusione all'esecuzione e composizione delle figure. Una buona parte della fortuna dell'editore Valgrisi è attribuibile al testo illustrato del Mattioli.

Alcuni libri sono rari: di *De lue hispanica* di Ferrier Auger è segnalata solo una copia in Italia, nella Biblioteca Braidense; i testi di botanica di Gessner e di Mattioli, il secondo volume delle opere compilative di Ramusio e di Falloppio, risultano uniche nel panorama bibliotecario milanese.

Tutti i testi presentati meriterebbero un'adeguata valorizzazione storica e un approfondimento critico. La lettura presenta notevoli difficoltà, soprattutto per i testi in latino, dove la lingua viene utilizzata per illustrare concetti diversi dall'uso classico: la collaborazione tra cultura umanistica e scientifica può ottenere risultati di grande interesse nel tracciare un cammino evolutivo della scienza.

Quando si affrontano catalogazioni critiche, come nel percorso al quale appartiene questo saggio, ci si può domandare quale obiettivo si persegua. La domanda è meno peregrina di quanto s'immagini a prima vista. La risposta, forse ambigua, è che la finalità concettuale nasce e si forma durante l'elencazione del materiale bibliografico di cui si dispone. Alla curiosità per l'antico splendore subentra una sorta di reverenziale rispetto per la fatica di uomini antichi, corredati da possibilità d'informazione ben più povere delle nostre. Tanto grandi da lanciare messaggi, che portano i segni del loro ingegno e del loro mondo, nel nostro tempo. Noi

crediamo nella preziosa indicazione morale dell'antica fatica. Deve essere ancora da noi militata, perché il futuro, con la pazienza del tempo, ci assista nell'accedere a valori umani sempre più elevati.

BIBLIOGRAFIA

Andreoli Ilaria. *Ex officina erasmiana. Vincenzo Valgrisi e l'illustrazione del libro tra Venezia e Lione alla metà del '500*. Tesi di dottorato in cotutela Università di Ca' Foscari, Venezia e Université Lumière Lyon 2, 2006.

Belloni Speciale Gabriella. *Falloppia Gabriele in Dizionario Biografico degli italiani*. Vol 44, Treccani 1994.

Fausti Daniela. *Su alcune traduzioni cinquecentesche di Dioscoride: da Ermolao Barbaro a Pietro Andrea Mattioli. in Sulla tradizione indiretta di testi medici greci: le traduzioni*. Atti del III seminario internazionale. (I. Garofalo, S. Fortuna, A. Lami, A. Roselli eds) Certosa di Pontignano 18-19 settembre 2009.

Hesse Hermann. *Le poesie dello studente in Il gioco delle perle di vetro*, traduzione di Ervino Pocar. Mondadori, Milano 1955.

Preti Cesare. *Mattioli Pietro Andrea. In Dizionario Biografico degli italiani*. Vol 72 Treccani 2008.

Ramusio G.B. *Navigazioni e viaggi* 6 voll, a cura di Marica Milanesi. Einaudi "I millenni"1988.

Sacchi Landriani G.A. *Cinquecentine di argomento matematico*. Istituto Lombardo Rendiconti Scienze, 147, 2013.

Edizioni latine da testi greci

Aristotele. Aristotelis Stagiritae principi de Historia animalium. Theodoro Gaza interprete. Historia animalium, De partibus animalium, De generatione animalium. De plantis. Venetiis 1585.

Dioscoride. Dioscoridis et Stephani atheniensis Alphabetum empiricum a Casparo Vuolpio tigurino medicum in lingua latina conversus, 1581.

Teofrasto. Theophrasti sparsae de plantis sententiae in continuatam seriem ad propria capita revocatae, nominaque secundum literarum ordinem disposita per Cesarem Odonum Philosophum ac Medicum Bononiae praticam medicinae ordinariam profitentem. Bononiae apud Alexandrum Benaccium, 1561.

Ippocrate. Hippocratis Epidemiorum liber sextus. Traduzione latina, 1582, legato insieme a Claudi Galeni pergamena liber de optima secta ad thrasibulum. Iunio Paulo patavino interprete.

Ippocrate. Hippocratis Coi Opera per Ianum Cornarium latina lingua conscripta. Venetiis apud Hieronymus Scotum 1546.

Paolo Egineta. Pauli Aeginetae De Arte Medendi libri VII. Bernardo Feliciano interprete. Venetiis in aedibus Luceantonii Iuntae Florentini 1532.

I PRINCIPI DELLA DINAMICA DI TARTAGLIA E CARDANO NELLE *CINQUECENTINE* DELL'ISTITUTO LOMBARDO

Nota del m.e. CARLO ENRICO BOTTANI (*)

(Adunanza del 5 giugno 2014)

SUNTO. – La biblioteca dell'Istituto Lombardo possiede due cinquecentine contenenti capitoli di argomento fisico: *La nova scientia* di Niccolò Tartaglia stampato *In Venetia: per Nicolò de Bascarini a istantia de l'Autore, 1550* e il *De rerum varietate* di Girolamo Cardano stampato *Basileae: per Sebastianum Henricpetri*, 1581. Assieme al *De Subtilitate* di Girolamo Cardano, vengono in queste opere trattati i principi generali della dinamica e, con grande dettaglio, la traiettoria di un proiettile sparato da una arma da fuoco. Anche se i principi generali del moto sono ancora di impronta aristotelica, l'attenzione ai fatti sperimentali ed un uso spregiudicato di argomenti eterogenei di spiegazione, finalizzati al raggiungimento di una capacità predittiva con scopi eminentemente pratici, permettono di identificare in Tartaglia e in Cardano veri precursori della moderna balistica. La rivisitazione cardaniana, oggi insostenibile, del ruolo di forza motrice dell'aria, richiesto dall'assenza della legge d'inerzia nella dinamica aristotelica, e del concomitante ruolo di forza resistente, suggerisce lo spunto per una considerazione di principio sulla persistenze mancanza di una deduzione microscopica rigorosa del secondo principio della termodinamica e, in genere, sull'origine delle forze dette *dissipative*.

***

ABSTRACT. – The library of Istituto Lombardo owns two volumes of XVI century (*cinquecentine)* including physical sections. *La nova scientia* by Niccolò Tartaglia printed *In Venetia: per Nicolò de Bascarini a istantia de l'Autore, 1550* and the *De re-*

(*) Politecnico di Milano, Dipartimento di Energia, Via Ponzio 34/3, 20133 Milano, Italy.
E-mail: carlo.bottani@polimi.it

rum varietate by Girolamo Cardano printed *Basileae: per Sebastianum Henricpetri*, 1581. Together with the *De Subtilitate* by Girolamo Cardano, these books contain the general laws of dynamics and, in great detail, a description of the trajectory of a projectile fired from a firearm. Though the general principles are still of Aristotelian derivation, a new attention to experimental facts together with an unconvential pragmatic use of etherogeneous explanation arguments, justified by an essentially practical goal of predictive nature, induce one to identify both Tartaglia and Cardano as true precursors of modern ballistics. Furthermore, the way Cardano revisits the role of driving force played by the projectile-air interaction, following a modified idea of Aristotle due to the lacking of an inertia law in his mechanics, and the concomitant need that air produces also a resisting force, reminds us that, so far, a rigorous microscopic derivation of the exclusively dissipative nature of this force has not been achieved yet as well as a rigorous microscopic derivation of the second principle of thermodynamics.

> "Ma a causa di una proposizione, che è vera, cioè
> che ogni corpo che muove è mosso, si pone ora
> lo stesso interrogativo per l'aria, e perciò se
> l'aria muove la pietra lanciata, essa è mossa;
> quindi l'aria è mossa da qualcosa, e così ci
> ritroviamo come nel caso della pietra. Dicono
> che l'aria, essendo leggera, sia mossa dalla sua forma"
>
> Traduzione da *De subtilitate* di Girolamo Cardano
> del dott. Elio Nenci (comunicazione privata)

1. Introduzione

La data di nascita della fisica moderna non è, ovviamente, determinabile con esattezza. Si arriva all'attuale stato della scienza fisica attraverso un processo con accelerazioni e decelerazioni che trova in Galileo Galilei (1564-1642) una nuova consapevolezza e un nuovo uso della sperimentazione che condurranno a geniali, anche se parziali, intuizioni per una dinamica rinnovata e, in Isaac Newton (1642-1727), un punto di svolta di eccezionale rilevanza. Personalmente ritengo che non solo la fisica ma anche, in generale, la scienza moderna diventino pienamente consapevoli del nuovo *modus operandi* con quel celeberrimo "Hypotheses non fingo" nello *Scolium generale* dei *Principia* (seconda edizione del 1713). Anthony Kenny, in *Nuova Storia della Filosofia Occidentale* (Torino, Einaudi, 2012), in quattro volumi, dichiara nel capitolo *Fisica* del terzo volume, dedicato ai seco-

li XVI-XVII-XVIII, di non aver voluto includere questo capitolo nel quarto volume sulla filosofia contemporanea in quanto, a partire da Newton, la Fisica si è guadagnata il ruolo di scienza matura, degna di una trattazione separata da quella della filosofia. E' curioso, a tal proposito, che il titolo della rivoluzionaria opera newtoniana sia ancora *Philosophiae naturalis principia mathematica*! Per i nostri scopi risulta comunque chiaro che il XVI secolo, cui qui rivolgiamo il nostro interesse riguardo alle *cinquecentine* dell'Istituto Lombardo, va considerato un periodo di transizione in cui si manifestano numerose embrionali anticipazioni della fisica moderna, soprattutto per quanto riguarda la dinamica, ma non solo. Mi preme tuttavia rilevare che anticipazioni di epoca medievale, talora impressionanti per precisione e potenziale capacità predittiva, di alcuni capitoli della fisica attuale, sono state rese disponibili all'indagine storica solo in tempi recenti o recentissimi. Ne cito solamente due. Thomas Bradwardine (1290-1349), arcivescovo di Canterbury, membro del Merton College di Oxford, contemporaneo di Guglielmo di Occam, uno degli *Oxford Calculators*, nel *De proportionibus velocitatum in motibus* scoprì le leggi del moto uniformemente accelerato. Il fisico matematico e storico della scienza Clifford Truesdell (già membro straniero dell'Istituto Lombardo) scrisse [1, pag. 30]: "*The now published sources prove to us, beyond contention, that the main kinematical properties of uniformly accelerated motions, still attributed to Galileo in the physics texts, were discovered and proved by scholars of Merton college.... In principle, the qualities of Greek physics were replaced, at least for motions, by the numerical quantities that have ruled Western science ever since. The work was quickly diffused into France, Italy, and other parts of Europe. Almost immediately, Giovanni di Casale and Nicole Oresme found how to represent the results by geometrical graphs introducing the connection between geometry and the physical world that became a second characteristic habit of Western thought ...".* Ritengo ancora più impressionante la recente scoperta del ruolo profetico di Roberto Grossatesta (1175-1253), vescovo di Lincoln, riguardo ad argomenti di cosmologia e fisica del colore. I contributi del vescovo alla scienza sono ben noti da molto tempo, ma non era stato adeguatamente riconosciuto l'aspetto assolutamente *moderno* e, potenzialmente, *quantitativo e predittivo* di due sue idee contenute nel *De luce*. Ringrazio il caro amico prof. Brian K. Tanner, professore emerito di fisica nell'università di Durham (UK), per avermi segnalato una serie di lavori

recenti [2] che hanno messo il luce un aspetto del contributo del Grossatesta che non esito a definire *attuale.* Probabilmente lo studio della scienza medievale ci riserverà ancora non poche sorprese.

2. La fisica nel cinquecento: opere principali

La storia della scienza [3] riconosce i seguenti come i principali contributi del cinquecento alla fisica:

- Buonamici Francesco (1530-1603) *De Motu* (conosciuto e respinto da Galileo in quanto ancora completamente legato alla dinamica aristotelica).
- Cardano Girolamo (1501-1576) *De rerum varietate* (ce ne occupiamo direttamente qui) *De subtilitate* (ce ne occupiamo direttamente qui).
- Tartaglia (Fontana) Niccolò (1499-1557) *La nova scientia* (ce ne occupiamo direttamente qui).
- Benedetti Giambattista (1530-1590) *Diversarum speculationum mathematicarum et physicarum liber* (anticipa in qualche misura il principio d'inerzia rispetto a Galileo e, soprattutto, a Cartesio).
- Maurolico Francesco (1494-1575) *Photismi de lumine et umbra Diaphana* (importanti opere di ottica pubblicate postume nel 1611. Galileo non le aveva lette: ciò spiega la relativa ignoranza di Galileo riguardo all'ottica e l'impossibilità da parte sua di comprendere i limiti tecnici del suo cannocchiale).
- Commandino Federico (1509-1575) *Horologiorum descriptio* (studi di statica).
- Del Monte Guidobaldo (1545-1607) *Mechanicorum liber* (corrispondente di Galileo).
- Stevin Simon (1548-1620) *De Beghinselen der Weegconst* (Principi di statica e idrostatica).

3. Le cinquecentine di contenuto *fisico* dell'Istituto Lombardo e il *De Subtilitate*

La biblioteca dell'Istituto Lombardo possiede due di queste opere: *La nova scientia* di Niccolò Tartaglia Stampato *In Venetia: per Nicolò de Bascarini a istantia de l'Autore, 1550* (Fondo Arnaldo

Masotti) e il *De rerum varietate* di Girolamo Cardano stampato *Basileae: per Sebastianum Henricpetri*, 1581(Fondo Luigi Belloni), di cui sono mostrate di seguito due immagini (*Fig. 1*).

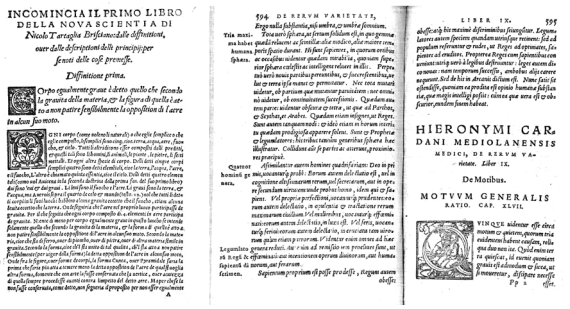


*Fig. 1 – a) L'*incipit *della* Nova Scientia*; b) due pagine del* De Rerum Varietate.

4. L'eredità aristotelica nei principi della dinamica di Tartaglia e Cardano

Tartaglia e Cardano si basano su principi generali del moto di impronta ancora sostanzialmente aristotelica, introducendo tuttavia alcune significative, anche se marginali, variazioni e innovazioni. Per comodità del lettore, riassumiamo qui i punti base della dinamica di Aristotele.

- Il cambiamento di posizione è solo uno dei possibili fatti *meccanici*: il moto locale dei corpi è il quarto tra i cambiamenti possibili nel mondo sublunare: questi cambiamenti possono essere di sostanza, di qualità, di quantità e di posizione.
- Il vuoto non esiste (si consideri la posizione radicalmente diversa di Newton [4] e il *ritorno all'antico* dell'attuale QFT-Quantum Field Theory [5]).
- I possibili tipi di moto sublunare sono due: naturale (per esempio la caduta di un grave) e violento (per esempio il moto iniziale di una freccia scoccata da un arco).
- Non c'è legge d'inerzia: il moto richiede sempre una causa (talora difficile da evidenziare per i moti naturali).

- Il moto naturale dei gravi (verso il centro della terra) avviene con velocità media proporzionale al peso e inversamente proporzionale alla densità del mezzo.
- Nel moto violento la velocità è proporzionale alla forza motrice e inversamente proporzionale alla resistenza del mezzo. La dinamica dell'aria fornisce sia la forza motrice (dopo il primo impulso) sia la forza resistente. Vedi di seguito le connessioni con la moderna teoria cinetica microscopica e il secondo principio della termodinamica.
- E' in buon accordo con molti dati sperimentali, soprattutto per i moti stazionari in presenza di resistenza viscosa.

Non affronterò analiticamente i punti in cui Tartaglia e, soprattutto, Cardano si discostano, nel merito, dalle leggi aristoteliche generali. Basti qui ricordare che entrambi si basano su Aristotele ma con una certa autonomia di pensiero e con un attenzione importante ai fatti sperimentali:

- utilizzano in modo nuovo un concetto precedente di moto di tipo *misto* (in parte violento, in parte naturale), introdotto empiricamente per meglio *salvare i fenomeni* e, per la prima volta, interessati alla precisa forma geometrica della traiettoria relativa a questo tipo di moto.
- Tartaglia, con una taglio che diremmo fisico-matematico, introduce originali postulati *ad hoc*, alcuni mutuati dagli elementi di Euclide, per esempio: *Lo istante è quello che non ha parte (Il ponto è quello che non ha parte).*
- Cardano si discosta dall'interpretazione corrente del *filosofo* nella descrizione dettagliata dell'interazione con l'aria di un corpo in moto violento. Egli ritiene che la potenza motrice dell'aria nei confronti di un proiettile non sia stata compresa: solo lui, Cardano, ha capito cosa Aristotele voleva intendere e, comunque, il *filosofo* deve essere parzialmente corretto.
  Del resto già Filopono, un autore del VI secolo dell'era cristiana, aveva criticato Aristotele su questo punto [6].

Qui mi concentrerò esclusivamente sulle innovazioni introdotte dai nostri due autori nel caso particolare del moto di un proiettile, caso trattato in estremo dettaglio da entrambi nelle due cinquecentine dell'Istituto. Va però detto subito che Cardano tratta la balistica con

dettaglio ancora maggiore in un'altra opera che l'Istituto Lombardo non possiede: il *De Subtilitate*, di cui è stata pubblicata a cura del dott. Elio Nenci un'edizione critica parziale [7]. Uno degli esemplari più antichi del testo, stampato da Johann Petrejus, Nürnberg: 1550, si trova a Milano (Braidense, coll. D XIV 10, 948). Grazie alla cortesia del dott. Nenci ho potuto leggere in anteprima la sua traduzione italiana inedita del capitolo del *De Subtilitate* che tratta del moto di un proiettile. Un esempio della bella traduzione del dott. Nenci è stato da me utilizzato nella citazione di apertura. Ho così potuto integrare le informazione contenute nel *De Rerum Varietate* e completare il confronto con la visione di Tartaglia.

5. Il moto di un proiettile in Tartaglia e Cardano

Nel cinquecento la balistica assume sempre di più i tratti di una scienza: le motivazioni pratiche, essenzialmente militari, sono ovvie. Tartaglia e Cardano si preoccupano degli aspetti sperimentali della traiettoria di un proiettile sparato da un arma da fuoco. Si rendono entrambi conto che i principi della fisica aristotelica non permettono di descrivere adeguatamente la forma dettagliata di tutta la traiettoria. Assumono allora entrambi un atteggiamento estremamente pragmatico e adottano una spiegazione non unitaria del fenomeno. La traiettoria è divisa in tre tratti. Il moto iniziale, rettilineo, è ben spiegato come *moto violento*, in accordo con Aristotele. Come accennavo, Cardano si discosta dalla descrizione classica nell'analisi particolareggiata dell'interazione con l'aria (che fornisce anche la forza resistente). Il lettore interessato potrà trovare i dettagli nel *De Subtilitate.* Più avanti riprenderò brevemente questo aspetto dal punto di vista della cinetica fisica moderna. Il terzo e ultimo tratto della traiettoria viene assunto come un *moto naturale* verticale di caduta. In questo entrambi gli autori abbandonano, curiosamente, il tentativo di tenere conto della traiettoria *reale* che non ha affatto questa forma: si tratta dell'aspetto più conservatore e meno attuale. Il maggiore elemento di novità sta nella descrizione del secondo tratto (intermedio) della traiettoria. Empiricamente si assiste ad un moto curvilineo con la concavità verso il basso. Tartaglia e Cardano non possono trovarne la *forma* né una spiegazione semplice nella fisica del *filosofo*. Ricorrono allora, in modo puramente fenomenologico, ad un raccordo del primo e del

terzo tratto con un arco di curva che *assomigli* a quello effettivamente osservato (*Fig. 2*). Non sono più interessati a dedurre il moto da principi generali, ma alla costruzione di una descrizione predittiva di utilità pratica. La differenza sta nella scelta della forma del tratto di raccordo. Tartaglia adotta un arco di cerchio. Non conosceva il trattato sulle coniche di Apollonio: non poteva fare di meglio. Cardano, dimostrando maggiore aderenza alla forma reale e, forse, guidato da un misterioso intuito, assume invece un arco di parabola. La nuova meccanica del seicento gli darà ragione, anche se solo nel caso in cui si trascuri la resistenza dell'aria. Paradossalmente il raccordo con il primo e il terzo tratto viene rappresentato graficamente con punti angolosi, imperfezione assente nei disegni di Tartaglia. Potremmo allora riassumere. Tartaglia si è posto il problema della forma della traiettoria usando anche esperimenti che lo hanno costretto all'introduzione di un moto *misto* di raccordo. Così anche Cardano, che ha però introdotto l'idea della parabola, più vicina alla descrizione corretta. Guidobaldo Del Monte estenderà la somiglianza della parabola a tutta la traiettoria eguagliando i tratti ascendente e discendente. Infine Galileo – partendo dall'assunto errato dell'uguaglianza di catenaria e parabola – assimilerà l'intera traiettoria a quest'ultima curva. Sarà tuttavia Bonaventura Cavalieri (1598-1647) a fornire per primo la dimostrazione esatta nell'opera *Lo specchio ustorio*, precedendo Galileo.

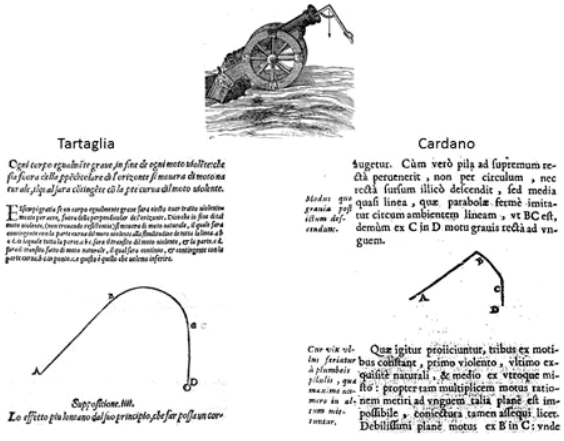


Fig. 2 – Una bombarda e la traiettoria del proiettile nella Nova Scientia (a sinistra); la traiettoria del proiettile nel De Subtilitate *(a destra).*

6. La forza motrice risultante dall'interazione aria-proiettile secondo Aristotele e la deduzione microscopica del secondo principio della termodinamica

Come abbiamo già accennato un uso inedito, oggi si direbbe opportunistico, del vecchio concetto di *moto misto*, per salvare i fenomeni, soprattutto la forma della parte centrale della traiettoria, innestato nello schema logico deduttivo della precedente dinamica aristotelica, costituisce un importante elemento di novità. Si accetta una spiegazione composta da due parti, tra loro disgiunte e incoerenti, che nell'insieme permette una maggiore capacità predittiva, rinunciando ad una giustificazione unitaria. Il ruolo dell'interazione del proiettile con l'aria, che produce, secondo Tartaglia e Cardano, sia forza motrice, subito dopo l'esplosione della polvere da sparo, sia forza resistente, anche se descritto da entrambi gli autori con argomentazioni aristoteliche modificate, oggi insostenibili, ci ricorda inevitabilmente che la moderna cinetica fisica non ha completamente risolto il complesso problema del moto di un corpo immerso in un fluido viscoso dal punto di vista molecolare dettagliato. Si tratta di un caso particolare del formidabile problema della derivazione microscopica rigorosa dell'irreversibilità intrinseca di tutti i fenomeni macroscopici, da cui seguono i concetti di *dissipazione dell'energia* e di *forze dissipative*, connessi con quello di *produzione di entropia* (mai negativa) e della *freccia del tempo* che punta sempre dal passato verso il futuro. Boltzmann credette di aver risolto il problema con la sua dimostrazione del cosiddetto teorema H, cui furono opposte significative obiezioni, basate sul teorema del ritorno di Poincaré e sulla reversibilità temporale di tutte le leggi di forza microscopiche. Per quanto riguarda il primo, si tratta del fatto che un sistema dinamico, pur di aspettare un tempo sufficiente, ritorna sempre in un intorno infinitesimo delle condizioni iniziali. Per quanto riguarda il secondo aspetto, la difficoltà risiede nella proprietà di invarianza rispetto all'inversione del tempo ($t \rightarrow -t$) di tutte le dinamiche microscopiche, classiche e quantistiche. Per chi voglia approfondire tale affascinante tema, consigliamo la lettura di alcune belle pagine di un libro di Carlo Cercignani (già membro effettivo del nostro Istituto): vedi [8], pagg.140-141, sulla fallacia del teorema H di Boltzmann per particolari insiemi di condizioni iniziali. Il tema è: il secondo principio della termodinamica non è derivabile rigorosamente dalle leggi dinamiche microscopiche. Nel caso del moto Browniano di un colloide (oggi si direbbe di una nanoparticella) il problema è stato affrontato da Einstein e da

Smoluchowski, apprendo la strada alla teoria dei rapporti tra fluttuazioni e dissipazione [9]. Nel caso di un corpo macroscopico che si muove in un fluido la deduzione microscopica rigorosa del moto medio, in particolare della forza media resistente, descritta oggi dalla legge empirica di Stokes, in accordo con i dati sperimentali,[1] è ancora un problema aperto. Aristotele aveva bisogno di invocare anche il ruolo di forza motrice dovuta all'interazione del proietto con l'aria: la sua meccanica difettava della legge d'inerzia. La spiegazione aristotelica, anche nella forma modificata da Cardano, è oggi assolutamente inaccettabile. Tuttavia: è anche tale la mera idea che l'effetto medio di innumerevoli urti molecolori possa produrre, in linea di principio, una forza motrice, invece di una forza resistente? Possa cioè violare il secondo principio della termodinamica? Il singolo urto microscopico può produrre un'accelerazione equiversa alla velocità istantanea appena precedente l'urto stesso. Perché l'effetto medio di tutti gli urti in un intervallo di tempo finito è sempre equivalente ad una forza resistente (dissipativa) opposta alla velocità? Nel nostro caso, per quanto praticamente irrealizzabile a causa di probabilità estremamente basse (così risponderebbe Boltzmann e così testimoniano i fatti sperimentali), non è, in teoria, completamente inconcepibile un mezzo fluido dove la produzione di entropia sia negativa. Ciò, non violando alcuna legge microscopica nota, comporterebbe una viscosità negativa [10]: se così fosse la legge di Stokes (*Fig. 3*) si trasformerebbe in una forza motrice.

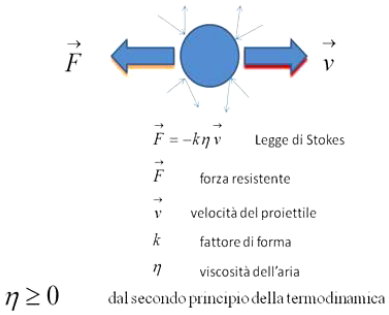


Fig. 3 – Illustrazione grafica della forza di Stokes. Sono schematicamente illustrati quattro eventi corrispondenti a urti con molecole del fluido.

[1] Solo nel caso di fluido in quiete e di basse velocità del corpo che si muove nel fluido. Non è il caso normalmente considerato nella balistica. Vedi le conclusioni.

Si tratta, naturalmente, di una pura suggestione, anche anacronistica: nulla era più estraneo ad Aristotele quanto l'idea di una struttura atomica della materia. Idea estranea ad Aristotele ma non all'antichità tutta: Leucippo, Democrito e Lucrezio insegnano…

7. Conclusioni

Le due cinquecentine dell'Istituto Lombardo, di Tartaglia e Cardano, di cui si è qui discusso limitatamente agli aspetti fisici riguardanti il moto di un proiettile, completando l'analisi con la corrispondente parte del *De Subtilitate*, sempre di Cardano, consentono, da un lato, di considerare Tartaglia come il padre della moderna balistica e, dall'altro, Cardano come colui che, per primo, anticipa, per una parte della traiettoria di un proiettile, la forma parabolica che la nuova meccanica newtoniana assegnerà a tutta la traiettoria nel caso limite di resistenza dell'aria trascurabile. Il principale aspetto innovativo in Tartaglia è l'uso dei fatti sperimentali assieme ai vecchi principi aristotelici, generando una spiegazione concettualmente non unitaria ma assai efficace ai fini predittivi, per esempio dell'alzo della bocca da fuoco che produce la gittata massima. Cardano, oltre ad indovinare la forma parabolica di un tratto di traiettoria, senza giustificazione alcuna, si dimostra intellettualmente più indipendente da Aristotele nella descrizione dell'interazione con l'aria. Interazione, quest'ultima, non suscettibile di una descrizione semplice, neppure oggi. Per un interessante rassegna delle edizioni cardaniane del CNR si veda il riferimento [11]. La storia della balistica [12, pag. 971] ci insegna che la forza resistente non è descritta adeguatamente dalla legge di Stokes. Essa può, generalmente, dipendere da una potenza n della velocità (con n diverso da 1). Eulero fu il primo a ridurre alle quadrature le equazioni del moto in questo caso. Oggi il problema è risolto numericamente assumendo leggi di resistenza empiriche che devono tenere conto anche della dinamica atmosferica e del moto di rotazione del proiettile prodotto dalla rigatura delle canne da fuoco. La bella e semplice parabola, che qualunque moderno libro di testo di Meccanica deriva nel vuoto, ha quindi, più che altro, un valore didattico introduttivo ad un problema ben più complesso, così complesso da valorizzare maggiormente i contributi contenuti nelle opere di Tartaglia e Cardano, considerando i mezzi concettuali e tecnici a loro disposizione.

8. Ringraziamenti

Ringrazio sentitamente il prof. Giannantonio Sacchi-Landriani per avere stimolato il mio interesse all'argomento e il prof. Enrico Isacco Rambaldi per avermi segnalato gli studi su Cardano del dott. Elio Nenci; entrambi per aver letto in anteprima il manoscritto di questa nota. Devo molta riconoscenza al dott. Elio Nenci per aver redatto in tempi brevissimi una bella traduzione in italiano del capitolo sul moto del *De Subtilitate* e per l'estrema cortesia con cui me l'ha resa disponibile.

Bibliografia

[1] Clifford Truesdell, *Essays in The History of Mechanics*, Springer-Verlag, New York, 1968.

[2] Richard G. Bower *et al.*, Proc. R. Soc. A, 2014: **470,** 20140025; Tom C.B. McLeish et al., Nature, 2014: **507**, 162; Hannah E. Smithson *et al.*, J. Opt. Soc. Am. A, 2014: **31**, A341.

[3] Marie Boas, *Il Rinascimento scientifico: 1450-1630*, Feltrinelli, 1973; Paolo Rossi, *La nascita della scienza moderna in Europa*, Laterza, 1997; H. Butterfield, *Le origini della scienza moderna*, Il Mulino, 1962.

[4] Alexandre Koyré, *Studi Newtoniani*, Einaudi, 1983.

[5] Matthew D. Schwartz, *Quantum Field theory and the Standard Model*, Cambridge University Press, 2014.

[6] Ernst Mach, La Meccanica nel suo sviluppo storico-critico, Universale Scientifica Boringhieri, 1977.

[7] Elio Nenci (a cura di), Girolamo Cardano, De Subtilitate, Libri I-VII. Tomo I, Franco Angeli, Milano, 2004.

[8] Carlo Cercignani, *The Boltzmann equation and ist Applications*, Springer Verlag, 1988.

[9] Albert Einstein, Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilche, *Annalen der Physik*, 1905: **322** (8), 549–560; Marian von Smoluchowski, Zur kinetischen Theorie der Brownschen Molekularbewegung und der Suspensionen, 1906: *Annalen der Physik* **326** (14), 756-780.

[10] Lev D. Landau, Evgenij M. Lifshitz, *Fluid Mechanics 2-nd ed.*, Course of Theoretical Physics vol. 6, Pergamon Press, 1987.

[11] Enrico I. Rambaldi, Rivista di Storia della Filosofia, 2010: **4**, 745-773.

[12] Attilio Lazzarini, voce *Balistica* nell'Enciclopedia Italiana, vol. V, Istituto dell'Enciclopedia Italiana fondata da Giovanni Treccani, Roma, 1949.

L'EDIZIONE CARDANIANA DEL CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE; UN'OCCASIONE PERDUTA[1]

Nota del m.e. ENRICO ISACCO RAMBALDI (*)

(Adunanza del 5 giugno 2014)

SUNTO. – *L'edizione cardaniana del Consiglio nazionale delle ricerche; un'occasione perduta*. Il conributo illustra le carenze d'impostazione scientifica che provocarono il fallimento del "Progetto Cardano", ch'era stato promosso dal «Centro del consiglio nazionale delle ricerche per lo studio del pensiero filosofico del cinquecento e del seicento in relazione ai problemi della scienza» fondato da Mario Dal Pra, e che avrebbe dovuto realizzare un'edizione critica delle opere del medico, matematico, astrologo e filosofo Girolamo Cardano (Pavia 1501-Roma 1576).

***

ABSTRACT. – *The Cardano edition from the Consiglio nazionale delle ricerche has been a wasted opportunity*. It shows the lack of an accurate systematic approach that led to the Cardano Project ending in failure. The project had been fostered by the "National research council Center for the study of philosophical thought in the 16th and 17th centuries in relation to scientific questions", set up by Mario Dal Pra. The aim had been for it to prepare a critical edition of the works of the doctor, mathematician, astrologist and philosopher Girolamo Cardano (Pavia 1501-Rome 1576).

(*) E-mail: enrico.rambaldi@unimi.it

1 Il presente intervento è una sintesi della mia *Breve storia delle edizioni cardaniane del Consiglio Nazionale delle Ricerche*, in «Rivista di storia della filosofia», LXV (2010), 4, pp. 745-773.

Fondato da Mario Dal Pra negli anni Sessanta del secolo scorso e da lui diretto fino al 1982, il «Centro [del Consiglio nazionale delle ricerche] per lo studio del pensiero filosofico del Cinquecento e del Seicento in relazione ai problemi della scienza» s'occupò soprattutto del movimento libertino e delle moderne scienze della vita; indirizzi di ricerca confermati durante le direzioni di Arrigo Pacchi (1982-1989) e di chi vi parla (1989-1993), ma progressivamente abbandonati con la direzione di Guido Canziani (1993-2002), che a scopo primario del «Centro» elesse un'*edizione critica* delle opere di Girolamo Cardano.

Alla direzione scientifica del "Progetto Cardano" si dedicarono Guido Canziani e una ricercatrice del «Centro», Marialuisa Baldi. Verso la metà degli anni Novanta, i due ricercatori cominciarono ad "anticipare" l'edizione di testi e materiali: una redazione del *De libris propriis*,[2] un escerto dell'*editio secunda* del *De utilitate ex adversis capienda*,[3] tre lettere di Cardano[4] e alcuni manoscritti d'argomento cardaniano.[5] Questi materiali, presentati come "appunti", "note preliminari", "trascrizioni provvisorie", "riflessioni introduttive", "rapidi itinerari" e così via, risultarono distanti dai requisiti d'una *edizione critica*, sia per l'assenza di rigorosi criteri di trascrizione, di punteggiatura e d'ortografia, sia per la sbrigatività delle introduzioni e delle note storiche. Lacune che, oltre a comportare l'abbandono della méta dell'*edizione critica*, generarono perplessità sulla stessa gestione scientifica del "Progetto Cardano", anche per l'evidente disparità tra il carattere approssimato di quelle "anticipazioni" e i livelli scientifici molto elevati

---

[2] Girolamo Cardano, *Una quarta redazione del* De libris propriis, a cura di Marialuisa Baldi e Guido Canziani, in «Rivista di storia della filosofia», LIII (1998), 4, pp. 767-798.

[3] Id., *Dalla* "secunda editio" *del* De utilitate, a cura di Marialuisa Baldi e Guido Canziani, in *Girolamo Cardano. Le opere, le fonti, la vita*, Atti del Convegno internazionale di studi, Milano (11-13 dic. 1997) a cura di Marialuisa Baldi e Guido Canziani, Angeli, Milano 1999 (in seguito: Atti 1999), pp. 499-512.

[4] *Alcune lettere di Basilea*, a cura di Marialuisa Baldi e Guido Canziani, in *Cardano e la tradizione dei saperi*, Atti del secondo Convegno internazionale di studi, Milano (23-25 maggio 2002) a cura di Marialuisa Baldi e Guido Canziani, Angeli, Milano 2003 (in seguito: Atti 2003), pp. 519-523.

[5] *La circolazione dei manoscritti cardaniani. Alcuni documenti*, a cura di Marialuisa Baldi e Guido Canziani, in Atti 1999 cit., pp. 477-497.

del *Pronostico generale*[6] e del *De orthographia*,[7] due testi di Cardano allora editi a cura di studiosi non organicamente legati al «Centro», Germana Ernst e Raffaele Passerella.

Si sperava tuttavia che i volumi dell'edizione sarebbero stati esenti da mende gravi, dato che nel sito ufficiale del "Progetto Cardano" si leggeva il solenne impegno che tutto il materiale sarebbe stato sottoposto al vaglio di un Comitato Scientifico, che avrebbe «*garanti[to] l'uniformità dell'edizione, stabilendo criteri omogenei per la realizzazione degli apparati e il trattamento filologico dei testi*».[8]

Grande fu quindi la delusione all'uscita del primo volume della progettata *edizione critica*, il *De libris propriis*,[9] curato da Ian Maclean. L'edizione, riguardo alla quale vari componenti il Comitato Scientifico del "Progetto Cardano" lamentarono che non fosse stato loro sottoposta in via preliminare, mancava di doppio apparato (che invece figurerà in successivi volumi cardaniani del Cnr) ed era poco rigorosa nei criteri di trascrizione, uniformazione ortografica e punteggiatura. Inoltre, come osservò Giovanni Orlandi,[10] Maclean si era ristretto a raccogliere e pubblicare una di seguito all'altra le quattro redazioni dell'opera, senza compiutamente esaminarne lo sviluppo diacronico né indagare i nodi teorici e le circostanze storiche che avevano spinto Cardano a ripetutamente e profondamente rimaneggiarla.

La situazione parve del tutto migliorare con i primi sette libri del *De subtilitate*,[11] usciti a cura di Elio Nenci. L'edizione era dotata di dop-

---

6 Girolamo Cardano, *Pronostico generale*, a cura di Germana Ernst, in Atti 1999 cit., pp. 461-475.

7 Id., *Liber de orthographia*, a cura [e con traduz. it.] di Raffaele Passarella, in Atti 2003, pp. 530-617.

8 *www.cspf.mi.cnr.it/cardano*. Il Comitato Scientifico era composto da Giovanni Aquilecchia, Marialuisa Baldi, Davide Bigalli, Jean-Yves Boriaud, Guido Canziani (coordinatore), Thomas Cerbu, Eugenio Di Rienzo, Germana Ernst, Paolo Galluzzi, Enrico Giusti, Alfonso Ingegno, Eckhard Keßler, Jacques Le Brun, Ian Maclean, Pierre Magnard, Nancy Siraisi, Maurizio Vitale.

9 Girolamo Cardano, *De libris propriis. The Editions of 1544, 1550, 1557, 1562, with Supplementary Material*. Edited with an introduction and chronology of Cardano's works by Ian Maclean, Angeli, Milano 2004.

10 Giovanni Orlandi, *Sincronia e diacronia. Su una recente edizione del* De libris propriis *di Girolamo Cardano*, in «Rivista di storia della filosofia», LXI (2006), 4, pp. 949-954.

11 Girolamo Cardano, *De subtilitate*. Edizione critica a cura di Elio Nenci, Tomo I, Libri I-VII, Angeli, Milano 2004.

pio apparato, seguiva rigorosi criteri di trascrizione, d'ortografia e di punteggiatura, conteneva ampie analisi storico-critiche e ricche note. Con un'appropriata modulazione dei caratteri di stampa ed altri accorgimenti tipografici, Nenci dava conto anche dello sviluppo diacronico delle tre redazioni del testo.

La speranza che il *De subtilitate* segnasse una svolta nella gestione scientifica del "Progetto Cardano" andò definitivamente delusa all'uscita del *De immortalitate animorum*, a cura di José Manuel García Valverde.[12] Povera d'inquadramento e commento storici, l'edizione aveva sì doppio apparato, ma usava criteri differenti da quelli, già discrepanti, di Maclean e di Nenci, e cadeva in errori grossolani, come equiparare la lezione licenziata dall'autore e quella dei secenteschi *Opera omnia*[13] di Cardano, scientificamente superati e con molti errori.

I giudizi negativi s'erano frattanto ulteriormente aggravati a causa di due infelici iniziative editoriali apparse *a latere* del "Progetto Cardano", ma opera dei suoi due responsabili: un dvd con i *Contradicentia medicorum*[14] e uno "stampato" ("edizione" sarebbe troppo dire) della seconda edizione del *De utilitate*.[15] Nel dvd da un lato s'ammetteva che, anziché criticamente vagliate, le modalità di trascrizione fossero state adattate alle "caratteristiche tecniche del *software*", ma dall'altro si protestava che quel dvd fosse una sorta d'edizione *supercritica*, con la risibile motivazione che in quell'insaccato elettronico fossero stipate "non una, ma tutte le edizioni disponibili dei *Contradicentia*". Quanto al volumone di circa millecinquecento facciate, che nel frontespizio veniva gabellato come *Secunda editio* del *De utilitate*, altro non era se non la mera riproduzione fotografica del codice.

Nel frattempo era però intervenuto un provvidenziale mutamento istituzionale: il «Centro» era confluito nell'«Istituto [del Consiglio nazionale delle ricerche] per la storia del pensiero filosofico e scientifi-

---

[12] Id., *De immortalitate animorum*. Edición crítica de José Manuel García Valverde, Angeli, Milano 2006.

[13] Id., *Opera omnia*, a cura di Charles Spon, 10 vv., Huguetan e Ravaud, Lione 1663; rist. anast. con introduzione di August Buck, Frommann-Holzboog, Stuttgart-Bad Cannstadt 1966 e Johnson Reprint Corporation, New York (N.Y.) 1967.

[14] Id., *Contradicentium medicorum libri*, a cura di Marialuisa Baldi e Guido Canziani, dvd realizzato dalla ditta META, Lucca [2004].

[15] Id., *De utilitate ex adversis capienda libri III, Editio secunda*, Insubria University Press-Istituto di Studi Superiori dell'Insubria «Gerolamo Cardano», Varese 2004.

co moderno», retto da un nuovo Consiglio scientifico, del quale era decano Maurizio Vitale,[16] e da una nuova Direzione, affidata per concorso internazionale a chi vi parla. Le critiche alla gestione scientifica del "Progetto Cardano" trovarono così un alveo istituzionale, e in breve si giunse alla dolorosa ma inevitabile decisione di cassarlo.

Tuttavia, per dar prova che un'istituzione fondata da Mario Dal Pra era ben in grado di produrre edizioni critiche scientificamente elevate, prima d'interrompere il "Progetto Cardano" l'«Istituto» pubblicò la *Praefatio* al *De utilitate*[17] a cura di Raffaele Passerella e il *De ludo aleae*[18] e l'*Ars magna*[19] a cura di Massimo Tamborini. Tre edizioni che, insieme al *De subtilitate*, costituiscono il retaggio positivo di un'occasione, colpevolmente perduta.

16 Il Comitato Scientifico dell'«Istituto» era composto da Claudio Cesa, Giuseppe Giarrizzo, Jürgen Trabant, Maurizio Vitale.

17 Girolamo Cardano, *De utilitate ex adversis capienda. Praefatio*. Edizione critica a cura di Raffaele Passarella; supplemento al n. 4/2008 della «Rivista di storia della filosofia».

18 Id., *Liber de ludo aleae*, a cura di Massimo Tamborini, Angeli, Milano 2006.

19 Id., *Artis magnae sive de regulis algebraicis liber unus*, a cura di Massimo Tamborini, Angeli, Milano 2011.

LE APPLICAZIONI DELLE NUOVE MODALITÀ OPERATIVE MISTE AL RILIEVO DELLA GUGLIA MAGGIORE DEL DUOMO DI MILANO

CARLO MONTI (*)

Nota presentata dal m.e. Leone Corradi Dell'Acqua
(Adunanza del 26 giugno 2014)

SUNTO. – Le applicazioni delle nuove modalità operative miste al rilievo della Guglia Maggiore del Duomo da quota 63m alla sommità della Madonnina e nei due altari laterali della campata di sinistra e di destra.

***

ABSTRACT. – The main purpose of the paper is to discuss how to use 3D models in the world of Cultural Heritage (CH) by focusing on complex architectures. The experience of survey and modelling of the main spire of the Milan's Cathedral is described. It is as an example, how a detailed real based 3D model is created and used as base for an information system (BIM) that is now at disposal for the maintenance works of the cathedral. The interesting case of study is the chance to present common problems, adoptable solutions and to discuss about the use and implementation of this kind of system for CH.

Forti cambiamenti ha subito anche quella che un tempo veniva chiamata fotogrammetria terrestre, ora fotogrammetria dei vicini. Uno degli esempi più interessanti nel nostro Paese è quello riguardante le applicazioni al rilevamento, a scopo di manutenzione e di catalogazione, di molti beni culturali. Un esempio concreto e importante è quello

(*) Politecnico di Milano, Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito - A.B.C., 3D Survey Group, Milano, Italy.
E-mail: carlo.monti@polimi.it

delle guglie, statue, archi rampanti, decori, altari del Duomo di Milano, dove si sono usati scansori laser e riprese fotografiche operando la metodologia del matching d'immagini *(Figg. 1-12)*.

I sensori di rilievo di ultima generazione stimolano la ricerca scientifica degli addetti al settore e -viste le nuove possibilità- aumentano il livello di confronto pluridisciplinare e spingono verso la ricerca di nuovi utilizzi dei prodotti generati. Oggi le tecniche di rilievo permettono di costruire modelli 3D raffinati e i sistemi di *Rapid Prototyping* sono in grado di realizzare modelli fisici, con tempi e costi sempre più ridotti.

Nel settore dei beni culturali questa tecnologia rappresenta un mezzo efficace per la realizzazione di copie di reperti e parti di architetture; modello e copia fisica possono essere utilizzati per vari scopi:

- il modello costituisce la più moderna forma di catalogazione- archiviazione del bene (una banca dati 3D della forma);
- a partire dal modello 3D si possono generare tutte le viste e le sezioni desiderate, con un buon 3D si genera tutto il 2D necessario;
- sul modello si possono effettuare confronti (disponendo di diversi file) dello stesso oggetto ottenuti da rilievi effettuati in tempi diversi, per verificare lo stato di conservazione e per monitorare l'eventuale danneggiamento dovuto ad agenti esterni;
- dal modello si possono ricavare volume e dimensioni, ed è possibile inserire qualsivoglia tipo di informazione, anche collegamenti a DB d'archivio;
- il modello digitale può essere reso disponibile on-line e quindi navigato ed esplorato (gallerie virtuali, alto livello di fruibilità);
- il modello digitale permette operazioni di restauro virtuale (ricomposizione di frammenti, completamento di parti mancanti, …);
- dal modello digitale (mediante tecnologie di *rapid prototyping*) si realizzano copie del bene;
- disporre di modelli digitali estende il settore delle attività dimostrative o didattiche, si possono, ad esempio, esplorare siti generalmente inaccessibili;
- modelli digitali e realtà virtuale offrono sensazioni molto coinvolgenti per gli spettatori.

Sicuramente l'estrema flessibilità delle tecnologie oggi disponibili applicate ai beni culturali offre modi nuovi per documentare, indagare, conoscere, diagnosticare, divulgare, fruire,…. migliorando il livello di conoscenza sugli oggetti e anche l'interesse da parte del pubblico che si avvicina con curiosità a queste nuove modalità di visualizzazione delle opere d'arte.

In questo senso il lavoro in corso sul Duomo di Milano rappresenta un caso interessantissimo per le difficoltà che presenta e per le ricadute sia nel settore cantieristico di gestione del monumento che nelle aperte possibili applicazioni a livello museale.

Le immagini che accompagnano questa premessa danno ragione a quanto detto.

Vale la pena di parlare un poco più diffusamente di questo argomento, anche perché le attuali prestazioni degli scansori laser, integrate radiometricamente da prese fotografiche, trovano vaste applicazioni nell'ambito del rilevamento dei beni culturali in genere, delle architetture in particolare.

I "prodotti" del rilievo più richiesti nel campo dei Beni Culturali e Archeologici estesi sono oggi i seguenti:

- *ortofoto:* per la conoscenza del bene *in primis* e a cascata per il computo metrico estimativo;
- *piante, sezioni, prospetti* come base per le operazioni di restauro e manutenzione;
- *modello tridimensionale* globale del bene a una determinata data temporale.

L'integrazione di rilievo laser e fotogrammetria può fornire la soluzione ottimale per ottenere i suddetti prodotti in maniera rigorosa e con tempi rapidi.

Il risultato di una scansione laser è come si è detto a suo tempo, una nuvola di punti con coordinate XYZ molto densa, che costituisce da sola un modello tridimensionale completo e discreto, ma per la numerosità dei punti considerabile continuo (quindi finito senza alcuna elaborazione successiva) ad una certa scala.

Ai fini della completezza e della comprensione del modello tridimensionale l'integrazione dell'informazione di colore sulla nuvola di punti incrementa la leggibilità del dato e favorisce la sua interpretazione da parte dell'operatore (*modello tridimensionale*). Tre sono le tecniche ormai consolidate:

a) "intensity based";
b) "feature based";
c) "relational".

In a) le immagini originali vengono usate come matrici di grigio; il metodo è detto anche "area-based matching". L'incertezza è oggi subpixel e spesso minore sino a 1/10 di pixel.

In b) il processo richiede per prima cosa le specificità delle imma-

gini di base come contorni, angoli, areole, strutture e così via. L'incertezza è sub-pixel, ma minore del caso a). I procedimenti sono:
1) relazionali,
2) stime robuste,
3) cross-correlation,
4) programmazione dinamica,
5) correlazione fra elementi grafici.

In c) si usano relazioni geometriche o d'altro tipo fra strutture e caratteristiche del rappresentato. Il metodo non è molto accurato ma è robusto e non richiede elevate approssimazioni. Raramente viene però usato per generare DSM (Digital Surface Model).

La correlazione area-based è un metodo di applicazione locale basato sull'accoppiamento di due areole di pixels (una per ogni immagine). Per prima cosa, viene scelto un pixel *p* di coordinate (i, j) nella prima immagine. Questo pixel sarà il baricentro di una finestra di ricerca con dimensioni N × N (finestra di riferimento). Trovare il pixel della seconda immagine corrispondente a *p* significa confrontare la finestra di riferimento con alcune finestre prese dalla seconda immagine (frames di ricerca). Una volta trovata la zona di ricerca che più assomiglia alla finestra di riferimento, il baricentro di tale finestra sarà il pixel corrispondente a *p*.

Visto in termini assolutamente generali, il problema ha una complessità molto elevata ed è intrattabile: esso va, dunque, semplificato. L'introduzione del vincolo epipolare è un'ottima soluzione al fine di semplificare il problema iniziale. Questo vincolo impone che, nelle immagini stereoscopiche, punti corrispondenti debbano sempre giacere su linee epipolari. Queste linee corrispondono all'intersezione di un piano epipolare (il piano contenente un punto dell'oggetto nell'immagine 3D e i punti principali dei due obiettivi) con i piani di immagine sinistro e destro. La ricerca delle corrispondenze, quindi deve essere effettuata solo su tali linee epipolari e non sull'intera immagine. L'utilizzo del vincolo epipolare riduce il problema, inizialmente bidimensionale, a uno monodimensionale, poiché il pixel obiettivo nella seconda immagine deve trovarsi sulla linea orizzontale di ordinata uguale a quella del pixel di partenza (per l'appunto, linea epipolare).

Un modo semplicistico di trovare la disparità è quello di cercare lungo le linee epipolari il massimo della funzione di correlazione; tuttavia si può fare molto meglio adoperando dei vincoli aggiuntivi:

1) unicità: un punto in una immagine può corrispondere al massimo ad un punto nell'altra immagine,
2) continuità a tratti delle superfici nella scena: il fatto che il mondo solitamente è continuo a tratti, implica che punti vicini di una scena abbiano valori di profondità, e quindi di disparità, simili.

Oltre a questi vincoli, si possono trovare funzioni euristiche atte a migliorare l'algoritmo, come ad esempio l'introduzione di valori di soglia o l'analisi dell'andamento dei vari picchi che contraddistinguono la funzione di correlazione.

In definitiva, gli algoritmi di autocorrelazione permettono il riconoscimento di segnali o forme atte a individuare automaticamente punti omologhi; ciò permette di limitare l'impiego dell'operatore umano e in certi casi di sostituirlo.

Torniamo alla procedura "area based"; di fatto si tratta di un confronto statistico fra i valori di grigio di due minuscole porzioni d'immagine (ormai solo digitali) di cui la prima è detta "matrice sagoma" (*search window*) e la seconda "matrice di ricerca" utilizzando algoritmi di "*cross-correlation*" e dei minimi quadrati ("*least square modelling*"). Viene qui ricercata la massima correlazione fra i livelli di grigio della matrice sagoma rispetto alla matrice di ricerca, assumendo come posizione corretta quella corrispondente al valore massimo del coefficiente di correlazione, che è dato da:

$$r = \frac{\sigma_{12}}{\sigma_1 \sigma_2}$$

ove σ_1 e σ_2 sono gli sqm delle due matrici, mentre σ_{12} è la covarianza. L'espressione di *r* è la seguente:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(g_{1i} - g_1)(g_{2i} - g_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(g_{1i} - g_1)2 \sum_{i=1}^{n}(g_{2i} - g_2)2}}$$

ove gli elementi sono i seguenti:

g_{1i} = *livelli di grigio matrice sagoma in i*
$g_{2,i}$ = *livelli di grigio matrice di ricerca*
g_1, g_2 = *media livelli di grigio nelle due matrici*
n = numero totale pixel

La trasformazione fra le due matrici è di tipo affine, a sei parametri e l'equazione relativa è la seguente:

$g_1 (x,y) = g_1 g_2 (ax + by + cdx + ey + f) + s$

Ecco la successione delle operazioni nel caso "area based":
- si seleziona l'entità da correlare nella prima immagine,
- si individua l'entità corrispondente sulla seconda immagine,
- si calcola la posizione del punto da correlare,
- si valuta la qualità della correlazione effettuata.

Per la prima operazione si impiegano algoritmi detti genericamente "operatori".

Gli operatori sono quindi algoritmi per l'estrazione delle diverse immagini di punti che sono potenzialmente degli adatti candidati alla correlazione. Adatti candidati di punti omologhi sono immagini di pixel di caratteristiche tali, da essere uniche entro limitati intorni, che sembrano avere similari aspetti nelle corrispondenti immagini. L'operatore determina per ogni pixel uno o più parametri per il calcolo di un dato valore da utilizzare nella successiva correlazione.

Esamineremo qui due operatori: quello di Moravec e quello di Förstner, a titolo di esempio. Il primo calcola le somme quadratiche dei gradienti in quattro direzioni principali della finestra d'immagine esaminata. Il secondo calcola la matrice di covarianza dello spostamento di finestra immagine. Ecco le espressioni relative ai due operatori.

Operatore di Moravec

$$V_1 = \frac{1}{p(q-1)} \sum_{j=-k}^{+k} \sum_{j=-1}^{+l-1} [g(i,f) - g(i,f+1)]^2$$

$$V_2 = \frac{1}{(p-1)q} \sum_{i=-k}^{+k-1} \sum_{j=-1}^{+l} [g(i,f) - g(i+1,f)]^2$$

$$V_3 = \frac{1}{(p-1)(q-1)} \sum_{i=-k}^{+k-l} \sum_{j=-1}^{+l-1} [g(i,j) - g(i+1,j+1)]^2$$

$$V_4 = \frac{1}{(p-1)(q-1)} \sum_{i=-k}^{+k-l} \sum_{j=-1}^{+l-1} [g(i,j+1) - g(i+1,f)]^2$$

essendo: $V = \min (V_1, V_2, V_3, V_4)$ mentre: $p = 2k+1$ e $q = 2l+1$

Il programma dell'operatore di Moravec è di facile implementazione e relativamente veloce per i tempi d'impiego; non è però invariante alle rotazioni e la sua incertezza è di un pixel.

Vediamo ora l'*operatore di Förstner*.

Questo operatore è fondato sul principio che la zona intorno ad un punto $f(x,y)$ è una copia slittata e affetta da rumore del segnale originale dell'immagine $g(x,y)$:

$$f(x,y) = g(x + x_0,\ y + y_0) + e(x,y)$$

linearizzando e ponendo $x_0 = y_0 = 0$ si ha:

$$dg(x,y) - e(x,y) = \partial g/\partial x\ x_0 + \partial g/\partial y\ y_0 = g_x\ x_0 + g_y y_0$$

essendo:

$$dg(x,y) = f(x,y) - g(x,y)$$

Se ne ottiene la matrice:

$$\begin{vmatrix} \sum g_x^2 & \sum g_x g_y \\ \sum g_y g_x & \sum g_y^2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x_0 \\ y_0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} g_x & dg \\ g_y & dg \end{vmatrix}$$

Che si può scrivere come:

$$\mathbf{Nx = A^T Ax = A^T dg}$$

Le relazioni sopra viste sono la base sulla quale sono maturati sofware numerosi di trattamento sia delle nuvole laser, sia del matching d'immagine. La potenza dei calcolatori attuali, portatili compresi, permettono di orientare centinaia di immagini trovando i punti corrispondenti e costruire quindi una nuvola così fitta che costituisce di fatto un modello digitale misurabile e conosciuto nelle sue caratteristiche di posizione, forma e colore. I modelli 3D sono uno degli strumenti di conoscenza oggi disponibili, la cui realizzazione è in continua crescita e sostenuta dall'aumento delle capacità hardware e software. La realizza-

zione di modelli digitali, in particolare nel settore dei Beni Culturali, è comunque un processo abbastanza complesso che prevede l'impiego di strumenti diversi e programmi adeguati per le elaborazioni e necessita sempre dell'intervento di personale qualificato, sia durante le campagne di rilievo che nella fase di modellazione digitale. Sono disponibili sul mercato diversi tipi di sensori per il rilievo tridimensionale e gli strumenti maggiormente impiegati nel settore dei Beni Culturali sono gli strumenti laser scanner e le camere digitali.

Se oggi gli strumenti disponibili sono tanti e diversi bisogna però ricordare che la forma e la collocazione dell'oggetto da rilevare influenzano le operazioni di acquisizione.

Di fatto non esiste una metodologia di acquisizione che possa essere applicata in modo indifferenziato; la complessità della forma dell'oggetto, la sua dimensione e la sua posizione, le caratteristiche della superficie (texture) rendono ogni caso "un caso a sé" ed è l'abilità dell'operatore che rende possibile un risultato di qualità (oltre alle problematiche legate al tempo a disposizione per la campagna di rilievo e i costi sostenibili dal progetto).

Ringraziamenti

Un particolare ringraziamento per la collaborazione continuativa e la disponibilità assoluta al Direttore della VFD Dott. Ing. Benigno Mörlin Visconti Castiglione, al personale tutto e in particolare a Franco Aquilano, Massimiliano Regis.

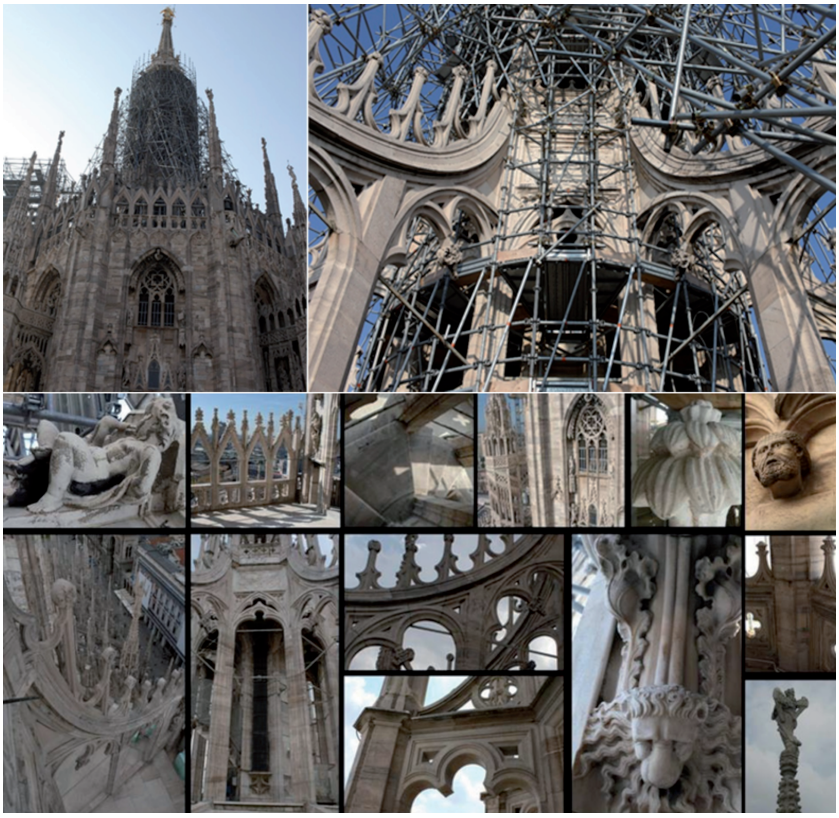


Fig. 1 – Il cantiere della Guglia Maggiore del Duomo di Milano.
Il ponteggio strallato per le operazioni necessarie (controllo degli elementi marmorei, restauro, sostituzioni dei conci ammalorati, ….) è particolarmente complesso e ha richiesto un studio preliminare per verificare che lo stesso non gravasse sulla parte strutturale da quota 63 m fino alla sommità della Guglia a quota 108 m.

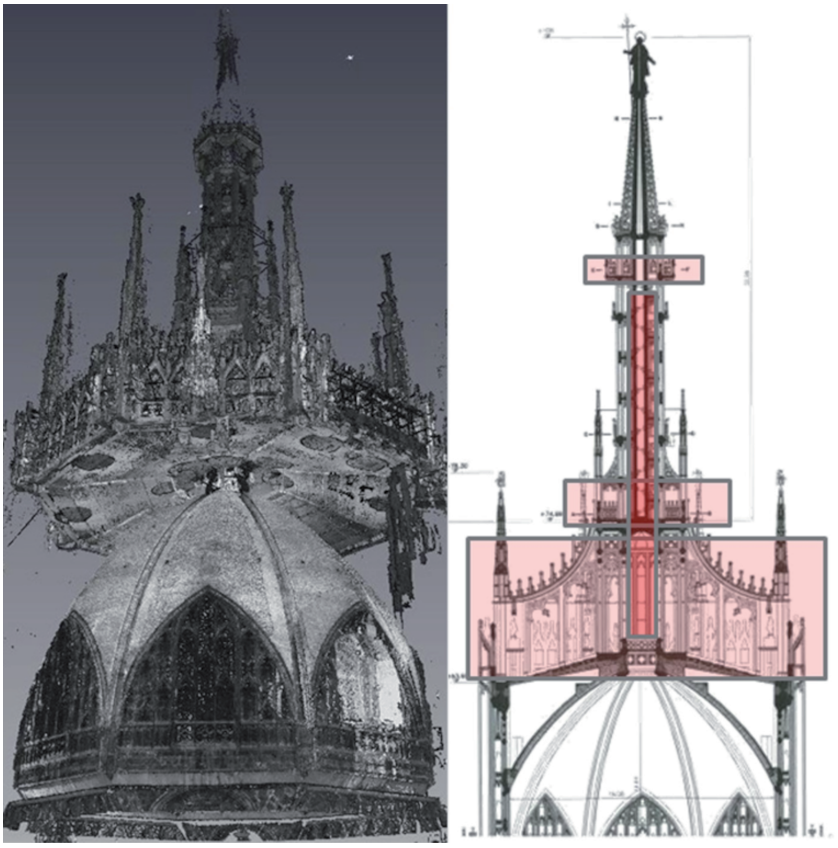


Fig. 2 – Qui si può vedere il rilievo 3D ottenuto col Laser Leica HDS 7000 con la visualizzazione delle nuvole di punti acquisiti georeferenziate. Sono state effettuate 73 stazioni per un modello 3D composto da circa 600 milioni di punti. A destra si può vedere il passaggio dal 3D al 2D evidenziando partendo dall'alto il Belvedere, la scala alta e bassa, il belvedere basso e infine gli Archi rampanti e il Tiburio.

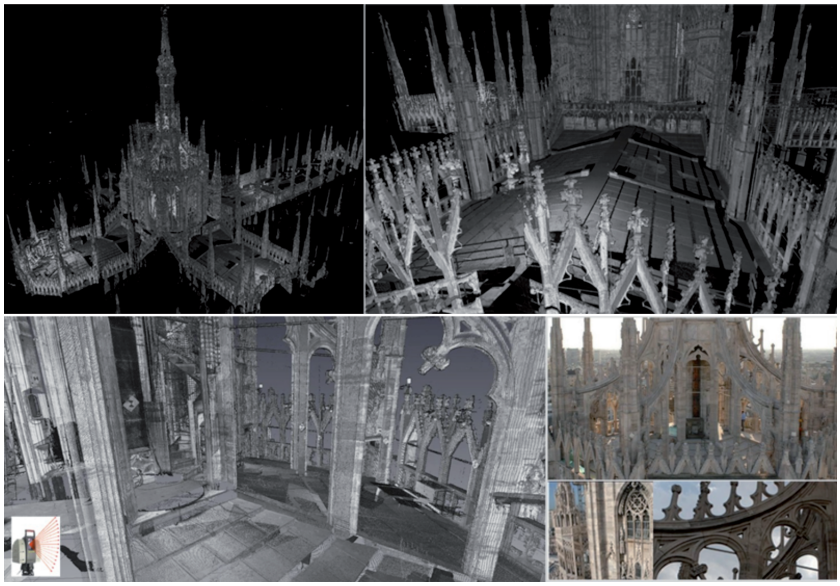


Fig. 3 – Come detto è stato realizzato un rilievo laser scanner dell'intero complesso del tiburio, la georeferenziazione delle nuvole ha permesso di ricavare un ricco modello – in formato nuvola di punti – utile per la costruzione del modello 3D e la georefenziazione delle singole parti sempre con laser Leica HDS 7000. Nella figura si vedono le estrazioni di zone di interesse creando delle "finestre" dal totale della nuvola di punti.

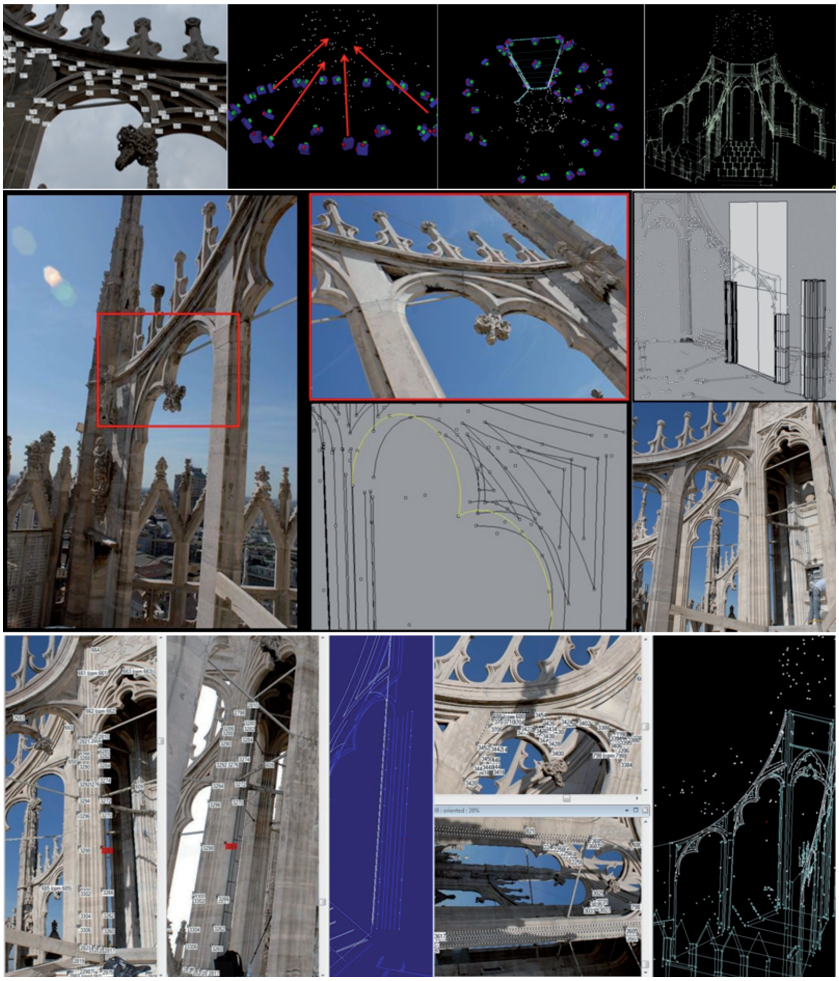


Fig. 4 – Attraverso la restituzione fotogrammetrica è stato possibile ricostruire forma e posizione delle parti lineari della struttura, le immagini illustrano alcuni degli step di costruzione del modello dei pilastri del tiburio. Qui appare l'intervento fotogrammetrico che si rivela fondamentale per l'individuazione di ciascun pezzo della struttura. Qui vengono applicate Tecniche di Image modelling per gli oggetti "Line based" (scheletro strutturale della guglia) e Tecniche di Image matching per oggetti di tipo"Surface based" (Statue, decorazioni, Guglie secondarie…) acquisendo Nuvole di punti, con passaggio alle Mesh. Per oggetti di tipo "Line based (scheletro della Guglia) acquisendo Nuvole di punti, Estrazione di profili. Il tutto per arrivare alla Modellazione.

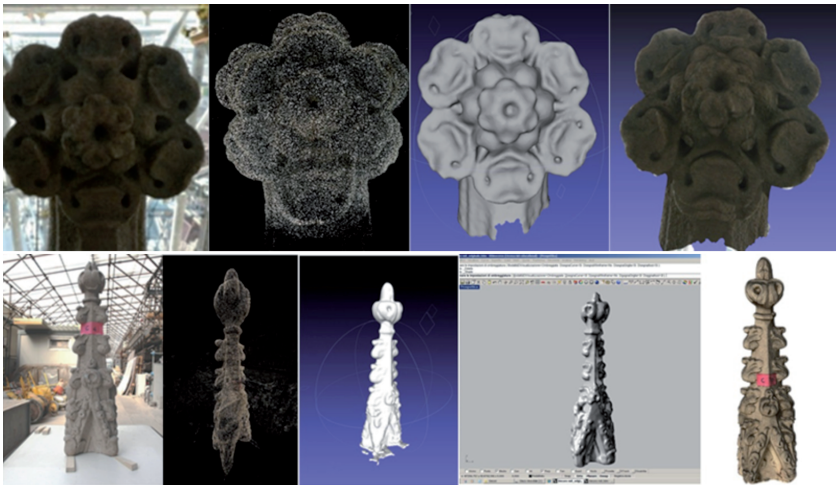


Fig. 5 – Tutti i dettagli relativi agli ornati e statuaria sono stati modellati con la tecnica del matching di immagine. Vale quanto detto per la Fig. 4. Tutti i modelli concorrono alla costruzione del modello generale della Guglia. In rosso si evidenzia il singolo elemento di cui si viene a conoscere il tutto: forma, dimensione, peso. Andando in ordine: dai fotogrammi si estrae la nuvola di punti, si ricava una superficie interpolante, si operano sul modello le correzioni e per ultimo si ha la "vestizione"con le immagini.



Fig. 6 – Sono state fatte alcune prove di rilievo e modellazione con strumentazione laser scanner (laser triangolatore). Si è utilizzato il Konica Minolta Range7. Questo è uno scanner 3D a triangolazione laser. Per la massima accuratezza, anche su corpo nero, occorrono 96 sec. circa con incertezza sul punto intorno a 0,1 mm.
Ogni scansione acquisisce un massimo di 1.310.000 punti con un foot print sull'oggetto di circa 20x30 cm^2 ad una distanza compresa fra 45 e 80 cm.

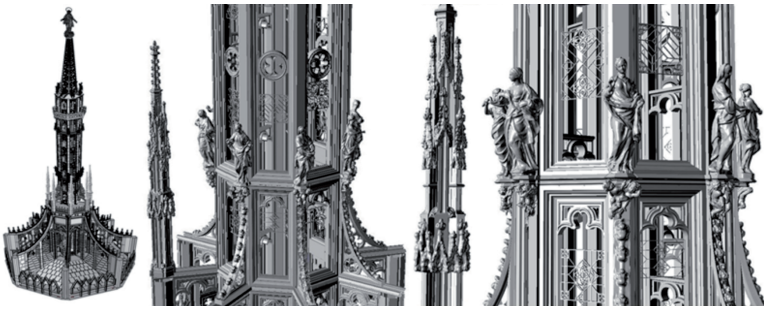


Fig. 7 – Il modello 3D completo della Guglia Maggiore è la 'somma' dei singoli conci, ornati, statue che la compongono. E' possibile esplorare il modello in ogni sua parte ….

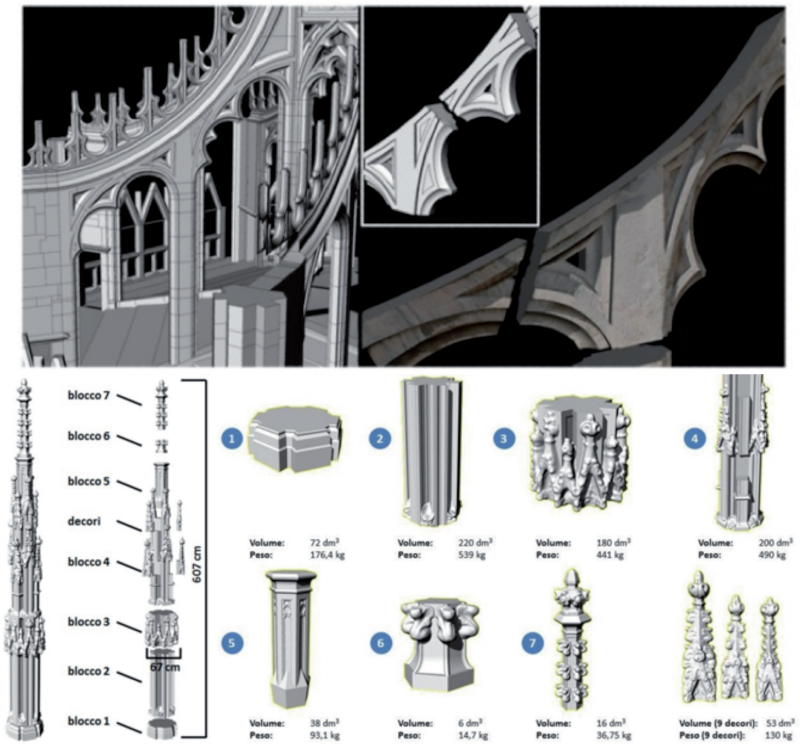


Fig. 8 – Un dettaglio di una delle gugliette che adornano il primo terrazzo. Sono state modellate tutte le parti (lineari e free form) poi combinate insieme per costruire il modello completo dell'oggetto. Il modello così realizzato permette di conoscere le dimensioni delle parti e il peso. Dati particolarmente interessanti per l'ordinaria gestione del cantiere di manutenzione.

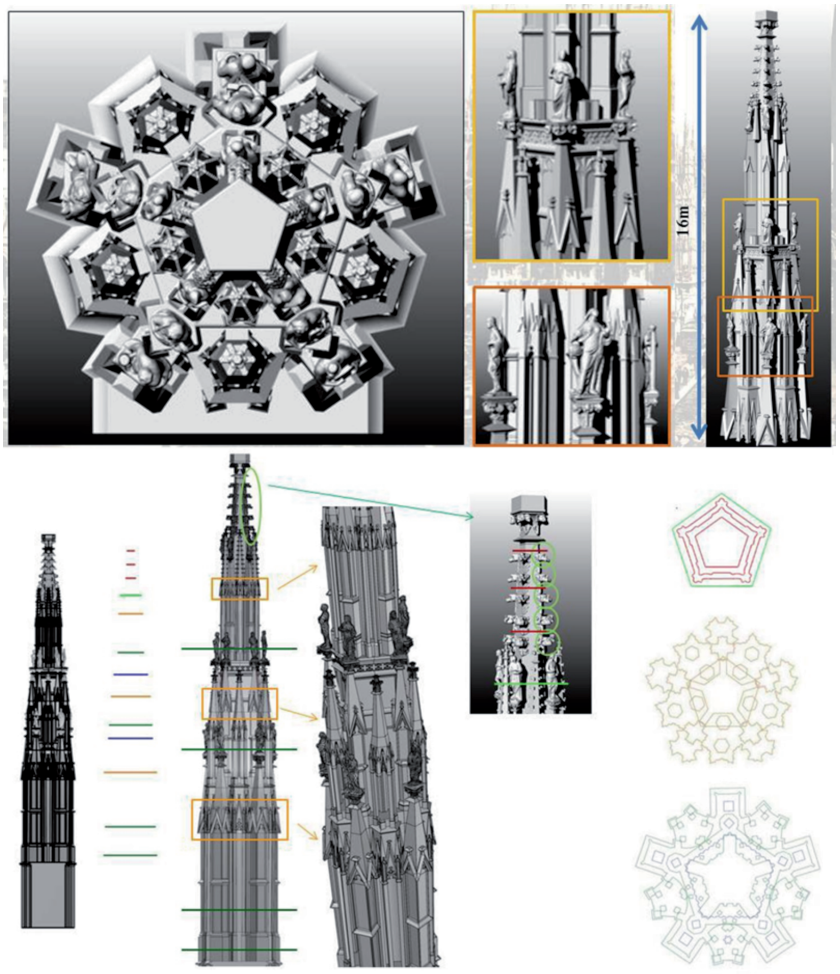


Fig. 9 – La guglia 18. E' l'unica guglia pentagonale del Duomo. E' un tipico esempio di architettura frattale con caratteristiche di omotetia e auto somiglianza, 500 anni prima che Mandelbrot scoprisse e rendesse famosa la geometria frattale.

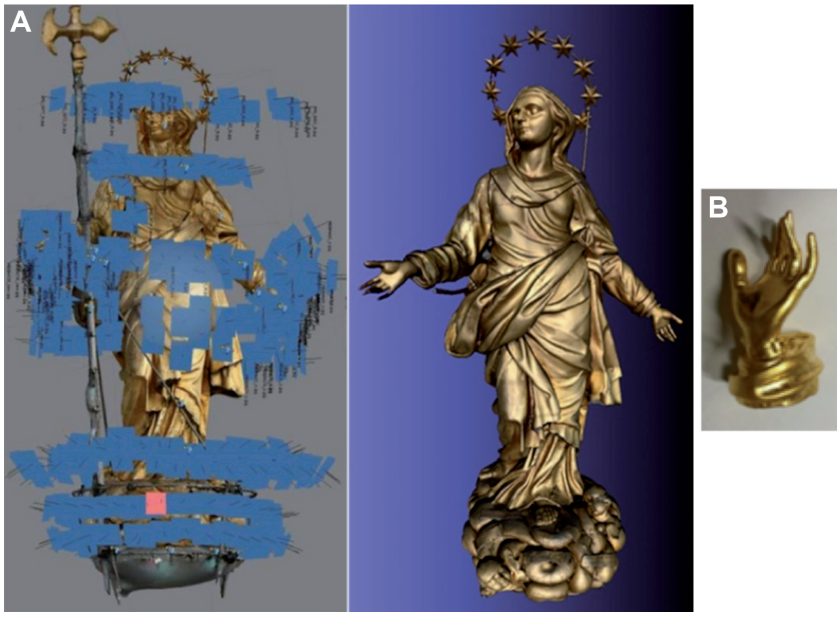


Fig. 10 – A) Il modello della Madonnina. È stata rilevata dopo la ridoratura con una camerera montata su un braccio apposito per raggiungerla in tutta la sua altezza (4,58 m) E' stata utilizzata una camera CANON 5D MARKIII, Obiettivo 35 mm, Sensore full frame 24x36 mm. Sono state fatte 458 foto (5760x3840), 11 blocchi fotogrammetrici. Le immagini sono state suddivise in 5 sottogruppi (chunk), dense matching estratto ad alta risoluzione (lim: 20 milioni). Ogni chunck è stato registrato sull'altro usando procedura automatica per la parte bassa del corpo. Tramite l'utilizzo di target per la parte alta del corpo. Allineamento fine e post-elaborazione della mesch in Rapidform. Numero dei triangoli 155000 circa, risoluzione 0,5 mm. Prototipazione modello in scala 1:5 (916 mm) in resina caricata con alluminio, finitura superficiale di macchina.
B) Finitura finale in foglia d'oro della mano destra.

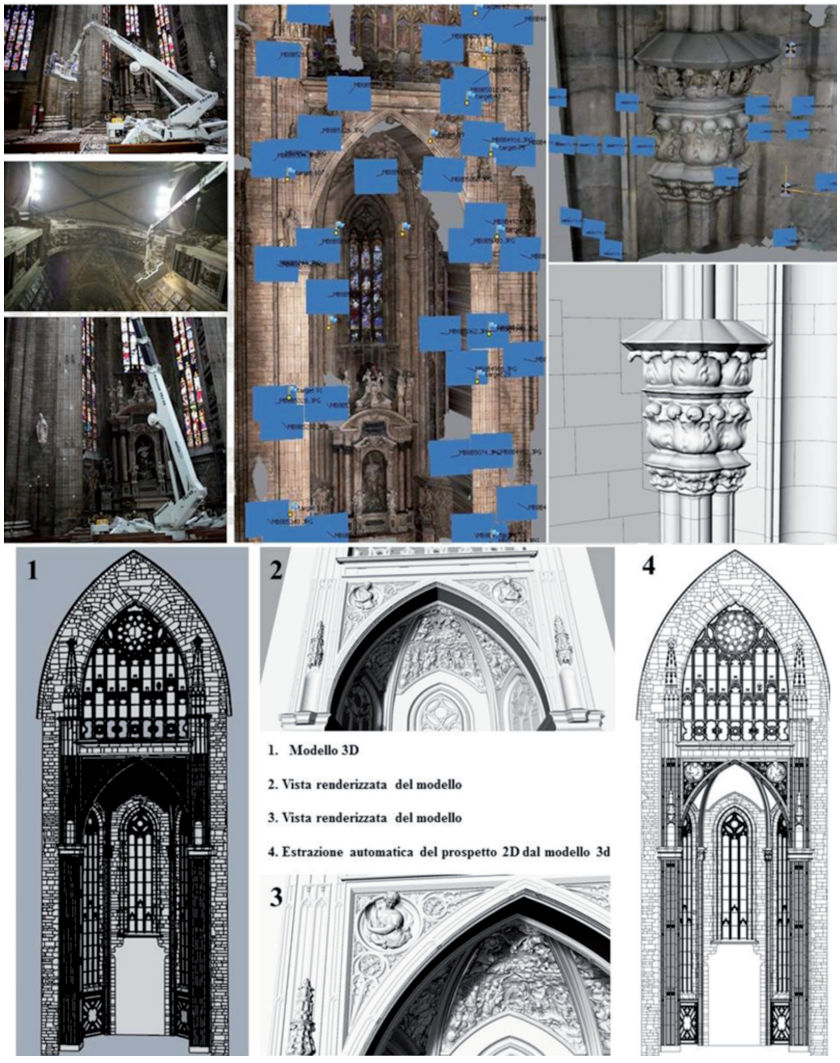


Fig. 11 – Anche gli altari posti ai lati del transetto sono stati rilevati con tecnica fotogrammetrica. Dalle immagini acquisite alle diverse quote è stato possibile ricavare il modello 3D, poi scomposto nei conci costruttivi. Dal modello 3D è sempre possibile estrarre qualunque vista 2D scegliendo di volta in volta quella necessarie in funzione delle esigenze dell'ufficio tecnico e del cantiere.

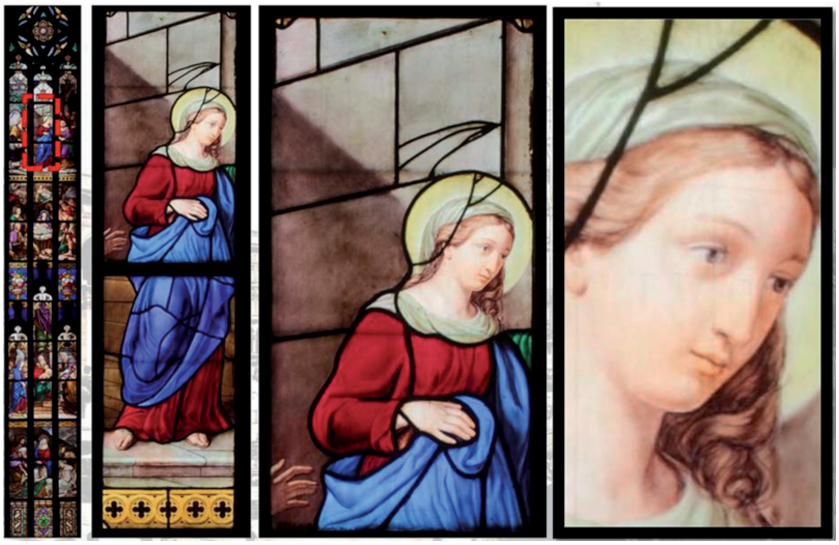


Fig. 12 – Sono state realizzate anche le ortofoto delle magnifiche vetrate che adornano gli altari, l'immagine illustra un particolare.

LA BIOLOGIA SINTETICA COME UN NUOVO QUADRO INTERPRETATIVO DEI SISTEMI VIVENTI[1]

Nota del m.s. VÍCTOR DE LORENZO (*)

(Adunanza del 2 ottobre 2014)

SUNTO. – La Biologia Sintetica non è solo una riformulazione contemporanea delle tecnologie del DNA ricombinante degli ultimi 30 anni combinato con un linguaggio descrittivo importato dall'ingegneria elettrica e industriale. È anche una nuova chiave interpretativa dei sistemi viventi e una dichiarazione di intenti per l'uso e la riprogrammazione degli oggetti biologici a beneficio umano. Così come la Chimica scientifica iniziata da Lavoisier ha fatto irruzione nell'Ingegneria Chimica che è alla base della nostra società sviluppata, la Biologia ha acquisito un potenziale trasformatore che probabilmente ci porterà a un tipo di industria e di economia molto diversa da quella attuale. A tal fine è essenziale identificare i colli di bottiglia che limitano il disegno di oggetti biologici da principi primi e non perdere il treno della Biologia Sintetica nella sua fase fondazionale, quando è la mente -e non il braccio- ad essere determinante.

***

ABSTRACT. – Synthetic Biology is not just a contemporary update of the recombinant DNA technologies of the past 30 years along with a descriptive language imported from electrical and industrial engineering. It is also a new interpretative key of living systems as well as a declaration of intent on the use and reprogramming of biological objects for human benefit. In the same way that scientific chemistry initiated by Lavoisier evolved into the Chemical Engineering that is the basis of our industrial society, Biology has ac-

(*) Centro Nazionale di Biotecnologia-CSIC Campus di Cantoblanco, Madrid, Spagna.
E-mail: vdlorenzo@cnb.csic.es

[1] Una versione estesa di questo articolo è stato pubblicato in lingua spagnola: Lorenzo, V. de (2014) Biología sintética: la ingeniería al asalto de la complejidad biológica. *Arbor*, 190 (768): a149.

quired a transforming potential that will possibly lead to a type of industry and economy very different from the current paradigm. To this end, it is essential to identify bottlenecks that limit the design of biological objects from first principles and not to miss the train of Synthetic Biology at its current foundational stage, when talent -and not the muscle- is what really matters.

INTRODUZIONE

Dall'inizio del millennio la Biologia ha iniziato a sperimentare una transizione accelerata tra essere una scienza prevalentemente descrittiva ed essere una disciplina quantitativa. Questo processo è iniziato con il famoso saggio di E. Schrödinger *Che cos'è la vita*? scritto alla fine della Seconda Guerra Mondiale (Schrödinger, 1944) nel quale per la prima volta si propone l'approccio scrupoloso ai sistemi biologici come entità soggette alle stesse regole della Fisica del resto del mondo materiale. Il punto culminante di questa visione è stata la decifrazione 50 anni fa e nel periodo immediatamente successivo della struttura del DNA, del codice genetico e degli elementi che partecipano al flusso di informazione dal DNA alle proteine. Eppure, paradossalmente, il protagonismo dei Fisici nella nascita della Biologia Molecolare non si è tradotto in una cultura quantitativa e in un linguaggio descrittivo preciso e standardizzato caratteristico delle scienze *dure*. Decisamente al contrario, la Genetica Molecolare e la Biologia che da essa ha avuto origine non ha saputo approfittare (salvo contate eccezioni) dell'opportunità di formalizzare i meccanismi e le funzioni presenti nei sistemi viventi con enunciati e codici precisi. Ne sono susseguiti decenni di completo scompiglio nella nomenclatura dei geni e nella forma di misurare e quantificare le attività biologiche, per non parlare dell'esplosione di ogni tipo di vettori di DNA per la manipolazione genetica dei sistemi sperimentali studiati. Forse l'*hooliganismo* scientifico glorificato nella *Doppia elica* di J. Watson (Watson, 1968) non è stato estraneo all'*ethos* informale e antiautoritario della comunità scientifica nata dopo quel periodo. Mentre questo non è stato un problema per molto tempo, è indiscutibile che sia i progressi propri in questo ambito sia il ruolo crescente della Biologia e della Biotecnologia in campi al di là del contesto accademico tornano a reclamare con forza la necessità di dotare le Scienze della Vita di metodologie e linguaggi più vicini alla Fisica che alle scienze narrative - così com'è stata la Biologia per gran parte della sua storia. È in questo contesto che si manifestano i due ultimi tentativi di quanti-

ficare la Biologia, che sono chiamati a cambiare per intero - sia metodologicamente che concettualmente, i nostri approcci alle domande scientifiche e ai loro derivati biotecnologici.

Dalla Biologia molecolare alla Biologia dei sistemi e alla Biologia sintetica

L'inizio della Biologia dei Sistemi è stato determinato da un problema molto pratico: come organizzare e come trovare un senso alla valanga di dati derivati dalle tecnologie *omiche* che dalla fine degli anni '90 si sono iniziate ad applicare ai sistemi biologici. Al sequenziamento del genoma completo hanno poi fatto seguito i trascrittomi, i proteomi e i metabolomi. A questi sono successi in maniera naturale le loro versioni *meta* corrispondenti (cioè, dati di popolazioni multispecie), così come l'esame degli stessi dati in cellule individuali. Sfortunatamente, i dati *per se* non si trasformano automaticamente in informazione e ancora meno in conoscenza. Per questo è necessario processarli con tecnologie che non provengono in assoluto dalla Biologia, ma dalla computazione, dall'informatica e dalla fisica di sistemi complessi. Infatti, le tecniche *omiche* permettono di disporre di tutti i dati contenuti in un sistema biologico, ma in una forma più o meno criptica che ha bisogno di essere decifrata per essere compresa, ma con strumenti estranei alla Biologia (ad esempio la teoria delle reti; Barabasi e Oltvai, 2004). Questo implica al tempo stesso un'opportunità (capire il sistema vivente per intero più che le sue parti separatamente) e una grande sfida metodologica ed epistemologica. Da una parte, l'analisi dei dati massivi si trasforma non solo in un aiuto alla sperimentazione, ma anche in una fonte genuina di nuova informazione e conoscenza. Questa forma di investigare è estranea alla grande tradizione ipotetico-deduttiva della Biologia sperimentale, ma è molto probabile che sia ugualmente valida. Branche intere della Biologia che 25 anni fa erano completamente sperimentali (ad esempio, l'Ecologia Microbica) si stanno trasformando in grandi piattaforme di analisi di sequenze. Dall'altra parte, i dati devono proiettarsi sempre su qualche modello di funzionamento, e questo ha portato una buona parte dei Biologi Sistemici a specializzarsi nella rappresentazione di dati e nella modellazione del loro funzionamento, spesso importando formalismi dalle reti sociali e dai circuiti elettronici. Questo a sua volta genera nuove domande e nuovi filoni di ricerca, il

cui obiettivo è comprendere la complessità multiscala degli oggetti viventi. Per la prima volta si considera la possibilità di capire l'architettura materiale (l'*hardware*) e la logica operativa (il *software*) di un sistema vivente (Danchin, 2009a). E per capire il tutto è necessario studiare il tutto come tale, non concentrarsi soltanto nei dettagli dei suoi componenti. Con questo fine è necessario utilizzare astrazioni e semplificazioni tipiche della Fisica che aiutino a separare i componenti principali di un sistema da quelli che soltanto sono spettatori o di passaggio.

Questo porta alla tappa successiva: la definizione dei componenti minimi che deve avere un sistema biologico per mantenere la sua identità e le sue funzioni. E alla fine, la comprensione totale di un sistema richiede non solo la sua analisi, ma anche la sua sintesi, così come proclamava nella sua celebre lavagna postuma il Premio Nobel di Fisica Richard Feynman "*...quello che non posso creare, non lo capisco...*". È pertanto la Biologia dei Sistemi e la sua enfasi nella quantificazione, la modellizzazione e l'uso combinato dell'analisi e la sintesi per capire le entità viventi che all'inizio del millennio ha preparato lo scenario per la nascita e lo sviluppo esplosivo della Biologia Sintetica, così come lo stiamo vivendo oggigiorno.

Guardare i sistemi viventi con occhi da ingegnere

La quantificazione della Biologia e le astrazioni che sono il segno distintivo della Biologia dei Sistemi rendono quasi inevitabile un nuovo quadro interpretativo degli oggetti viventi. La Biologia del XX secolo ha usato due chiavi ermeneutiche collegate tra loro per la comprensione dei sistemi biologici. La prima e più importante è la teoria dell'evoluzione. Così come dichiara la nota affermazione di Dobzhansky "*...Nulla ha senso in Biologia, se non alla luce dell'evoluzione...*". Questo chiarisce la ragion d'essere degli oggetti biologici come risultato di un processo temporale non-orientato di complessità e di interattività a beneficio dell'adattamento ambientale e del successo riproduttivo. L'altra chiave è ciò che è stato denominato il Dogma Centrale (DC) della Biologia Molecolare, cioè il flusso dell'informazione DNA→RNA→Proteine. Queste due chiavi (l'evoluzione e il DC) permettono di rispondere alla domanda sul *perché i sistemi biologici sono così come sono* e come li conosciamo. Ma, in realtà, le stesse chiavi non ci dicono gran cosa sul *funzionamento* del sistema naturale stesso, e molto meno sulla possibilità che questo possa

essere distinto, meccanicisticamente, rispetto a ciò che vediamo qui e ora.

L'evoluzione seleziona le funzioni e le sue costellazioni, ma non necessariamente i meccanismi specifici che proporzionano tale funzionalità. Questo si può vedere chiaramente nel mondo procariotico: uno stesso problema metabolico o regolatore può risolversi attraverso schemi molecolari distinti (Cases e de Lorenzo, 2001). La domanda su come funziona un sistema biologico è pertanto difficile da rispondere con una mera ottica evolutiva. E qui giunge la proposta rivoluzionaria della Biologia Sintetica: per capire il funzionamento dei sistemi viventi dobbiamo contemplarli come se fossero oggetti non distinti da quelli che disegna un ingegnere computazionale, chimico o elettronico (Endy, 2005). Ad esempio, per capire la distribuzione spazio-temporale del metabolismo in un batterio non ci è di grande aiuto conoscere la sua origine evolutiva. Al contrario, ci dovremmo interrogare su cosa si chiederebbe un ingegnere chimico per creare un microreattore nel quale avvengono migliaia di reazioni simultaneamente nello spazio e nel tempo. Da questa domanda si deduce, ad esempio, la necessità di compartimentalizzazione (o almeno di limitazione della libera diffusione), l'esistenza di canalizzazione di substrati e prodotti, l'invecchiamento delle proteine, il problema dei residui tossici, ecc. (de Lorenzo e Danchin, 2008). Solo con questa prospettiva *ingegneristica* possiamo capire quel sistema fisico-chimico che è la cellula nello spazio e nel tempo - lasciando da parte la domanda sulle sue origini.

In generale, gli oggetti procedenti dall'ingegneria devono compiere una *funzione* per la quale hanno bisogno di alcune *istruzioni* (il software nei computer) che si *implementano* attraverso un hardware (la macchina che legge ed esegue le istruzioni). La Biologia Molecolare tradizionale tende a dimenticare la distinzione tra funzione, istruzioni (*software* e sistema operativo) e il macchinario per eseguirle (*hardware*), che richiede una certa rivisitazione della frase di Dobzhansky prima citata: l'evoluzione seleziona prevalentemente le funzioni e le sue combinazioni, ma non tanto le istruzioni né le forme di leggerle. Ciò che sì è caratteristico dei sistemi viventi è che buona parte del loro software/hardware è dedicato alla loro autoreplicazione. In questo senso, così come ha proposto A. Danchin, le cellule possono somigliare a macchine di Turing capaci di interpretare simboli (ad esempio chimici: ATGC) contenuti in un nastro (il DNA/RNA nel nostro caso) conforme a una tabella di regole nello stesso modo in cui lo fanno i computer (Danchin, 2009b). Una macchina di questo tipo può essere adattata per

eseguire ogni tipo di operazione, comprese le istruzioni sul proprio assemblaggio. Portando questa metafora all'estremo, le cellule possono intendersi come computer che fanno computer (Danchin, 2009a).

TECNO-LOGIA *VS* TECNO-NOMIA

Tuttavia, l'enunciato *Biologia-come-ingegneria* richiede varie precisazioni. In primo luogo, il guardare gli oggetti biologici come se fossero il prodotto di una ingegneria non dice nulla sull'intervento di un ingegnere. Un argomento simile è stato usato da J. Monod nella sua encomiata discussione sulla *teleologia* (finalità dei sistemi biologici) e la *teleonomia* (apparenza di finalità nei sistemi stessi) del suo libro *Il caso e la necessità* (Monod, 1970). Mentre la prima non è accreditata come fatto scientifico, la seconda è una chiave interpretativa estremamente utile per capire perché i sistemi biologici sono come sono invece di essere diversi. Per lo stesso motivo, si può adattare l'ingegneria a una metafora e a una chiave ermeneutica per capire la logica degli oggetti biologici, che è distinta, ma perfettamente compatibile con altre chiavi che affrontano domande diverse. In questo senso, alla tensione *teleologia* (finalità) vs. *teleonomia* (apparenza della finalità) corrisponderebbe una correlazione *tecno-logia* (disegno)/*tecno-nomia* (apparenza di disegno).

Tralasciando questi argomenti piuttosto speculativi, possiamo realmente considerare i sistemi viventi con la prospettiva di un ingegnere? Ai suoi tempi, F. Jacob propose un contrasto insuperabile tra l'*ingegneria* e il *bricolage* come metafora di quanto sia distinto il disegno razionale dall'evoluzione biologica (Jacob, 1977). Mentre il lavoro degli ingegneri si basa su componenti precisi e strumenti che si adeguano esattamente a un progetto predefinito, l'amante del *bricolage* gioca con cianfrusaglie e rimasugli senza sapere ciò che produrrà e usa tutto ciò che trova per creare qualsiasi tipo di oggetto funzionale, la cui utilità potrebbe manifestarsi in un secondo momento: nessuno dei materiali possiede all'inizio una funzione precisa e ognuno si può utilizzare in maniera diversa. Tuttavia, questa visione sembra trasmettere che la struttura dei sistemi viventi non ha nessuna logica relazionale comparabile all'ingegneria. Niente di più lontano dalla realtà. Nonostante le soluzioni a problemi di disegno possano presentarsi su strade diverse, le due con frequenza coincidono o convergono (ad esempio, forme di aerei *vs* uccelli) e una può facilmente aiutare a capire l'altra.

Lo stesso può applicarsi ai sistemi biologici: anche se la loro struttura e funzionamento non possono attribuirsi ad un ingegnere, è molto utile esaminarle con la prospettiva e i formalismi che proporziona l'ingegneria. Funzioni e moduli biologici che hanno rappresentato un'innovazione evolutiva per risolvere un problema hanno avuto il loro maggior successo quando sono stati poi applicati in un altro contesto per raggiungere un obiettivo diverso. Ad esempio, il piumaggio apparve a suo tempo come un mero isolamento termico ma poi si è trasformato in un componente essenziale del volo degli uccelli. L'analisi dei genomi batterici proporziona innumerevoli esempi di proteine che nascono per fare qualcosa che poi risulta essere molto diverso da quello per cui erano sorte in un primo momento (Milanesio *et al.*, 2011). Questo processo, che in Biologia evolutiva si denomina *esaptazione*, ha anche innumerevoli controparti in ingegneria: un dispositivo che si inventa con un proposito molto specifico riappare con piccole modifiche in un altro luogo con una finalità inaspettata. Il sistema di carica e sgancio rapido di bombe negli aerei da combattimento si riutilizza per l'incorporazione e scarica di pesanti batterie nelle macchine elettriche. Uno stesso dispositivo si inventa per una funzione ma alla fine si afferma quando gli si assegna un'altra distinta e addirittura opposta a quella iniziale. Questo scenario è costantemente presente nei sistemi biologici e nei sistemi disegnati e permette di ridurre la frattura insuperabile tra i due, così come lo aveva prospettato Jacob. Tuttavia, il principio di *tecno-nomia* che si propone in questo articolo sarà difficile da discutere serenamente in un momento in cui il dibattito tra l'*evoluzionismo* e il *disegno intelligente* si è diffuso in maniera virale nei paesi anglosassoni e si è riverberato su tutti gli altri. In ogni caso e in modo più o meno esplicito, guardare gli oggetti biologici con occhi da ingegnere è e sarà il più grande e utile pilastro concettuale della Biologia Sintetica.

La modularità dei sistemi biologici

Una seconda motivazione sulla relazione Biologia-Ingegneria ha a che vedere con la struttura modulare degli oggetti di studio in ogni caso. Qualsiasi entità disegnata da un ingegnere è composta da moduli chiaramente definiti, con connessioni tra i suoi componenti ben standardizzate (che permette il suo riutilizzo in contesti differenti), con entrate e uscite compatibili e una chiara gerarchia e disposizione in tre dimensioni dei distinti componenti. Questo fa sì che la modularità fisica degli ogget-

ti fatti dagli ingegneri coincida, almeno approssimativamente, con quella funzionale. Al contrario, i sistemi biologici esistenti non sembrano manifestare a prima vista questa coincidenza tra il fisico e il funzionale. Il catalogo di funzioni necessarie per dare vita a un sistema si è potuto quantificare in circa 300-500, paragonando gruppi di geni persistenti nei genomi microbici (de Lorenzo e Danchin, 2008). Tuttavia, cercando geni specifici condivisi tra quei stessi genomi, la conclusione sorprendente è che quel numero è esattamente zero (Acevedo-Rocha *et al.*, 2013). Questo significa che le stesse necessità funzionali possono essere coperte da configurazioni molto diverse di geni e molecole.

Un altro particolare degno di nota che separa gli oggetti disegnati e i sistemi biologici sono le caratteristiche fisiche dei loro componenti: i telefoni e gli aerei sono fatti con materiali *duri*, con componenti perfettamente definiti nella loro struttura tridimensionale e con connessioni precise con i componenti vicini. La comparsa di interazioni non previste in genere dà problemi e causa incidenti. Al contrario, oggetti biologici sono tipicamente composti da elementi *labili*, a volte senza limiti ben chiari e con la tendenza a interagire gli uni con gli altri – ciò che a volte porta alla comparsa di proprietà emergenti non anticipate. Se l'ingegneria elettrica e industriale si occupa di cavi, tubi e viti, i sistemi viventi sono composti da elastomeri, gelatine e colle. In ultimo, i sistemi viventi crescono, replicano e si riproducono – proprietà estranee agli oggetti fatti dall'ingegneria razionale che conosciamo. Questo può significare che il principio di modularità che associamo ai dispositivi fatti dall'uomo è assente nei sistemi biologici? Ancora una volta la risposta è no. La complessità delle cellule con grandi genomi ed estesa diversità biochimica è ingannevole a questo rispetto. L'analisi dei genomi minimi trovati, ad esempio nei batteri endosimbionti, rivela un considerevole grado di modularità nelle funzioni essenziali che permettono la loro esistenza (Porcar *et al.*, 2013). La zuppa biochimica che a volte il metabolismo sembra essere è perfettamente modularizzata, con un'organizzazione che ricorda un'industria chimica. Nella direzione contraria, nemmeno l'idea di oggetti auto-replicanti è nuova in ingegneria, così come dimostrano nell'ultimo decennio i tentativi di disegnare stampanti tridimensionali che stampino se stesse (ad esempio il progetto RepRap: http://reprap.org/).

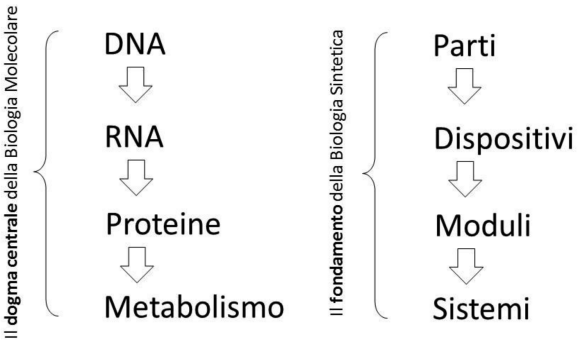
È pertanto possibile e produttivo usare la metafora e anche i formalisimi dell'ingegneria per capire il funzionamento dei sistemi biologici come la metafora biologica per indirizzare il disegno di nuovi

dispositivi creati dall'uomo. In questo senso, una buona parte dell'ingegneria contemporanea è abituata a investigare aleatoriamente lo spazio di soluzioni a un problema la cui risposta non si può intuire sin dall'inizio. Per questo, si adottano strategie di prova ed errore che non sono molto distinti dai processi evolutivi in Biologia. Lo stesso Gaudí, in un momento storico senza capacità computazionale né simulazioni che sono oggi così abituali nell'architettura moderna, à stato capace di calcolare parametri complessi nei suoi edifici a forza di interrogare la natura (nel suo caso, per pura gravità in modelli di corde e pesi) sulla configurazione ottimale dei componenti delle sue grandi opere. Ciò che più interessa in questo caso è che tali soluzioni siano virtualmente identiche a quelle trovate dagli architetti molti anni dopo usando calcoli e simulazioni avanzate (Huerta, 2006). Sembra pertanto che nell'ingegneria come nella Biologia, lo spazio di soluzioni a un obiettivo adattativo abbia attrattori nei quali la soluzione stessa può essere il risultato di un disegno guidato o una esplorazione aleatoria. A effetti pratici, questo accredita il valore e l'utilità di esaminare la logica composizionale dei sistemi viventi con gli strumenti concettuali dell'ingegneria.

L'ingegneria genetica: analogia e metodologia

L'opzione dell'ingegneria come chiave per interpretare fenomeni biologici che costituiscono la Biologia Sintetica implica una conseguenza affascinante e allo stesso tempo inquietante. Non è solo una questione epistemologica, ma anche molto pratica. Se un sistema biologico è come un artefatto realizzato dall'ingegneria, allora possiamo anche scomporlo in un insieme limitato di componenti definiti che poi possiamo ricomporre per generare un oggetto distinto seguendo un piano razionale. Il risultato può essere un oggetto con una struttura e delle proprietà distinte da quelle che aveva la fonte originale di quei stessi componenti. Ma per farlo abbiamo bisogno di due cose. In primo luogo, l'astrazione relazionale e gerarchica del nuovo oggetto come un insieme di parti (le unità basiche di funzione biologica) che si collegano in maniera razionale per formare dispositivi e questi a loro volta interagiscono per generare sistemi di complessità crescente. A questo punto saltiamo dall'ingegneria come *metafora* e analogia (come nell'ingegneria genetica) all'ingegneria come autentica *metodologia* per costruire oggetti biologici. In questo senso, la formulazione *narrativa* della Biologia Molecolare come un processo DNA→RNA→proteine viene sostituita

dal principio *composizionale* e *quantitativo* della Biologia Sintetica: Parti →dispositivi→sistemi (*Fig. 1*).



Il dogma centrale della Biologia Molecolare (sinistra) si basa nel trasferimento di informazione dai nucleotidi del DNA alle proteine e (come è stato proposto recentemente: de Lorenzo, 2014) la propagazione di questo flusso di informazione sul funzionamento delle reti metaboliche. Al contrario, la Biologia Sintetica (destra) mette in rilievo la logica relazionale e composizionale dei sistemi viventi, sia quelli esistenti sia quelli che si potranno disegnare in futuro.

Fig 1. – La Biologia Molecolare e la Biologia Sintetica affrontano i sistemi viventi con diverse chiavi interpretative.

In secondo luogo, le parti per l'ingegneria di nuovi sistemi biologici hanno bisogno di essere standardizzate per renderle riutilizzabili, componibili e scalabili. Nella maggior parte dei casi, queste parti non appaiono così nella loro situazione naturale. Possiamo fare una capanna con i tronchi di alberi così come si trovano in Natura. Ma per fare una casa i tronchi devono essere trasformati in travi e pannelli di dimensioni precise per permettere la costruzione di un edificio più complesso. Mediante questo ragionamento, uno dei segni distintivi della Biologia Sintetica è lo sforzo di partire da sequenze di DNA che determinano funzioni d'interesse e modificarle affinché si possano utilizzare come blocchi di costruzione (*biomattoni*) di nuovi oggetti biologici (Kosuri *et al.*, 2013; Mutalik *et al.*, 2013). Partendo dalla situazione esistente, si può pensare di modulare sempre più le funzioni e i componenti biologici per renderli più facili da combinare, sia fisicamente che funzionalmente. Quest'obiettivo di modularizzazione e standardizzazione apre prospettive immense alla Biotecnologia: i sistemi viventi si trasformano

in una fonte di materiali che permettono di generare nuovi oggetti e proprietà poco o per niente simili alla loro funzione naturale. Un promotore batterico, che nel suo contesto nativo controlla l'espressione di un gene di resistenza a tetraciclina, quando le cellule trovano l'antibiotico nel terreno di coltura, si trasforma per opera e arte della Biologia Sintetica in un modulo inversore (una porta logica NOT) che può combinarsi con altre per eseguire calcoli e processare segnali che in origine non sono i suoi (Silva-Rocha e de Lorenzo, 2008). Distinti enzimi batterici e vegetali possono integrarsi in un lievito per dar vita a una via biosintetica di una droga anti-malarica (Paddon e Keasling, 2014). Luoghi di ancoraggio di proteine derivate da vie di segnaletica di metazoi sono stati utilizzati per canalizzare in *Escherichia coli* i substrati di una biotrasformazione di interesse industriale (Dueber *et al.*, 2009). E così decine di casi nei quali una funzione biologica si decontestualizza con gli strumenti del DNA ricombinante (e più recentemente attraverso sintesi chimica di sequenze di DNA) e si riutilizza in una situazione distinta per fare qualcosa che la natura non ha fatto o inventato prima.

Semplificare la Biologia per renderla più facile da (ri)disegnare

Questo anelito collide con due grandi obiettivi. Da una parte, la composizione fisica delle sequenze di DNA non si traduce necessariamente in una integrazione delle funzioni corrispondenti, almeno in forma quantitativa. E i parametri associati agli elementi biologici (ad esempio, promotori, terminatori, luoghi di unione di ribosomi, ecc.) cambiano spesso con il contesto genomico e con le condizioni fisiologiche dell'ospite. Infatti, il problema della dipendenza di contesto è una delle maggiori limitazioni per disegnare dispositivi biologici affidabili. Per rimediare questo stato delle cose sono state proposte varie strategie.

Una di queste è riesaminare il genoma per eliminare la complessità che non sia strettamente necessaria per una certa applicazione. In una prima fase, il genoma si può *pulire* da elementi che causano instabilità (ad esempio, profagi, sequenze di inserzione, elementi mobili, ecc.), per continuare poi con blocchi di geni che, nonostante siano presenti e utili nell'ambiente naturale, possono non essere essenziali (ad esempio, il macchinario flagellare) in un bioreattore (Posfai *et al.*, 2006). Poi, si potrebbero eliminare i blocchi metabolici non utilizzati, strutture del-

l'involucro cellulare e molti altri geni che possono considerarsi non necessari. Nonostante con questo approccio si potrebbe minimizzare il genoma e pertanto il contesto molecolare di qualsiasi dispositivo che si potrebbe impiantare in esso, di fatto i tentativi di ridurre il genoma di batteri modello come *E. coli* non sono stati in grado di andare oltre il 20-30% (Posfai *et al.*, 2006). A parte l'eliminazione di possibili geni essenziali, la delezione di grandi segmenti del cromosoma potrebbe alterare la sua architettura dentro la cellula e renderlo non funzionale. Un'alternativa sarebbe andare nella direzione esattamente contraria: partire da batteri con genomi già molto piccoli, ad esempio *Mycoplasma* o endosimbionti come *Buchnera* (van Ham *et al.*, 2003). In questi casi, la natura stessa ha fatto il lavoro di riduzione. Anche se in principio questo potrebbe essere un buon approccio, che un sistema abbia meno componenti non significa che la situazione sia più semplice. La riduzione di complessità *composizionale* si compensa con l'incremento della complessità *relazionale*: i cromosomi con meno geni danno vita a cellule che sono molto più dipendenti alle loro interazioni con l'ambiente. Nonostante questo, alcuni batteri con genomi piccoli (come *Mycoplasma*) sono cavalli di battaglia di riferimento in Biologia Sintetica. Soprattutto perché la dimensione del cromosoma permette di realizzare la sua sintesi chimica completa, così come l'aveva effettuata il gruppo di Venter (Gibson *et al.*, 2010). Questo apre la possibilità di mettere in pratica lo scenario sopra citato, ossia di considerare i batteri e altri sistemi biologici come computer per i quali si può scrivere un software (il DNA) che può essere eseguito da un macchinario molecolare già esistente. Le proposte futuriste di Craig Venter su un futuro convertitore biologico digitale (http://www.theguardian.com/science/2013/oct/13/craig-ventner-mars) vanno esattamente in questa direzione.

Ortogonalizzazione

Tuttavia, semplificare il genoma e persino riscriverlo non risolve tutti i problemi. Come si è sopra citato, il funzionamento, soprattutto quantitativo delle parti biologiche, è soggetto in maggior o minor misura all'influenza di vari livelli di contesto –da interferenze con sequenze prossime a effetti globali e medio ambientali. A beneficio dell'evoluzione ma a scapito dei bioingegneri, i materiali biologici (proteine, polimeri, piccole molecole, ecc.) tendono a interagire con i loro vicini molecolari in modo spesso imprevedibile. In Biologia, 2+2 non fa sempre 4 per-

ché ogni nuova combinazione è soggetta alla comparsa di proprietà emergenti (negative o positive) che non si possono predire a partire dalle qualità dei componenti della somma, almeno con il grado di conoscenza che abbiamo nella maggior parte dei casi. Una situazione familiare a qualsiasi biotecnologo è l'incertezza sull'efficienza di sistemi di espressione eterologa di geni di interesse industriale. La combinazione di un promotore forte con un segnale di inizio della traduzione anch'esso forte dovrebbe in linea di principio condurre a un'espressione (combinazione trascrizione+traduzione) anch'essa forte del gene di interesse. Questo risulta essere così in molti casi, ma in altri succede esattamente il contrario. Perché? Molto spesso, l'estremo 5' del trascritto forma strutture secondarie inaspettate con sequenze più in basso del gene in questione, che genera una grande instabilità nell'mRNA o impedisce la traduzione.

Un possibile rimedio a queste situazioni è la cosiddetta *ortogonalizzazione* dei componenti che vanno in un sistema. Due sistemi sono reciprocamente ortogonali se non si influenzano l'uno all'altro. È ragionevole partire da un componente o un modulo biologico molto connesso, produrre una variante che conservi solo la connessione desiderata e rendere così più facile il suo uso in nuovi disegni biologici. La natura stessa offre casi di parti ortogonali, solitamente in elementi mobili promiscui e batteriofagi (ad esempio, l'RNA polimerasi del fago T7). Inoltre, si sono fatti grandi passi avanti anche nell'elaborazione di codici genetici alternativi e ribosomi ortogonali capaci di decifrarli. Forse in un futuro non molto lontano potremo disporre di entità biologiche con un genoma che possa codificare l'informazione con un cifrato genetico distinto (anche con basi non naturali; Malyshev *et al.*, 2014) che si possa trascrivere con polimerasi alternative e produca un messaggio che è traducibile mediante ribosomi ortogonali. Infatti, l'essere vivente risultante sarebbe così lontano da quello esistente che non potrebbe interagire in nessun modo con i sistemi biologici naturali, assicurando così il suo contenimento e la sicurezza del suo uso biotecnologico (Schmidt e de Lorenzo, 2012).

Frenare l'evoluzione?

Le sfide che deve affrontare la Biologia Sintetica per trasformarsi in un'autentica branca dell'ingegneria non finiscono con ciò che si è detto finora. Infatti, rimane ancora la sfida più importante: assicurarsi che qualsiasi dispositivo/essere vivente disegnato da bioingegneri man-

tenga le sue proprietà nel tempo e non soccomba al rumore e alle mutazioni - o sviluppi proprietà inaspettate. Anche se ottenessimo un disegno ottimizzato di un circuito biologico o di un sistema completo, sarebbe comunque inevitabile che dopo un certo periodo di tempo il DNA che lo determina muti (molto di più in caso di stress ambientale) e che questo porti al collasso finale dell'entità. La letteratura scientifica e biotecnologica contiene numerosi esempi di microrganismi ricombinanti disegnati per una determinata funzione che, dopo un certo periodo di tempo, smettono di eseguire il programma genetico atteso a causa dell'accumulo di mutazioni. La domanda ovvia è se possiamo forzare in modo stabile i sistemi naturali a fare qualcosa a nostro stesso beneficio che abitualmente non fanno. La strategia predominante per affrontare questa grande sfida è quella di penalizzare (sempre attraverso circuiti genetici *ad hoc)* le mutazioni che portano a non raggiungere gli obiettivi, ad esempio inducendo al suicidio i mutanti indesiderati. Tuttavia, come qualsiasi costruzione genetica, i circuiti di letalità condizionale sono soggetti ad acquisire mutazioni che li rendono inefficienti. Questo è un obiettivo che è stato proposto ma che è ancora assolutamente irrisolto. Le proposte passano dalla permuta delle molecole che portano l'informazione (dal DNA a polimeri parzialmente o totalmente artificiali) fino al cambio totale del supporto dell'informazione, da essere incriptata in un codice ad essere determinata da una composizione lipidica. Questo è un collo di bottiglia reale che dovrà essere affrontato perché la Biologia Sintetica arrivi a realizzare tutte le sue promesse.

Cosa fare?

L'agenda di ricerca della Biologia Sintetica si può facilmente dedurre da quanto è stato detto finora in quest'articolo. L'ostacolo oggettivo più grande per l'ingegneria di sistemi biologici è l'influenza del contesto multiscala nel funzionamento dei componenti individuali di qualsiasi entità vivente. La riduzione della complessità genomica, l'ortogonalizzazione delle parti e dei dispositivi da combinare e l'eliminazione di mutanti che perdono il proprio programma impiantato sono ovviamente strade da seguire. Ma questo non è tutto. Ci sono domande biologiche fondamentali a cui dobbiamo rispondere per poter andare avanti nel disegno di tali oggetti. La prima è chiarire la relazione tra metabolismo, crescita, divisione e proliferazione di cellule, iniziando

dagli esseri più semplici, i batteri. Come è stato sopra citato, a differenza dei dispositivi fatti dall'uomo, i sistemi viventi crescono e questo aggiunge una complessità straordinaria nel momento di disegnarli in modo predicibile. Nel migliore dei casi, si vorrebbe disporre di cellule che eseguono le funzioni per le quali sono state disegnate ma senza crescere. Questo suppone obiettivi di ricerca affascinanti, perché qualsiasi programma implementato con componenti materiali invecchia e commette errori. E la forma che i sistemi biologici hanno per ripararli è creandoli di nuovo nelle copie che si generano durante la crescita. Dato che il fine evolutivo degli esseri viventi è il successo riproduttivo, possiamo separare quella crescita dal resto della funzionalità biologica senza alterare seriamente le cellule corrispondenti? Qui c'è un problema che difficilmente può risolvere solo la Biologia Molecolare, perché ha derivazioni nella teoria dell'informazione, nella resistenza di nanomateriali e nell'ingegneria di sistemi meccanici.

Un'altra limitazione ancora da studiare nel dettaglio è l'influenza del metabolismo nel flusso di espressione genetica. Le astrazioni dei circuiti e moduli da impiantare nei sistemi biologici spesso omettono che la loro azione si esegue in un ambiente chimico complesso con una logica propria e un'alta reattività. Quello che nel gergo della Biologia Sintetica viene denominato *chassis* si compone non solo di genoma più o meno intricato ma anche con una grande complessità molecolare che conosciamo appena. Da come potremo capire questa complessità multiscala e multimolecolare dipenderà in gran misura che gli sviluppi in corso della Biologia Sintetica possano trasformarsi in tecnologie robuste o restare meri aneddoti.

Nel migliore dei casi, una volta che si possiedono componenti affidabili per la costruzione di un oggetto complesso (come un Meccano o un Lego), è questione dell'immaginazione dell'utente il produrre ogni tipo di articolo e materiale, da biocombustibili, biocatalizzatori e nuovi agenti terapeutici con forme di computazione distinte, bioplastiche e fibre intelligenti o biosensori per molecole di ogni tipo. Ed è giustamente nell'immaginazione e creatività che la nostra comunità scientifica e tecnica può dare i maggiori contributi al campo e giungere laddove non sono riuscite ad arrivare le grandi iniziative in Biologia Sintetica negli Stati Uniti basate nel dominio tecnico, come il Programma SynBERC (http://www.synberc.org). Per questo è necessario fomentare l'intercambio Scienze della Vita-Ingegneria nei programmi accademici delle Università e promuovere corsi di studio che inte-

grino in parti uguali Biologia Fondamentale e principi di Ingegneria. Per il momento, molti Biologi Molecolari adducono che gli Ingegneri sanno poco o niente di Biologia e pertanto è difficile interagire con loro. E a loro volta, gli Ingegneri ritengono che buona parte dei Biologi sia carente di talento quantitativo e di formazione matematica considerati importanti per il disegno di sistemi che funzionino veramente. Il superamento di questa barriera culturale è probabilmente il più grande obiettivo che dobbiamo affrontare, dal quale tuttavia dipendiamo per non essere meri spettatori, bensì attori del nuovo tipo di Bioindustria che vedremo svilupparsi nei prossimi decenni.

Ringraziamenti

Il progetto è stato finanziato dall'Unione Europea (Grants ARYSIS, ST-FLOW ed EVOPROG), dal Prgramma BIO del Ministero dell'Economia spagnolo e dal Progetto della Regione Autonoma di Madrid. VdL dà atto dei dibattiti con Antoine Danchin per il modo in cui illustra la sua visione della Biologia Sintetica discussa nel presente articolo.

L'autore ringrazia sinceramente la traduttrice Maria Elena Casasole per la professionalità con cui ha svolto il suo lavoro.

BIBLIOGRAFIA

Acevedo-Rocha, C.G., Fang, G., Schmidt, M., Ussery, D.W. y Danchin, A. (2013) From essential to persistent genes: a functional approach to constructing synthetic life. *Trends Genet* 29: 273-279.

Barabasi, A.-L. y Oltvai, Z. N. (2004) Network biology: understanding the cell's functional organization. *Nat Rev Genet* 5, 101-113.

Cases, I. y de Lorenzo, V. (2001) The black cat/white cat principle of signal integration in bacterial promoters. *EMBO J* 20, 1-11.

Danchin, A. (2009a) Bacteria as computers making computers. *FEMS Microbiol Revs* 33, 3-26.

Danchin, A. (2009b) Information of the chassis y information of the program in synthetic cells. *Syst Synth Biol* 3, 125-134.

de Lorenzo, V. (2014) From the selfish gene to selfish metabolism: Revisiting the central dogma. *Bioessays* 36, 226-235.

de Lorenzo, V. y Danchin, A. (2008) Synthetic biology, discovering new worlds and new words. *EMBO Rep* 9, 822-827.

Dueber, J.E., Wu, G.C., Malmirchegini, G.R., Moon, T.S., Petzold, C.J., Ullal, A.V., Prather, K.L. y Keasling, J.D. (2009) Synthetic protein scaffolds provide modular control over metabolic flux. *Nature Biotech* 27, 753-759.

Endy, D. (2005) Foundations for engineering biology. *Nature* 438, 449-453.

Gibson, D.G., Glass, J.I., Lartigue, C., Noskov, V.N., Chuang, R.-Y., Algire, M.A., Benders, G.A., Montague, M.G., Ma, L. y Moodie, M.M. (2010) Creation of a bacterial cell controlled by a chemically synthesized genome. *Science* 329, 52-56.

Huerta, S. (2006) Structural design in the work of Gaudi. *Architech Scie Rev* 49, 324-339.

Jacob, F. (1977) Evolution and tinkering. *Science* 196, 1161-1166.

Kosuri, S., Goodman, D.B., Cambray, G., Mutalik, V.K., Gao, Y., Arkin, A.P., Endy, D. y Church, G.M. (2013) Composability of regulatory sequences controlling transcription y translation in *Escherichia coli. Proc Natl Acad Sci USA* 110, 14024-14029.

Malyshev, D.A., Dhami, K., Lavergne, T., Chen, T., Dai, N., Foster, J.M., Corrêa, I.R. y Romesberg, F.E. (2014) A semi-synthetic organism with an expanded genetic alphabet. *Nature* 509, 385-388.

Milanesio, P., Arce-Rodriguez, A., Munoz, A., Calles, B. y de Lorenzo, V. (2011) Regulatory exaptation of the catabolite repression protein (Crp)-cAMP system in *Pseudomonas putida. Env Microbiol* 13, 324-339.

Monod, J. (1970) *Le hasard et la nécessité. Essai sur la philosophie naturelle de la biologie moderne.* Editions du Seuil, Paris.

Mutalik, V.K., Guimaraes, J.C., Cambray, G., Mai, Q.A., Christoffersen, M. J., Martin, L., Yu, A., Lam, C., Rodriguez, C., Bennett, G., Keasling, J.D., Endy, D. y Arkin, A.P. (2013) Quantitative estimation of activity y quality for collections of functional genetic elements. *Nat Methods* 10, 347-353.

Paddon, C.J. y Keasling, J.D. (2014) Semi-synthetic artemisinin, a model for the use of synthetic biology in pharmaceutical development. *Nat Revs Microbiol* 12, 355-367.

Porcar, M., Latorre, A. y Moya, A. (2013) What symbionts teach us about modularity. *Front Bioeng Biotech* 1.

Posfai, G., Plunkett, G., 3rd, Feher, T., Frisch, D., Keil, G.M., Umenhoffer, K., Kolisnychenko, V., Stahl, B., Sharma, S.S., de Arruda, M., Burland, V., Harcum, S.W. y Blattner, F.R. (2006) Emergent properties of reduced-genome *Escherichia coli. Science* 312, 1044-1046.

Schmidt, M. y de Lorenzo, V. (2012) Synthetic constructs in/for the environment, managing the interplay between natural y engineered Biology. *FEBS Lett* 586, 2199-2206.

Schrödinger, E. (1944) *What is Life?* Cambridge University Press, Cambridge.

Silva-Rocha, R. y de Lorenzo, V. (2008) Mining logic gates in prokaryotic transcriptional regulation networks. *FEBS Lett* 582, 1237-1244.

van Ham, R.C.H.J., Kamerbeek, J., Palacios, C., Rausell, C., Abascal, F., Bastolla, U., Fernández, J.M., Jiménez, L., Postigo, M., Silva, F.J., Tamames, J., Viguera, E., Latorre, A., Valencia, A., Morán, F. y Moya, A. (2003) Reductive genome evolution in *Buchnera aphidicola. Proc Natl Acad Sci USA* 100, 581-586.

Watson, J.D. (1968) *The Double helix, A personal account of the discovery of the structure of DNA*. Atheneum, New York.

MAXWELL E GLI ANELLI DI SATURNO

Nota del m.e. SERGIO BITTANTI (*)

(Adunanza del 2 ottobre 2014)

SUNTO. – Ancora studente all'Università di Cambridge, James Clerk Maxwell si cimentò nello studio degli anelli di Saturno, al fine di scoprirne la loro reale costituzione. Lo studio non fu basato su osservazioni astronomiche, ma su un approccio di pura modellistica matematica. Mediante la legge di gravitazione universale, Maxwell costruì vari modelli esplicativi, ciascuno dedotto in conformità con una determinata ipotesi di lavoro. Ad esempio, un modello fu costruito nell'ipotesi che l'anello fosse un'unica corona rigida, un altro era invece basato sull'ipotesi che si trattasse di una corona gassosa, e così via. Una volta costruiti i modelli, si passava alla fase di validazione effettuata per confronto con l'evidenza dei fatti. I modelli con caratteristiche contradditorie rispetto alla realtà dovevano essere scartati, e, con loro, le ipotesi su cui si basavano. Come strumento base per la validazione, Maxwell si avvalse della nozione di stabilità, partendo dall'assunzione che, essendo gli anelli in tale configurazione da millenni, il modello ottenuto dovesse essere necessariamente stabile; pertanto, i modelli instabili andavano rigettati, insieme con le sottostanti ipotesi. L'approccio, che anticipa le attuali tecniche di identificazione dei modelli, è sintetizzato magistralmente dall'autore con queste parole: *… by rejecting every hypothesis which leads to conclusions at variance with the facts, we may learn more on the nature of these distant bodies than the telescope can yet ascertain*. Fu così che Maxwell concluse che gli anelli dovevano essere costituiti da molti elementi rigidi disconnessi tra loro, in rotazione intorno al pianeta, ciò che, a distanza di secoli, è stato confermato dalle odierne missioni spaziali.

***

ABSTRACT. – While still a student at Cambridge University, James Clerk Maxwell attention was attracted by Saturn Rings. To discover how these celestial bodies are composed, he constructed various mathematical models; each model was derived under dif-

(*) Dipartimento di Elettronica, Informazione e Bioingegneria del Politecnico di Milano, Milano, Italy.
E-mail: sergio.bittanti@polimi.it

ferent assumptions, such as: the rings constitute a unique rigid cap, or the rings are made by a gas nebula, and so on. The adopted rationale was to construct the models and then validate them by comparing their characteristics with "the facts", as Maxwell wrote, namely with the observation of reality. For the validation, Maxwell resorted to the notion of stability. Indeed, being the rings operating since millennia, it was argued that the stability property had to be satisfied. In the opposite, the model had to be rejected, together with the underlying assumption. This approach, which anticipates the current identification techniques, is summarized by the author with this masterful statement: *… by rejecting every hypothesis which leads to conclusions at variance with the facts, we may learn more on the nature of these distant bodies than the telescope can yet ascertain*. With his approach, Maxwell came to the conclusion that the rings are constituted by various rigid parts disconnected each other rotating around the planet, a fact which has been confirmed by space missions of our days.

1. La scoperta di Nettuno e il premio Adams

Alla metà dell'ottocento, John Adams, docente all'Università di Cambridge, si era concentrato sullo studio delle traiettorie dell'ultimo pianeta allora conosciuto, Urano. Adams giunse alla conclusione che tali traiettorie non potevano che essere spiegate con l'esistenza di un altro corpo celeste, un *pianeta esterno*. La medesima conclusione fu tratta, in modo indipendente, da Urbain Le Verrier, che lavorava a Parigi. Grazie ai loro calcoli, fu possibile stimare la posizione del "nuovo" corpo celeste, corpo che fu osservato sperimentalmente da Johan G. Galle, con il telescopio dell'osservatorio di Berlino. Era il 23 settembre 1846. Il sistema solare si arricchiva così di un nuovo pianeta, cui fu attribuito il nome di Nettuno.

Per dare lustro a questa scoperta, nel 1848 l'Università di Cambridge istituì un riconoscimento denominato *Premio Adams*, il cui bando recita:

> The University has accepted a fund raised by several members of St John's College, for the purpose of founding a Prize to be called the ADAMS PRIZE, for the best essay on some subject of Pure Mathematics, Astronomy, or other branch of Natural Philosophy.

Il premio era biennale e vi poteva partecipare chi era stato ammesso, in qualunque epoca, a quell'Università, dunque a tutti gli alunni, presenti e passati.

In questa nota, focalizzeremo l'attenzione su due *Premi Adams*, quello del 1855 e quello del 1876. Iniziamo con il primo, del secondo parleremo più avanti.

Il bando del 1855 diceva quanto segue:

> The Examiners give Notice, that the following is the subject for the prize to be adjudged in 1857: - "The Motions of Saturn's Rings".

Questo tema si collocava nell'ambito degli studi sul sistema solare compiuti nel corso del settecento e dell'ottocento, [1].



Fig. 1 – Ritratto di James Clerk Maxwell.

Il premio andò a un giovane studente, James Clerk Maxwell (*Fig. 1*), originario di Edimburgo, dove era nato il 13 giugno 1831, per il saggio "The stability of Saturn's rings", la cui copertina è riprodotta in *Fig. 2*. Si osservi che il titolo del saggio non coincide esattamente con il tema del bando.

ON THE

STABILITY OF THE MOTION

OF

SATURN'S RINGS.

AN ESSAY,

WHICH OBTAINED THE ADAMS PRIZE FOR THE YEAR 1856, IN THE UNIVERSITY OF CAMBRIDGE.

Fig. 2 – Frontespizio del saggio di Maxwell sugli anelli di Saturno.

2. Primi studi sul sistema solare

Il libro di Newton "*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*", pubblicato nel 1687, offrì al mondo i metodi per la comprensione delle leggi che governano i fenomeni celesti, da sempre oggetto d'investigazione da parte degli esseri umani.

Ebbe così avvio un fervore di studi sul sistema solare. Una delle domande che ci si poneva era quale effetto avrebbe potuto avere una perturbazione dovuta all'intrusione di un corpo esterno, come una cometa o un asteroide.[1] La presenza di tale corpo avrebbe potuto avere effetti diversi sulle traiettorie dei pianeti, come a) una deformazione temporanea, al termine della quale i pianeti sarebbero poi tornati nelle loro usuali traiettorie, b) una deformazione permanente, c) la deflagrazione del sistema solare. Si trattava cioè di studiare la *stabilità* del sistema solare. Tra i paladini di questi studi di *astronomia matematica* si annoverano grandi scienziati, come Joseph-Louis Lagrange (1736-1813), Pierre Simon Laplace (1749-1827), Simon-Denis Poisson (1781-1840) e Carl Jacobi (1804-1851). In particolare, Laplace diede due fondamentali contributi, il saggio *Exposition du système du monde* (1796), e la monumentale *Mécanique Céleste*, un'opera che si compone di cinque volumi, il primo dei quali pubblicato nel 1799. Di Laplace, vogliamo anche ricordare il celebre motto: *poco è ciò che conosco, immenso ciò che ignoro*. Lo studio del sistema solare appassionava talmente l'opinione pubblica che, nel 1887, re Oscar di Svezia istituì un premio[2] per gli

[1] Eventi di questo genere non sono così remoti. Ad esempio, nel 1994, la cometa Shoemaker-Levy si schiantò su Giove. Di recente, il 19 ottobre 2014, la cometa Siding Spring ha sfiorato Marte, passando a 140.000 chilometri dal pianeta rosso (vale a dire a un terzo della distanza Terra-Luna), con pesanti conseguenze sulla sua atmosfera. Anche la Terra fu minacciata da un simile evento, quando la cometa Lexel transitò a soli 2 milioni di kilometri da noi. Era il 1770.

[2] Re Oscar istituì il premio per celebrare il suo sessantesimo genetliaco. Per la medesima occasione, l'autore di questa nota ebbe invece l'idea di proporre un numero speciale di *European Journal of Control*, rivista di cui fu Editor-in-Chief dal 2003 al 2013, interamente dedicato agli albori della scienza del controllo. Il numero, curato con Michel Gevers, docente all'Università di Lovanio, raccoglie le testimonianze di emeriti studiosi di varie nazionalità: Karl Åström (per gli sviluppi in Svezia), Roger Brokett (US), Han-Fu Chen e Daizhan Cheng (Cina), A.J. Fossard (Francia), Guido Guardabassi (Italia, si veda il riferimento [9]), Alexander Kurzhanski (Russia), David Mayne (UK) e Jan Willems (Olanda).

studi sul sistema dei tre corpi (ad esempio, Sole, Terra, Luna). Si trattava di determinare le traiettorie di tale sistema, note le condizioni iniziali. Il premio (si potrebbe dire il "premio Oscar") andò a Henri Poincaré (1854-1912), che mostrò l'impossibilità di esprimere la soluzione in forma esplicita, provando anche che due soluzioni associate a condizioni iniziali poco diverse potevano divergere tra loro a lungo andare.

3. Nascita del concetto di sistema dinamico

Poiché la forza determina l'accelerazione, che è la variazione della velocità, e, a sua volta, la velocità è, la variazione della posizione, la celebre legge di gravitazione universale si traduce matematicamente in un legame dinamico tra forza e posizione, ciò che oggi chiamiamo equazione differenziale. Nel mondo scientifico di allora, questo genere di modellizzazione era un'innovazione di grande portata. In precedenza, infatti, l'attenzione degli studiosi era sostanzialmente focalizzata su descrizioni di tipo algebrico.

Per maggiore chiarezza, soffermiamoci su questi due termini, relazione algebrica e relazione dinamica, nell'ipotesi semplificativa che il sistema che si stia analizzando sia caratterizzato da due sole variabili, diciamo u e y, dipendenti dal tempo t: $u(t)$ e $y(t)$. Può essere utile pensare a $u(t)$ come la variabile causa e a $y(t)$ come la variabile effetto. Una relazione algebrica tra due variabili è una relazione che lega i valori istantanei delle variabili. In tal modo, $y(t)$ è perfettamente determinabile quando si conosce $u(t)$, il valore assunto dalla variabile u al tempo t. Ad esempio, la tensione $y(t)$ ai capi di un filo conduttore (un resistore) è proporzionale alla corrente $u(t)$, come asserisce la celebre legge di Ohm. Vi sono però dei casi in cui non è possibile stabilire il valore di $y(t)$ noto che sia solamente $u(t)$. Consideriamo per esempio l'andamento $y(t)$ della popolazione in Cina. Nel periodo che va dal 1960 al 2010, $y(t)$ è crescente, passando da circa 0.6 a circa 1.5 miliardi di abitanti. Al contrario, il tasso di fertilità, vale a dire il numero medio di figli per donna, è decrescente, da circa 6 a circa 2. Se consideriamo il tasso come "variabile causa", $u(t)$, sembrerebbe vi sia una contraddizione dato che, nonostante che la progressiva diminuzione di $u(t)$, *l*a popolazione $y(t)$ è in continua crescita. In realtà, il paradosso è solo apparente; infatti, è a tutti chiaro che il valore attuale della popolazione dipende dall'andamento del tasso in tutta la sua storia passata. Presumibilmente, l'effetto della riduzione della fertilità si

manifesterà tra qualche anno, anzi tra qualche decennio. Pertanto, il legame $u(t) – y(t)$ è, in questo caso, dinamico.

3.1 Osservazione (sui modelli)

La legge di gravitazione esplicita la forza di attrazione tra due corpi. Per come è enunciata normalmente, è sottinteso che si tratta di una forza che si "esercita a distanza", in modo istantaneo. Già Laplace, nel corso dei suoi studi sul moto della luna, aveva dubitato che questo fosse corretto; certe anomalie, infatti, non avrebbero potuto trovare spiegazione se la forza di gravità si fosse davvero trasmessa a velocità infinita. Per avere un completo chiarimento su questa fondamentale questione, bisognava però attendere i primi decenni del novecento, quando, per merito di Henry Poincaré e Albert Einstein, fu sviluppata la teoria della relatività. Divenne allora chiaro che la forza di gravità non si propaga da un corpo all'altro istantaneamente, ma a velocità finita, precisamente alla velocità della luce. Così, se in questo momento il sole cessasse la sua attività, la forza di gravitazione cui è soggetta la Terra continuerebbe a manifestarsi per altri otto minuti, il tempo impiegato dalla luce per giungere a noi. Naturalmente, questa osservazione, seppur di fondamentale importanza, non inficia la portata della legge di Newton, che, per i sistemi in cui i corpi si muovono a velocità lontane da quella della luce, ha consentito di raggiungere risultati formidabili per l'umanità. Del resto, com'era solito dire lo statistico George Box (1919-2013), *tutti i modelli sono sbagliati, ma qualcuno è utile.*

4. Albori del concetto di stabilità

Come accennato in precedenza, gli studi sulla stabilità del sistema solare erano volti a stabilire l'effetto di una perturbazione prodotta da una cometa o da altro corpo celeste in transito nel sistema. Si tratta di un interessantissimo problema, che ha comprensibilmente suscitato l'interesse non solo degli studiosi ma anche del grande pubblico. A ben riflettere, però, il concetto di stabilità ha valenza generale, e può essere riferito a un qualunque sistema dinamico. In particolare, questa nozione ha un ruolo cruciale nei sistemi di controllo. Per il buon funzionamento di tali sistemi, l'effetto d'imprevedibili perturbazioni (disturbi) deve essere neutralizzato, e questo può accadere solo se il sistema è stabile.

L'affermazione del concetto di stabilità per lo studio di ogni sistema dinamico ebbe luogo nella seconda metà dell'ottocento. Il merito della definizione generale, universalmente accettata ai nostri giorni, va ad Alexander M. Lyapunov (1857-1918), che l'enunciò per la prima volta nella sua tesi di dottorato, discussa all'Università di San Pietroburgo nel 1884.

Tuttavia, come vedremo a breve, la nozione di stabilità era già apparsa ed utilizzata in letteratura alcuni decenni prima. In particolare, tale nozione svolse un ruolo fondamentale già nei lavori di Maxwell.

5. Il saggio di Maxwell sugli anelli di Saturno

Veniamo ora al saggio sugli anelli di Saturno. Analizzeremo dapprima la logica di studio adottata. Passeremo quindi a descrivere l'organizzazione del saggio stesso

5.1 La logica di studio adottata nel saggio anticipa le moderne tecniche d'identificazione dei modelli

Nel suo saggio, Maxwell procede facendo diverse congetture sulla costituzione degli anelli e ricavando il corrispondente modello matematico. Il modello ottenuto viene quindi validato confrontando le sue caratteristiche salienti con "i fatti", vale a dire la realtà conosciuta. Se il modello è contradditorio rispetto al reale, l'ipotesi di partenza viene rigettata. Se non è contradditorio, allora la congettura non è falsificata, e potrebbe essere corretta. Nel saggio, vi è uno splendido passaggio in cui Maxwell sintetizza magistralmente questo suo modus operandi:

> *… by rejecting every hypothesis which leads to conclusions at variance with the facts, we may learn more on the nature of these distant bodies than the telescope can yet ascertain*.

Notiamo che questa linea di pensiero è tipica di quella disciplina che chiamiamo oggi *identificazione dei modelli e analisi dei dati*, il cui obiettivo è di ricavare una descrizione matematica valida di un dato sistema da dati sperimentali, a scopo conoscitivo, previsionale o di controllo. A tal fine si postula inizialmente una famiglia di modelli, all'interno della quale si sceglie il "modello migliore", di norma inteso come quello che fornisce pre-

dizioni aderenti il più possibile alle osservazioni sperimentali. Si valida poi il risultato ottenuto: se il modello non è soddisfacente, ad esempio perché qualche sua caratteristica non rispetta l'evidenza sperimentatale, si passa ad altra famiglia di modelli e si ripete il procedimento *ex novo* [2].

Ed ecco l'idea vincente di Maxwell: la validazione di un dato modello viene fatta ricorrendo alla nozione di stabilità: poiché' gli anelli sono in essere da tempo immemorabile, un modello valido deve essere stabile. In caso opposto, il modello va rigettato, e con esso l'ipotesi su cui esso si basa.

5.2 Organizzazione del saggio

Il saggio sugli anelli di Saturno si compone di 68 pagine seguite da una Appendice e da una tavola finale con le figure, 13 in tutto. I riferimenti bibliografici sono citati di volta in volta all'interno del testo.

Il lavoro è organizzato in due parti. La prima (pagine 6-17) ha come titolo *On the motion of a rigid body of any form about a sphere*. Qui il modello è ricavato nell'ipotesi che gli anelli siano costituiti da un unico blocco rigido. Come evidenzia Maxwell stesso nell'introduzione generale (pagine 1-5), tale ipotesi era già stata fatta nella *Mécanique Céleste* di Pierre Simon Laplace, per l'esattezza nel Capitolo sesto del Terzo volume e nel Capitolo terzo del Quinto volume. In merito, Maxwell scrive che

> *… (Laplace) proves most distinctly that a solid uniform ring cannot revolve around a central body in a permanent manner, for the slightest displacement of the centre of the ring from the centre of the planet would originate a motion which would never be checked, and would inevitably precipitate the ring upon the planet… We may draw the conclusion more formally as follows: If the rings were solid and uniform, their motion would be unstable, and they would be destroyed. But they are not destroyed, and their motion is stable; therefore they are either not uniform or not solid.*

Nella seconda parte del saggio, intitolata *On the motion of a ring, the parts of which are not rigidly connected*, si studia il caso di più elementi non rigidamente connessi, come se l'anello fosse costituito da vari satelliti indipendenti. Naturalmente, la modellistica è più complessa poiché occorre considerare, oltre alla forza di attrazione esercitata da Saturno e alla forza centrifuga, anche l'effetto mutuo di un satellite sugli altri. Lo studio, viene condotto dietro alcune ipotesi semplificative: a) la traiettoria di ciascun satellite è circolare; b) la velocità di rotazione è uniforme; c) i

vari satelliti dell'anello sono tutti identici tra loro d) la dimensione trasversale è trascurabile. Il numero dei satelliti è indicato con la lettera greca μ, mentre R ed S indicano rispettivamente la massa dell'anello e la massa di Saturno. La condizione ricavata da Maxwell affinché il moto sia stabile è che la massa di Saturno sia sufficientemente elevata in rapporto a quella dell'anello: $S>0.4352\mu^2 R$. Come osserva Maxwell stesso, se il numero di satelliti fosse così elevato da violare questa condizione, il moto sarebbe instabile, e si innescherebbero oscillazioni distruttive che porterebbero i satelliti a collidere tra loro e quindi - presumibilmente - ad unificarsi in un unico corpo, riportando il numero dei satelliti all'interno del massimo che Saturno può sostenere (o, come dice l'autore, *keep in discipline*). Quando al contrario la diseguaglianza è verificata, i satelliti non solo sono in grado di permanere ad una distanza appropriata dal centro di gravità di Saturno, ma, data la preponderante massa del pianeta, possono evitare di interferire l'un l'altro.

Nel corso della trattazione, i simboli impiegati, in numero non piccolo, vengono via via introdotti in modo discorsivo, ciò che rende la lettura un po' difficoltosa. Maxwell ha però il merito di terminare lo studio con un'utile ricapitolazione della prima e della seconda parte, facendo una sintesi efficace dei casi considerati e dei risultati ottenuti.

5.3 Osservazione (sulle missioni spaziali per l'esplorazione di Saturno)

Gli studi di Maxwell sulla costituzione degli anelli hanno trovato conferma nel corso di alcune missioni spaziali. Si tratta principalmente di Pioneer 11, Voyager 1, Voyager 2 e Cassini-Huygens, le cui sonde sono transitate nei pressi del grande pianeta nel 1979, 1980, 1981 e 1997, rispettivamente. Per un resoconto di queste missioni si rimanda a [3] e [4].

6. Contributo di Maxwell allo studio dei sistemi di controllo

Ci soffermiamo ora su un altro importante contributo di Maxwell, in cui si usano alcuni concetti vicini a quelli già impiegati nel saggio sugli anelli, in particolare il concetto di stabilità. Si tratta di un articolo pubblicato nei *Proceedings della Royal Society* nel 1868, dal titolo lapidario: *On governors*. Allo scopo di imporre un determinato comportamento a un dato sistema, si può ricorrere a un disposi-

tivo opportunamente progettato che, connesso al sistema stesso, ne garantisca il buon funzionamento. Nell'articolo citato, tale dispositivo è indicato come *governor*; oggi si usa piuttosto il termine *controller* in inglese, e *controllore* nella nostra lingua. L'insieme del sistema da governare e del suo controllore prende il nome di *sistema di controllo*. La scienza che si occupa dello studio di questi sistemi prende il nome di Automatica.

A titolo esemplificativo, soffermiamoci sul compito di imporre una certa temperatura in un locale. Nel periodo invernale, l'obiettivo è raggiunto mediante un dispositivo che regola la quantità di calore immessa nel locale, tipicamente tramite un termostato, che, dal confronto tra la temperatura attuale e temperatura desiderata, provvede ad accendere o spegnere la sorgente di calore. Un simile sistema prende più precisamente il nome di *sistema di controllo retro-azionato* poiché è dalla valutazione della differenza tra temperatura desiderata e temperatura effettiva che si decide l'intervento ottimale del termostato. La denominazione deriva dal fatto che la misurazione della temperatura effettuata nel locale deve essere riportata (*portata indietro*, *retro-azionata*) al termostato per il confronto con il riferimento di temperatura.

E' importante notare che i sistemi di controllo sono diffusissimi anche negli esseri viventi; in tal caso è la natura stessa ad aver impresso in un nostro organo la legge di controllo, senza che se ne abbia consapevolezza. Ad esempio, il complesso sistema di regolazione del glucosio nel sangue ha sede nel pancreas, un organo che produce due ormoni, l'insulina e il glucagone, aventi effetti contrastanti tra loro: il primo riduce la concentrazione di glucosio, mentre il secondo la aumenta. I due ormoni sono generati automaticamente in opportuna quantità a seconda che vi sia eccesso o carenza di glucosio, consentendo il mantenimento delle condizioni di benessere naturale dell'individuo. Il diabete è una malattia che insorge quando il pancreas non è più in grado di reagire al disallineamento tra concentrazione effettiva di glucosio e concentrazione ideale.

Per maggiori informazioni sull'Automatica si rimanda all'immensa letteratura disponibile, ad esempio al volume [5]; chi fosse interessato all'evoluzione storica della disciplina può fare riferimento a [6]-[10].

Ma torniamo all'articolo di Maxwell *On Governors*, dove l'autore prende in considerazione alcuni sistemi operanti in realtà fisiche diverse, in particolare il cosiddetto *regolatore centrifugo*. Questo

dispositivo fu concepito per il controllo dei mulini a vento e poi adattato al problema del controllo della velocità dell'albero di macchine a vapore. Come noto, le macchine a vapore presero a svilupparsi all'inizio della rivoluzione industriale del 700, principalmente in Gran Bretagna, per la movimentazione dei treni. Erano però soggette a disturbi di varia natura, vuoi per le variazioni di carico vuoi per la variabilità delle caratteristiche del combustibile impiegato. Il regolatore centrifugo era un dispositivo consistente in una sorta di compasso ad apertura variabile il cui asse di rotazione era calettato sull'albero della macchina da regolare (*Fig. 3*). Incidentalmente, notiamo che questa immagine è diventata una sorta d'icona dell'Automatica, tanto da essere stata adottata come marchio da diversi istituti di ricerca nel settore e da essere riprodotta sulle copertine di molti libri. All'estremità del compasso erano collocate due sferette, cosicché, quando – ad esempio – la velocità di rotazione era eccessiva, la forza centrifuga agente sulle sferette portava ad un ampliamento dell'apertura del compasso; corrispondentemente, tramite un opportuno levismo, questa variazione si rifletteva sulla portata del vapore, e quindi sulla velocità di rotazione dell'albero, riportandola in modo automatico, senza intervento di un operatore umano, a valori accettabili.

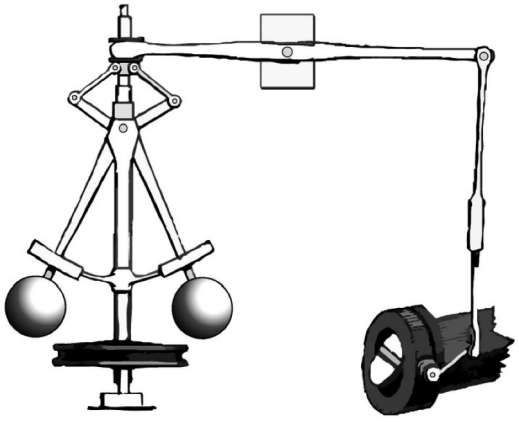


Fig. 3 – Il regolatore centrifugo.

Nel suo articolo del 1868, oltre al regolatore centrifugo, Maxwell tratta diversi altri sistemi di controllo, appartenenti a campi assai diversi. E' degno di nota osservare che tutti i dispositivi conside-

rati sono descritti mediante sistemi dinamici lineari, seppur di diversa complessità. Ciò che li accomuna tutti quanti è che si tratta di sistemi retro-azionati. Corrispondentemente il concetto di controllore (*governor*) è comune:

> *"A governor is a part of a machine by means of which the velocity of the machine [...] is kept nearly uniform, not with standing variations in the driving power or the resistance. Most governors depend on the centrifugal force of a piece connected with a shaft of the machine. When the velocity increases, this force increases, and either increases the pressure of the piece against a surface or moves the piece, and so acts on a break or a valve".*

Più avanti si legge:

> *"I propose [...] to direct the attention of engineers and mathematicians to the dynamical theory of such governors. It will be seen that the motion of a machine with its governor consists in general of a uniform motion, combined with a disturbance which may be expressed as the sum of several component motion. These components may be of four different kinds:*
>
> *The disturbance may continually increase*
> *It may continually diminish*
> *It may be an oscillation of continually increasing amplitude*
> *It may be an oscillating continually decreasing amplitude*
>
> *The first and the third cases are evidently inconsistent with the stability of the motion, and the second and fourth alone are admissible in a good governor. This condition is mathematically equivalent to the condition that all the possible roots, and all the possible parts, of the impossible roots of a certain equation shall be negative. I have not been able completely to determine these conditions for equation of a higher degree than the third; but I hope that the subject will obtain the attention of mathematicians".*

In ultima analisi, lo studio della stabilità porta al problema della risoluzione di un'equazione polinomiale a coefficienti reali, quella che oggi si chiama *equazione caratteristica*. Il risultato base è che un sistema è stabile se tutte le soluzioni della sua equazione caratteristica hanno parte reale negativa. Uno dei meriti di Maxwell fu di aver compreso che le cosiddette *soluzioni impossibili*, vale a dire le soluzioni complesse, sono altrettanto importanti delle soluzioni reali e anch'esse vanno analizzate nello studio della stabilità. Si noti poi che, secondo il particolare

sistema considerato, l'equazione caratteristica ricavata dall'autore poteva avere grado diverso. E Maxwell termina riconoscendo di non essere stato in grado di ricavare una condizione di stabilità per polinomi di grado superiore a tre.

7. Studio delle soluzioni di una equazione algebrica

Siamo dunque condotti ad un celebre problema, palestra di studio per molti scienziati: il problema della soluzione di equazioni algebriche di vario grado.

Come noto vi è una formula esplicita per le soluzioni delle equazioni di secondo grado. Ma anche le equazioni di terzo grado ammettono soluzione in forma chiusa. La storia della messa a punto di quest'ultima formula è davvero curiosa. La scoperta si deve a due matematici di grandissimo valore, il bresciano Niccolò Fontana, detto Tartaglia (1499-1557), e il bolognese Scipione del Ferro (1465-1526), che la ricavarono in modo indipendente l'uno dall'altro. Sia Tartaglia sia del Ferro, però, tennero la formula nel cassetto per parecchi anni. Tartaglia la rivelò in via del tutto confidenziale a Gerolamo Cardano (1501-1576). Quanto a del Ferro, confidò la soluzione a suo genero Annibale della Nave, che, a sua volta, la espose a Cardano durante una visita di quest'ultimo a Bologna. Fatto sta che la formula fu pubblicata nel 1545 nel libro di Cardano *Ars Magna*, universalmente considerato come il maggiore trattato scientifico del Rinascimento. Nel libro, Cardano ammette che la paternità della formula non è sua, riconoscendo che essa si deve a Tartaglia e a del Ferro. Tuttavia, Tartaglia se la prese a male, ed ebbe inizio una disputa che si protrasse per anni [11], [12]. Ricordiamo poi che Paolo Ruffini (1765-1822) provò che, dal quinto grado, non vi è una formula esplicita risolutiva.

In seguito a tutte queste considerazioni, sembrerebbe, dunque, che il problema dell'analisi di stabilità sia un problema arduo, soprattutto per sistemi complessi, di elevato ordine. A ben riflettere, però, l'analisi di stabilità non richiede la soluzione esplicita dell'equazione caratteristica, richiede molto meno: basta stabilire se tutte le soluzioni hanno parte reale negativa.

Maxwell cercò di ottenere una condizione necessaria e sufficiente, senza riuscirvi, come scrisse nel passaggio finale del suo articolo sopra citato.

8. Il premio Adams del 1877 e il criterio di Routh

In seguito al suggerimento espresso da Maxwell nel finale del suo articolo del 1868, fu bandito un Premio Adams per la messa a punto di un criterio di stabilità. Il premio, assegnato nel 1877, andò a Edward J. Routh (1831-1907), anch'egli docente a Cambridge, per il suo saggio dal titolo *A treatise in the stability of a given state of motion*. Routh aveva ricavato una condizione (necessaria e sufficiente) grazie alla quale era possibile stabilire se tutte lo soluzioni di una equazione algebrica avessero parte reale negativa, senza che fosse necessario ricavare le soluzioni dell'equazione stessa. La condizione richiedeva solamente la costruzione di una tabella i cui elementi si potevano ricavare con calcoli elementari dai coefficienti del polinomio di partenza. Nasceva così il celeberrimo Criterio di Routh,[3] che è insegnato oggi in tutti i corsi di Automatica nel mondo, si veda ad esempio [5].

In realtà si può ben dire che Maxwell e Routh ebbero due destini incrociati. Nati entrambi nel 1831, furono compagni di studi a Cambridge. A quei tempi, era d'uso sottoporre gli allievi di quella Università ad una prova molto selettiva, una sorta di "competizione dei bravissimi", denominata *Mathematical Tripos*, che si teneva alla fine del primo triennio di studi. I *Tripos* consistevano in un insieme di test matematici complessi, che potevano richiedere diversi giorni di lavoro da parte dei candidati. L'etimologia del termine *Tripos* non è chiara; potrebbe forse avere a che vedere con la parola tripode (tripod), lo sgabello a tre piedi che gli studenti usavano nei loro esami orali all'università. I primi classificati in questa competizione venivano inseriti in una lista nota come *Wrangler list*. Questo era un segno distintivo molto ambito, ed anche un prestigioso biglietto da visita per future occupazioni (non necessariamente universitarie, né unicamente di tipo scientifico, ad esempio per concorsi di giudice di tribunale). La classificazione ottenuta in queste prove era indicata con sigle sintetiche, ad esempio 7W 1893 indica chi si classificò in settima posizione nei Tripos del 1893, mentre 12W 1905 sta per il dodicesimo classificato del 1905 (per la pre-

[3] Nel 1894, Adolf Hurwitz (1859-1916), un matematico che lavorava al Politecnico di Zurigo (ETH), ricavò una condizione necessaria e sufficiente diversa ma equivalente a quella di Routh. Per questo il criterio viene anche denominato Criterio di Routh-Hurwitz.

cisione, si tratta rispettivamente di Bertrand Russell e di Lord Keynes). Maxwell e Routh avevano partecipato entrambi ai *Tripos* del 1854, classificandosi ai primi due posti (1W 1854 e 2W 1854). Per l'esattezza, Routh era stato classificato al primo posto e Maxwell al secondo.

Una seconda analogia tra i due riguarda il premio Adams, che, come già detto, fu assegnato a Maxwell per il suo saggio sugli anelli di Saturno e, circa vent'anni dopo, a Routh per il suo studio sulla condizione generale di stabilità.

9. Epilogo

Il saggio sugli anelli di Saturno rappresenta il debutto scientifico di James C. Maxwell, all'epoca studente universitario a Cambridge. Per la comprensione della costituzione degli anelli, si adotta un approccio molto originale, che anticipa la logica delle moderne tecniche d'identificazione. Se si considerano poi i fondamentali contributi successivi all'elettromagnetismo e ad altri campi, si comprende perché siano in molti a ritenere che Maxwell sia stato il maggiore scienziato dell'Ottocento. Sulla sua vita e sui suoi contributi, vi sono molte pubblicazioni, tra cui [13][4] e [14]. Nella commemorazione per il centenario della sua nascita, Albert Einstein disse che Maxwell era stato *"the most profound and the most fruitful scientist that physics has experienced since the time of Newton"*. Chi scrive si è chiesto spesso quali altri contributi l'illustre scienziato ci avrebbe potuto dare se un tumore non lo avesse sottratto alla vita a soli 48 anni.

---

[4] Questo volume si compone di tre parti. La prima è articolata in 14 capitoli, i primi 13 dei quali sono dedicati alla biografia dello scienziato. I lavori di Maxwell sono raccolti nel capitolo 14 della prima parte, e nelle parti seconda e terza del volume. Per la precisione, gli scritti scientifici sono presentati nella parte seconda; il capitolo 14 della parte prima contiene invece tre scritti a carattere filosofico; infine la terza parte contiene le poesie di Maxwell. Queste ultime sono state tradotte in italiano con testo originale a fronte nel volume "Poesie" pubblicato da Archivio Dedalus Edizioni nel 2012. Il Capitolo 14 della Parte prima è stato tradotto in italiano e pubblicato con il titolo "Ultimi saggi di Cambridge" nel 2014, sempre da Archivio Dedalus Edizioni. E' ora in corso la traduzione in lingua italiana dei Cap. 1-13, la vera e propria biografia, che verrà pubblicata nel 2015, dal medesimo editore. L'Istituto Lombardo - Accademia di Scienze e Lettere ha in programma un evento nell'autunno 2015 per celebrare il completamento di questa poderosa opera.

BIBLIOGRAFIA

[1] Simonyi K., *A cultural history of Physics*. CRC Press, Boca Raton, Florida, 2012.
[2] Bittanti S., *Identificazione dei Modelli e Sistemi Adattativi*. Pitagora Editrice, Bologna, prima edizione 1990, ultima edizione 2013.
[3] Lovett L., Horvath J., Cuzzi J., *Saturn - a New View*. Abrams, New York, 2006.
[4] Sassone Corsi E., *Il Signore degli Anelli*, Gremese, Roma, 2015.
[5] Bittanti S., *Introduzione all'Automatica*, Zanichelli, Bologna, 2014.
[6] Åström K.J., Kumar P.R., Control: A perspective, *Automatica*, 2014: vol. 50: 3-43.
[7] Bittanti S., Zibaldone di pensieri sull'evoluzione storica dell'Automatica, *AEIT,* 2014: 6: 30- 43. (numero speciale per il centenario della rivista *AEIT*).
[8] Bittanti S. (ed.), *Control Science evolution. Proceedings of the Second Convegno Internazionale sui Problemi dell'Automatismo*. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma, 2008.
[9] Guardabassi G.O., The dawn of control science in Italy – from intuitive engineering to modern control theory. *European Journal of Control*: 2007: 13: 36-48.
[10] Lepschy A., Trent'anni di Automatica in Italia. *Automazione e Strumentazione*: 1997: 45: 91-97.
[11] Bittanti L., *Di Nicolò Tartaglia, matematico bresciano*. Apollonio, Brescia, 1871.
[12] Toscano F., *La formula segreta,* Sironi Editore, Milano, 2009.
[13] Campbell L., Garnett W., *The life of James Clerk Maxwell*. MacMillan and Co., London, 1882.
[14] James Clerk Maxwell, in: *Alessandro Volta, le onoranze del 1878 all'Università di Pavia*, a cura di Cantoni V., Morando P.A., 132-139, Silvana Editoriale, Cinisello Balsamo, 2011.

PANCREAS AND ISLET TRANSPLANTATION: CLINICAL INDICATIONS AND CLINICAL RESULTS

ANTONIO SECCHI (*)

Nota presentata dal m.e. Guido Pozza
(Adunanza del 23 ottobre 2014)

SUNTO. – Il trapianto di pancreas è la cura più efficace in caso di diabete di tipo 1. Sebbene sia stato dimostrato che uno schema intensivo di somministrazione d'insulina sia in grado di ridurre l'incidenza delle note complicanze del diabete, solo il trapianto di pancreas normalizza il controllo glicometabolico, evita i rischi di gravi episodi d'ipoglicemia e previene o in alcuni casi migliora le complicanze già riscontrate. Nel seguente articolo sarà analizzato l'impatto del trapianto di pancreas sugli effetti collaterali dovuti a diabete e sulla sopravvivenza dei pazienti. Recentemente è emerso come il trapianto d'isole sia l'approccio terapeutico più promettente per migliorare il controllo glicometabolico nel diabete di tipo 1 e in molti casi per ottenere l'indipendenza da insulina. Il trapianto d'isole richiede inoltre un ricovero ospedaliero relativamente breve e ha il vantaggio di essere una procedura non invasiva. Il grado di insulinoindipendenza ottenuto dopo un anno dal trapianto di isole è migliorato significativamente negli ultimi anni. I dati provenienti da una ricerca internazionale hanno confermato che il trapianto di isole può costituire una cura per il diabete di tipo 1. Dati recenti inoltre indicano che l'insulino indipendenza intervenuta dopo il trapianto di isole si associa a un miglioramento del metabolismo del glucosio e di conseguenza della qualità di vita con una decisa riduzione degli episodi di ipoglicemia. Il trapianto di isole pancreatiche è ancora allo stadio iniziale e quindi è necessario superare altri ostacoli, ma una volta insediato con successo dal punto di vista clinico questo trattamento potrà essere proposto a pazienti diabetici molto prima dell'insorgenza delle complicanze oppure a coloro che rischiano la vita a causa della non consapevolezza della ipoglicemia o nei casi di diabete instabile.

(*) San Raffaele University, Milano, Italy.
E-mail: secchi.antonio@hsr.it

ABSTRACT. – Pancreas transplantation is the more effective cure for type 1 diabetes. Although intensive insulin scheme has been demonstrated to reduce the incidence of diabetes related complication, only pancreas transplantation normalizes glycometabolic control, avoids the risk of severe hypoglycemic events and prevents or in some case ameliorates diabetes related complications. In this review it will be analyzed the impact of pancreas transplantation on diabetes related complication and patient survival. Islet cell transplantation has recently emerged as one the most promising therapeutic approaches to improving glycometabolic control in type 1 diabetic patients and, in many cases, to obtaining insulin independence. Islet cell transplantation requires a relatively short hospital stay and has the advantage of being a relatively noninvasive procedure. The rate of insulin independence 1 year after islet cell transplantation has significantly improved in recent years Data from a recent international Trial confirmed that islet cell transplantation can be potentially a cure for type 1 diabetes. Recent data indicate that insulin independence after islet cell transplantation is associated with an improvement in glucose metabolism and quality of life and with a reduction in hypoglycemic episodes. Islet cell transplantation is still in its initial stages, and many obstacles still need to be overcome. Once clinical islet transplantation has been successfully established, this treatment could even be offered to diabetic patients long before the onset of diabetic complications or to patients with life-threatening hypoglycemic unawareness and brittle diabetes.

INTRODUCTION

Pancreas transplant was performed for the first time in 1966 at the University of Minnesota. More than 27,00 pancreas transplants were reported in the USA, and further 15,000 were reported all over the world, reaching at 1 year a survival rate of 95% for patients and 85% for pancreas, as reported by the International Pancreas Transplant registry, hold at the University of Arizona [1].

Currently pancreas transplantation represents the preferred treatment for the restoration of the endocrine function, guaranteeing normal glucose homeostasis and consequently the effective reduction of the side effects on the long-term diabetic disease. However, the procedure of pancreas transplant cannot be considered life-saving, in contrast, *e.g.*, to liver or heart /lungs transplant. For this reason, the long-term advantages have to be evaluated and correlated to the potential mortality and morbidity associated with the surgical intervention as well as to the possible side effects due to the chronic immunosuppression therapy.

SELECTION CRITERIA FOR PANCREAS TRANSPLANTATION

All the patients affected by type 1 diabetes mellitus and end stage renal disease, able to face major surgery, are possible candidates for a

simultaneous kidney and pancreas transplant. Candidates for isolated pancreas transplant are all the patients suffering type1 diabetes mellitus, who show an elevated risk to develop secondary complications to the disease, such as nephropathy, neuropathy and retinopathy or manifest a severe glycometabolic unbalance, with frequent episodes of undetected hypoglycemia. Particular attention has to be observed in patients who suffer from renal dysfunction: in such case it is very important to consider the risk of progression of disease and consequently the potential necessity to undergo a kidney transplant in the near future.

As a consequence three recipient categories are currently identified:

– simultaneous pancreas kidney transplantation (SPK) in patients affected by type 1 diabetes and end stage renal failure: this represents 80% of all the pancreas performed.
– Pancreas after kidney transplantation (PAK) in type 1 diabetic patients already submitted to kidney transplantation, either by cadaver or living donors: this represents 15% of all the transplants performed.
– Pancreas transplant alone (PTA) in brittle diabetic patients: 5-10% of the cases.

Surgical procedures

The transplanted pancreas is situated in the right iliac fossa. The blood anastomosis of the transplanted organ are done between the iliac artery of the recipient and the upper mesenteric artery and the splenic artery of the donor. The surgical technique for the venous drainage can be different according to the different receivers: the anastomosis can be prepared on the iliac vein (systemic drain) or on the inferior cava vein or on the mesenteric vein (portal drain). The drainage in the portal system imitates the physiological insulin passage at the hepatic level where it is metabolized by 50%. The systemic vein drain bypasses the effect of the first liver passage, causing hyperinsulinemia, which can predispose and accelerates atherosclerosis [2,3]. Studies have shown how the portal vein drainage, compared with the systemic one, is able to reduce the free cholesterol level, VLDL, LDL and apolipoprotein B [4]. The exocrine secretions are drained into the bladder or at enteric level. The bladder drain is associated with an elevated frequency of urologic side – effects, including urinary tract infections, ematuria, acidosis, dysplasia of the bladder, as well as episodes of reflux pancreatitis, although it would permit, through the evaluation of the urinary concentration of amylases, an early diagnosis

of organ rejection. Studies carried out at the Maryland prove that nowadays, thanks to new models of immunosuppressive therapy, a more a suitable antibiotic treatment, and the use of pancreatic biopsy for reject diagnosis and improved radiological techniques for the study of the transplanted pancreas, the enteric drain of the exocrine pancreatic secretions represents the golden standard [5].

Immunosuppressive therapy

A key point for the pancreas graft is the immunosuppressive therapy, which assume particular relevance due to the pronounced immunogenicity of this organ and the risk of recurrence of autoimmunity in patients affected by type 1 diabetes mellitus type 1. The immunosupressive schemes more widely utilized today are based on the association of induction treatment (rATG, basiliximab, or alemtuzumab) and maintenance polytherapy (calcineurin inhibitors, cell proliferation inhibitors and steroids). Induction treatment has proved to be capable to reduce frequency and seriousness of rejection episodes and to improve renal function within 3 years from kidney-pancreas graft [6]. As far as maintenance therapy, it has been capital the transition from azathioprine to mycophenolate mofetil as inhibitor of cell proliferation, so as the definition of tacrolimus superiority compared to cyclosporine in the prevention of rejection in kidney-pancreas combined transplant [7] and the proof of the security of protocols with rapid decalage of steroids, with all the consequent advantages. The introduction of the present immunosupressive protocols has allowed to move from 78% pancreas rejection in the "cyclosporine era" to the current 5-25%.

Immunosuppressants increase neoplastic risks, that should be carefully analyzed in a risk/benefit ratio evaluation before transplantation.

Outcome and results of pancreas transplant on the diabetes complications

Metabolic control

Pancreas transplant restore near-normal glucose homeostasis, with a reduction of HbA1c levels (*Fig. 1*): in a cohort of 54 patients who received pancreas transplantation HbA1c average after 6 years was 6%,

compared with 7% in patients who underwent intensive insulin therapy in Diabetes Control and Complications Trial.

Furthermore the pancreatic graft is able to restore glucagon secretion and consequently the blunted response to hypoglycemia, restore normal glucose hepatic production and improves lipid profiles.

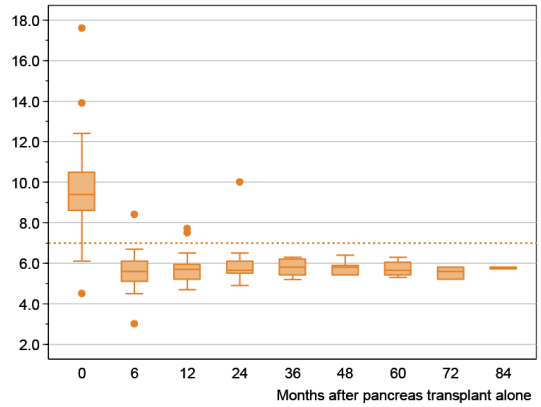


Fig. 1 – HbA1c levels after kidney-pancreas transplantation: a normalization is observed already at 6 months, and maintained over the years.

Retinopathy [8]

75% of type 1 diabetes mellitus patients develop diabetic retinopathy within 10 years from the onsetof diabetes. Among these 30% presents proliferating retinopathy requiring laser therapyand 40% will suffer blindness within 3 years. Several studies show that, after initial worsening of diabetic retinopathy, in the long run pancreas transplantation positively affects the development of this invalidating complication of diabetes. A research realized by Chow to compare retinopathy profiles between patients submitted to well functioning kidney-pancreas simultaneous graft and patients who lost the pancreas, proves that 14% of patients will show an improvement in diabetic retinopathy, 76% remained stable, while 10% deteriorated. Nearly all the patients developed cataract, probably due to the immunosuppressive therapy, with a reduction of visual acuity. This study underlines the importance to obtain a stabilization of pre-transplant diabetic retinopathy in order to guarantee a non-progression of diabetic retinopathy.

Nephropathy [9]

Hyperglycemia is a fundamental requirement for the development of the typical damages of the diabetic nephropathy. As shown by DCCT, patients affected by type 1 diabetes mellitus receiving an intensive insulin treatment, proved a reduced microalbuminuria incidence compared to patients receiving a standard treatment. Different studies have shown that achievement of normoglycemia is able to stop the worsening of diabetic nephropathy, but unable to recover when already present. Moreover other studies carried out by Fioretto *et al.* have proved that after 10 years of fully functional pancreatic graft, an improvement of glomerular and tubular damages was shown. Histology have shown reduction of the thickness of basal glomerular and tubular membranes and of mesengial matrix, as well as the disappearance of typical Kimmelstiel-Wilson nodular lesions. Additional studies have come to the conclusion that in the first stages the pancreas transplant leads to a significant decrease of proteinuria, obtaining a definite protection towards diabetic nephropathy.

Neuropathy [10]

Several studies carried out in patients submitted to simultaneous kidney-pancreas transplant (SPK) have proved the protective effect of normoglycemia on diabetic neuropathy. Kennedy *et al.* Have studied the progression of peripheral and autonomic neuropathy in pancreas transplanted patients compared to type 1 mellitus diabetic patients undergoing intensive insulin therapy. At 12, 24 and 42 months pancreas transplanted patients show a definite improvement in the sensory-motor and autonomic profile, whereas a worsening in the control group was evident. These observations were confirmed in other studies.

Coronary heart disease [11]

It is known that the high mortality rate in patients with type 1diabetes and end stage renal disease is mainly due to Ischemic Heart Disease. Jukema *et al.* have proved that at least 40% of patients undergoing pancreas transplantation show after transplantation a reduction of atherosclerotic damages, thus confirming previous observations of La Rocca *et al.* that demonstrated a reduction of carotid atherosclerosis

in patients with a functioning simultaneous kidney-pancreas graft, when compared to a control group of patients with failed transplant. The Jukema study appears to point out that simultaneous kidney-pancreas transplant, although suffering major perioperatory side-effects, is able to reduce the coronaric atherosclerosis thanks to the euglycemia achieved, improving the prognosis and the quality of life of type1 mellitus diabetes patients. Furthermore metabolic alterations of type 1 diabetes lead to selective diastolic dysfunction: 30% of diabetic patients with cardiovascular disease show normal systolic function together with isolated diastolic dysfunction. This specific alteration was shown to be reversible 4 years after successful pancreas transplantation by the studies of La Rocca. Both La Rocca and Gaber also stress the positive impact on systolic function of the normalization of metabolic control in kidney-pancreas transplanted patients. An echocardiographic analysis within 2 years from kidney-pancreas transplant suggests an improvement of the left ventricle geometry in comparison with the same exam performed on matched patients who received only kidney transplant and therefore remained diabetic. Other studies have shown that the percentage of cardiac events like severe myocardial infarction and/or pulmonary edema are reduced in patients undergoing simultaneous kidney-pancreas transplant when compared to diabetic patients undergoing only kidney transplantation.

All these observations justify the inferior incidence of cardiovascular events and the higher rate of survival (see chapter Survival) in patients undergoing a kidney-pancreas transplant, when compared to diabetic patients undergoing kidney transplant alone.

Cerebral and peripheral vasculopathy [12]

Nankivell *et al.* has shown an initial worsening of carotid intima thickness in kidney-pancreas patients, without evidence of cerebrovascular accidents. More recent studies prove an improvement in the carotid intima thickness within 2 years from pancreas-kidney transplant independently from lipid profiles, body mass index, blood pressure control, smoke and use of antilipidic therapy. On the other hand, as to peripheral vasculopathy, a progressive worsening seems to occur, despite good pancreas transplant function. This behavior could be explained by a vascular damage, at the moment of transplantation, too advanced to be reversible.

Survival [13]

SPK transplant was shown to increase, when compared to kidney transplant alone in diabetic patients (KTA), observed *vs.* expected life span [8, 9] (*Fig. 2*). Data of the U.S. Scientific Renal Transplant Registry and of the U.S. Renal Data System (more than 13,000 patients studied) show that patient survival rate at 10 years was higher in SPK than in KTA, the former group showing greatest longevity (23.4 yrs) when compared to 20.9 yrs in KTA from living donors and 12.8 yrs in KTA from deceased donors [14].

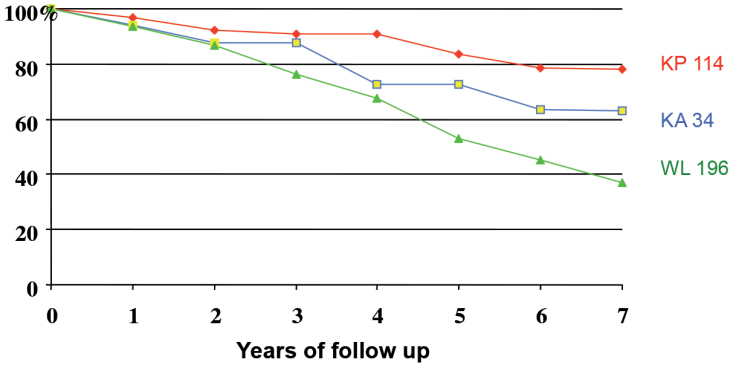


Fig. 2 – Actuarial survival in type 1 diabetic patients after Kidney-pancreas transplantation (KP, red), after Kidney transplantation alone (KA blue) and in waiting list for Kidney-pancreas transplantation (WL, green): pancreas transplantation improves live survival at 7 years of 18% over single kidney transplantation and of 40% over patents not yet transplanted.

Similar results were observed also in PAK patients, with an improvement of long term patient and kidney graft survival. When brittle diabetic patient are considered, the survival is higher at 4 years, when these patients receive a pancreas transplant, than in patients in waiting list for a transplant. In fact the survival percentage of patients included in the waiting list for pancreas transplant compared with patients undergoing transplant has been evaluated in a further UNOS data analysis. These results prove that within 4 years the survival rate in pancreas-transplanted patients *vs.* patients in waiting list for SPK reaches 90.3% (*vs.* 58.7%) and for PAK 88.3% (*vs.* 81.7%) and finally in the PTA group 90.5% (*vs.* 87.3%). This study has confirmed that simultaneous kidney/pancreas transplant obtains survival global advan-

tage in comparison with type1mellitus diabetes patients included in the waiting list for transplant [15].

From these data it appears that pancreas transplantation, that is not considered a life-saving procedure in the short term, must be considered a life-saving procedure in the long term.

SUMMARY BOX

- Pancreas transplantation is indicated in type 1 diabetic patients.
- Survival rates of patients and organs improved over years, achieving 95% and 85% respectively at 1 year.
- Pancreas transplantation normalize glucose metabolism
- Pancreas transplantation stabilize, reverts and prevent degenerative diabetic complications.

Islet transplantation

Islet transplantation is a relatively new medical procedure aimed to replace pancreatic function. Unfortunately, the lack of standardized protocols and the differences in inclusion criteria and in immunosuppressive regimens among studies have prevented islet transplantation from becoming the gold standard treatment for patients affected by T1DM.

Indications for islet cell transplantation

Frequent and severe hypoglycemic events are the most common indication for islet transplantation alone (ITA). Clinical and emotional problems associated with the use of exogenous insulin that are so severe as to be incapacitating, and consistent failure of insulin-based management to prevent acute complications are further indications for islet transplantation. Islet after kidney (IAK) transplantation is restricted to patients with end-stage renal disease affected by T1D previously submitted to successful kidney transplantation. A further group, rare, is simultaneous islet and kidney transplantation (SIK).

Procedure

Islet transplantation is performed using pancreas from heart beating donors.

After harvesting, the pancreas is processed in order to separate the islets from the surrounding tissue. This procedure is currently rather difficult with a relatively low rate of success (40-50%). When al adequate islet preparation, in terms of quality and quantity, is available, it is generally infused within the liver, through a portography. The procedure can be performed under local anesthesia. Alternative sites were already proposed without success, so intrahepatic transplantation is currently the gold-standard procedure (*Fig. 3*).

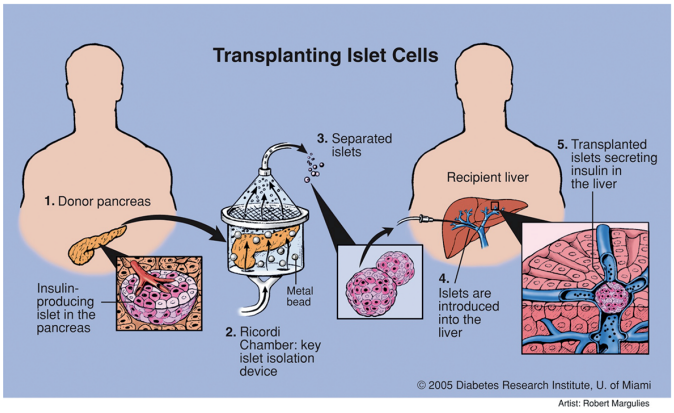


Fig. 3 – Schematic representation of islet transplantation.

The risks are minor and related to the portography procedure (bleeding, segmental liver thrombosis). Literature reports very limited side effects.

The procedure can be repeated when full function is not achieved.

Immunosuppression for islet transplantation

As in any case of allotransplantation, islet transplantation requires immunosuppression in order to prevent allorejection. Furthermore islets seem to be more sensitive to recurrence of autoimmunity than pancreas transplantation, thus stressing the requirement of a complete and effective immunosuppression [16]. This constitutes the major risk for patients undergoing islet transplantation and should be carefully balanced according to the current

clinical conditions of the patient and the potential advantages. Immunosuppressive schemes does not differ greatly from those used for pancreas transplantation. What characterize the immunosuppressive schemes in islet transplantation is the requirement of and anti-inflammatory co-treatment, generally based on anti-TNF, aimed to prevent local inflammation at the transplant site, that greatly reduces islet engraftment. Immunosuppressants must be tightly monitored in order to avoid known nephrotoxic and diabetogenic effects. Furthermore Immunosuppressants increase neoplastic risks, that should be carefully analyzed in a risk/benefit ratio evaluation before transplantation.

Clinical impact of islet transplantation

Clinical results achievable with islet transplantation were fully analyzed by the Collaborative Islet Transplantation Registry (CITR) [17], held in Bethesda, that is collecting clinical data of the majority of the active Centers, since 1999. The registry has collected data of 677 patients who received islet transplantation alone (ITA) or islet transplantation after a successful kidney transplant (IAK) and compared results achieved in the periods 1999-2002, 2003-2006, 2007-2010. Insulin independence at 3 years was 27% in the first era (214 patients), 37% in the second era (255 pts) and 44% in the third era (208 pts), showing a progressive and constant improvement of the results.

When insulin independence is achieved all metabolic parameters improve (*Fig. 4* and *Fig. 5*).

When full insulin independence is not achieved islet transplantation can in any case give an advantage to the patients by providing an auto regulated source of endogenous insulin, not enough to achieve full function, but enough to improve remarkably metabolic control with few units of insulin per day: this is considered "partial function" and is monitored though the blood levels of C-peptide, a surrogate marker of islet function. When C-peptide is higher than 0.3 ng/ml islet are considered still functioning, regardless of the insulin doses. This condition was maintained at 4 years in 60% in the first era, 74% in the second era and 88% in the third era, with a progressive and constant improvement also of this parameter of function.

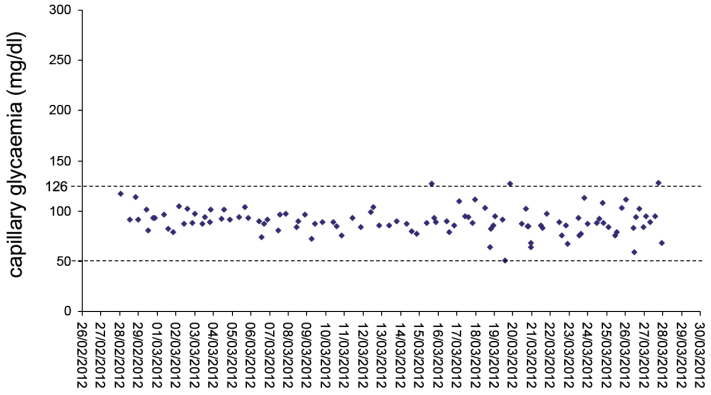


Fig. 4 – Blood glucose levels after islet transplantation are maintained within the normal range without insulin administration. These date are referred to a 40 years old type 1 diabetic patients, who developed diabetes at 19. Insulin requirement was 0.38 U/kg pre transplantation and dropped to 0 after transplantation. HbA1c, 9.8% pre transplantation, was 5% after transplantation.

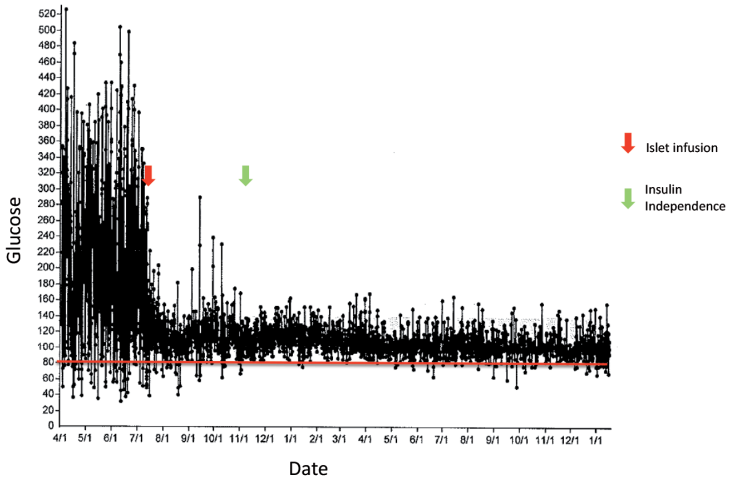


Fig. 5 – Blood glucose variability, very high before transplantation, is greatly reduced after transplantation.

As a consequence Glycated Hemoglobin improved over time and Hypoglycemic episodes nearly disappeared in patients showing islet function.

A second islet infusion is required when full function is not achieved. Also this improved over years: 65% of patients required a second infusion in the era 1999-2006, compared to 48% in the period 2007-2010.

Patient survival

A study analyzed the effect of islet transplantation on patient survival [18]. This work compared two populations of kidney-islet transplanted patients: a successful group with C-peptide secretion >0.5 ng/mL for more than 6 months and an unsuccessful group with early failure of the islet graft, who lost C-peptide secretion within 6 months of transplantation. All detailed studies before transplantation found that the two groups had similar general characteristics, metabolic status, immunosuppressive regimens, kidney graft function, degree of diabetic complications, and major known cardiovascular risk factors. After 7 years of follow-up, the survival among patients in the group with successful islet transplantation and sustained restoration of β-cell function was significantly higher (90%) than among patients in the unsuccessful transplantation group (51%). This higher survival in the successful group was accompanied by higher C-peptide levels and lower insulin requirements compared to the unsuccessful group, despite similar glycated hemoglobin levels. The number of cardiovascular deaths (according to ICD-9) was higher in the group with unsuccessful transplants, who also had poorer atherosclerotic profile and endothelial function [18].

Impact of islet transplantation on degenerative diabetic complications

Preliminary studies have shown that islet transplantation, even when not fully successful, can positively impact on late complications of diabetes, either preventing progression, either inducing a recover. The specific impact of islet transplantation on each of these complications is described in the following paragraphs.

Macroangiopathy

A previous report described the long-term beneficial effects of islet transplantation on micro- and macrovascular complications in 34 patients with T1D who received kidney transplants at a single institution. The authors found a reduction in carotid intima media thickness (IMT), an important index of eventual cardiovascular disease [18]. The increased IMT in the groups with nonfunctioning islets reached values higher than those in the general population but were similar to those in subjects with ischemic heart disease. Analysis of skin biopsies from islet-transplanted patients revealed that functioning islet transplants can induce positive micromodifications at the vessel level, such as an increase in the expression of von Willenbrand factor or endothelial nitric oxide or can reduce the thickening of the capillary basement membrane, cellular swelling, and the dilation of endoplasmic reticulum in endothelial cells [18]. The small sample size and single-center data render this study interesting but not definitive.

Kidney function

Successful islet transplants in T1D patients with end-stage renal disease receiving kidney transplants is capable to prolong graft survival and prevent reduction in vascular function of the kidney graft [19]. Furthermore non-invasive assessments of graft vascular function using the Doppler resistance index and microalbuminuria evaluations showed that patients with T1D who received a kidney transplant and an islet transplant showed better renal vascular function and cumulative kidney graft survival than the group without functioning islet. The positive effect of islet transplantation on kidney function was confirmed by decreases in the urinary excretion of albumin, the urinary fractional excretion of sodium, and the sodium excretion rate.

Diabetic retinopathy

Little information is currently available on the effect of islet transplantation on diabetic retinopathy. A statistically significant increase in retinal blood flow velocity at 1 year in patients with T1D who received

islet transplants [20] was reported (*Fig. 6*). The restoration of islet function can help control glucose excursion and, *per se*, can probably halt the alterations in retinal microcirculation. The Miami group reported a series of 12 patients who received islet transplants and were evaluated for the progression of diabetic retinopathy and neuropathy. Patients were examined by a single ophthalmologist and single neurologist throughout the study period. All patients showed stabilization of their retinopathic disease after islet transplantation.

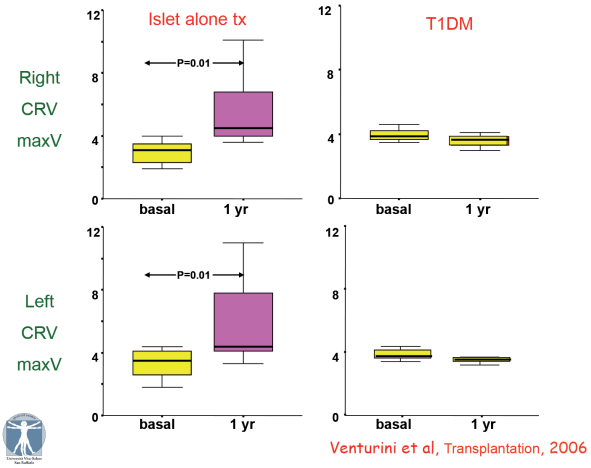


Fig. 6 – Right and left eye Central Retinal Velocity (CRV) in type 1 diabetic patients 1 year after islet transplantation (purple) and still in waiting list (yellow): a clear improvement is seen in the former group.

Diabetic neuropathy

Lee *et al.* assessed peripheral nerve function with a nerve conduction velocity (NCV) index [21] in islet-transplanted patients. Although no statistical analysis was provided, and the follow-up period was no longer than 2 years, the effect of β-cell replacement appeared to be positive on polyneuropathy. A preliminary report from the Milan group [22] showed, using the NCV index, that islet transplantation may induce long-lasting stabilization or even improvement of polyneuropathy in type 1 kidney-transplanted diabetic patients who also received a functioning islet transplant, reducing nerves' RAGE expression.

Islet autotransplantation

Islet autotransplantation (IAT) is a therapeutic approach used to prevent pancreatogenic diabetes or to reduce the severity of diabetes after a major pancreatectomy. This procedure was initially performed mainly in Minneapolis, staring at the end of seventies, the main indication being chronic painful panctreatitis. Indications were recently extended to pancreatectomy performed for the resection of benign tumors of the mid-segment of the pancreas or after total pancreatectomy for severe abdominal trauma. The aim of this procedure is to prevent post-pancreatectomy diabetes, that is very difficult to treat, due to the absence of counter-regulation effects of glucagon. Technically is very similar to islet allo-transplantation.

SUMMARY BOX
- Islet transplantation is indicated in type 1 diabetic patients.
- Success rate (insulin-independence) is around 80% at 1 year.
- Degenerative complications of diabetes can be halted by islet transplantation.
- Long term function is still fragile.

When pancreas and when islets?

A recent study has analyzed, in a single center study, the effects of pancreas and islet transplantation in an homogeneous population.

The outcomes of 33 PTA and 33 ITA were analyzed and pancreas or islet function (*i.e.*, insulin independence), perioperative and long-term adverse events were recorded. A higher rate of insulin independence in PTA (75%) *versus* ITA (59%) wasobserved, with the longer insulin independence among PTA patients receiving tacrolimus. The burden of adverse events was higher for PTA patients in terms of hospitalization length and number, re-intervention for surgical and immunological acute complications, CMV reactivation and other infections.

This study sugests the practice of listing patients for PTA when the metabolic lability and the progression of chronic complications require a rapid normalization of glucose levels, with the exception of patients with cardiovascular disease, because of the high surgical risks. ITA is indicated when replacement of beta cell mass is needed in patients with a high surgical risk.

REFERENCES

[1] Gruessner, A.C., Gruessner, R.W.G. Pancreas transplant outcomes for United States and Non United States cases as reported to the United Network for Organ Sharing and the International Pancreas Transplant Registry as of December 2011. Clinical Transplants 2012, Terasaki Foundation Laboratory, Los Angeles, CA.

[2] Stout RW. Insulin and atheroma. 20-yr perspective. *Diabetes Care* 1990; 13: 631-54.

[3] Fontbonne A, Charles MA, Thibult N, *et al.* Hyperinsulinaemia as a predictor of coronary heart disease mortality in a healthy population: the Paris Prospective Study, 15-year follow-up. *Diabetologia* 1991; 34: 356-61.

[4] Hughes TA, Gaber AO, Amiri HS, *et al.* Kidney-pancreas transplantation. The eff ect of portal *versus* systemic venous drainage of the pancreas on the lipoprotein composition. *Transplantation* 1995; 60: 1406-1412.

[5] Kuo PC, Johnson LB, Schweitzer EJ, *et al.* Simultaneous pancreas/kidney transplantation-a comparison of enteric and bladder drainage of exocrine pancreatic secretions. *Transplantation* 1997; 63: 238-43.

[6] Burke *et al.* Prospective, randomized trial of the effect of antibody induction in simultaneous pancreas and kidney transplantation: three-year results. *Transplantation* (2004) vol. 77 (8) pp. 1269-75.

[7] Malaise *et al.* Tacrolimus compared with cyclosporine microemulsion in primary simultaneous pancreas-kidney transplantation: the EURO-SPK 3-year results. *Transplant Proc* (2005) vol. 37 (6) pp. 2843-5.

[8] Chow VC, Pai RP, Chapman JR, *et al.* Diabetic retinopathy after combined kidney-pancreas transplantation. *Clin Transplant* 1999; 13: 356-62.

[9] Fioretto P, Steffes MW, Sutherland DE, *et al.* Reversal of lesions of diabetic nephropathy after pancreas transplantation. *N Engl J Med* 1998; 339: 69-75.

[10] Martinenghi S, Comi G, Galardi G, *et al.* Amelioration of nerve conduction velocity following simultaneous kidney/pancreas transplantation is due to the glycaemic control provided by the pancreas. *Diabetologia* 1997; 40: 1110-11.

[11] Jukema JW, Smets YF, van der Pijl JW, *et al.* Impact of simultaneous pancreas and kidney transplantation on progression of coronary atherosclerosis in patients with end-stage renal failure due to type 1 diabetes. *Diabetes Care* 2002; 25: 906-11.

[12] Fiorina P, La Rocca E, Venturini M, *et al.* Effects of kidney-pancreas transplantation on atherosclerotic risk factors and Endothelial Function in Type-1 diabetic uremic patients. Diabetes, 50: 496-501.

[13] La Rocca E, Fiorina P, Di Carlo V, *et al.* Cardiovascular outcomes after kidney-pancreas and kidney-alone transplantation. *Kidney Int* 2001;60: 1964-71.

[14] Reddy, K.S., Stablein, D., Taranto, S. Long-term survival following simultaneous kidney-pancreas transplantation *versus* kidney transplantation along in patients with type-1 diabetes mellitus and renal failure. Am J Kidney Dis 2003; 41:464-470.

[15] Gruessner RW, Sutherland DE, Gruessner AC. Mortality assessment for pancreas transplants. *Am J Transplant* 2004; 4: 2018-26.

[16] Piemonti, L; Everly, ; Maffi, P; *et al.* Alloantibody and autoantibody monitoring predicts islet transpnatation outcome in human type 1 diabetes. Diabetes. 2013 May;62(5):1656-64.
[17] Barton F *et al.* Improving outcomes in clinical islet transplantation: 1999-2010. Diabetes Care 35:1436-1445, 2012.
[18] Fiorina P, Gremizzi C, Maffi P, *et al.* Islet transplantation is associated with an improvement of cardiovascular function in type 1 diabetic kidney transplant patients. Diabetes care 2005;28(6):1358-1365.
[19] Fiorina P, Venturini M, Folli F, *et al.* Natural history of kidney graft survival, hypertrophy, and vascular function in end-stage renal disease type 1 diabetic kidney-transplanted patients: beneficial impact of pancreas and successful islet cotransplantation. Diabetes care 2005;28(6):1303-1310.
[20] Venturini M, Fiorina P, Maffi P, *et al.* Early increase of retinal arterial and venous blood flow velocities at color Doppler imaging in brittle type 1 diabetes after islet transplant alone. Transplantation 2006;81(9):1274-1277.
[21] Lee TC, Barshes NR, O'Mahony CA, *et al.* The effect of pancreatic islet transplantation on progression of diabetic retinopathy and neuropathy. Transplant Proc 2005;37(5):2263-2265.
[22] Del Carro U, Fiorina P, Amadio S, *et al.* Evaluation of polyneuropathy markers in type 1 diabetic kidney transplant patients and effects of islet transplantation: neurophysiological and skin biopsy longitudinal analysis. Diabetes care 2007;30(12):3063-3069.

NEURONAL APOPTOSIS AND INTERVENTION STRATEGIES

Nota del m.s. GIORGIO TERENGHI (*)

(Adunanza del 23 ottobre 2014)

SUNTO. - A seguito di una lesione distale di un nervo periferico, si riscontra la morte di una proporzione delle cellule neuronali sensoriali nei gangli dorsali. Se il trauma è più prossimale, per esempio una lesione del plesso brachiale, anche una proporzione dei corrispondenti neuroni motori muore. Questo fenomeno è stato poco studiato, ma è importante perchè le cellule neuronali perse non possono essere sostituite per la mancata potenzialità di divisione cellulare, con conseguente rigenerazione sub-optimale e deficit di recupero sensoriale del paziente. Ultimamente è stato accertato che la morte neuronale è dovuta al processo di apoptosi, come rivelato da studi di geni specifici che regolano i segnali apoptotici. Un intervento di riparazione chirurgica immediata del nervo conferisce una minima neuro-protezione, ma non abolisce completamente la morte cellulare dei neuroni, soprattutto questo approccio non è sempre possibile. I nostri studi hanno dimostrato che un intervento farmacologico usando sia acetil-L-carnitina (ALCAR) che N-acetil-cisteina (NAC) produce una protezione totale dei neuroni a seguito di lesioni dei nervi. Entrambi ALCAR e NAC sono già in uso clinico per altre applicazioni, ed i nostri studi hanno stabilito la miglior dose e la durata di somministrazione. L'efficacia della neuroprotezione di ALCAR e NAC può essere monitorata tramite risonanza magnetica del volume dei gangli dorsali, come dimostrato sia sperimentalmente che clinicamente. L'applicazione farmacologica sui pazienti richiede ulteriori studi, ma i risultati ottenuti finora dimostrano che questo approccio potrà determinare la sopravvivenza dei neuroni ed un miglioramento della rigenerazione dei nervi.

(*) Professore di Ingegneria Tissutale, Centre for Tissue Injury & Repair University of Manchester.
E-mail: giorgio.terenghi@manchester.ac.uk

***

ABSTRACT. - Following distal nerve injury significant sensory neuronal cell death occurs in the dorsal root ganglia, while after a more proximal injury, such as brachial plexus injury, a sizeable proportion of spinal motoneurons also undergo cell death. This phenomenon has been undervalued for a long time, but it has a significant role in the lack of functional recuperation, as neuronal cells cannot divide and be replaced, hence the resulting nerve regeneration is usually suboptimal. It is now accepted that this cell death is due to apoptosis, as indicated by analysis of specific genes involved in the apoptotic signalling cascade. Immediate nerve repair, either by direct suturing or nerve grafting, gives a degree of neuroprotection, but this approach does not fully prevent neuronal cell death and importantly it is not always possible. Our work has shown that pharmacological intervention using either acetyl-L-carnitine (ALCAR) or N-acetyl-cysteine (NAC) give complete neuroprotection in different types of peripheral nerve injury. Both compounds are clinically safe and experimental work has defined the best dose, timing after injury and duration of administration. The efficacy of neuroprotection of ALCAR and NAC can be monitored non-invasively using MRI, as demonstrated experimentally and more recently by clinical studies of the volume of dorsal root ganglia. Translation to patients of this pharmacological intervention requires further work, but the available results indicate that this approach will help to secure a better functional outcome following peripheral nerve injury and repair.

1. PERIPHERAL NERVE INJURY AND NEURONAL CELL DEATH

Peripheral nerve injury triggers a number of cellular and molecular events which can be fundamental for successful nerve regeneration following nerve repair. Distal to the injury, the process known as Wallerian degeneration is responsible for the dying out of the distal axons and the de-differentiation of Schwann cells. These proliferate and secrete a number of growth factors which have tropic and trophic effects on the regrowing axons [1, 2, 3]. However, a more important and often neglected aspect is the effect of the injury on the neuronal cells. It is now accepted that various factors influence the survival of neuronal cells following peripheral nerve injury, with sensory neurons in dorsal root ganglia more susceptible to cell death following distal nerve injury [3, 4, 5] while spinal motoneurons die only after proximal injury [1, 3, 6].

1.1 Sensory neurons cell death

Following distal nerve injury and nerve repair, limited motor function restoration, due to survival of motoneurons, can compensate

for poor axonal regeneration of sensory motoneurons, but sensory recovery is affected more substantially as the innervation density of target organs is critical for restoration of sensory function [7, 8, 9]. There is no doubt that that neuronal cell death contributes to poor functional recovery following nerve repair, in particular when surgical repair is delayed post-injury. Sensory neuronal cell death starts soon after nerve axotomy. Experimentally it has been shown that a statistically significant cell loss is already evident in the dorsal root ganglia at one week post-injury if repair is not carried out [10, 11, 12]. Loss of sensory neurons increases with time reaching a value of 35-40% of the total neuronal cell population in the dorsal root ganglia at 2 months post-injury [11]. Sensory cell loss varies considerably according to the level of injury along the nerve, with more proximal injury provoking a wider neuronal cell death [13].

These experimental results have been validated in one human post-mortem study [14], where the magnitude of neuronal cell loss appears to correspond to the loss of functional sensory recovery after nerve repair [15]. Although motoneurons survive a distal nerve injury, approximately 30% of motoneurons die after spinal nerve injury, and 50% or more after experimental ventral rhizotomy or root avulsion [5, 6, 16]. As neuronal cells cannot be replaced after death, it is inevitable that regeneration will be poor, with significant loss of sensory and motor functions [7, 9, 17, 18].

Interestingly, cutaneous sensory afferent neurons appear to be more susceptible to cell death than sensory motor afferents [4, 19, 20]. In particular small diameter cutaneous afferent neurons undergo cell death more easily than large diameter cutaneous afferent ones, although there are no clear links to quality of sensation after nerve regeneration. This difference is more likely to be due to the dependence of the small sensory neurons on neurotrophins, such as NGF, BDNF, NT-3 and NT-4, as following injury there is a loss of neutrophic support derived from the target organs [1, 3, 21]. The regenerative potential of both cutaneous and muscular afferent neurons is dependent on the activation of peripherin and ATF3 gene expression, while those neurons lacking regeneration have a significant lower expression of these genes [22]. After injury there is activation of both regenerative and cell death signalling in any type of neuron, and it is the balance between the two that determines whether the neuronal cell will survive and regenerate or die [23].

1.2 Signalling pathways of neuronal cell death

This equilibrium is probably due to various intrinsic and extrinsic cellular signalling pathways, and our experiments have indicated that the balance between intracellular pro-apoptotic and pro-survival signalling determines the fate of the cell. Neuronal cell death is regulated by an apoptosis pathway, and regulating this pathways are the pro-survival mediator Bcl-2 and the pro-apoptotic Bax, which interact at the mitochondrial level determining their membrane permeabilization [24, 25, 26]. The predominance of Bax signalling leads to the formation of pores in the mitochondrial membrane, allowing the release of cytochrome C and other apoptotic molecules that cause activation of the caspase cascade [27], and in particular of caspase-3 which exerts a death-inducing action on cells [28, 29]. Following differential nerve axotomy of medial gastrocnemius nerve or sural nerve, gene analysis was carried out on the corresponding sensory neurons, which have been previously shown respectively to survive or die following nerve injury [20]. Interestingly, the survival of the muscle afferent sensory neurons of the gastrocnemius nerve corresponded to a significant upregulation of the pro-survival Bcl-2 gene and downregulation of Bax and caspase-3, while in the cutaneous sensory afferent neurons there is an upregulation of the pro-apoptotic Bax and caspase-3 gene expression, which is the likely cause of their death [30].

It is evident from all these studies that neuronal cell death is a significant and common occurrence after nerve injury, which if not addressed would results in deficient axonal regeneration and loss of functional recuperation. Neuronal survival is essential for regeneration [1], and immediate nerve repair after injury reduces loss of both sensory and motor neurons [11, 31]. Although early repair is recommended where appropriate, it is recognized that this surgical strategy is not always applicable [32], and a pharmacological approach to neuroprotection is therefore essential.

2. Pharmacological neuroprotective strategies

Neuroprotective intervention has been studied widely for the central nervous system [33, 34], but very little has been reported for the peripheral nervous system, and it is generally related to the administra-

tion of neurotrophic factors [3, 35]. However, this latter approach has limited clinical relevance as different neuronal sub-populations respond specifically to the administration of different neurotrophic factors, hence the need to use different mixtures of growth factors for each type of nerve. Furthermore, side effects of such treatments have discouraged their clinical application [36, 37]. More recently, two pharmacological agents, acetyl-L-carnitine (ALCAR) and N-acetyl-cysteine (NAC), have been shown to have the requisite neuroprotective potential, possibly due to their antioxidant effect, and both are established as safe clinical pharmaceutical agents [38].

2.1 ALCAR

Systemic administration of ALCAR after experimental sciatic nerve injury without repair reduces significantly neuronal cell loss in dorsal root ganglia, and this neuroprotective effect is maintained up to 2 months post-injury [39]. A dose response study has established an optimal dose of 50mg/kg/day [40], and a delayed administration of 24 hours post-injury still has efficacy in preventing neuronal cell loss [41], another important point for the future clinical translation of this treatment. Interestingly, ALCAR administration promotes nerve regeneration separately from its neuroprotective effect [42] with increased target organ reinnervation [43]. Unfortunately, ALCAR does not have a neuroprotective effect on motoneurons, which would limit its applicability only to distal nerve injury.

2.2 NAC

A neuroprotective effect has also been demonstrated for NAC in both sensory [44] and motor neurons [16]. Systemic administration of 150mg/kg/day was optimal for sensory neuronal survival after experimental sciatic nerve injury [45], and a treatment duration of 4 weeks reduces the cell loss to only 5%, with total neuroprotection if the NAC is administered for 8 weeks post-injury (unpublished). A higher dose of 750mg/kg/day was more effective for motoneuron survival after ventral rhizotomy [16], but importantly there was no loss of neuroprotective effect if the administration of NAC was delayed for 1 week after root avulsion [16]. The anti-apoptotic effect of NAC administration was demonstrated by the preservation of the mitochondria structure in sen-

sory neurons following nerve injury [44], which is consistent with the marked downregulation of the pro-apoptotic genes Bax and caspase-3 in cutaneous sensory afferent neurons following sural nerve injury and NAC administration [30], confirming the neuroprotective properties of this compound.

2.3 Clinical application

The problem faced by the clinician in applying these neuroprotective strategies is how to define the success of the treatment. In the experimental studies described above the dorsal root ganglia and spinal cord are harvested from the animal at the end of the experiments, and neuronal counts are carried out on with stereological techniques [46]. However, it was shown that the neuronal loss observed after nerve transection is correlated with the volume of the axotomized dorsal root ganglia [11]. In the past, magnetic resonance imaging (MRI) has provided a non-invasive assessment of rodent peripheral nervous system structures [47, 48], and in our experience it has been useful to determine the volume of dorsal root ganglia as a proxy measure of neuronal cells death or survival. Following rat sciatic nerve axotomy, we have compared morphological measurement of sensory ganglia volume and neuronal cells death with calculation of volume carried out on MRI images. There is a strong correlation between the morphological and MRI results, with the MRI volume of the dorsal root ganglia being a representative measure of the number of neurons in the ganglia [49].

Hence, it appears that MRI volumetric quantification of dorsal root ganglia can be developed clinically as a non-invasive measure of sensory neuronal survival after ALCAR or NAC treatment. As a precursor to such a clinical trial, we have carried out morphological assessment of numbers of sensory neurons and ganglia volume on cadavers and compared them with the ganglia volume of healthy volunteers, and of patients that have suffered arm amputations and median/ulnar nerve injuries [50]. Using cadaver ganglia, we have shown that there was low inter-individual variability in DRG neuronal counts and volume, and strong correlation between counts and MRI volume measurements. MRI also gives good resolution for volumetric analysis in patients, confirming the validity of proxy measurement of sensory neurons in human, but further clinical studies are necessary to determine the sensitivity for the MRI technique used following different nerve injuries at different times.

3. Conclusions

The functional outcome of peripheral nerve injury remains inadequate despite the technical advances of microsurgical nerve repair. The understanding of the cellular and molecular mechanisms underlying the neuronal response to nerve injury have indicated that a combined surgical and neuroprotective approach could give the best results. The work presented here shows that pharmacological intervention can be used to prevent neuronal cells death, and that the efficacy of the treatment can be assessed non-invasively.

Although initially these drugs should not be given outside the framework of an appropriate clinical trial, with a specific and sensitive outcome measure, there is little doubt that in future such applications will result in an improved functional outcome for the patients allowing them to return to a better work and social lives.

REFERENCES

1. Fu SY, Gordon T. The cellular and molecular basis of peripheral nerve regeneration. Mol Neurobiol. 1997, 14: 67-116.
2. Hall S. Nerve repair: A neurobiologist view. J Hand Surg Br. 2001, 26: 129-136.
3. Terenghi G. Peripheral nerve regeneration and neurotrophic factors. J Anat. 1999, 194: 1-14.
4. Hu P, McLachlan EM. Selective reactions to cutaneous and muscle afferent neurons to peripheral nerve transaction in rats. J Neurosci. 2003, 23: 10559-10567.
5. Ma J, Novikov LN, Wiberg M, Kellerth JO, Novikov LN. Delayed loss of spinal motoneurons after peripheral nerve injury in adult rats: A quantitative morphological study. Exp Brain Res. 2001, 139: 216-223.
6. Gu Y, Spasic Z, Wu W. The effects of remaining axons on motoneurons survival and NOS expression following axotomy in the adult rat. Dev Neurosci. 1997, 19: 255-259.
7. Shenker M, Burstedt MK, Wiberg M, Johanson RS. Precision grip function after hand replantation and digital nerve injury. J Plast Reconstr Aesthet Surg. 2006, 59: 706-716.
8. Westling G, Johansson RS. Factors influencing the force control during precision grip. Exp Brain Res. 1984, 53: 277-284.
9. Wiberg M, Hazari A, Ljungberg C, Pettersson K, Backman C, Nordh E, Kvast-Rabben O, Terenghi G. Sensory recovery after hand reimplantation: A clinical, morphological and neurophysiological study in human. Scand J Plast Reconstr Surg Hand Surg. 2003, 37: 163-173.

10. Groves MJ, Christopherson T, Giometto B, Scaravilli F. Axotomy-induced apoptosis in adult rat primary sensory neurons. J Neurocytol. 1997, 26: 615-624.
11. McKay Hart A, Brannstrom T, Wiberg M, Terenghi G. Primary sensory neurons and satellite cells after peripheral axotomy in the adult rat: Timecourse of cell death and elimination. Exp Brain Res. 2002, 142: 308-318.
12. Vestergaard S, Tandrup T, Jakobsen J. Effect of permanent axotomy on number and volume of dorsal root ganglion cell bodies. J Comp Neurol. 1997, 388: 307-312.
13. Ygge J. Neuronal loss in lumbar dorsal root ganglia after proximal compared to distal sciatic nerve resection: A quantitative study in the rat. Brain Res. 1989, 478: 193-195.
14. Suzuki H, Oyanagi K, Takahashi H, Kono M. A quantitative pathological investigation of the cervical cord, roots and ganglia after long-term amputation of the unilateral upper arm. Acta Neuropathol. 1993, 85: 666-673.
15. Kuyper PD, van Egeraat JM, Godschalk M , Hovius SER. Loss of viable neuronal units in the proximal stump as possible cause for poor function recovery following nerve reconstruction. Exp Neurol. 1995, 132: 77-81.
16. Zhang CG, Welin D, Novikov LN, Kellerth JO, Wiberg M, Hart AM. Motoneuron protection by N-acetyl-cysteine after ventral root avulsion and ventral rhizotomy. Br J Plast Surg. 2005, 58: 765-773.
17. Allan CH. Functional results of primary nerve repair. Hand Clin. 2000, 16: 67-72.
18. Kelly EJ, Terenghi G, Hazari A, Wiberg M. Nerve fibre and sensory end organ density in the epidermis and papillary dermis of the human hand. Br J Plast Surg. 2005, 58: 774-779.
19. Tandrup T, Woolf CJ, Coggleshall RE. Delayed loss of small dorsal root ganglion cells after transaction of the rat sciatic nerve. J Comp Neurol. 2000, 422: 172-180.
20. Welin D, Novikova LN, Wiberg M, Kllerth JO, Novikov LN. Survival and regeneration of cutaneous and muscular afferent neurons after peripheral nerve injury in adult rats. Exp Brain Res. 2008, 186: 315-323.
21. Ambron RT, Walters ET. Primary events and retrograde injury signals. A new perspective on the cellular and molecular biology of nerve regeneration. Mol Neurobiol. 1996, 13: 61-79.
22. Reid AJ, Welin D, Wiberg M, Terenghi G, Novikov LN. Peripherin and ATF3 genes are differentially regulated in regenerating and non-regenerating primary sensory neurons. Brain Res. 2010, 1310: 1-7.
23. Nunez G, del Peso L. Linking extracellular survival signal and the apoptotic machinery. Curr Opin Neurobiol. 1998, 8: 613-618.
24. Adams JM, Cory S. Bcl-2 regulated apoptosis: Mechanism and therapeutic potential. Curr Opin Immunol. 2007, 19: 488-496.
25. Gillardon F, Klimaschewski L, Wickert H, Krajewski S, Reed JC, Zimmerman M. Expression pattern of candidate cell death effector protein Bax, Bcl2, BclX and c-Jun in sensory and motor neurons following sciatic nerve transaction in the rat. Brain Res. 1996, 739: 244-250.
26. Korsmeyer SJ, Shutter JR, Veis DJ, Merry DE, Oltvai ZN. Bcl-2/Bax: A rheostat

that regulates an anti-oxidant pathway and cell death. Semin Cancer Biol. 1993, 4: 327-332.
27. Benn SC, Woolf CJ. Adult neuron survival strategies - slamming on the brakes. Nat Rev Neurosci. 2004, 5: 686-700.
28. Janicke RU, Sprengart ML, Wati MR, Porter AG. Caspase-3 is required for DNA fragmentation and morphological changes associated with apoptosis. J Biol Chem. 1998, 273: 9357-9360.
29. Putcha GV, Johnson EM Jr. Men are but worm: neuronal cell death in C elegans and vertebrates. Cell Death Differ. 2004, 11: 38-48.
30. Reid AJ, Shawcross SG, Hamilton AE, Wiberg M, Terenghi G. N-acetyl-cysteine alters apoptotic gene expression in axotomised primary sensory afferent subpopulation. Neurosci Res. 2009, 65: 148-155.
31. Ma J, Novikov LN, Kellerth JO, Wiberg M. Early nerve repair after injury to the postganglionic plexus: An experimental study of sensory and motor neuronal survival in adult rats. Scand J Plast Reconstr Surg Hand Surg. 2003, 37: 1-9.
32. Birch R. Surgical disorders of the peripheral nerve, 2nd Edn., Springer-Verlag, London 2011.
33. Baptiste DC, Fehlings MG. Update on the treatment of spinal cord injury. Prog Brain Res. 2007, 161: 217-233.
34. Faden AI, Stoica B. Neuroprotection: Challenges and opportunities. Arch Neurol. 2007, 64: 794-800.
35. Lundborg G. A 25-year perspective of peripheral nerve surgery: Evolving neuroscientific concepts and clinical significance. J Hand Surg Am. 2000, 25: 391-414.
36. Martin D, Merkel E, Tucker KK. Cachectic effect of ciliary neurotrophic factor on innervated skeletal muscle. Am J Physiol. 1996, 271: 1422-1428.
37. Metcalf D, Gearing DP. Fatal syndrome in mice engrafted with cells producing high levels of leukemia inhibitory factor. Proc Natl Acad Sci USA. 1989, 86: 5948-5952.
38. Hart AM, Wilson AD, Mantovani C, Smith C, Johnson M, Terenghi G, Youle M. Acetyl-carnitine: A pathogenesis based treatment for HIV-associated antiretroviral toxic neuropathy. AIDS. 2004, 18: 1549-1560.
39. Hart AM, Wiberg M, Youle M, Terenghi G. Systemic acetyl-L-carnitine eliminates sensory neuronal loss after peripheral axotomy: A new clinical approach to the management of peripheral nerve trauma. Exp Brain Res. 2002, 145: 182-189.
40. Wilson AD, Hart AM, Brannstrom T, Wiberg M, Terenghi G. Primary sensory neuronal rescue with systemic acetyl-L-carnitine following peripheral axotomy. A dose-response analysis. Br J Plast Surg. 2003, 56: 732-739.
41. Wilson AD, Hart AM, Brannstrom T, Wiberg M, Terenghi G. Delayed acetyl-L-carnitine administration and its effect on sensory neuronal rescue after peripheral nerve injury. J Plast Reconstr Aesthet Surg. 2007, 60: 114-118.
42. Hart AM, Wiberg M, Terenghi G. Pharmachological enhancement of peripheral nerve regeneration by systemic acetyl-L-carnitine treatment. Neurosci Lett. 2002, 334: 181-185.
43. Wilson AD, Hart AM, Wiberg M, Wiberg M. Acetyl-L-carnitine increases nerve

regeneration and target organ reinnervation. A morphological study. J Plast Reconstr Aesthet Surg. 2010, 63: 1186-1195.
44. Hart AM, Terenghi G, Kellerth JO, Wiberg M. Sensory neuroprotection, mitochondrial preservation and therapeutic potential of N-acetyl-cysteine after nerve injury. Neurosci. 2004, 125: 91-101.
45. West CA, Hart AM, Terenghi G, Wiberg M. Analysis of the dose-response of N-acetyl-cysteine in the prevention of sensory neuronal loss after peripheral nerve injury. Acta Neurochir Suppl. 2007, 100: 29-31.
46. Hart AM, Terenghi G. Frozen section fluorescence microscopy and stereology in the quantification of neuronal death within dorsal root ganglia. J Mol Histol. 2004, 35: 565-580.
47. Aagaard BD, Lazar DA, Lankerovich L, Andrus K, Hayes CE, Maravilla K, Kliot M. High resolution magnetic resonance imaging is a non-invasive method of observing injury and recovery in the peripheral nervous system. Neurosurg. 2003, 53: 199-203.
48. Bjorn B, Schnabel R, Mirastschijski U, Ibrahim B, Angenstein F, Schneider W. Magnetic resonance imaging monitoring of peripheral nerve regeneration following neurotmesis at 4.7 Tesla. Plast Reconstr Surg. 2009, 123: 1778-88.
49. West CA, Davies KA, Hart AM, Wiberg M, Williams SR, Terenghi G. Volumetric magnetic resonance imaging of dorsal root ganglia for the objective quantitative assessment of neuron death after peripheral nerve injury. Exp Neurol. 2007, 203: 22-33.
50. West CA, Hart AM, Terenghi G, Wiberg M. Sensory neurons of the human brachial plexus: A quantitative study employing optical fractionation and in vivo volumetric magnetic resonance imaging. Neurosurg. 2012, 70: 1183-1194.

ON THE RELATIVISTIC GRAVITATIONAL COLLAPSE *ET CETERA*

Nota del m.e. ANGELO LOINGER (*) e di TIZIANA MARSICO (**)

(Adunanza del 23 ottobre 2014)

SUNTO. – Sfere di "polvere" di grande massa collassano gravitazionalmente in "sfere piene" compatte di volumi *finiti*, le cui superfici hanno le medesime proprietà dell'orizzonte degli eventi associato alla gravitazione di un punto materiale. Sia l'orizzonte degli eventi di una "sfera piena" sia quello associato ad un punto materiale, in virtù della repulsione gravitazionale hilbertiana non possono "inghiottire" alcunché, contrariamente a quanto afferma un *locus communis*. I dati osservazionali convalidano i nostri risultati.

***

ABSTRACT. – Massive and supermassive "dust" spheres (with a zero internal pressure) collapse to compact "full spheres" of *finite* volumes, whose surfaces have the properties of the event horizon of a gravitating mass-point. By virtue of Hilbert's repulsive effect, both the event horizon of a mass-point and the event horizon of a "full sphere" cannot "swallow" anything, in contradiction with the assertion of a *locus communis*. The observational data corroborate our results.

1. – The main theme of this paper is treated in sect. 5. In sect. 2 we recall a general expression (de Sitter, Eddington, Levi-Civita) of the

(*) Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Milano, Italy.
E-mail: angelo.loinger@mi.infn.it
(**) Liceo Classico "G. Berchet", Via della Commenda 26, 20122 Milano, Italy.
E-mail: martiz64@libero.it

metric of a Schwarzschild spacetime created by a gravitating mass-point. Sects. 3, 3bis, 4 give a concise formulation of the Hilbertian gravitational repulsion, which is the essential instrument for the developments of sect. 5. In Appendix some remarks on past and present things.

2. – In 1926 Levi-Civita [1] gave a *geometrically explicit* explanation of the general form of solution (de Sitter, Eddington) to the Schwarzschild problem to find the Einsteinian field created by a gravitating point-mass M at rest. He adopted a Palatini's method [2], which yields *the appropriate geometrical definition of spherical symmetry in a curved spatial manifold*, and the justification of the employment in it of the polar coordinates $r(\geq 0)$, $\vartheta(0 \leq \vartheta \leq \pi)$, $\varphi(0 \leq \varphi < 2\pi)$. He found, with de Sitter and Eddington:

$$\mathrm{d}s^2 = \left[1 - \frac{2m}{\mathcal{R}(r)}\right] c^2\mathrm{d}t^2 - \left[1 - \frac{2m}{\mathcal{R}(r)}\right]^{-1} [\mathrm{d}\mathcal{R}(r)]^2 - [\mathcal{R}(r)]^2 (\mathrm{d}\vartheta^2 + \sin^2\vartheta\, \mathrm{d}\varphi^2) \,, \quad (1)$$

where: $m \equiv GM/c^2$, and $\mathcal{R}(r)$ is any regular function of r, which gives a Minkowskian $\mathrm{d}s^2$ at $r = \infty$. For $\mathcal{R}(r) = r$ we have the standard (Hilbert, Droste, Weyl) form of solution; for $\mathcal{R}(r) = [r^3 + (2m)^3]^{1/3}$ and $\mathcal{R}(r) = r + 2m$ the original Schwarzschild's [3] and Brillouin's [4] forms of solution, respectively. (Remark that the forms [3] and [4] are *maximally extended* – and thus the baroque known form of solution by Kruskal and Szekeres is quite superfluous).

It is evident from Levi-Civita's treatment that eq. (1) has a mathematical and physical meaning *only for* $\mathcal{R}(r) > 2m$, and that no role inversion between $\mathcal{R}(r)$ and t for $\mathcal{R}(r) \leq 2m$ is allowed.

Temporarily forgetting that when $\mathcal{R}(r) \leq 2m$, metric (1) loses any meaning, we could claim that the surface area $A = 4\pi(2m)^2$ represents an invariant and significant notion – and the so-called "Schwarzschild radius" $2m$ is physically meaningful. But this forgetting is not permitted, and we understand why the Founding Fathers of general relativity (GR) rejected the idea to give a physical meaning to the "globe" $\mathcal{R}(r) \leq 2m$. As a matter of fact, the astrophysical phenomena that have been interpreted as originated by a "globe" of this kind can be plainly interpreted as due to a great, or enormous, mass concentrated in a relatively small space region. In particular, no "swallowing" property of the *event horizon* $\mathcal{R}(r) = 2m$ has ever been observed. (Remark that the radially moving test-particles and light-rays arrive at $\mathcal{R}(r) = 2m$ with *zero* velocity and *zero* acceleration).

Kundt [5] thinks that the stellar-mass "globe"– candidates are in

reality neutron stars inside massive accretion disks, and that the central engine of an AGN (active galactic nucleus) is a nuclear-burning disk.

3. – We have treated in several papers [6] various consequences and applications of the Hilbertian gravitational repulsion [7]. Here, we limit ourselves to expose the essential of this concept.

First of all, we recall the fundamental equations of the *radial* geodesics of Schwarzschild manifold created by a mass-point. Putting with Hilbert $2m \equiv \alpha$, we obtain from eq. (1) – see Hilbert [7] (with r in lieu of $\mathcal{R}(r) := \mathcal{R}$):

$$\frac{\mathrm{d}^2\mathcal{R}}{c^2\mathrm{d}t^2} - \frac{3\alpha}{2\mathcal{R}(\mathcal{R}-\alpha)}\left(\frac{\mathrm{d}\mathcal{R}}{c\,\mathrm{d}t}\right)^2 + \frac{\alpha\,(\mathcal{R}-\alpha)}{2\mathcal{R}^3} = 0 \quad ; \tag{2}$$

$$\left(\frac{\mathrm{d}\mathcal{R}}{c\,\mathrm{d}t}\right)^2 = \left(1-\frac{\alpha}{\mathcal{R}}\right)^2 + A\left(1-\frac{\alpha}{\mathcal{R}}\right)^3 \quad , \tag{3}$$

where the constant A of first integral (3) is negative for the test-particles and zero for the light-rays. We put $A = -|A|$.

Eq. (2) tells us that the acceleration is negative or positive – *i.e.*, that the gravitation acts in an attractive or in a repulsive way – according to the absolute value of the velocity: when

$$\left|\frac{\mathrm{d}\mathcal{R}}{c\,\mathrm{d}t}\right| < \frac{1}{\sqrt{3}}\left(1-\frac{\alpha}{\mathcal{R}}\right) \tag{4}$$

we have attraction; but when

$$\left|\frac{\mathrm{d}\mathcal{R}}{c\,\mathrm{d}t}\right| > \frac{1}{\sqrt{3}}\left(1-\frac{\alpha}{\mathcal{R}}\right) \tag{5}$$

we have *repulsion*.

Let us call $\mathcal{R}_*$ the value of $\mathcal{R}$ such that $\mathrm{d}^2\mathcal{R}/c^2\,\mathrm{d}t^2 = 0$: attraction and repulsion counterbalance each other. At $\mathcal{R} = \mathcal{R}_*$ the absolute value of the velocity $|\mathrm{d}R/c\,\mathrm{d}t|$ is maximal:

$$\left|\frac{\mathrm{d}\mathcal{R}}{c\,\mathrm{d}t}\right|_{\max} = \frac{1}{\sqrt{3}}\left(1-\frac{\alpha}{\mathcal{R}_*}\right) \quad ; \quad \mathcal{R}_* = \frac{3|A|\alpha}{3|A|-2} \ . \tag{6}$$

For the light-rays $A = 0$; eq. (3) gives

$$\left|\frac{\mathrm{d}\mathcal{R}}{c\,\mathrm{d}t}\right| = 1-\frac{\alpha}{\mathcal{R}} : \tag{7}$$

the light is *repulsed everywhere* ; $|\mathrm{d}\mathcal{R}/\mathrm{d}t|$ increases from zero at $\mathcal{R} = \alpha$ to c at $\mathcal{R} = \infty$.

It follows from the above equations that the test-particles and the light- rays arrive at $\mathcal{R} = \alpha$ with zero velocity and zero acceleration – as we have anticipated in sect. 2. *The spatial surface* $\mathcal{R} = \alpha$ *represents for them an insuperable barrier* : a fact of paramount importance from the astrophysical standpoint. In other terms, we can affirm that the *event horizon* $\mathcal{R} = \alpha$ is "inappetent".

We see that attraction and repulsion are linked in a physical way to the *three* -acceleration and the *three* -velocity. This means that the *physical* evolution-parameter is the "Systemzeit" t (von Laue) of Schwarzschild spacetime, not the proper time of the particles or the affine parameter of the light-rays, as we shall prove in the following sect. 3bis.

3bis. – There exists a tentative to give a meaning to space region $\mathcal{R} \leq \alpha$: with the substitutions $\mathcal{R} \to \alpha - ct$ and $ct \to \alpha - \mathcal{R}$, eq. (1) becomes:

$$(\mathrm{d}s^2)_{\mathcal{R}\leq\alpha} = \left(\frac{\alpha - ct}{ct}\right) c^2\mathrm{d}t^2 - \left(\frac{ct}{\alpha - ct}\right) \mathrm{d}\mathcal{R}^2 - (\alpha - ct)^2\,(\mathrm{d}\vartheta^2 + \sin^2\vartheta\,\mathrm{d}\varphi^2) \qquad (1')$$

thus, a static problem has become non-static in a limited spatial region. In particular: at $\mathcal{R} = \alpha$ we have $t = 0$, at $\mathcal{R} = 0$ we have $t = \alpha/c$. We see that eq. (1') describes an absurd physical situation. Further, the metrics (1) and (1') are not continuously connected. We can also remark that the transition to a time-dependent problem implies the introduction of *inertial* forces, that are completely extraneous to the real problem.

We emphasize finally that also the famous metric of Kruskal and Szekeres is non-static, and therefore introduces inertial forces in a static situation.

It follows immediately from the Schwarzschildian equations of the radial geodesics that, both for particles and light-rays, $(\mathrm{d}\mathcal{R}/\mathrm{d}p)^2$ is different from zero (p is an affine evolution-parameter) at $\mathcal{R} = \alpha$.

For the particles also $(\mathrm{d}\mathcal{R}/\mathrm{d}s)^2$ is different from zero at $\mathcal{R} = \alpha$. it seems that the event horizon $\mathcal{R} = \alpha$ has become "appetent". But this conclusion is misleading, because – as we have seen – no reasonable metric exists in $\mathcal{R} \leq \alpha$.

A last remark. It was observed by von Laue [8] that the coordinate-time t of Schwarzschild manifold of a gravitating mass-point has

the character of a physical "Systemzeit", as it is proved by its role in the explanations of the red-shifts of the spectral lines.

4. – For the Schwarzschildian *circular* geodesics Hilbert's gravitational repulsion acts in a simple way. For the particles we have the following inequalities:

$$\mathcal{R} > \frac{3}{2}\alpha \ ; \tag{8}$$

$$v \equiv \mathcal{R}\frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t} < \frac{c}{\sqrt{3}} \ . \tag{9}$$

Remark that $v^2 = \alpha\, c^2/2\mathcal{R}$, as in Newton theory.

For the light-rays ($A = 0$) we have two equalities:

$$\mathcal{R} = \frac{3}{2}\alpha \ ; \tag{10}$$

$$v = \frac{c}{\sqrt{3}} \ . \tag{11}$$

The restrictions (8), (9), (10), (11) are *not* deducible from the geometric differential equation that connects directly $\mathcal{R}$ and φ. (See Appendix A of paper [9].)

5. – According to well-known – but not irresistible arguments – a cold, degenerate star, whose mass is equal to $\approx (3 \pm 1)$ solar masses, and beyond, collapses inevitably and forms a "globe" $\mathcal{R}(r) = r = 2m$. And since in GR a fluidodynamical pressure is not weightless, its presence would accelerate the gravitational collapse.

However, McVittie [10] and the present authors [11] have proved with *exact* computations that a spherically-symmetric gravitational collapse, under the action of a time-dependent pressure $p(t)$, ends up in a body with a *finite* extent.

We shall now demonstrate a very general result: even with a zero pressure, by virtue of the decisive action of the Hilbertian repulsive effect, a spherically-symmetric collapse of a body composed of "dust" particles ends up in a final stage with a comparatively small, *finite*, volume.

Of course, the particles will describe *geodesic* lines. The interval ds_{ext} outside the sphere is given by eq. (1).

In Newton theory the gravitational collapse of a "dust' model, whose particles are distributed with spherical symmetry about a centre, ends in a material point with an infinite mass density in a finite time.

But in GR things go otherwise. As in Newton theory, the surface shell of the "dust" sphere contracts itself as if the total mass $M = mc^2/G$ were concentrated in the centre. The other concentric spherical shells contract themselves as if the mass in the centre were correspondently reduced. *By virtue of the Hilbertian repulsion*, the particles of the superficial shell arrive on the surface whose area is equal to $4\pi(2m)^2$ with a zero velocity $d\mathcal{R}/dt$ and a zero acceleration $d^2\mathcal{R}/dt^2$. The particles of a generic shell arrive with zero velocity and zero acceleration on the spherical surface whose area is equal to $4\pi[2 \cdot (\text{the pertinent partial mass})]^2$.

Evidently, the collapse ends when the total mass M of the star has filled up the sphere whose superficial area is $4\pi(2m)^2$.

We see that the famous arguments, that we have above mentioned, according to which the collapse of the "dust" sphere ends with the formation of the "globe" $r = 2m$, with its "hard" singularity at $r = 0$ and its "soft" singularity at $r = 2m$, do not describe the real physical situation.

Two final remarks. *i*) It is clear that the event horizon $\mathcal{R} = 2m$ of the above "full sphere" – like the event horizon of a "globe" – does not "swallow" anything. *ii*) As it was proved by Schwarzschild, there is a minimal radius, equal to $(9/8) \cdot (2m)$, for an incompressible fluid sphere with a given mass [12].

APPENDIX – Remarks on past and present things

In the previous treatment we have designed (with M. Brillouin) the spatial region $\mathcal{R} \leq 2m$ as a "globe". Its current name is "black hole" (BH), because with a widespread, but erroneous, interpretation one assigns to it the following characteristic properties – expressed with the radial coordinate $\mathcal{R}(r) = r$: the space $r < 2m$ cannot communicate with the space in which $r > 2m$; any signal, even a light signal, would take an infinite time to cross the boundary $r = 2m$. Thus one cannot have a direct observational knowledge of the region $r < 2m$; such a region is called a "black hole", because things may fall into it, taking an infinite time, but nothing can come out.

Now, the "proof " of these miraculous properties rests on a paralogism: indeed, if one *hides* (as many authors do, in particular Lémaître, Kruskal and Szekeres) the "soft" singularity $r = 2m$ in the connection between the coordinates (r, t) and suitable new coordinates (ϱ, τ), it is possible to extend the transformed solution (which is non-static!) to the region $r < 2m$, thus "justifying" in particular the interchange in it of the roles of r and t. (In $r = 0$ we have a "hard" singularity).

Einstein, Levi-Civita, Schwarzschild, Hilbert, Weyl, Eddington, Pauli, von Laue, Fock, ..., who created and developed the relativity theory always rejected the very notion of BH. In 1939 Einstein [13] investigated a dynamical model composed of several particles, and demonstrated that its behaviour is such that no BH of the ensemble can appear. However, since the Sixties of the past century lots of papers have been published with the aim of exhibiting the wonderful properties of the BHs. And the astrophysical community made a *historical falsification* by claiming that the mathematical structure of GR had been deeply understood only in the mentioned Sixties. On the contrary, the concepts of the modern differential geometry have been created in the Thirties; better, in the Twenties, if we take into account some papers by Weyl. Furthermore, with another *historical falsification* it was claimed that Schwarzschild and Einstein foresaw the existence of BHs.

A widespread "Vulgate" of GR claims that if the problem of the Einsteinian field created by a gravitating point-mass is solved using coordinate-free methods (as orthonormal bases, *etc.*), the result is necessarily the standard form of solution, for which $R = r$. But the procedure of the "Vulgate" is impaired by a vulgar fallacy: in it the angular part is written $r^2(d\vartheta^2 + \sin^2\vartheta)$, and with this postulate the standard form of solution is already chosen.

It is useful to recall that for $r \geq 0$ the forms of solution by Schwarzschild ($\mathcal{R}(r) = [r^3 + (2m)^3]^{1/3}$) and by Brilluoin ($\mathcal{R}(r) = r + 2m$) are diffeomerphic to the standard form (Hilbert, Droste, Weyl) for $r \geq 2m$.

Physics is essentially an experimental and observational science. It seems to us that the astrophysical community has neglected this fact with the introduction of fictive notions as the black holes, the gravitational waves, and several other things. A *New Scholasticism* has been created, which ostracizes the scientists who abhor its bad metaphysics.

(An amazing instance of bad metaphysics is the purpose to investigate the interaction of *two* BHs. Now, there exists *no* solution of Einstein field equations, which describes two BHs. In numerical rela-

tivity, the authors work out some expressions that they think apt to describe the approximate behaviour of a pair of interacting BHs.)

In a paper of 2008 [14] entitled "On the radial geodesics of Kerr's manifold" we have demonstrated the following result: the event horizons of the famous Kerr's manifold are incapable of "swallowing" anything, because the "stationary-limit" surface, which is external to the event horizons, exerts a gravitational *repulsion* ($dr/dt = 0$; $d^2r/dt^2 \geq 0$) on the arriving particles and light-rays, that is quite similar to the Schwarzschildian repulsive action.

In a paper entitled "The event horizon of Sagittarius A^*" [15], the authors affirm that recent millimetric and infrared observations of the supermassive centre SgrA^* of the Milky Way require the existence of a central BH. Now, we have demonstrated (see sect. 5) that the final stage of the collapse of a massive or supermassive "dust" sphere is a compact "full sphere" of a relatively small, but *finite*, volume. In the paper quoted in [16] we have shown that the observational data of [15] are perfectly explained by the existence of a central "full sphere" of the above kind.

A unpleasant consequence of the erroneous notion of BH is the belief in the so-called "Information Paradox", from which it would follow that GR is in contradiction with the time-reversibility. Indeed, it has been affirmed (as we have recalled in the first paragraph of this Appendix) that in the instance of Schwarzschild's manifold created by a gravitating point-mass the test particles and the light-rays go beyond the space surface $\mathcal{R}(r) = 2m$, and disappear from the "external" world for ever, with an irreversible process.

We have shown (see [17]) that if one takes into account all the assumptions which characterize the deduction of the geometric differential equation of the Schwarzschildian geodesic trajectories [$\mathcal{R}(r)$ = a function of φ; $(0 \leq \varphi < 2\pi)$], one obtains a confirmation of the dynamical results (see sect. 3): the geodesics that arrive on the surface $\mathcal{R}(r) = 2m$ find here their end: *the "Information Paradox" does not exist*. – An interesting by-product of [17] is as follows: the mentioned geometric equation does not yield the conditions that characterize the circular orbits. A fact which has been ignored in the previous literature.

We conclude that we could affirm *a priori* – *i.e.*, without the detailed examination of the above geodesics – that the "Information Paradox" cannot have existence in a theory as the GR, which has been devised in a manner quite independent of the directions of the space-time coordinates, in particular of the direction of the temporal coordi-

nate – a property that was emphasized by Levi-Civita. The contrary opinion must be ascribed to a wrong interpretation of a given aspect of the formalism.

In the last decades, beyond the bad metaphysics of the BHs the Scholasticism has developed the worst metaphysics of the BHs considered from the point of view of the so-called "quantum gravity". A short digression about this locution is now useful. We give here a résumé of paper [18].

The spacetime of quantum theories are the following (as it is well known): *i*) the Euclidean-Newtonian substrate of the Galilean group of transformations; *ii*) the Minkowskian substrate of the Lorentzian group of transformations; *iii*) any given, "rigid", pseudo-Riemannian manifold. We have correspondingly: *i*) the nonrelativistic quantum mechanics of the dynamical systems with a finite number of degrees of freedom; *ii*) the Lorentzian quantum field theories – and the quantitized *linearized* approximation of GR (Pauli, Rosenfeld); *iii*) Dirac equation for a particle in a fixed pseudo- Riemannian manifold. – The known quantum formalisms have a definite physical meaning *only* under the condition that the mentioned spacetimes are described by the usual *non* -operator quantities. Consequently, any rational quantization program of GR is doomed to a failure, because it would imply necessarily some operator characterizations of the spacetimes. But the coefficients $g_{\mu\nu}$, (μ, $\nu = 0, 1, 2, 3$), of any Einsteinian metric do *not* represent a classical field in the conventional meaning: *they "are" the spacetime*. – "Quantum gravity": a patchwork of various particular concepts and results of quantum field theories (*e.g.*, unitary evolution, CPT-theorem, *etc.*) acritically applied to the Einsteinian field: an enormous paralogism, which gives contradictory assertions.

Back to the "quantized BHs". For a list of many papers on this theme, see the references in [19]. In this paper we find a fictive lucubration, which contradicts all the previous fancies on the BHs. The author "proves" that the notion of an event horizon, from which nothing can escape, is incompatible with quantum theory; however, the gravitational collapse would create *apparent* horizons, which persist for a period of time. Thus, by virtue of a pseudo-argumentation, the author comes near to the classic, right conclusion that the BHs are *non* -existing objects.

"Die Wahrheit bildet ein *System*".
H. Weyl

REFERENCES

[1] T. Levi-Civita, *The Absolute Differential Calculus (Calculus of Tensors)* – (Dover Publications, Inc., Mineola, N.Y.) 2005, Chapt. XII, sects. **11**, **12**, **13**. (First publi- shed by Blackie and Son Lim. – London and Glasgow, 1926).

[2] A. Palatini, *Nuovo Cimento*, **14** (1917) 12.

[3] K. Schwarzschild, *Berl. Ber.*, (1916) 189. An English translation in *arXiv:physics/9905030*,(May 12th, 1999.

[4] M. Brillouin, *Journ. Phys. Rad.*, **23** (1923) 43. An English translation in *arXiv:physics/0002009*, February 3rd, 2000.

[5] W. Kundt, *Astrophysics* (Springer-Verlag, Berlin, *etc.*) 2007, p.p.190 and 187; and *passim*.

[6] A. Loinger and T. Marsico, *arXiv:0706.3891* [physics.gen-ph] 16 Jul 2007; *ibid.*: *arXiv:0710.3927* [*id.*] 21 Oct 2007; *ibid.*: *arXiv:0711.4997* [*id.*] 22 Dec 2007; *ibid.*: *arXiv:0803.0050* [*id.*] 1 Mar 2008; *ibid.*: *arXiv:0809.1221* [*id.*] 7 Sept 2008; *ibid.*: *arXiv:0904.1578* [*id.*] 9 Apr 2009; *ibid.*: *arXiv:0907.2895* [*id.*] 16 Jul 2009; *ibid.*: *arXiv:0912.1329* [*id.*] 7 Dec 2009; *ibid.*: *arXiv:1011.2600* [*id.*] 11 Nov 2010; *ibid.*: *arXiv:1304.4190* [*id.*] 15 Apr 2013. See also A. Loinger and T. Marsico, "Dark Energy explained by a Schwarzschildian Cosmology – *et cetera*", *Academia.edu* and *Research-gate*, Mar 2014. And our preceeding Note in "Istituto Lombardo".

[7] D. Hilbert, *Math. Annalen*, **92** (1924) 1; also in *Gesammelte Abhandlungen*, Dritter Band (Springer-Verlag, Berlin) 1935, p. 258.

[8] M. v. Laue, *Die allgemeiune Relativitätstheorie*, 4. neubearbeitete Auflage (Friedr. Vieweg und Sohn, Braunschweig) 1956, p. 112.

[9] A. Loinger and T. Marsico, *arXiv:1304.4190* [physics.gen-ph] 15 Apr 2013.

[10] G.C. Mc Vittie, *Ap. J.*, **140** (1964) 401.

[11] A. Loinger and T. Marsico, *arXiv:physics/0612160* (December 16th, 2006).

[12] K. Schwarzschild, *Berl. Ber.*, (1916) 424. An English translation in *arXiv:physics/9912033*, December 16th, 1999.

[13] A. Einstein, *Ann. Math.*, **40** (1939) 922.

[14] A. Loinger and T. Marsico, *arXiv:0809.1221* [physics.gen-ph] 7 Sep 2008. See further A. Loinger and T. Marsico, *arXiv:0903.1267* [physics.gen-ph] 6 Mar 2009.

[15] A.E. Broderick *et al.*, *arXiv:0903.1105* [astro-ph, HE] 5 Mar 2009.

[16] A. Loinger and T. Marsico, *arXiv:1011.2600* [physics.gen-ph] 11 Nov 2010.

[17] A. Loinger and T. Marsico, *arXiv:1304.4190* [physics.gen-ph] 15 Apr 2013.

[18] A. Loinger, *arXiv:physics/0308042*, August 12th, 2003.

[19] S.W. Hawking *et al.*, *arXiv:1401.5761* [hep-th] 22 Jan 2014.

SUPERHYDROPHOBIC SURFACES FOR DRAG REDUCTION

ALESSANDRO BOTTARO (*)

Nota presentata dal m.e. Alfio Quarteroni
(Adunanza del 27 novembre 2014)

SUNTO. – Le proprietà dei materiali superidrofobici sono esaminate alla luce del loro possibile uso per la riduzione di attrito in applicazioni navali. La superidrofobicità può essere raggiunta strutturando un materiale di bassa energia superficiale in modo da minimizzare le interazioni solido-liquido. L'aspetto cruciale che deve essere considerato è quello del mantenimento di uno strato di gas inframmezzato tra la parete (caratterizzata da asperità superficiali) e il liquido, attraverso l'uso di una micro- e nano-strutturazione della superficie solida, di modo che il liquido possa *scorrere* sulla parete con conseguente riduzione dell'attrito. Il comportamento del liquido è quantificato da una *lunghezza di scorrimento* il cui valore, secondo recenti risultati sperimentali, può raggiungere anche i 400 μm. Per il fenomeno della transizione verso la turbolenza si mostra che le superfici superidrofobiche sono efficaci (cioè ritardano la destabilizzazione di onde viaggianti nel canale) unicamente per condotti dalle dimensioni caratteristiche di pochi millimetri. La situazione è diversa se il moto fluido ha già raggiunto uno stato turbolento, e una riduzione molto significativa della resistenza può essere ottenuta anche in configurazioni macroscopiche. Ciò accade in quanto la scala di lunghezza caratteristica dello strato limite è ora lo spessore del sottostrato viscoso, che può essere di taglia paragonabile alla lunghezza di scorrimento, così che interazioni positive possono emergere. Infine, alcune procedure di produzione di superfici superidrofobiche vengono esaminate, alla luce della possibilità di applicare tali rivestimenti innovativi sulla chiglia di imbarcazioni.

***

ABSTRACT. – Properties of superhydrophobic materials are examined in light of their possible use for drag reduction in naval applications. To achieve superhydrophobicity

(*) DICCA, Scuola Politecnica, Università di Genova, Via Montallegro 1, 16145 Genova, Italy.
E-mail: alessandro.bottaro@unige.it

a low-surface-energy material must be structured so as to minimize the liquid-solid interactions. The crucial aspect is that of maintaining a layer of gas in between the (rough) wall and the liquid, and this can be achieved by hierarchical micro- and nano-structuring of the solid surface, to ensure a sufficiently large *apparent* slip of the fluid at the wall, thus reducing skin friction. The behavior of the liquid is quantified by a *slip length*; recent results have shown that this length can be as large as 400 μm. As far as transition to turbulence is concerned, we show that superhydrophobic surfaces are effective (*i.e.* they delay the onset of travelling instability waves) only in channels with characteristic dimensions of a few millimeters. Conversely, when the fluid flow has already attained a turbulent state, the gain in term of drag reduction can be very significant also in macroscopic configurations. This occurs because the relevant length scale of the boundary layer is now the thickness of the viscous sub-layer, which can be of magnitude comparable to the slip length, so that an effective coupling emerges. Finally, some procedures to produce superhydrophobic surfaces are examined, in light of the possible application of such innovative coatings on the hull of ships.

1. Introduction

Biological surfaces are never smooth but covered with hair, filaments, scales, feathers, leaves, needles, cilia, etc., which perform a variety of functions. Such *appendages* often have only local interactions with the fluid flowing over or around them, so that the effect produced is circumscribed over distances which can be rather small. In other instances, surface irregularities (say, an array of short filaments) can produce an effect of much larger scale, because of their collective behavior. The example that comes to mind immediately is that of flexible plant canopies, with the wind above the canopy forming eddies which drive *honami* waves.[1,2] The plant bending stiffness plays a role in the frequency and wavelength selection of the coherent motion of the canopy. This leads us to a second point: biological surfaces are rarely infinitely rigid, most often they display a visible degree of elasticity, reacting to the stress exerted upon them by the flowing medium. A showcase of the coupled effect of small-scale surface roughness and long-scale compliant behavior is the shark. The shark skin is covered with scales, called denticles, of characteristic length equal to 100 μm. By mechanically flapping sheets of actual shark skin in a hydrodynamic channel, Oeffner & Lauder[3] have shown that the flow resistance actually increases in the presence of denticles, compared to the case in which denticles are sanded off, when the sheets are maintained rigid. Conversely, a significant drag reduction is achieved for flexible sheets which mimic typical shark undulations. Very recently, the same conclusions have been reached by

the use of artificial denticles made by a 3D printer and embedded in a flexible substrate.[4]

Despite these biomimetic pointers, man insists on conceiving devices and machines which are often as rigid and smooth as possible. An example is constituted by the hull of marine vessels, which undergoes lengthy milling and sanding operations in naval workshops, before painting. Can these operations be carried out so as to prepare the surface "optimally" for the successive coating work? Can the paint itself possess properties able to yield positive hydrodynamic effects (*i.e.* drag reduction)? If such a paint were also capable of reducing or eliminating fouling caused by organisms such as oysters, barnacles, mussels or algae which attach to the hull while the boat is at dock, the advantage would be double, since fouling organisms not only damage the hull, but also cause additional drag and alter the vessel's maneuverability.

Superhydrophobic (SH in the following) materials have received tremendous attention in recent years for the large variety of applications in which they could be put to profitable use, ranging from anti-wetting to anti-icing, from self-cleaning to anti-corrosion. Examples range from the protection of electrical equipment and the prevention of shortages, to the protection from damage and corrosion of metal, wood or fabrics, the buildup of ice on airplane wings or transmission lines, the cleaning of cars' windshields or shower doors, etc. The potential application of SH coatings to marine vessels for drag reduction and antifouling is presently acquiring momentum.

1.1 Some definitions

A SH surface is initially defined on the basis of static conditions; *Fig. 1* shows two water drops which have been gently deposited onto two identical glass surfaces, the second of which has been treated with a SH coating. The difference is striking, including the fact that the glass in the second case is not perfectly smooth any more.

The *apparent*,[5] static contact angle α exhibited at a stationary contact line depends *uniquely* on the characteristics of the three materials involved, *i.e.* the gas, the liquid and the solid, reflecting the nature of the interactions at the different surfaces which intersect at the contact line. It is useful to introduce a quantity, γ_{AB}, called interfacial or surface energy, which represents the work per unit area required to increase the surface area of substance *A* in contact with substance *B*. The interfacial

energy of a condensed material derives from the unsatisfied bonding potential of the molecules at its surface: the higher the surface energy of a solid, the higher its ability to bond with other materials. The degree of wetting (*viz.* the wettability) of a solid by water arises from a balance between adhesive forces (*i.e.* solid-liquid interactions) and cohesive forces within the liquid. Water has a *strong attraction* for itself (strong cohesive forces) and wettability is thus determined by the interfacial energy of the solid. Molecules of materials such as fluoropolymers are held together by weak forces; such materials have low surface energy and low wettability. Conversely, metals, glass and ceramic materials have high surface energy, because of strong chemical bonds, and thus high wettability.

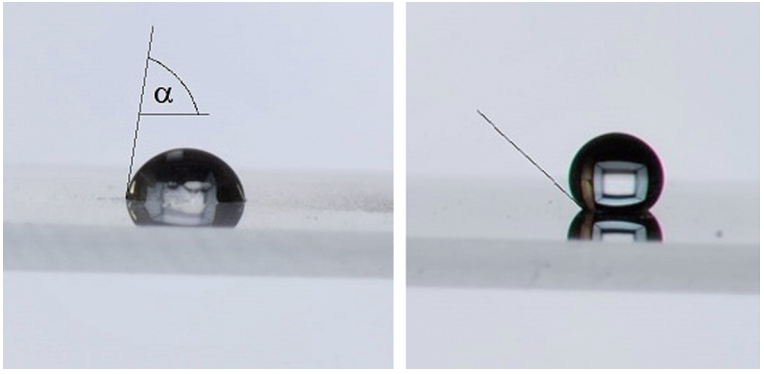


Fig. 1 – A small drop of water deposited onto clean glass (left) displays an apparent contact angle α smaller that 90°, whereas a drop deposited onto the same glass sprayed with carbon nanotubes shows a much larger contact angle.
Pictures courtesy of Nicolas Mazellier.

With reference to *Fig. 2*, a static force balance at the solid-liquid-gas contact line in the plane of the solid boundary, first proposed by Young[6] for a perfectly smooth, planar and chemically homogeneous solid surface, yields

$$A = \gamma_{SG} - \gamma_{LS} = \gamma_{GL} \cos \alpha, \qquad (1)$$

with A the adhesion tension, and subscripts L, G and S denoting, respectively, the liquid, gas and solid phase. A value of α between 0° and 90° (high wettability) means that the liquid is strongly attracted to the solid,

which is thus called hydrophilic; when α exceeds 90° (low wettability) the surface is said to be hydrophobic.[7] When the apparent contact angle exceeds 150° the surface is called superhydrophobic, provided the contact angle hysteresis $\Delta\alpha$ (see later for definition) does not exceed 5°. The simple equation (1) above is, however, of little practical use since it is very difficult to measure directly either γ_{LS} or γ_{SG}; conversely, γ_{GL} is easily measurable and is denoted simply by γ; its value, the so-called *surface tension*, equals 0.073 $N\,m^{-1}$ for the case of an air-water interface at 20°C. A further limitation of Young's equation lies in the fact that, when the drop is micro or nanometric, α depends on the drop size.[8]

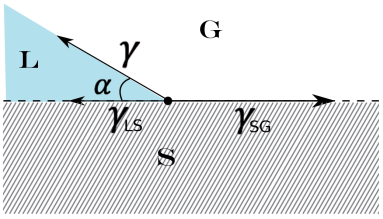


Fig. 2 – Static force balance at a triple line.

A low-surface-energy material is the first condition for superhydrophobicity. The second condition rests on the roughness or surface topography produced by fabrication and coating processes.

Wenzel[9] was the first to study the wetting characteristics of rough materials, with a focus on woven or knitted fabrics to be made waterproof. He argued that, for the case of a real (*viz.* rough) solid, A in equation (1) must be replaced by an *effective adhesion tension* given by the product of A with a roughness factor, r, which expresses the ratio of the actual surface of the interface to its planar projection, *i.e.*

$$r\,A = \gamma \cos \alpha_W, \tag{2}$$

with $r \geq 1$. Whereas A depends solely on the chemical composition of the three contiguous phases, the effective adhesion tension rA varies widely with the microscopic morphology of the solid; rA is the value typically measured experimentally. According to this simplified model, the equilibrium contact angle in the Wenzel state, α_W, is given by

$$\cos \alpha_W = r \cos \alpha; \tag{3}$$

the presence of the parameter r indicates that roughness reinforces hydrophobicity (as well as hydrophilicity) with respect to a smooth surface. Discussions on the applicability and limitations of the Wenzel model are provided by Wolansky & Marmur[10] and Gao & McCarthy,[11] with particular reference to the possible pinning of the contact line along defects on the surface and the effect of chemical and geometrical properties of the interfacial area contained within the contact perimeter. Despite criticisms, Wenzel's averaged view represents a useful scheme for uniformly rough surfaces and for drops much larger than the length scale of surface heterogeneities.

One aspect which complicates the understanding of wetting phenomena is the so-called contact angle hysteresis, which manifests itself, for example, when droplets on an incline remain at rest, with the front and rear contact angles exhibiting different values. The asymmetry in contact angles creates a Laplace pressure difference between the front of the drop (high curvature and high pressure) and the rear (small curvature and small pressure) so that the weight of the drop might be balanced. Even in this case chemical heterogeneities and roughness can act as pinning sites, so that the hysteresis $\Delta\alpha = \alpha_a - \alpha_r$ depends strongly on surface properties (α_a and α_r denote, respectively, the advancing and receding contact angles). Eventually, should the angle of the incline exceed a certain threshold value, the drop slides down, maintaining a front-rear asymmetry.

If air is trapped within asperities, so that the solid-liquid contact area is decreased, ultra- or super-hydrophobicity can be attained, with the drop partially *sitting* on air (this is known as the Cassie-Baxter[12] or fakir[13,14] state). Capturing and maintaining a connected gas layer (or disconnected gas bubbles) between the solid and the liquid depends crucially on the way the solid surface is structured. Cassie & Baxter[12] have proposed the following equation to describe the contact angle α_F in the fakir state:

$$\cos \alpha_F = f_1 \cos \alpha - f_2, \tag{4}$$

with f_1 the total area of solid per unit projected area under the liquid and f_2 defined in an analogous way for the air-liquid interface. The two-dimensional schematic in *Fig. 3* clarifies the definition of f_1 and f_2 for coplanar interfaces (left image) and for the case in which water partially fills the cavities. The Cassie-Baxter equation captures the Wenzel equation (2) when the air layer disappears, *i.e.* when $f_1 \to r$ and $f_2 \to 0$, so that $\cos \alpha_F = \cos \alpha_W = r \cos \alpha$. When the solid surface is homogeneous

and smooth ($r \to 1$) it is correctly recovered that $\alpha_F = \alpha_W = \alpha$.

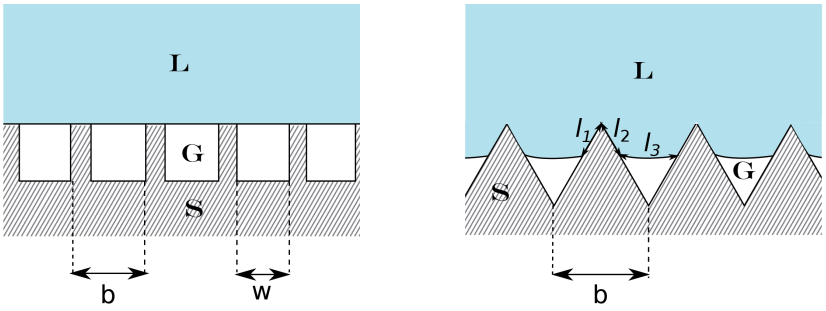


Fig. 3 – Close up of two (periodic) rough surfaces, taken to be homogeneous in the third direction. In the left frame, with reference to equation (4) it is $f_1 = 1 - w/b$ and $f_2 = w/b$, whereas in the right frame $f_1 = (l_1 + l_2)/b$ and $f_2 = l_3/b$.

Sketches of a liquid interacting with a solid in Wenzel and Cassie-Baxter modes are shown in *Fig. 4*, together with a qualitative sketch of the situation which might take place when the solid surface is both micro- and nano-structured. For simply micro-structured surfaces, the Cassie-Baxter state (left image) can undergo a *wetting transition* with a rapid depletion of the gas layer (or of the gas bubbles), so that the Wenzel mode ensues (center image). In static conditions, this occurs above a critical pressure difference between the liquid and the gas, function of the roughness scale, of surface tension γ, and of the contact angle α. Furthermore, even for a liquid pressure below critical, the transition to the Wenzel state can still take place, over longer time scales, because of the solubility of gases in water, chemical reactions or Marangoni effects.

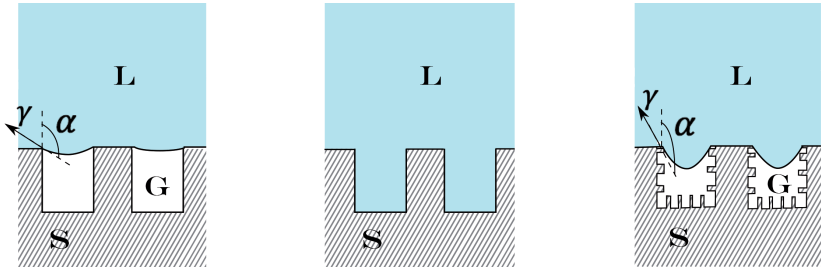


Fig. 4 – From left to right: Cassie-Baxter state with microstructured roughness; Wenzel state; Cassie-Baxter state with micro- and nano-structured roughness. In the latter case, the contact angle α approaches 180°, so that surface tension γ can more easily balance the pressure difference ($P_L - P_G$).

Hierarchically nanostructured sidewalls yield larger contact angles[15,16] and render the unwetted state more energetically stable[17,18] so that the transition to the Wenzel state is avoided, or at least postponed to larger values of the water pressure (*Fig. 4*, right). By careful design of the micro- and nano-textures, Lee & Kim[16] have been able to achieve a *slip length* (defined later in Section II) of up to 400 μm, rendering feasible the use of SH coatings in macroscale applications.

The key issue which emerges when attempting to design effective SH materials for specific applications is thus the following: how to best structure the surface in order to achieve large slip lengths while avoiding the wetting transition? Unfortunately, requirements on the slip length (and thus on the characteristic length scale b of the micro-roughness) and on the wetting transition are conflicting, since the collapse pressure ΔP at which transition occurs scales like γ/b. It is at this point convenient to turn to Nature.

1.2. Biomimicry

> *Biomimetics or biomimicry is the imitation of the models, systems, and elements of nature for the purpose of solving complex human problems.*
>
> Wikipedia

The most complete open-source database of biological literature, organized by design and engineering function, is probably the website http://www.asknature.org/, initiated in 2008 by Dr. Janine Benyus, founder of the Biomimicry Institute (http://biomimicry.net/about/biomimicry38/institute/). When searching for inventive and original solutions to a technical problem, this is the number one stop.

A natural example of water-repellence, known for a long time, is constituted by birds' feathers. In 1944, Cassie & Baxter[12] state that

> *it is usually taken for granted that the duck uses an oil or similar coating with larger contact angles than any known to man. In actual fact, the duck obtains its water-repellency from the structure of its feathers.*

After describing how feathers are made, each with a keratin rachis, barbs and tiny barbules, the latter hooked to one another to form a network of fibers (*cf. Fig. 5*, left), Cassie & Baxter conclude that

man's attempts to make clothing with the water-repellency of a duck should be directed to perfecting an appropriate cloth structure rather than as at present, to searching for an improved water-repellent agent.

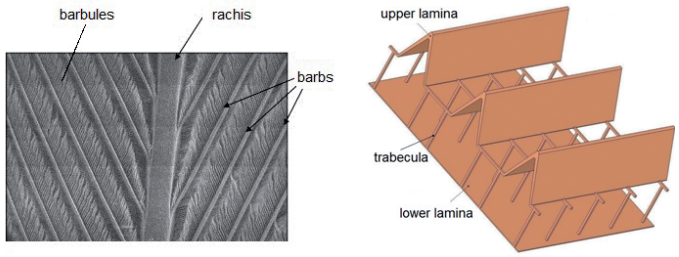


Fig. 5 – Left: scanning electron micrograph (SEM) image of the central part of a feather. The distance between consecutive barbs is of the order of 200 μm, whereas the spacing between adjacent barbules is of the order of 10 μm. Figure from Bormashenko et al.[19] *Right: sketch of the structure of a scale of a butterfly wing. Air can flow through the porous interface from the upper lamina to the inner, impermeable region (lower lamina). The upper lamina consists of ridges, of periodicity close to 2 μm, and grooves with discrete openings, which allow air to flow through. The two laminae are maintained separated by post-like structures, called trabeculae.*

Today it is believed that it is the two-scale structure of the feather vane which renders it exceptionally waterproof, with air trapped underneath the network of barbs and barbules.[19]

Man's fascination with superhydrophobicity started probably in 1997 with the work by Barthlott & Neinhuis[20] on the lotus (*Nelumbo nucifera*) leaf. Since then, the number of scientific articles on the *lotus effect* has grown exponentially, and there is still no sign of an approaching saturation. As shown in *Fig. 6* (left image) the surface of the lotus leaf has a two-scale structure: the papillose epidermal cells have characteristic dimensions close to 10 *μm*, and hairlike epicuticular wax crystalloids sitting on top of the epidermal cells are about 100 *nm* long. The two-level hierarchical surface structure is responsible for the remarkable stability of the Cassie-Baxter state for the lotus leaf even under harsh environmental conditions.[15,17,21]

Another plant which has received recent attention is the water fern *Salvinia molesta*.[22] The surface of the leaf of this plant has a dense coating of elastic hairs shaped as egg-beaters and coated with nanoscopic wax crystals (*cf. Fig. 6*, right). The terminal cells of each hair lack the crystals, rendering the surface locally hydrophilic (over a por-

tion of approximately 2% of the whole leaf surface). These evenly distributed hydrophilic patches are capable to pin and stabilize the air-water interface, preventing the loss of air for a few weeks even in turbulent flow conditions.

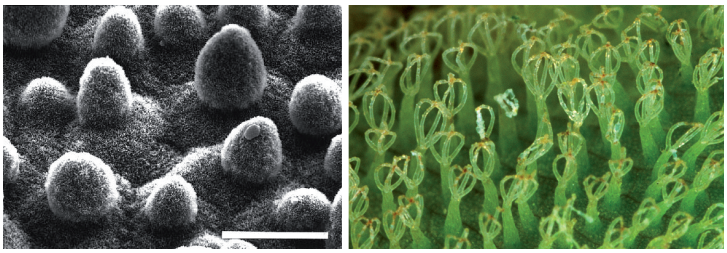


Fig. 6 – Left: SEM image of the lotus leaf. The white bar is 20 μm long. Image from Barthlott and Neinhuis.[20] *Right: surface of the leaf of the* Salvinia molesta. *The terminal structure of each* egg-beater *is half a millimeter wide. Image: www.invasive.org.*

Interesting SH abilities have been found also among insects. The surface of the legs of the water strider *Gerris remigis*[23,24] displays a hierarchical micro- and nano-structure, with needle-shaped setae oriented longitudinally, of length around 100 *μm* and diameter ranging from several hundred nanometers to 3 *μm*; each seta has elaborate nanoscale grooves. The action of the setae is that of allowing the insect to stand effortlessly and maneuver quickly on water.

Another insect which has shown remarkable properties is the *Natonecta glauca*. Ditsche-Kuru *et al.*[25] have analyzed different body parts of this hairy water bug, to infer that the hierarchical structure formed by setae (of length around 90 *μm*) and dense tiny microtrichia (of length close to 2 *μm*) on the upper side of the elytra confers tremendous advantages in terms of long term air film persistence (after 130 days under water the air film was marginally altered), for both hydrostatic and hydrodynamic conditions.

A two-scale hierarchical structure appears also on the wings of butterflies and moths. They have wings covered with millions of tiny scales (similar to partially overlapping tiles on a roof) of characteristic dimensions around 100 *μm*. Scales are made of chitin, a hydrophobic material with contact angle α close to 100°. Each scale is composed by a riblet-like air-permeable surface, as sketched in *Fig. 5* (right frame). By analyzing several species of common butterflies via scanning elec-

tron microscopy and a video optical contact angle measuring system, Fang *et al.*[26] have demonstrated that superhydrophobicity is attained (apparent contact angles increase by up to 40% compared to the base value of chitin) because of the hierarchical nature of the wing structure.

The surface structure of butterfly scales shown in *Fig. 5* (right) resembles that of riblets.[27-29] However, both the function and the mechanism by which riblets operate are different: riblets are completely wetted by the fluid and are used to reduce turbulent friction drag by disrupting the lateral motion of the fluid at the surface, thereby moving turbulent near-wall structures farther from the wall. Furthermore, riblets perform well only in a narrow range of Reynolds numbers, with negative effects outside of their designed range. In particular, they are effective when their spanwise periodicity b is around 20 viscous wall units (*i.e.* four times the thickness of the turbulent viscous sublayer); in physical units, for the turbulent flow of water in a channel of thickness $2H = 4$ *cm* at a bulk velocity of 0.15 $m\ s^{-1}$ (the Reynolds number based on half-channel height is 3000, and the friction velocity u_τ is about 10 $mm\ s^{-1}$), this translates into a length of the order of 2 *mm*, which is much larger than typical superhydrophobic microfeatures. With the increase of the fluid velocity the thickness of the viscous sublayer decreases, approaching the surface roughness length scale.

1.3 Man-made SH surfaces

A large variety of methods have been developed to fabricate non-wettable surfaces, all based on combining a low-surface-energy material with a rough surface morphology; recent reviews are due to Ma & Hill,[30] Zhang *et al.*,[31] and Shirtcliffe, McHale & Newton.[32] Materials of choice for designing, developing and producing superhydrophobic surfaces are polymers; they are versatile, have excellent surface properties and can be easily formed. The softness of polymers, which renders them vulnerable to damage and wear, can be compensated by combining them with inorganic fillers.

In the context of laboratory experiments, SH surfaces are often realized using microfabrication processes developed for the electronic industry, leading to regular arrays of microposts or microridges (*cf. Fig. 7*). For example, photolitographic processes were employed by Daniello,[33] Lee & Kim[34] and Park, Sun & Kim.[35] Large-scale manufacturing of microfabricated SH surfaces is, however, prohibitively expensive. Likewise,

the cost and the complexity of electrospinning techniques,[36,37] together with the need of a high voltage source and the slow rate of fiber production, limit the appeal of electrospun fibers.

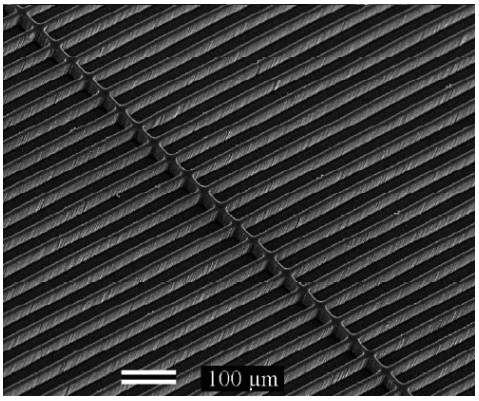


Fig. 7 – Scanning electron micrograph of microridges. The flow runs along the microridges, from bottom left to top right. The single transverse ridge in the image is meant to trap the air layer and ensure its longevity. Figure from Daniello.[33]

A low cost alternative is the one-step casting technique described by Buatier de Mongeot *et al.*[38] and Hsu & Sigmund,[39] with a membrane filter as the mold. In the former study, a disordered array of poly(dimethyl)siloxane micro-pillars hinged on a substrate of the same material was achieved. In the latter, polycarbonate hairs were cast on a polypropylene substrate. In both cases excellent hydrophobic properties were achieved, related to the mechanical response (deflection) of the pillars to the fluid interface. The limitation of this casting approach lies at present in the little resistance of the fibrous structures to abrasion, and the difficulty of producing large scale samples, for example for naval applications.

Another alternative is constituted by spray deposition, which allows to rapidly and conformally coat large areas on a variety of substrates; Srinivasan *et al.*[40] describe a simple spraying technique of poly(methyl methacrylate) blends to fabricate microtextured, superoleophobic surfaces with re-entrant topographic features, capable to enhance the stability of the Cassie-Baxter state. When using this spray-coating technique onto various woven wire meshes (an example of which is shown in *Fig. 8*) a dual texture is achieved which, in laminar flow conditions, allows to significantly increase the apparent slip of the

fluid at the wall.[41] It appears interesting also the possibility to incorporate aerogel particles into polymer mixtures to be directly painted or sprayed onto the solid surface.[42]

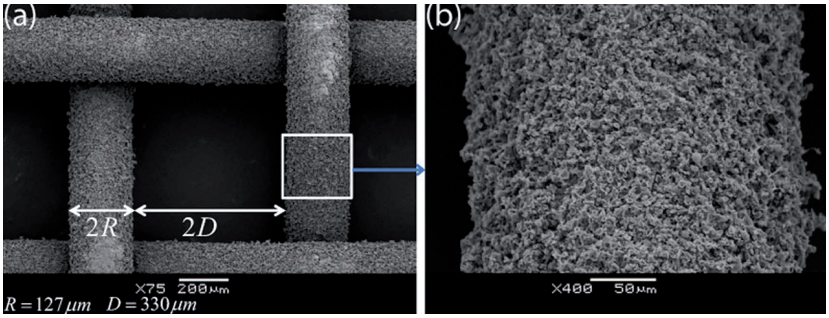


Fig. 8 – SEM image at two magnifications of a dual-textured spray-coated SH mesh surface. Figure from Srinivasan et al.[40]

Probably the simplest technique consists in the direct mechanical abrasion of the surface of a low-surface-energy material, as proposed by Nilsson, Daniello & Rothstein;[43] they have used various grits of sandpaper to treat smooth surfaces made of polytetrafluoroethylene (commercially known as Teflon), measuring contact angles and contact angle hystereses to catalogue the surfaces obtained. Experiments in a microchannel under laminar flow conditions, carried out very recently by Song, Daniello & Rothstein,[44] have employed a variety of such surfaces to infer a correlation between the surface with lower hysteresis (produced by sandpaper with gritsize denominated 240-grit) and the largest pressure drop reduction in the channel (up to 27%, when the sanding is done in the direction of the flow). These results are very promising in view of potential applications because of the large surface areas which can be treated easily and cheaply.

2. To slip or non to slip?

One of the crucial *assumptions*, based mostly on empirical evidence, made in fluid dynamics is that the molecules composing the liquid adhere to the impermeable wall about which the fluid moves. If Γ is the solid surface of unit normal vector $\mathbf{n}$, directed into the fluid, in the frame of reference fixed with the wall we are accustomed to writing:

$\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0, \quad \mathbf{u}_{\parallel} = \mathbf{u} - (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n})\mathbf{n} = 0,$ both valid at Γ,

with $\mathbf{u}$ the fluid velocity and $\mathbf{u}_{\parallel}$ the vector of velocity components tangent to the surface. The no-slip condition has been questioned for a long time, and has become a tenet in fluid mechanics only after 1923, following G.I. Taylor[45] use of it, and success in relating theory and experiments in the analysis of the stability of Taylor-Couette flow. One hundred years earlier, Navier[46] had proposed another condition for the tangential velocity (with no more theoretical foundation than the no-slip condition, only more general), *i.e.*

$$\mathbf{u}_{\parallel} = 2\lambda\{\mathbf{E} \cdot \mathbf{n} - [(\mathbf{E} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{n}]\, \mathbf{n}\}, \text{ at } \Gamma, \tag{5}$$

with $\mathbf{E} \equiv \frac{1}{2}(\nabla\mathbf{u} + \nabla\mathbf{u})$ the rate of strain tensor. The parameter λ is known as the *slip length*, the fictitious distance below the reference surface where the velocity of a flowing liquid vanishes (*cf. Fig. 9*); the classical no-slip condition is recovered for $\lambda = 0$ and perfect slip is found for $\lambda \to \infty$. In equation (5) a unique slip length is employed for the two wall-tangent velocity components; for the case of anisotropic SH surfaces (for example, when the wall has microridges aligned with the main flow direction, *cf. Fig. 7*) it is necessary to introduce a slip tensor as argued by Bazant & Vinogradova.[47] Equation (5) can be interpreted as an asymptotic approximation to treat configurations for which either the continuum equations break down, or the surface geometry presents a microstructure.

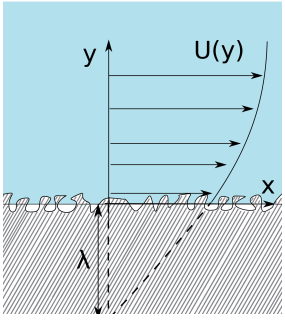


Fig. 9 – Schematic of the Navier slip length. The choice of where to position the x*-axis is arbitrary and the slip length depends on it; a common choice is to put the* y = 0 *reference axis just on top of the most protruding roughness element(s).*

Situations where the slip length does not vanish include the flow of an advancing free surface, such as that developing when a drop of liquid flows down an incline under gravity, or the motion in micro- and nano-fluidic devices. In the first instance it has been shown[48] that a contact line singularity develops, with stresses and viscous dissipation in the fluid wedge bordered by the solid and the liquid-gas interface growing without bound under the usual no-slip condition. Remedies within the continuum model include (*i*) the use of a thin precursor film upstream of the advancing front, or (*ii*) the use of a slip boundary condition in the proximity of the triple point. In the case of micro- or nano-fluidic apparatuses, provided the Knudsen number exceeds a value around 0.1, slip has been shown to be important,[49] at least for solid surfaces which are not atomically smooth.

The widespread use of miniaturized devices for a variety of medical and engineering applications renders the employment of SH materials of interest, with slip lengths used to enhance flow rates for a given pressure gradient (or conversely, reduce the pressure drop necessary to pump a given flow). A simple example can illustrate this effect: let us consider a micro-channel bounded by two infinite parallel plates distant $2H$, the lower one of which (at $y = -H$) can support slip. A fluid of dynamic viscosity μ ($\mu = \rho\nu$, with ρ the fluid density and ν its kinematic viscosity) can flow in the channel under the action of a pressure gradient $-\frac{dp}{dx}$; then, the bulk speed within the channel increases with the slip length λ as

$$\bar{U} = \frac{2H^2}{3\mu}\left(-\frac{dp}{dx}\right)\frac{H+2\lambda}{2H+\lambda}. \tag{6}$$

When expressed in terms of the mean velocity for the no-slip case, $\bar{U}_{\lambda=0}$, it is

$$\bar{U} = \bar{U}_{\lambda=0}\frac{2(H+2\lambda)}{2H+\lambda},$$

which shows that, if λ is rendered equal to, for example, the half-channel thickness H, the volumetric flow rate through the channel is twice that of the no-slip case. The slip velocity at the SH wall is:

$$U(y=-H) = \bar{U}\frac{3\lambda}{H+2\lambda};$$

this is also a growing function of λ and attains the value $\bar{U}$ when $\lambda = H$. This simple example shows the interest of finding means to increase λ through the interplay of wettability and surface roughness.

2.1 The effective *surface slip length*

Effective slip boundary conditions have been proposed for a few periodic microstructures, under the hypothesis that the fakir state is maintained with planar, no-shear liquid-gas interfaces. Thus, alternating no-slip and no-shear boundary conditions are enforced on planes above which the liquid satisfies the creeping flow equations.

Different planar lattices have been studied: Philip[50] has studied the case of periodic ridges both aligned and perpendicular to the mean stream. The effective (*i.e.* valid in an averaged sense) slip length in the second case is half that of the first, for the same values of w and b (*cf. Fig. 3* for notations). Ng & Wang[51] have evaluated λ for both square arrays of posts, emerging from the substrate, and holes, carved in the substrate. Davis and Lauga[52,53] have studied circular posts in both square and rectangular arrays, as well as a grid-like structure. The slip length λ, normalized by the lattice periodicity b, is given as function of ϕ_s, the solid area fraction of the surface, in both *Tab. 1* and in *Fig. 10* for some representative cases. The validity of the results reported in *Tab. 1* is typically limited to values of ϕ_s up to 0.25.

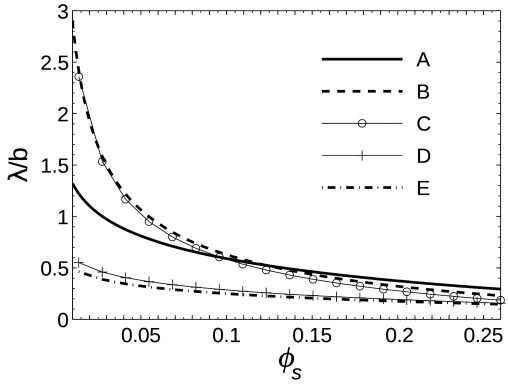
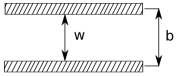
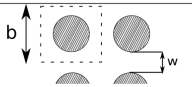
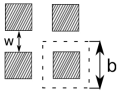
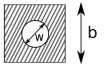
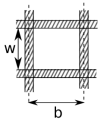


Fig. 10 – Dimensionless effective slip length as a function of the solid area fraction for a few regular SH lattices (identified by the letters ***A*** *through* ***E*** *in* Tab. 1*).*

Tab. 1 – Normalized effective slip lengths (column to the right) for a few rough-surface patterns in the fakir state. The no-slip region is shown with hatched lines, while the shear-free region is white.

A. Ridges aligned with the flow (Philip[50])		$\phi_s = 1 - \frac{\mathrm{w}}{\mathrm{b}}$	$\frac{\lambda}{\mathrm{b}} = \frac{1}{\pi}\ln\left\{\sec\left[\frac{\pi}{2}(1-\phi_s)\right]\right\}$
B. Circular posts in a square lattice (Davis & Lauga[53])		$\phi_s = \frac{\pi}{4}\left(1 - \frac{\mathrm{w}}{\mathrm{b}}\right)^2$	$\frac{\lambda}{\mathrm{b}} = 0.332\,\phi_s^{-1/2} - 0.421$
C. Square posts in a square lattice (Ng & Wang[51])		$\phi_s = \left(1 - \frac{\mathrm{w}}{\mathrm{b}}\right)^2$	$\frac{\lambda}{\mathrm{b}} = 0.33\,\phi_s^{-1/2} - 0.461$
D. Circular cavities in a square lattice (Ng & Wang[51])		$\phi_s = 1 - \frac{\pi}{4}\left(\frac{\mathrm{w}}{\mathrm{b}}\right)^2$	$\frac{\lambda}{\mathrm{b}} = -0.134\ln\phi_s - 0.023$
E. Grid-like pattern (Davis & Lauga[52])		$\phi_s = 1 - \left(\frac{\mathrm{w}}{\mathrm{b}}\right)^2$	$\frac{\lambda}{\mathrm{b}} = -0.107\ln\phi_s + 0.003$

It is consistently found that slip increases with the reduction in solid area fraction and that λ is of order b. Square and circular posts yield the largest slip for $\phi_s < 0.1$, whereas ridges aligned along the stream provide the best result for larger values of the solid area fraction. A grid-like structure (*i.e.* square cavities carved in the substrate) yields the lowest values of λ, probably coupled to a good capacity of trapping and maintaining air bubbles within.

After the wetting transition, the boundary conditions at a wall with regularly patterned roughness can be expressed via two coefficients, a *protrusion* coefficient accounting for the effect of the aspect ratio of the individual roughness element, and a *proximity* coefficient which considers the mutual interference of multiple wall perturbations placed in a periodic array.[54] The coefficients proposed by Luchini[54] can be used to assess the reduction in slip lengths for the Wenzel state as compared to the Cassie-Baxter state, for selected surface topographies.

3. Transition and turbulence with slip conditions

Transition and turbulence are open issues even for simple, no-slip, plane shear flows, such as the Couette or Poiseuille cases, despite the advances made in the last twenty years with direct numerical simulations, with advanced experimental techniques, and with the new understanding provided by the effect of nonnormality on the initial growth of disturbance waves. Some reliable experimental and numerical results have appeared very recently for the case of SH surfaces.

3.1 Some linear stability results

Let us take as a reference the case studied via microparticle image velocimetry (*μ*-PIV) by Ou, Perot & Rothstein[55] and Ou & Rothstein,[56] and focus on the linear stability of the flow in the micro-channel bounded by two walls at $\pm H$, the lower one of which can support slip. The streamwise velocity distribution in the channel is

$$\frac{U(y)}{\bar{U}} = \frac{3}{4}\frac{(2H+3\lambda) - 2\lambda\frac{y}{H} - (2H+\lambda)\left(\frac{y}{H}\right)^2}{H+2\lambda}, \tag{7}$$

with the velocity scale $\bar{U}$ given in equation (6). This velocity distribution is displayed in *Fig. 11* together with the experimental values by Ou & Rothstein;[56] their data have been digitized from *Fig. 10* of their article, without the error bars on the dimensionless velocity (the largest value of which is equal to 0.3, close to the channel axis). Another case studied experimentally by Ou, Perot & Rothstein[55] considers longitudinal ridges in a channel of thickness $2H = 127\ \mu m$, with width w of the ridges equal to either 20, 40 or 80 μm and spanwise periodicity b equal to 40, 60 or 100 μm. According to the theory by Philip,[50] the slip lengths in these three cases should be $\lambda = 4.4$, 13.2 and 37.4 μm, in reasonably good agreement to the values found indirectly by Ou and colleagues through pressure drop experiments, which are, respectively, 6, 12 and 24 μm. Discrepancies can partly be ascribed to the deflection of the air-water interface in the experiments.

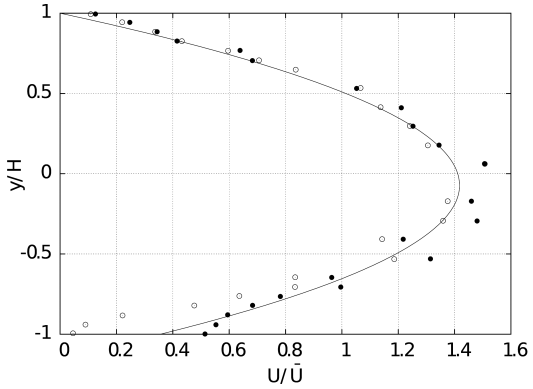


Fig. 11 – Velocity distribution in a microchannel with a lower slip wall. The microchannel of the experiments by Ou & Rothstein[56] has a thickness $2H = 85\ \mu m$; the lower wall has microridges aligned along the flow direction, with $w = 30\ \mu m$ and $b = 60\ \mu m$ (cf. Tab. 1 *for definitions). The two sets of experimental values correspond to μ-PIV measurements taken above the center of the ridge (o) and above the center of the air-water interface (•). The continuous line through the experimental data points is given by equation (7) with $\lambda = 6.6\ \mu m$ as predicted by Philip.[50]*

Conventional linear stability analysis can be easily carried out by assuming two-dimensional infinitesimal disturbances in the form of normal modes, *i.e.*

$$\tilde{f}(t, x, y) = f(y)\ \exp(\sigma t + i\alpha x);$$

with $\tilde{f}$ the generic disturbance, α the (real) streamwise wavenumber and σ the (complex) growth rate. It is easy to recover the Orr-Sommerfeld equation for the vertical disturbance velocity v, together with four boundary conditions:

$v = v' = 0$ at $y = H$,

$v = v' - \lambda v'' = 0$ at $y = -H$,

with primes used to denote derivation with respect to the independent variable y. The slip conditions above are adequate as long as $2\pi/\alpha$ is much larger than the characteristic dimension b of the SH micro-texture. In the boundary conditions there is a single slip length λ since disturbances are taken in the form of waves travelling only along x; in the case of oblique waves, a second, and possibly different, slip length would have been necessary to express the z-component of the disturbance velocity at the reference surface. Neutral stability curves for varying λ/H 's are plotted in *Fig. 12* (including also the case of two slip walls, right frame of the figure), highlighting the stabilizing effect of SH surfaces.

For the case studied by Ou & Rothstein[56] ($\lambda/H = 0.1553$) the onset of two-dimensional Tollmien-Schlichting waves is postponed from $Re = 3848$ to 7409 (Re is defined by $\bar{U}H/\nu$), with the characteristic wavelength of the modal disturbance increasing rapidly past λ around $0.07\ H$, a sign of the modified interplay between mean flow and disturbance field around the critical layer. By way of example, when $\lambda/H = 0.07$ the critical Reynolds number and wavenumber are, respectively, $Re_c = 9617$ and $\alpha_c = 0.80/H$; in this case the phase velocity is 0.326 times the mean velocity $\bar{U}$, and the critical layer is placed $0.056\ H$ away from the SH wall (and over twice this length on the side of the no-slip wall).

If both channel walls are rendered SH the onset of Tollmien-Schlichting waves is considerably postponed, as exemplified by *Fig. 12* (right frame), in agreement with results by Min & Kim[57] and Lauga & Cossu.[58]

Beyond indicating the enhanced delay of the Tollmien-Schlichting transition for the case of a channel with *two* SH walls, the results demonstrate that a significant effect can be expected only in microdevices. The largest possible slip length ever reported[16] is close to 400 μm, obtained by carefully nanostructuring the sidewalls of flow-aligned

ridges with pitch b equal to 450 μm and solid area fraction $\phi_s = 2\%$, coherent with the results in *Fig. 10*. Taking this as the upper limit case, and considering, for example, a channel with two SH walls distant $2H = 16$ *cm*, it is $\lambda/H = 0.005$; this corresponds to the second curve from the left in *Fig. 12* (right frame), too close to the curve of the no-slip case for stabilization to be of any practical relevance.

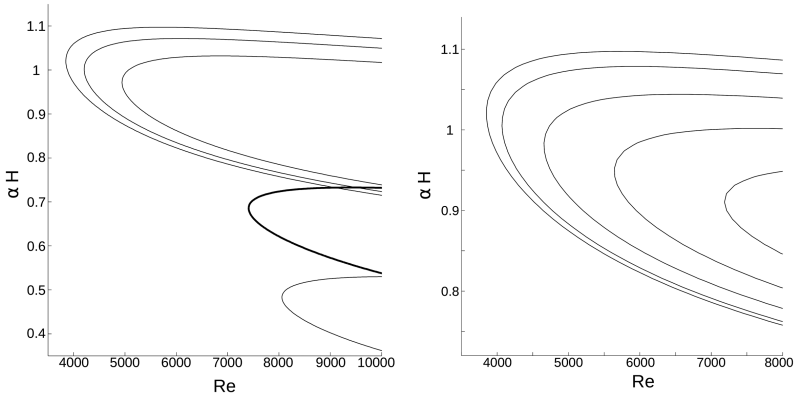


Fig. 12 – Neutral stability curves for the flow in a micro-channel with one (left frame) or both (right frame) slip walls; the unstable region for each value of λ is contained within the area embraced by each curve. In the left frame the values of λ/H are, from top to bottom, 0, 0.01, 0.02, 0.1553 and 0.3; for the conditions of the experiments by Ou & Rothstein[56] the neutral curve is drawn with a thick line. For the results on the right frame, the base flow is given by $U(y) = 1.5\,\bar{U}[1 + 2\lambda/H - y^2/H^2] / (1 + 3\lambda/H)$, and the slip boundary conditions for the vertical disturbance velocity component are $[v' \pm \lambda v'']_{\pm H} = 0$. From left to right: $\lambda/H = 0$, 0.005, 0.01, 0.015, 0.02.

A few open issues remain relative to the role of non-modal, transiently growing disturbances on the threshold for turbulent transition, particularly when nonlinear effects are accounted for. Preliminary results, both in the linear and nonlinear regimes, have been reported by Min & Kim.[57] In the linear case, the presence of a SH surface has insignificant consequences as long as λ is much smaller than H (*cf.* also Lauga & Cossu[58]). On the other hand, even a small streamwise slip has a remarkable effect on transition delay when the disturbance amplitude is sufficiently large, whereas spanwise slip appears to trigger early transition. Preliminary experimental results on transition delay for the turbulent boundary layer developing over a SH plate have been reported recently by Lyu *et al.*[59] More work is however necessary to elucidate the

mechanisms of transition in the nonlinear regime, for isotropic and anisotropic surface patterns.

3.2 Turbulence

The literature reports some very recent, promising results, both experimental and numerical, for the effect of superhydrophobicity on drag reduction.

For the case of a channel flow with microridges aligned in the flow direction, Park, Park & Kim[60] have discovered, via direct numerical simulations, that the skin friction drag decreases significantly when the slip length is at least of the order of the viscous sub-layer thickness, *i.e.* $\lambda^+ = \lambda u_\tau / \nu \approx 5$; drag is progressively reduced upon further increase of λ^+, until saturation at $\lambda^+ \approx 30 - 40$, with a significant modification of the near-wall turbulent structures. For the case of surface ridges aligned with the mean flow, and considering the laminar results in *Fig. 10* just to have an order of magnitude for b^+, it can be speculated that a drag-reducing effect might subsist even in the Wenzel state, at least in a range of speeds, simply by exploiting the *riblet effect* (*cf.* Section 1.2). Experiments of riblet-ed surfaces, coated with a sub-micrometric layer of a hydrophobic polymer, tested in a cone-and plate rheometer system have recently revealed a drag reduction in the turbulent regime of up to 20%, compared to the base, smooth-surface case.[61]

Microridges aligned with the main flow have also been examined experimentally by Park, Sun & Kim[35] in a turbulent boundary layer; they carefully monitored the state of the gas within the ridges and studied cases with different solid area fraction. Their set up considers a side-by-side configuration of smooth and superhydrophobic sample surfaces (of dimensions 20 *mm* × 10 *mm*) flush-mounted on the upper wall of a water-tunnel test section, and the (surface integrated) shear stress is assessed by suspending the two samples with an identical set of flexure beam springs and measuring the differential displacement. For $\phi_s = 0.05$ a drag reduction equal to 75% is obtained at $Re_\tau \approx 250$ (based on boundary layer thickness and friction velocity).

As expected, the drag-reducing effect is enhanced by increasing the periodicity b of the microridges, and is mitigated by raising ϕ_s's.

Park, Sun & Kim[35] have been unable to evaluate the slip length, because of spatial resolutions problems with the laser Doppler velocimetry (LDV) system employed. Such a value is available with μ-

PIV, which allows a spatial resolution of the order of 1 μm,[62] and possibly with digital holographic microscopy.[63]

Moving to a less academic configuration, Dong *et al.*[64] have recently reported 40% drag reduction for the case of a macroscopic model ship tested in a 6 *m*-long water tunnel, both with and without a micro- and nano-patterned SH coating. The result is very encouraging, since the drag in this case includes a sizeable part of wave drag, unaffected by the coating. However, the tests' duration is of only a few seconds and no mention is made of the longevity of the gas layer. This is, in fact, the main limiting factor for practical applications. The pressure difference between the liquid and gas phases holds primary responsibility for the collapse of the Cassie-Baxter state; the wetting transition is also favoured by the flow of gas across neighboring micro-channels (when interconnected), and by the solubility of the trapped gas in the surrounding liquid. Active or passive means to supply gas to an already wetted rough surface might be envisioned, and dewetting has shown to be possible, provided the wall microstructures satisfy certain geometrical constraints.[65] Partial recovery can be achieved by entraining outside air, as shown by Lee & Kim,[66] but this works only for small, above-ambient, water pressures. Another promising approach, which remains effective under large liquid pressures, consists in placing electrodes on the substrate of the SH surface, and using electrolysis to replenish the lost gas.[65,66]

4. BIOFOULING

All naval vessels suffer consequences from the phenomenon of biofouling, a very rapid process (*cf. Fig. 13*) which initiates with the formation of a biofilm to which larger organisms, such as barnacles, can later attach. It is known that heavy calcareous fouling can increase the required shaft power of a ship by 86% as compared to a hydraulically smooth hull at cruising speed,[67] so that the application of anti-fouling coatings is a necessity.

Biocides have been successfully used in the past to regulate fouling; in particular, tributyltin (TBT)-containing paint formulations, developed in the 1970s, were so effective at reducing fouling that no further paint development was considered necessary. However, the toxicity of TBT led to a worldwide ban on the use of these compounds in

2008,[68] which spurred research into alternative and environmentally benign biofouling solutions. Current strategies include both hydrophobic (fluoropolymers and silicone) and hydrophilic (glycine betaine and sulfobetaine) coatings; in the first instance a smooth surface is created which aims to prevent the attachment of larger microorganisms, while in the second the high hydration of the surface increases the energetic penalty of removing water for proteins and microorganisms to attach.

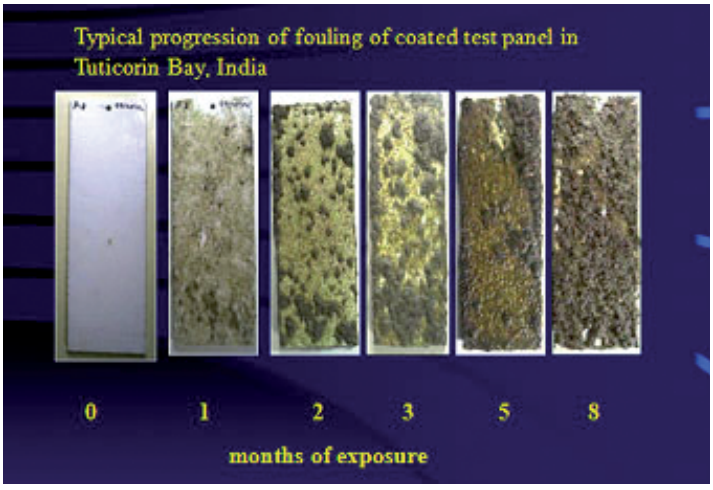


Fig. 13 – Fouling over time at a field test site in southern India. Image from http://www.poseidonsciences.com/static immersion.html.

Very recently, the Japanese company *Nippon Paint Marine* has patented and put into commerce a painting called A-LF-Sea based on copper silyl acrylate, for antifouling, and hydrogel particles, to realise a liquid-to-liquid near-wall shear layer. The special kind of hydrogel employed is composed of a polymeric network able to absorb water from the outside, until saturation, and capable to retain it with little swelling. This latter characteristic renders it suitable for anti-fouling coatings. According to the manufacturer, by treating a flat surface with A-LF-Sea, and by exploiting the liquid-to-liquid effect, frictional drag is reduced by 15%, which would result in a reduction of approximately 10% of the total resistance of a ship. This coating has been applied to over 140 ships in the period that goes from April 2013 to April 2014, and the beneficial effects are currently being evaluated in a cooperation between Nippon Paint Marine and Kobe University.

5. Concluding remarks

Much progress has been made in the understanding of superhydrophobicity since the works by Wenzel[9] and Cassie & Baxter,[12] but more is needed to be able to design and apply SH coatings to submerged objects with full confidence on both the drag-reducing effect and its durability. Producing a SH surface is relatively easy and several different approaches have been proposed in the literature; the main technological challenge is related to the longevity of the Cassie-Baxter state, when the superhydrophobic surface is subject to external pressure and shear. Until now, longevity of laboratory-developed coatings is of the order of a few days; this duration has to be extended by a factor of 100 and more, in order to render the technique of interest to the naval industry, otherwise a dewetting strategy might be indispensable. Other issues rest with the cost, ease of large-scale application, and resistance to wear. A new antifouling paint developed by the company Nippon Paint Marine (http://nipponpaint-marine.com/en/products/a_lf_sea/index.html) seems to meet some industrial expectations, but care is needed not to interpret marketing boasts as reliable laboratory results.

The ingredients which emerge for the design of effective coatings for real-world underwater implementation appear to be the following:

- The coating should have a (regular or irregular) fibrous polymeric structure of sub-millimetric characteristic dimensions, with embedded smaller-scale features. This could possibly be achieved by the simple mechanical abrasion of the low-surface-energy material.
- The solid area fraction of the surface ϕ_s should be as low as possible for large slip lengths to be attained.
- It is probably advantageous to use hydrophilic patches on top of the microroughness elements (on those parts in direct contact with the liquid) to pin and stabilize the air-water interface.
- A system of micro-barriers transverse to the main water flow should be envisioned to prevent air from escaping sideways, thus promoting the longevity of the air layer.
- The use of an active dewetting system could be considered, possibly based on electrolytically generated gas. Maintaining the gas layer is crucial also to inhibit biofouling activity and metal surface corrosion, thanks to the reduced areas of contact between the solid surface and water.
- An alternative for naval applications, when a constant speed is main-

tained over a long time, could be constituted by a *porous*, riblet-like topography (*cf. Fig. 5*, right), still with embedded smaller-scale (nano) features. This might permit to take advantage of superhydrophobicity before the wetting transition has occurred, and of the drag-reducing effect of riblets when in the Wenzel state. Moreover, active and passive gas replenishing systems, which take advantage of the porous nature of the surface, can be envisioned (a MURI - Multidisciplinary University Initiative - led by Prof. S.L. Ceccio of the University of Michigan, has been recently sponsored by the US Office of Naval Research to look - among other things - into these aspects; *cf.* https://onrsuperhydrophobic.org/).

The goal of the research community is to identify low cost technologies to deliver on the points above. This is an exciting task because of the tremendous benefits expected; for example, in the maritime transport sector, skin friction drag contributes to over 60% of the total drag for a cargo ship and 80% for a tanker.[69] Lowering drag by even a small amount would have a global impact on energy saving and greenhouse gas reduction.

Acknowledgements

Several colleagues have contributed through discussions and interactions to the present work, including in particular F. Barberis, C. Boragno, M. Capurro, P. Luchini, N. Mazellier, A. Mazzino, D. Natali, J. Pralits, A. Ungaro, and G. Zampogna. The support of the *Istituto Lombardo, Accademia di Scienze e Lettere* and of the *Edoardo Kramer Foundation*, through the "2013 Kramer Award", is very gratefully acknowledged. The activity on SH coatings has started thanks to a *Fincantieri Innovation Challenge* grant, monitored by Cetena S.p.A. (with G. Caprino as program officer).

References

[1] E. Inoue. On the turbulent structure of air flow within crop canopy. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 1:317-346, 1963.
[2] J.J. Finnigan. Waving plants and turbulent eddies. *J. Fluid Mech.*, 652:1-4, 2010.
[3] J. Oeffner and G.V. Lauder. The hydrodynamic function of shark skin and two biomimetic applications. *J. Exp. Biology*, 215:785-795, 2012.

[4] L. Wen, J.C. Weaver, and G.V. Lauder. Biomimetic shark skin: design, fabrication and hydrodynamic function. *J. Exp. Biol.*, 217:1656-1666, 2014.
[5] The word *apparent* is used with reference to the macroscopic measure of the contact angle; such a measure would change if we progressively zoomed on the contact line down to the molecular scale.
[6] T. Young. An essay on the cohesion of fluids. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 95:65-87, 1805.
[7] The prefix "hydro" indicates that the liquid considered - in the original usage of the words hydrophobic and hydrophilic - was water.
[8] F. Barberis and M. Capurro. Wetting in the nanoscale: A continuum mechanics approach. *J. Colloid Interf. Sci.*, 326:201-210, 2008.
[9] R.N. Wenzel. Resistance of solid surfaces to wetting by water. *Industr. and Eng. Chemistry*, 28(8):988-994, 1936.
[10] G. Wolansky and A. Marmur. Apparent contact angles on rough surfaces: the Wenzel equation revisited. *Colloids and Surfaces A*, 156:381-388, 1999.
[11] L. Gao and T.J. McCarthy. How Wenzel and Cassie were wrong. *Langmuir*, 23:3762-3765, 2007.
[12] A.B.D. Cassie and S. Baxter. Wettability of porous surfaces. *Trans. Faraday Soc.*, 40:546-551, 1944.
[13] D. Quéré. Fakir droplets. *Nature Materials*, 1:14-15, 2002.
[14] D. Quéré. Wetting and roughness. *Annu. Rev. Mater. Res.*, 38:71-99, 2008.
[15] Y. Yu, Z.-H. Zhao, and Q.-S. Zheng. Mechanical and superhydrophobic stabilities of two-scale surfacial structure of lotus leaves. *Langmuir*, 23:8212-8216, 2007.
[16] C. Lee and C.-J. Kim. Maximizing the giant liquid slip on superhydrophobic microstructures by nanostructuring their sidewalls. *Langmuir*, 25:12812-12818, 2009.
[17] Y. Su, B. Ji, K. Zhang, H. Gao, Y. Huang, and K. Hwang. Nano to micro structural hierarchy is crucial for stable superhydrophobic and water-repellent surfaces. *Langmuir*, 26:4984-4989, 2010.
[18] E. Bormashenko. Progress in understanding wetting transitions on rough surfaces. *Adv. Colloids Interf. Sci.*, in press, 2014.
[19] E. Bormashenko, Y. Bormashenko, T. Stein, G. Whyman, and E. Bormashenko. Why do pigeon feathers repel water? Hydrophobicity of pennae, Cassie-Baxter wetting hypothesis and Cassie-Wenzel capillarity-induced wetting transition. *J. Colloid Interf. Sci.*, 311:212-216, 2007.
[20] W. Barthlott and C. Neinhuis. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. *Planta*, 202:1-8, 1997.
[21] N.J. Shirtcliffe, G. McHale, M.I. Newton, G. Chabrol, and C.C. Perry. Dual-scale roughness produces unusually water-repellent surfaces. *Adv. Mater.*, 16:1929-1932, 2004.
[22] W. Barthlott, T. Schimmel, S. Wiersch, K. Koch, M. Brede, M. Barczewski, S. Walheim, A. Weis, A. Kaltenmaier, A. Leder, and H.F. Bohn. The *salvinia* paradox: Superhydrophobic surfaces with hydrophilic pins for air retention under water. *Adv. Mater.*, 22:2325-2328, 2010.

[23] D.L. Hu, B. Chan, and J.W.M. Bush. The hydrodynamics of water strider locomotion. *Nature*, 424:663-666, 2003.
[24] X. Gao and L. Jiang. Biophysics: water-repellent legs of water striders. *Nature*, 432:36, 2004.
[25] P. Ditsche-Kuru, E.S. Schneider, J.-E. Melskotte, M. Brede, A. Leder, and W. Barthlott. Superhydrophobic surfaces of the water bug *notonecta glauca*: a model for friction reduction and air retention. *Beilstein J. Nanotech.*, 2:137-144, 2011.
[26] Y. Fang, G. Sun, TQ. Wang, Q. Cong, and LQ. Ren. Hydrophobicity mechanism of non-smooth pattern on surface of butterfly wing. *Chinese Sci. Bull.*, 52:711-716, 2007.
[27] M.J. Walsch. Riblets as a viscous drag reduction technique. *AIAA J.*, 21:485-486, 1983.
[28] P. Luchini, F. Manzo, and A. Pozzi. Resistance of a grooved surface to parallel flow and cross-flow. *J. Fluid Mech.*, 228:87-109, 1991.
[29] D.W. Bechert, M. Bruse, W. Hage, J.G.T. Van der Hoeven, and G. Hoppe. Experiments on drag-reducing surfaces and their optimization with an adjustable geometry. *J. Fluid Mech.*, 338:59-87, 1997.
[30] M. Ma and R.M. Hill. Superhydrophobic surfaces. *Current Opinion in Colloid and Interf. Sci.*, 11:193-202, 2006.
[31] X. Zhang, F. Shi, J. Niu, Y. Jiang, and Z. Wang. Superhydrophobic surfaces: from structural control to functional applications. *J. Mater. Chem.*, 18:621-633, 2008.
[32] N.J. Shirtcliffe, G. McHale, and M.I. Newton. The superhydrophobicity of polymer surfaces: recent developments. *J. Polymer Science. Part B: Polymer Physics*, 49:1203-1217, 2011.
[33] R.J. Daniello. Drag reduction in turbulent flows over micropatterned superhydrophobic surfaces. Master's thesis, University of Massachusetts Amherst, 2009.
[34] C. Lee and C.-J. Kim. Influence of surface hierarchy of superhydrophobic surfaces on liquid slip. *Langmuir*, 27:4243-4248, 2011.
[35] H. Park, G. Sun, and C.-J. Kim. Superhydrophobic turbulent drag reduction as a function of surface grating parameters. *J. Fluid Mech.*, 747:722-734, 2014.
[36] F.O. Ochanda, M.A. Samaha, H.V. Tafreshi, G.C. Tepper, and M. Gad el Hak. Fabrication of superhydrophobic fiber coatings by dc-biased ac-electrospinning. *J. Appl. Polymer Sci.*, 123:1112-1119, 2012.
[37] R. Asmatalu, M. Ceylan, and N. Nuraje. Study of superhydrophobic electrospun nanocomposite fibers for energy systems. *Langmuir*, 27:504-507, 2011.
[38] F. Buatier de Mongeot, D. Chiappe, F. Gagliardi, A. Toma, R. Felici, A. Garibbo, and C. Boragno. Wetting process in superhydrophobic disordered surfaces. *Soft Matter*, 6:1409-1412, 2010.
[39] S.-H. Hsu and W.M. Sigmund. Artificial hairy surfaces with a nearly perfect hydrophobic response. *Langmuir Letter*, 26:1504-1506, 2010.
[40] S. Srinivasan, S.S. Chhatre, J.M. Mabry, R.E. Cohen, and G.H. McKinley. Solution spraying of poly(methyl methacrylate) blends to fabricate microtextured, superoleophobic surfaces. *Polymer*, 52:3209-3218, 2011.
[41] S. Srinivasan, W. Choi, K.C. Park, S.S. Chhatre, R.E. Cohen, and G.H.

McKinley. Drag reduction for viscous laminar flow on spray-coated non-wetting surfaces. *Soft Matter*, 9:5691-5702, 2013.

[42] J.E. Rodriguez, A.M. Anderson, and M.K. Carroll. Hydrophobicity and drag reduction properties of surfaces coated with silica aerogels and xerogels. *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, 71:490-500, 2014.

[43] M.A. Nilsson, R.J. Daniello, and J.P. Rothstein. A novel and inexpensive technique for creating superhydrophobic surfaces using Teflon and sandpaper. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 43:045301, 2010.

[44] D. Song, R.J. Daniello, and J.P. Rothstein. Drag reduction using superhydrophobic sanded Teflon surfaces. *Exp. Fluids*, 55:1783, 2014.

[45] G.I. Taylor. Stability of a viscous liquid contained between two rotating cylinders. *Phil. Trans. Royal Soc. London, Ser. A*, 223:289-343, 1923.

[46] C.L.M.H. Navier. Mémoire sur les lois du mouvement des fluides. *Mem. Acad. R. Sci. Inst. France*, 6:389-440, 1823.

[47] M.Z. Bazant and O.I. Vinogradova. Tensorial hydrodynamic slip. *J. Fluid Mech.*, 613:125-134, 2008.

[48] C. Huh and L.E. Scriven. Hydrodynamic model of steady movement of a solid/liquid/fluid contact line. *J. Colloid Interf. Sci.*, 35:85-101, 1971.

[49] G. Karniadakis, A. Beskok, and N. Aluru. *Microflows and Nanoflows: Fundamentals and Simulation*. Springer, 2006.

[50] J.R. Philip. Flows satisfying mixed no-slip and no-shear conditions. *J. Applied Math. Phys. (ZAMP)*, 23:353-372, 1972.

[51] C.-O. Ng and C.Y. Wang. Apparent slip arising from Stokes shear flow over a bidimensional patterned surface. *Microfluid. Nanofluid.*, 8:361-371, 2010.

[52] A.M.J. Davis and E. Lauga. The friction of a mesh-like super-hydrophobic surface. *Phys. Fluids*, 21:113101, 2009.

[53] A.M.J. Davis and E. Lauga. Hydrodynamic friction of fakir-like superhydrophobic surfaces. *J. Fluid Mech.*, 661:402-411, 2010.

[54] P. Luchini. Linearized no-slip boundary conditions at a rough surface. *J. Fluid Mech.*, 737:349-367, 2013.

[55] J. Ou, B. Perot, and J.P. Rothstein. Laminar drag reduction in microchannels using ultrahydrophobic surfaces. *Phys. Fluids*, 16:4635-4643, 2004.

[56] J. Ou and J.P. Rothstein. Direct velocity measurements of the flow past drag-reducing ultrahydrophobic surfaces. *Phys. Fluids*, 17:103606, 2005.

[57] T. Min and J. Kim. Effects of hydrophobic surface on stability and transition. *Phys. Fluids*, 17:108106, 2005.

[58] E. Lauga and C. Cossu. A note on the stability of slip channel flows. *Phys. Fluids*, 17:088106, 2005.

[59] S. Lyu, D.C. Nguyen, D. Kim, W. Hwang, and B. Yoon. Experimental drag reduction study of super-hydrophobic surface with dual-scale structures. *Applied Surface Science*, 286:206-211, 2013.

[60] H. Park, H. Park, and J. Kim. A numerical study of the effects of superhydrophobic surface on skin-friction drag in turbulent channel flow. *Phys. Fluids*, 25:110815, 2013.

[61] C. Barbier, E. Jenner, and B. D'Urso. Large drag reduction over superhydrophobic riblets. *arXiv:1406.0787v1*, 2014.
[62] R.J. Daniello, N.E. Waterhouse, and J.P. Rothstein. Drag reduction in turbulent flows over superhydrophobic surfaces. *Phys. Fluids*, 21:085103, 2009.
[63] J. Katz and J. Sheng. Applications of holography in fluid mechanics and particle dynamics. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 42:531-555, 2010.
[64] H. Dong, M. Cheng, Y. Zhang, H. Wei, and F. Shi. Extraordinary drag-reducing effect of a superhydrophobic coating on a macroscopic model ship at high speed. *J. Mater. Chem. A*, 1:5886-5891, 2013.
[65] C. Lee and C.-J. Kim. Underwater restoration and retention of gases on superhydrophobic surfaces for drag reduction. *Phys. Rev. Lett.*, 106:014502, 2011.
[66] C. Lee and C.-J. Kim. Wetting and active dewetting processes of hierarchically constructed superhydrophobic surfaces fully immersed in water. *J. Microelectromech. Systems*, 21:712-720, 2012.
[67] M.P. Schultz. Effects of coating roughness and biofouling on ship resistance and powering. *Biofouling*, 23:331-341, 2007.
[68] S. Sonak. Implications of organotins in the marine environment and their prohibition. *J. Environ. Manage.*, 90:S1-S3, 2009.
[69] K. Fukuda, J. Tokunaga, T. Nobunaga, T. Nakatani, T. Iwasaki, and Y. Kunitake. Frictional drag reduction with air lubricant over a super-water-repellent surface. *J. Mar. Sci. Technol.*, 5:123-130, 2000.

IL LASER: FULCRO DI GRANDI INFRASTRUTTURE DI RICERCA

Nota del s.c. SANDRO DE SILVESTRI (*)

(Adunanza del 27 novembre 2014)

SUNTO. – Una caratterista importante delle sorgenti laser consiste nella capacità di generare brevi e intensi impulsi di radiazione. Tale caratteristica ha stimolato la realizzazione di infrastrutture laser su larga scala principalmente dedicate alla fusione nucleare. Il presente lavoro presenta la realizzazione di una nuova infrastruttura di ricerca "Extreme Light Infrastructure" (ELI), concettualmente differente e con finalità diverse dalle precedenti. La caratteristica principale consiste essenzialmente nella produzione di potenze di picco estremamente elevate utilizzando impulsi della durata di pochi femtosecondi ed di alta energia. Focalizzando tali impulsi su di un'area delle dimensioni della lunghezza d'onda si potranno così ottenere intensità estremamente elevate, che consentiranno nuove ricerche nella fisica delle particelle, nella fisica gravitazionale, nella teoria non lineare dei campi, nella fisica delle altissime pressioni, nell'astrofisica e cosmologia.

***

ABSTRACT. – An important characteristic of the laser sources consists in the ability to generate short and intense radiation pulses. This feature has stimulated the development of large-scale laser infrastructures mainly dedicated to nuclear fusion. This paper presents the realization of a new research infrastructure "Extreme Light Infrastructure" (ELI) which has conceptually different purposes compared to the others. The main feature consists essentially in the production of an extremely high peak power by using pulses of the duration of a few femtoseconds and of high energy. Focusing these pulses over an area of the size of the laser wavelength one can achieve extremely high intensities, which will enable new research in particle physics, gravitational physics, nonlinear field theory, physics of high pressures, astrophysics and cosmology.

(*) Dipartimento di Fisica, Politecnico di Milano, Piazza L. da Vinci 32, 20133 Milano, Italy.
E-mail: sandro-desilvestri@polimi.it

1. Introduzione

L'invenzione del laser con la prima dimostrazione avvenuta nel 1960 ha inciso profondamente nello sviluppo tecnologico e scientifico grazie alla capacità di controllare la coerenza (sia spaziale che temporale) della radiazione emessa. Questa è la differenza sostanziale tra la luce emessa da una tradizionale sorgente di luce e quella emessa da un laser. Numerose sono le applicazioni della radiazione laser che parallelamente allo sviluppo delle sorgenti si sono via via affermate con successo [1] . Le lavorazioni meccaniche come il taglio, la foratura e la saldatura vengono realizzate con laser a gas, a stato solido e in fibra con efficienze e qualità superiori a quelle ottenibili mediante tecniche tradizionali. Nel campo delle comunicazioni ottiche vengono utilizzati i laser a semiconduttore, operanti alle lunghezze d'onda dell'infrarosso corrispondenti alla condizione di bassa attenuazione e minima dispersione delle fibre ottiche, che sono sorgenti ideali grazie alla loro compattezza e basso consumo energetico. Per quest'ultime caratteristiche i laser a semiconduttore sono anche utilizzati nei lettori di CD e DVD. In medicina branche come la chirurgia, la fototerapia, la fotoablazione e la diagnostica trovano nell'uso delle sorgenti laser la possibilità di nuove terapie e metodiche di indagine poco invasive. Nel settore della metrologia, l'utilizzo dei laser consente il riconoscimento selettivo e la misura della concentrazione di composti chimici con applicazioni interessanti nel monitoraggio ambientale per il controllo anche degli agenti inquinanti.

Una ulteriore importante caratteristica delle sorgenti laser consiste nella capacità di generare brevi e intensi impulsi di radiazione. Tale caratteristica ha stimolato la realizzazione di infrastrutture laser su larga scala la cui motivazione principale consisteva nelle ricerche sulla fusione nucleare via laser per la produzione di energia. In questa categoria le infrastrutture più avanzate sono rappresentate attualmente dalla "National Ignition Facility" (NIF) negli Stati Uniti e dal "Laser Megajoule" in Francia. NIF ad esempio fornisce un'energia di circa un MJ in pochi nanosecondi (1 ns=10^{-9} s) a cui corrisponde una potenza di picco di 0.5 PW. Nel 2007 è stata proposta la "Extreme Light Infrastructure" (ELI) nell'ambito della roadmap dell'European Science Forum for Research Infrastructures (ESFRI), un organismo dell'Unione Europea per il coordinamento delle infrastrutture di ricerca in Europa. Si tratta di un nuovo tipo di infrastruttura laser, concet-

tualmente differente e con finalità diverse dalle precedenti, la cui caratteristica principale consiste essenzialmente nella produzione di potenze di picco estremamente elevate con l'intenzione di raggiungere il regime sub-Exawatt, corrispondente a circa 1000 volte la potenza sviluppata da NIF e da "Laser Megajoule". Inoltre ELI sarà totalmente aperta alla comunità internazionale degli utilizzatori.

2. ELI: Impulsi laser ultrabrevi e intensi

L'idea di base per ottenere i livelli di potenza previsti in ELI, consiste nel concentrare l'energia della radiazione laser in impulsi estremamente brevi nel tempo. Questo è reso possibile grazie al continuo sviluppo di sorgenti laser in grado di produrre impulsi con durate via via più brevi dai picosecondi (1 ps=10^{-12} s) ai femtosecondi (1 fs=10^{-15} s). Il campo elettrico della luce visibile oscilla con un periodo di 2 femtosecondi, ossia 500000 miliardi di volte in un secondo. E' possibile generare impulsi di luce laser ultrabrevi in grado di contenere solo pochi cicli di oscillazione [2]. Parallelamente, lo sviluppo della tecnica di amplificazione degli impulsi, denominata "Chirped Pulse Amplification" [3] , ha consentito nel corso degli anni di poter aumentarne notevolmente l'energia. Focalizzando impulsi ultrabrevi e amplificati su di un'area delle dimensioni della lunghezza d'onda laser (pochi micrometri di diametro) sono state ottenute intensità estremamente elevate dell'ordine di 10^{22} W/cm^2 [4]. Le intensità che si vogliono raggiungere con ELI sono almeno 3-4 ordini di grandezza superiori a quelle disponibili attualmente. Tali intensità sono anche dette ultrarelativistiche poiché i relativi campi sono in grado di accelerare non solo gli elettroni ma anche gli ioni a velocità prossime a quelle della luce.

ELI vuole rappresentare un approccio completamente nuovo allo studio della fisica fondamentale basato su caratteristiche uniche, quali ad esempio:

– Il più elevato campo elettrico.
– La possibilità di controllare il moto a velocità relativistiche dei costituenti fondamentali della materia (ioni ed elettroni).
– La generazione di radiazione coerente e incoerente di alta energia come raggi X o raggi gamma.
– La possibilità di produrre gli impulsi di luce più brevi mai realizzati consentendo di superare il dominio temporale degli attosecon-

di (1 as=10^{-18} s) fino ad arrivare, in prospettiva, a quello degli zeptosecondi (1 zs=10^{-21} s).

Queste caratteristiche da sole o combinate consentono di realizzare un nuovo insieme di potenti strumenti di indagine per diverse branche della scienza. La visione a lungo termine di ELI consiste nel portare l'uso del laser in quei settori in cui era assente dando impulso a nuove aree della fisica, come ad esempio: (i) l'elettrodinamica quantistica non lineare in presenza di campi laser intensi; (ii) l'accelerazione di particelle basata sulla radiazione laser; (iii) nuovi modi di produrre radiazione a lunghezze d'onda ultracorte nella regione dei raggi X duri e gamma associata alla disponibilità di tale radiazione sotto forma di impulsi ultrabrevi. Una rassegna completa di tutta l'attività prevista per ELI sia per quanto riguarda lo sviluppo delle sorgenti e il relativo caso scientifico è riportata nel riferimento bibliografico [5].

3. ELI: Applicazioni

ELI consentirà nuove ricerche nella fisica delle particelle, nella fisica gravitazionale, nella teoria non lineare dei campi, nella fisica delle altissime pressioni, nell'astrofisica e cosmologia. Accanto alla sua missione in fisica fondamentale un importante obiettivo di ELI consiste nella generazione di fasci ultrabrevi di particelle energetiche (10-100 GeV) e radiazione (sino a qualche MeV) prodotti da compatti acceleratori laser-plasma. ELI imposterà la sua missione scientifica, tecnica e medica a beneficio dell'industria e più in generale della società. Accanto alla realizzazione della sorgente laser principale sub-exawatt, lo sviluppo di sorgenti di luce secondarie consentirà di disporre di tecnologie a raggi X per chiarire l'evoluzione temporale delle reazioni quali l'attività e il folding delle proteine, la radiolisi, il monitoraggio dei legami chimici e i processi di catalisi. Questo porterà ad una migliore comprensione e controllo di eventi chiave durante la formazione e la rottura dei legami chimici. Ci si aspetta un forte impatto sulla società e sulle nuove tecnologie per l'industria poiché questi processi giocheranno un ruolo importante nella produzione di nuovi farmaci e nel miglioramento della loro efficienza. La disponibilità di una sorgente gamma intensa e accordabile consentirà ad esempio la produzione di nuovi radioisotopi per la medicina per determinare l'efficienza della chemioterapia dei tumori e la dose ottimale per l'imaging nucleare. Nuove cop-

pie di radioisotopi per lo stesso elemento potranno rendersi disponibili, uno per la diagnostica e l'altro per la terapia, consentendo di controllare e ottimizzare il trasporto dell'isotopo attraverso il proprio elemento bio-coniugato nel tumore. Emettitori di elettroni Auger di bassa energia per una efficiente e mirata terapia tumorale potranno essere prodotti per uso clinico. La ricerca medica in questa direzione aprirà nuove prospettive per la società. Nel campo della scienza dei materiali ELI aiuterà a chiarire i meccanismi che portano alla creazione dei difetti e al deperimento dei materiali nei reattori nucleari. Occorre inoltre sottolineare che i fasci di radiazione e di particelle prodotte dai laser di ELI risulteranno perfettamente sincronizzati tra di loro per il modo con cui vengono generati dagli impulsi ottici di alta intensità. Questo consente l'uso di tecniche miste di pump-probe in un intervallo estremamente ampio di energie dei fotoni (eV-MeV) e fasci di particelle (eV-GeV) per sperimentazioni finora inedite.

In una visione a lungo termine ELI potrà diventare la più avanzata infrastruttura laser in campo internazionale per gli utilizzatori, promuovendo la scienza fondamentale e le sue applicazioni in molte aree di rilevanza sociale attraverso la disponibilità di sorgenti laser ultraintense.

4. ELI: Implementazione

La realizzazione di ELI passa attraverso tre fasi distinte. La prima fase è iniziata nel 2007 con un finanziamento da parte dell'Unione Europea di 6 M€ dedicato alla "Preparatory Phase" di ELI (ELI-PP). Si trattava di un progetto della durata di 3 anni, sostenuto da oltre 40 istituzioni di ricerca provenienti da 13 paesi europei, con il compito di portare ELI a un livello di maturità scientifica, organizzativa e finanziaria. La partecipazione italiana alla "Preparatory Phase" di ELI è stata coordinata dal CNR e dall'INFN. Durante i lavori il caso scientifico di ELI si è espanso notevolmente prendendo atto che le enormi potenzialità di ELI non potevano essere coperte da una singola infrastruttura. Nell'ottobre 2009 lo Steering Committee della "Preparatory Phase" ha dato il mandato alla Romania, Repubblica Ceca e Ungheria di implementare congiuntamente il progetto ELI attraverso la costruzione di un'infrastruttura distribuita con tre sedi coordinate e con missioni diverse: (i) applicazioni di fisica nucleare (RO); (ii) fasci di particelle

secondarie (elettroni e ioni) (CZ); (iii) impulsi ad attosecondi (HU), che rappresentano le "Grand Challenges" identificati nel caso scientifico del progetto [5]. Qui di seguito vengono sintetizzati gli obiettivi tecnologici e scientifici delle tre sedi:

– **ELI-Nuclear Physics(ELI-NP)** (Magurele, Romania): dedicata allo sviluppo di laser ultraintensi e alla generazione di fasci gamma a banda stretta e accordabili per ricerche di frontiera nell'ambito della fisica nucleare (http://www.eli-np.ro/).
– **ELI-Beamlines** (Praga, Repubblica Ceca)**:** dedicata alla generazione di pacchetti impulsivi di elettroni fino a 10 GeV, protoni fino a qualche centinaio di MeV e radiazione X fino a qualche MeV prodotta da acceleratori compatti a laser-plasma (http://www.eli-beams.eu/).
– **ELI-Attosecond Light Pulse Source (ELI-ALPS)** (Szeged, Ungheria): dedicata allo sviluppo di sorgenti laser ultrabrevi nella regione spettrale dei raggi X con durate sino al regime degli attosecondi per lo studio di dinamiche elettroniche in atomi, molecole, plasmi e solidi (http://www.eli-hu.hu/).

Le tre sedi saranno dotate di sorgenti laser multi-petawatt con caratteristiche diverse. Il costo complessivo stimato per la costruzione di ELI è pari a circa 800 M€, cosi distribuito: (i) la Repubblica Ceca (ELI-Beamlines) investirà circa 270 M€; (ii) la Romania (ELI-NP) circa 280 M€; (iii) l'Ungheria (ELI-ALPS) circa 260 M€. Il modello di finanziamento adottato per la realizzazione di ELI è del tutto pionieristico in quanto prevede per la sua quasi totalità l'utilizzo dei fondi strutturali che l'Unione Europea ha assegnato alle nazioni coinvolte. In generale i fondi strutturali vengono erogati per potenziare e sviluppare attività in regioni che necessitano la costruzione di infrastrutture. ELI rappresenta il primo caso in cui i fondi strutturali vengono utilizzati per finanziare infrastrutture di ricerca. In realtà la presenza di una infrastruttura ad alto contenuto tecnologico aperta alla comunità internazionale determina una importante ricaduta anche a livello regionale essendo di stimolo alle industrie e università sul territorio. La realizzazione dell'infrastruttura è prevista per la fine del 2018.

Al termine della "Preparatory Phase", a partire dal 2011, ha fatto seguito la costituzione di un'entità legale (ELI-DC, Delivery Consortium, http://www.eli-laser.eu/) che vede inizialmente presenti oltre ai tre stati coinvolti nella costruzione di ELI l'Italia, la Gran Bretagna e la Germania. Lo scopo di ELI-DC consiste nel: (i) coordinare l'implementazione dei tre siti garantendo la complementarietà

della loro missione; (ii) supportare l'implementazione di ELI attraverso un uso coordinato delle risorse umane e dei mezzi tecnologici e finanziari disponibili a livello europeo; (iii) definire le condizioni per l'implicazione e la contribuzione degli altri paesi dell'UE; (iv) organizzare le negoziazioni per diventare a partire dal 2018 un "European Research Infrastructure Consortium" (ELI-ERIC), entità legale creata dalla UE per facilitare la formazione di consorzi che realizzino e gestiscano infrastrutture di ricerca paneuropee di grandi dimensioni. La partecipazione delle nazioni europee ad ELI-DC si sta costituendo mediante adesioni ed espressioni di interesse a diversi livelli.

5. ELI: Partecipazione italiana

L'Italia partecipa ad ELI-DC ed ha interessi scientifici forti sia nella realizzazione sia nell'utilizzo della strumentazione presenti nelle sedi dell'infrastruttura. Gli enti di ricerca quali INFN, CNR e Elettra-ST hanno notevoli competenze in diversi settori tecnologici che riguardano le infrastrutture previste per ELI. In particolare dispongono di competenze progettuali e capacità costruttive nel settore degli acceleratori, dei sistemi laser a impulsi ultrabrevi di elevata energia, nonché nella realizzazione e nella gestione di grandi infrastrutture di ricerca aperte all'utenza internazionale. I tre Enti hanno forti connessioni tra di loro e con gruppi di ricerca universitari e contano su una qualificata capacità produttiva industriale. In particolare, l'INFN sta coordinando il consorzio EuroGammaS, che coinvolge 12 partner tra istituti e aziende europei, per la realizzazione della sorgente gamma a elevata intensità prevista per ELI-NP e collabora attivamente con ELI-Beamlines (sulla produzione di sorgenti secondarie di protoni per uso medicale). Il CNR ha attivato una collaborazione con ELI-ALPS per la progettazione e realizzazione di due beamline per l'utilizzo di impulsi ad attosecondi per applicazioni in fisica atomica e molecolare e ha anche connessioni con ELI-Beamlines per lo sviluppo di sistemi di accelerazione di particelle e strumentazione per laser di potenza. Elettra-ST ha interessi rilevanti in ELI, avendo sviluppato un vasto know-how nei sistemi per stabilizzazione, sincronizzazione e trasporto d'impulsi ultrabrevi, nell'ambito delle ottiche X-UV, nei sistemi a radiofrequenza in banda X e in generale nella diagnostica degli acceleratori. Infine per l'utilizzo futuro delle potenzialità offerte dalle sorgenti previste in ELI, vi è una forte

comunità scientifica nazionale con competenze multidisciplinari e specifiche per ciascuna delle tre sedi.

6. Conclusioni

ELI rappresenta una irripetibile occasione per la comunità scientifica internazionale e in particolare per l'Europa di poter disporre di una infrastruttura tecnologicamente avanzata nel campo delle sorgenti laser e delle relative applicazioni in diversi campi della scienza. In particolare a livello nazionale si assiste ad una importante opportunità da cogliere in quanto parte della programmazione della ricerca in atto nei tre enti nazionali convolti è indirizzata da tempo su tematiche fortemente connesse a quelle previste per ELI, ovviamente su un diverso fattore di scala. Essendo ormai entrati nella fase di implementazione di ELI e in vista dell'ampio spettro di attività di ricerca nelle tre sedi, il contributo di INFN, CNR e Elettra-ST diventa un naturale sviluppo dell'attuale contesto e assume un'importanza strategica in particolare per l'elevato valore tecnologico presente nella strumentazione da realizzare. Si renderà inoltre necessario produrre uno sforzo organico da parte dei tre enti e delle università italiane nella formazione di personale qualificato per la gestione della strumentazione operante in ELI e nella formazione della comunità degli utilizzatori.

BIBLIOGRAFIA

[1] O. Svelto*, "Principles of lasers",* 5th ed., Springer (2010).

[2] M. Nisoli, S. De Silvestri, O. Svelto, R. Szipöcs, K. Ferencz, Ch. Spielmann, S. Sartania, and F. Krausz, *"Compression of high-energy laser pulses below 5 fs"*, Opt. Lett. 22, 522 (1997).

[3] D. Strickland and G. Mourou, *"Compression of amplified chirped optical pulses"*, Opt. Commun. 56, 219 (1985).

[4] V. Yanovsky, V. Chvykov, G. Kalinchenko, P. Rousseau, T. Planchon, T. Matsuoka, A. Maksimchuk, J. Nees, G. Cheriaux, G. Mourou, and K. Krushelnick, *"Ultra-high intensity- 300-TW laser at 0.1 Hz repetition rate"*, Opt. Express 16, 2109 (2008).

[5] ELI White Book, "*Science and Technology with High Intensity Lasers"*, ed. by G. Mourou and G. Korn, http://www.eli-beams.eu/wp-content/uploads/2011/08/ELI-Book_neues_Logo-edited-web.pdf

L-TIROSINA: ANIMALE O VEGETALE?

Nota del m.e. CLAUDIO FUGANTI (*)

(Adunanza del 18 dicembre 2014)

SUNTO. – Viene presentato uno studio che dimostra come sia possibile avere indicazioni circa la natura animale o vegetale della dieta seguita da un animale mediante la determinazione dell'abbondanza isotopica dell'ossigeno 18 nell'ossidrile fenolico della tirosina, estratta da fonti proteiche provenienti dall'animale stesso.

***

ABSTRACT. – An investigation has been carried out to show how it is possible to collect information on the animal or vegetal nature of the diet of a certain animal, by determining the O^{18} isotopic abundance of the OH group of tyrosine samples extracted from proteins obtained from the animal itself.

Nel 1994 venne il sospetto che il morbo della mucca pazza potesse essere trasmesso fra i ruminanti attraverso la somministrazione, come fonte proteica, di farine di carne e di ossa animali. Nel dicembre 2000 la Commissione Europea vietò l'uso di questi prodotti nella dieta, specie dei vitelli. Da allora, la maggior parte di queste farine animali viene bruciata in centrali termiche e nei cementifici, ma è anche possibile usarle come fertilizzante organico. Allo stesso tempo è stato allestito un sistema efficiente di controllo della presenza dei prioni come agenti induttori della malattia operando sull'animale macellato.

(*) Dipartimento di Chimica del Politecnico di Milano, Italy.
E-mail: mariaelisabetta.brenna@polimi.it

Tuttavia, non sono disponibili metodi analitici in grado di stabilire se un animale è stato alimentato, in violazione del divieto, con proteine animali. Si ipotizzò che metodi isotopici potessero essere utili allo scopo e lo studio della composizione isotopica dell'ammino acido *L*-tirosina apparve il più indicato. Questo amminoacido aromatico non è essenziale per gli animali che lo possono sintetizzare dall'amminoacido *L*- fenilalanina per ossidrilazione in posizione *para*. E' stato altresì dimostrato[1] che nell'uomo l'intrinseca ossidrilazione della fenilalanina è inversamente proporzionale alla quantità di tirosina presente nella dieta (*Fig. 1*).

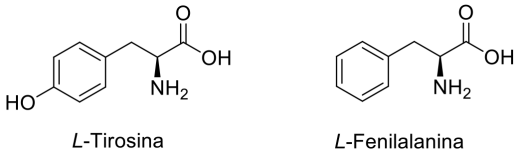


Fig. 1.

Pertanto, la *L*-tirosina nelle proteine animali deriva in parte dalla dieta e in parte dall'autoproduzione dalla *L*-fenilalanina. In *Fig. 2* è riportato lo schema biosintetico di formazione nelle piante della *L*-tirosina e della *L*-fenilalanina. Composto chiave è l'acido arogenico che per decarbossilazione ossidativa dà luogo al primo amminoacido. Quando invece assieme ad una molecola di anidride carbonica viene persa una molecola d'acqua si ha la *L*-fenilalanina. Gli animali sono in grado di ossidrilare la fenilalanina, sintetizzando così la tirosina. Le piante non hanno questa capacità enzimatica, ma sono in grado di ossidrilare in posizione *para* l'acido cinnamico (con l'ausilio di enzimi del tipo P-450) che, a sua volta deriva dalla *L*-fenilalanina per eliminazione degli elementi dell'ammoniaca, assistita dall'enzima fenilalanina-ammonia-liasi (PAL). E' altresì noto che il sistema enzimatico che negli animali assiste l'ossidrilazione in *para* della fenilalanina è lo stesso che nelle piante catalizza l'ossidrilazione dell'acido cinnamico. A proposito delle trasformazioni ora nominate è essenziale osservare che l'ossigeno in posizione *para* della tirosina generata dall'acido arogenico nelle piante deriva, via eritrosio fosfato, dall'acqua delle foglie mentre quello presente nella stessa posizione ed introdotto nella fenilalanina per ossidrilazione diretta proviene dall'ossigeno dell'aria.[2]

La distribuzione degli isotopi stabili di una specie atomica costituente un composto organico non è statistica, ma dipende piuttosto dal modo in cui questo è stato formato. In particolare, l'ossigeno possiede

gli isotopi 16 (99,762%), 17 (0,038%) e 18 (0.200%). Il presente studio mostra che la determinazione dell'abbondanza isotopica dell'ossigeno 18 (O^{18}) nell'ossidrile fenolico della tirosina estratta da fonti proteiche definite è utile ai fini dell'identificazione dell'origine animale (autoproduzione) o vegetale dell'amminoacido da cui derivano indicazioni sulla dieta seguita dall'animale.

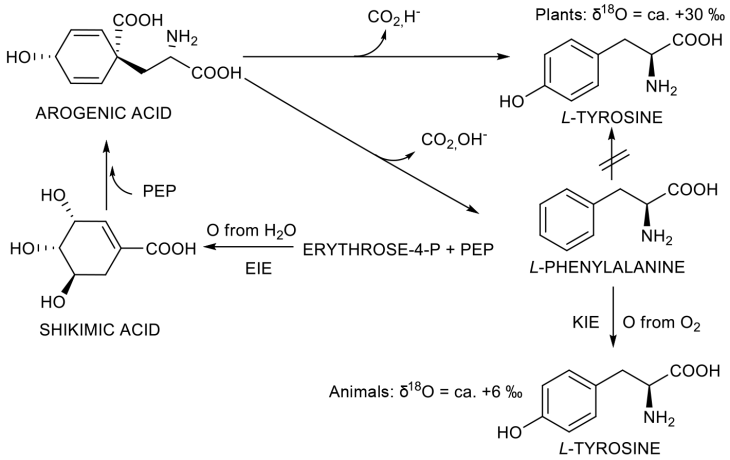


Fig. 2 – Biosintesi della Tirosina.

Le tre fonti primarie di ossigeno per i composti organici (anidride carbonica, ossigeno atmosferico e acqua) posseggono i seguenti arricchimenti in ossigeno 18 ($\delta^{18}O‰$), rispetto all'acqua dell'oceano presa come standard. CO_2 = + 40.3‰ - +42.5‰; O_2 = + 23.5‰ - +23.8‰ e H_2O = - 10‰ - 0‰, ove

$$\delta^{18}(‰)_{smow} = \{[(^{18}O/^{16}O)_{campione}/(^{18}O/^{16}O)_{smow}] - 1\} \times 1000$$

smow = standard mean ocean water

E' stato dimostrato[3] che nelle piante l'ossidrile in *para* della tirosina, conservato dall'acido arogenico, deriva dall'acqua delle foglie con valori attesi di $\delta^{18}O$ = + 27‰ - + 30‰. Questa circostanza si realizza a causa di un effetto isotopico di equilibrio durante la costruzione dell'eritrosio fosfato nei primi stadi della biosintesi. Invece, l'ossidrile in *para* della tirosina sintetizzata dalla fenilalanina deriva dall'ossigeno dell'aria, che pos-

siede $\delta^{18}O$ = + 23.5‰. L'enzima che catalizza l'ossidrilazione della fenilalanina negli animali è lo stesso che assiste la introduzione dell'ossidrile in *para* dell'acido cinnamico. In questa operazione si verifica un effetto isotopico cinetico. E' stato dimostrato che l'ossigeno in *para* dell'anello aromatico di composti quali il raspberry ketone e la vanillina, formati nelle piante per ossidrilazione in *para* dell'anello aromatico dell'acido cinnamico, possiede valori di $\delta^{18}O$ compresi fra + 5.8‰ e + 7‰.[4]

Ciò premesso, ci si attende quindi che la tirosina 'vegetale' possegga valori di $\delta^{18}O$ per l'ossidrile fenolico intorno a + 27‰ - + 30‰ mentre quella 'animale' fra + 6‰ e + 7‰. Nel caso in cui ci sia stato da parte dell'animale assunzione di tirosina prevalentemente dalla dieta vegetale, con poca o nessuna autoproduzione dalla fenilalanina, si attendono valori elevati di $\delta^{18}O$. Questi valori scenderanno se l'animale si è 'autoprodotto' l'amminoacido per ossidrilazione della fenilalanina con ossigeno atmosferico.

Per verificare questa ipotesi si è degradata la tirosina a dare 3-(4-metossifenil)-1-cloropropano (*p*-$CH_3OC_6H_4CH_2CH_2CH_2Cl$), che ritiene come unico ossigeno quello in posizione *para* (*Fig. 3*) e si sono determinati i valori di $\delta^{18}O$ di un set di materiali identici derivati da campioni di tirosina di differenti origini. I risultati sono elencati in *Tab. 1.* Questa comprende anche i valori di $\delta^{18}O$ relativi all'ossigeno in *para* della vanillina (che ci si attende sia lo stesso della tirosina completamente 'animale' ottenuta in vivo dalla fenilalanina) e quelli del derivato monoossigenato ottenuto dal tirosolo (*p*-$HOC_6H_4CH_2CH_2OH$), metabolita della tirosina isolato dal *Ligustrum ovalifolium* raccolto nelle vicinanze di Brescia (corrispondente al valore di una tirosina totalmente 'vegetale').

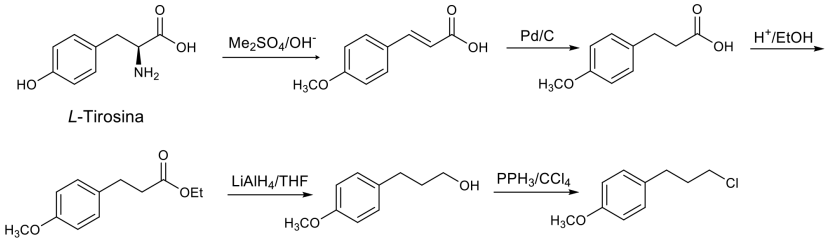


Fig. 3 – Degradazione della tirosina a composto mono ossigenato.

Fra i campioni commerciali di tirosina (3-7) di origine non definita si osservano valori compresi fra + 19.6‰ e + 27.5 ‰ - + 31.5‰ (campioni 7 e 3). Questi numeri sono simili come grandezza a quelli del tirosolo dal vegetale *Ligustrum ovalifolium* (+ 26.2‰). Questo ultimo valo-

re sperimentale dovrebbe essere corretto a + 30.2‰ se si ipotizza che il valore di $\delta^{18}O$ dell'acqua del suolo della zona di Brescia sia analogo a quello di Milano (*ca.* - 7‰). Molto interessanti, tuttavia, appaiono i dati relativi ai tre campioni di tirosina 8, 9 e 10. In particolare, i valori scendono dal primo campione (n 8) (caseina vaccina $\delta^{18}O$ = + 23.5‰) al terzo (n 10) (capelli umani δ^{18}= = + 17.8‰) passando per il terzo (piume di gallina $\delta^{18}O$ = + 19.8‰). I valori quindi scendono da quello del tirosolo e si avvicinano a quello della vanillina (rappresentativo di una tirosina idealmente tutta 'animale').[5]

Tab. 1 – Origine dei composti aromatici e valori di $\delta^{18}O$ dell'OH fenolico in posizione para.

COMPOSTO	**ORIGINE**	**$\delta^{18}O$**
1. Vanillina	*Vanilla planifolia*	+ 5.8
2. Acido gallico	*Rhus sp.*	+ 29.8
3. Tirosina	*Commerciale, Aldrich*	+ 31.5
4. L-Tirosina	*Commerciale, Fluka*	+ 22.7
5. L-Tirosina	*Commerciale, Merck*	+ 23.7
6. L-Tirosina	*Commerciale, ignota*	+ 19.6
7. D,L-Tirosina	*Commerciale, Fluka*	+ 27.5
8. L-Tirosina	*Da idrolisi caseina*	+ 23.5
9. L-Tirosina	*Da piume di gallina*	+ 18.9
10. L-Tirosina	*Da capelli umani*	+ 17.8
11. Tirosolo	*Sintetico, Janssen*	+ 18.6
12. Tirosolo	*Ligustrum ovalifolium*	+ 26.2
13. 2,3,5-Trimetil fenolo	*Sintetico, Merck*	+ 9.5

Nella *Fig. 4* sono correlati i valori di $\delta^{18}O$ dei campioni di origine nota 8, 9 e 10 con i valori + 6‰ e, rispettivamente, + 30‰ corrispondenti alle due tirosine completamente 'animali' e, rispettivamente, 'vegetali'. In questo modo appare che la tirosina di origine 'vegetale' sia presente per il 73% nella caseina, per il 54% nelle piume di gallina e, infine, per il 49% nei capelli umani.

Il lavoro di caratterizzazione isotopica della tirosina e dei prodotti correlati sopra riportato è stato successivamente sviluppato dal prof. H.-L- Schmidt e collaboratori che hanno caratterizzato dal punto di vista isotopico la tirosina attraverso due modi di degradazione a prodotti che contengono solo l'ossidrile fenolico, basati su degradazioni enzimatiche sofisticate. In un caso, usando l'enzima che degrada la tiro-

sina a fenolo, piruvato e ammoniaca si è ottenuto il fenolo, analizzato come tribromo derivato.

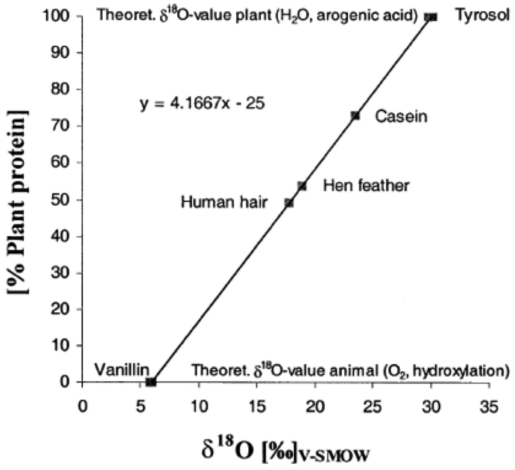


Fig. 4.

Alternativamente, si è trasformata la tirosina mediante l'uso della tirosina decarbossilasi in tiramina, analizzata come tale. I valori di $\delta^{18}O$ ottenuti su un set di campioni molto variegato (*Tab. 2*) e riportati nella *Fig. 5* permettono, comparando i valori di $\delta^{18}O$ di tirosina dai muscoli di carnivori quali il coccodrillo, il cane e il gatto, con quelli di erbivori di concludere che se i valori di $\delta^{18}O$ sono inferiori a + 19.5‰ c'è alta probabilità che l'animale sia stato alimentato come un 'carnivoro'.[6]

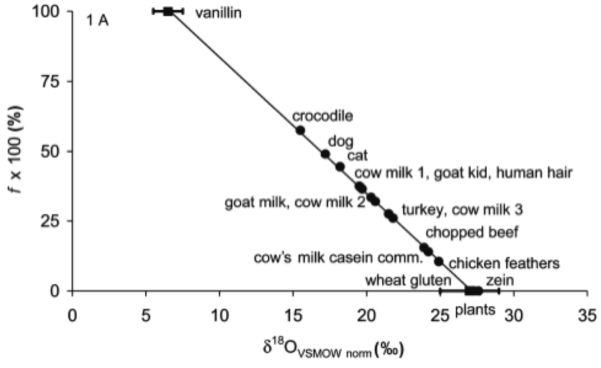


Fig. 5.

Tab. 2 – Valori di $\delta^{18}O$ dell'ossidrile fenolico della tirosina proteica di diverse origini.

Proteina	**Storia dietetica**	**$\delta^{18}O$**	**F x 100**
Glutine di grano		+ 27.3	
Zeina		+ 27.6	
Carne macinata	Sconosciuta	+ 23.9	15.5
Caseina commerc.	Sconosciuta	+ 24.2	14.0
Caseina 1 (mucca)	Erba	+ 19.2	37.5
Caseina 2 (mucca)	Erba, fieno	+ 20.6	32.0
Caseina 3 (mucca)	Grano, insilato	+ 21.8	26.0
Caseina (capra)	Erba, fieno	+ 20.3	33.5
Capretto (muscolo)	Solo latte di capra	+ 19.7	3 6.5
Tacchino (muscolo)	Sconosciuta	+21.5	27.5
Piume di gallina	Sconosciuta	+ 24.9	10.5
Capelli umani	Sconosciuta	+ 19.6	27.0
Cane (muscolo)	Sconosciuta	+ 17.2	49.0
Gatto (muscolo)	Sconosciuta	+ 18.2	44.4
Coccodrillo (muscolo)	Carne di manzo	+ 15.5	57.5

[$f = (27 - \delta^{18}O_{norm}) / 20$].

BIBLIOGRAFIA

1. Thorpe, J.M., Roberts, S.A., Ball, R.O., Pencharz, P.B. *Metabolism*, **2000**, *49*, 444-449.
2. Haslam, E. Shikimic Acid, metabolism and metabolites Wyley & Sons, Chichester 1993.
3. Schmidt, H.-L., Werner, Rossman, A. *Phytochem*., **2001**, *58*, 9-32.
4. Fronza, G., Fuganti, C., Pedrocchi-Fantoni, G., Serra, S., Zucchi, G., Fauhl, C., Guillou, C., Reniero, F. *J. Agric. Food Chem*., **1999**, *47*, 1150-1155.
5. Fronza, G., Fuganti, C., Schmidt, H.-L, Werner, R. *Eur. Food Res. Technol.,* **2002,** *215*, 55-58.
6. Tanz, N., Werner, R., Eisenreich, W., Schmidt, H.-L. *J. Agric. Food Chem*., **2011**, *59*, 9475-9483.

Istituto Lombardo (Rend. Scienze) 148, 285-322 (2014)

EINSTEIN AND BESSO: FROM ZÜRICH TO MILAN

CHRISTIAN BRACCO (*)

Nota presentata dal m.e. Andrea Silvestri
(Adunanza del 18 dicembre 2014)

SUNTO. – Il periodo milanese che va dal 1896 al 1901 è un periodo chiave per capire gli anni di formazione di Albert Einstein. Studente presso l'*ETH* di Zurigo tra il 1896 e il 1900, egli si ricongiunge regolarmente con la sua famiglia residente a Milano e che presta lavoro già da molti anni nello sviluppo dell'energia elettrica nell'Italia del nord. Tra il 1899 e il 1901 vi ritrova l'amico e collaboratore Michele Besso, conosciuto a Zurigo. Dal punto di vista della relazione Einstein-Besso, il periodo milanese che va dal 1899 al 1901 prefigura quello di Berna che comincia nel 1904, anno in cui i due amici si ritroveranno nell'Ufficio Brevetti. Al fine di precisare il contesto in cui si inquadra il loro incontro metteremo in evidenza i legami delle loro rispettive famiglie con l'ambiente dello sviluppo elettrico e delle scuole politecniche di Zurigo e Milano. Il lato materno della famiglia di Michele, relativamente ignorato fino ad ora, occupa un posto importante tramite Vittorio Cantoni, ingegnere in capo presso la prima linea di trasporto di corrente alternata in Italia, fra Tivoli e Roma, e che fino ad ora non era stato identificato come uno zio materno di Michele. Ma anche tramite Giuseppe Jung, professore di matematica al *Politecnico* di Milano, con il quale Einstein è rimasto in contatto diversi anni. Mostreremo ugualmente che Einstein, che abita in un celebre palazzo milanese del centro città, lavora nella ricca biblioteca scientifica dell'*Istituto Lombardo, Accademia di Scienze e Lettere*, situato nel palazzo *Brera*, a 500 metri dal suo domicilio. Il fatto di connettere con il fondo di questa biblioteca osservazioni scientifiche che appaiono nella corrispondenza di Albert Einstein offre una luce nuova sul suo lavoro ed in particolare sulla sua prima tesi.

***

(*) SYRTE, Observatoire de Paris, PSL Research University, CNRS, Sorbonne Univ., UPMC Univ. Paris 06, LNE, 61 avenue de l'Observatoire, 75014 Paris, France. E-mail: cbracco@unice.fr

ABSTRACT. – The 1896-1901 Milanese period is a key one to understand Einstein's training background. When he was a student at the ETH in Zürich (the Swiss Federal Polytechnic in Zürich) from 1896 to 1900, he would make regular trips back to Milan to stay with his family who was involved in the development of the electricity industry in northern Italy. Between 1899 and 1901, he would meet his faithful friend and collaborator, Michele Besso in Milan on a regular basis. Given their relationship, the 1899-1901 Milanese period therefore foreshadowed the Bern period. In order to specify the circumstances under which Einstein and Besso got the chance to meet, we will show that their respective families did have interconnected social networks, especially through the electricity sector and the polytechnic engineering Universities of Zürich and Milan. The branch of the Cantoni family, on Michele's mother's side, rather ignored by now, played a crucial role: with Vittorio Cantoni, a renowned electrical engineer who had not been previously identified as being Michele's uncle, and Giuseppe Jung, professor at the Milan *Politecnico*. We will also show that when staying in Milan, Einstein, who lived in a well-known Milanese palace in the heart of the city, worked in the nearby rich library of the *Istituto Lombardo, Accademia di Scienze e Lettere* in Brera. The linkage between the scientific observations which can be found in Einstein's correspondence and this library collection sheds new light on his scientific work, in particular on his original thesis.

1. INTRODUCTION

To date, there have been many biographies of Albert Einstein (1879-1955) (Reiser 1931; Franck 1947; Seelig 1956; Pais 1982; Pyenson 1985; Fölsing 1997, etc.). In addition, several letters from Einstein to his close friends have been released, in particular his letters to his friend Michele Besso, *Albert Einstein, Michele Besso: Correspondence: 1903-1955*, published by Pierre Speziali (Speziali 1979), referred to as EB in what follows, and his letters to Mileva Marić written between 1897 and 1902, published by Jürgen Renn and Robert Schulmann (Renn 1992). Today, the Collected Papers of Albert Einstein documentary edition consists of thirteen volumes and covers the 1879 to 1924 period.[1] The first volume, published by John Stachel (Stachel 1987), referred to as *CP* 1 in what follows, focuses on the 1879 to 1902 period. Among other things, it contains Einstein's letters to his friends Conrad Habicht and Marcel Grossmann, those sent to the professors with whom he applied for an assistant position and Mileva Marić's letters to her friend Helena Savić. His correspondence with

[1] This edition has been carried out under the *Einstein's papers project* from the *California Institute of Technology* and *Princeton University*, with the archives of the Hebrew University of Jerusalem.

Mileva whom he married in 1903, can also be found in this first volume. Even today it still remains the main source for documentation providing an overview of Albert Einstein's scientific concerns between 1898 and 1902.

It may be recalled that Albert Einstein entered the ETH[2] in Zürich in October 1896 and graduated in 1900. He then started to complete a first thesis on molecular forces with Professor Alfred Kleiner from the University of Zürich. What is less well known perhaps is that during that same period he spent in Switzerland, Einstein went to Milan during school holidays, for about three months a year, until 1901. During the 1899-1901 period, these stays in Milan took on special importance, since he would meet his friend Michele Besso there, an engineer with whom he would discuss scientific issues almost on a daily basis. The latter was six years older than Einstein. Einstein had met him in Zürich a few years before. Besso, who graduated from the ETH Zürich in 1895, settled in Milan in 1899 where he stayed until October 1901. It was only in January 1904 that they were brought together again in Bern where Einstein was appointed to his first position at the Patent Office as soon as 1902. The 1899-1901 Milanese period which has hitherto been underestimated or ignored altogether, is therefore of particular importance as it foreshadowed the Bernese periode.

The development of Einstein's ideas is closely related to his friendship with Besso, in particular in Milan between 1899 and 1901, in Bern as from 1904 and in Zürich in 1913. In June 1905, in the acknowledgements of his ground-breaking paper concerning the theory of special relativity, Einstein wrote: *"In conclusion, let me note that my friend and colleague M. Besso steadfastly stood by me in my work on the problem discussed here, and that I am indebted to him for several valuable suggestions."* Later on in 1922, during an impromptu lecture at Kyoto University, while looking back at this period, he said: *"By chance, a friend of mine* [Besso] *living in Bern (Switzerland) helped me* […] *I had various discussions with him. Through them it suddenly dawned on me"* (Einstein 1982). For his part, Besso recalled his presence near Einstein at key moments. For example, in July 1941, at the end of his letter, he alluded to the theory of relativity and commenting on Einstein's quote

[2] Eidgenössische Technische Hochschule (Polytechnikum).

"all this can only be conceived by the very person who experienced it" taken from *The World As I See It,* he wrote: *"In writing this, I do in fact have the feeling I'm falling back into childhood … 1898, and early 1904, by your side…"* (EB L. 139).[3] In 1947, he noted: *"On my side, I was your public in the years 1904 and 1905; in helping you to edit your communications on the quanta I deprived you of a part of your glory, but, on the other hand, I made a friend for you in Planck"* (EB L. 92). Finally, concerning general relativity, at the end of a letter sent to his aunt Ernesta on June 13th 1913,[4] Besso wrote: *"I will return there [to Zürich] to watch my friend Einstein struggle with the great Unknown: the work and torment of a giant, of which I am the witness - a pygmy witness - but a pygmy witness endowed with clairvoyance."*[5]

In order to gain a better understanding of Albert Einstein's Milanese period and his ties with Michele Besso, the professional and family circumstances under which these two friends got the chance to meet need to be clarified. First we will focus on the bonds the Einstein family fostered with the electrical engineering sector, which played a crucial role in Albert's early career. We will also see that the Einstein family had influential contacts in both scientific and political Italian circles. Concerning the Besso family, we will complete the biography provided by Speziali, with a few specifics concerning the paternal branch and additional information concerning the maternal branch, *i.e.* the Cantoni branch. This way, we will see that the engineer Vittorio

---

[3] The dotted lines are from Besso.

[4] Marco Besso Foundation, Largo Torre Argentina, 11, 00186 Rome, Italy. This letter is not reported in the *Collected Papers of Albert Einstein*. This is the only letter left in the correspondence between Michele and Marco. Michele was then working together with Einstein on writing a manuscript consisting of some forty pages and dealing with the calculations of the perihelion precession of Mercury, based on the gravitation theory developed by Einstein in his paper with Grossmann (Sauer 2014).

[5] The full paragraph reads in Italian: *"Tra giorni, credo, rivedrò i miei, rivedrò a Triese il caro zio e se i medici lo permetteranno (non ho veramente motivi di dubitarne), ritornerò qua, ad assistere alla lotta dell'amico Einstein col grande Ignoto: opera e tormento da gigante, a cui assisto da pigmeo, ma da pigmeo veggente"*. In a now famous quote, Seelig reported: *"Later Besso, who for a few terms taught the fundamentals of patents* [in 1916] *at the FIT* [ETH Zürich], *used the following analogy: Einstein the eagle has taken Besso the sparrow under his wing. Then the sparrow fluttered a little higher". "I could not have found a better sounding-board in the whole of Europe", Einstein remarked when the conversation turned one day to Besso"* (Seelig 1956 p 71).

Cantoni, in charge of carrying out the first transmission line of alternate current in Italy between Tivoli and Rome in 1892, was an uncle of Michele's. We will also see that the tie between Albert Einstein and Guiseppe Jung, Michele's maternal uncle through marriage, lasted several years. Finally once again, we will dwell on the letters sent to Mileva, in order to show that when in Milan, Einstein studied in the library of the *Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere*, where he was able to find all the science journals he needed for his research, in particular for his doctorate dissertation.

2. The Einstein family business, the electrical engineering sector and the Polytechnic schools

The history of the Einstein family is well known, in particular thanks to the numerous biographies about Albert Einstein. Nevertheless, there are still two points we must look more closely at. The first point concerns the 1891 Frankfurt electrical engineering exhibition during which the Einsteins probably established direct contact with Heinrich Friedrich Weber, Albert's professor-to-be at the ETH in Zürich. The second point concerns the ties between the Einstein family and high-ranking individuals from the fields of industry and politics in northern Italy, which led them to move to Milan as from 1894.

2.1 The 1891 Frankfurt electrotecnical exhibition, Weber, and Albert heading off for the ETH in Zürich

Albert's uncle, Jakob Einstein (1850-1912) graduated from the Stuttgart Polytechnic School in 1869. As soon as 1879, he became a member of the polytechnic engineers association in Munich, which enabled him to be in touch not only with other engineers concerning technical issues but also with representatives of large companies. The polytechnic school community played an important role for the Einstein family. Jakob was the one who got his elder brother Hermann (1847-1902) - Albert's father - involved in the creation of an electrical engineering company in Munich in 1885, the Elektrotechnische Fabrik J. Einstein & Cie, which employed up to two hundred people. Jakob held seven patents, relating in particular to arc lamps and electrical strain gauges. The history of the Einsteins' Munich-based company,

viewed within the evolving context of electric companies in Germany, has been told by Nicolaus Hettler in his PhD thesis (Hettler 1996); specific information has also been given by Pyenson (Pyenson 1982).

It is worth noting that the Einsteins took part in the 1891 Frankfurt electrical engineering exhibition. They provided lighting for a number of public places: Milani café, beer shed, labyrinth and shooting range (Steen 1891). They had a stand to present their company which manufactured arc lamps and filament lamps, but also dynamos to generate on-site electricity (fed by steam or gas). Their company was also active in the transmission of electrical current for the supply of DC machines and public lighting. In addition, it produced all kinds of electrical devices. A first conference - a political one - took place in Frankfurt from 27th to 29th August to deal with the situation of municipal lighting and the long-distance electrical power transmission system in Germany. A second conference - a scientific one - followed from 7th to 12th September, with 600 delegates, a third of whom were foreigners. Pyenson mentions that Jakob made a presentation there, along with twenty other participants, which *"described the electrical distribution system that the company had set up in the Munich quarter of Schwabing, as well as in the small, northern Italian towns of Varese and Susa"* (Pyenson 1982, p 45).

The Frankfurt Exhibition is famous for the inauguration in August 1891 of the first transmission line (178 km) of alternate current in Europe, from Lauffen am Neckar to Frankfurt. A commission (Prüfungskommission) met there, to compare the electrical systems and devices displayed at the exhibition. It was chaired by the famous German physicist Hermann von Helmholtz, and composed of nine groups. At the origin, it was spurred on by Frankfurt elected officials in 1887, because they wanted to be able to choose between the various electrical lighting systems proposed to the town council.[6] The 1891 commission report appeared in the *Bericht über die Arbeiten der Prüfungs-Kommission* (Offizieller Bericht 1894). The Einsteins' arc lamp system was tested in a comparative study, together with five other systems, by group II dedicated to lighting engineering (p 130-156). As for Heinrich Friedrich Weber, he was in charge of group IX concerning

[6] Proposals mainly based on the DC power supply lighting were opposed by other proposals backing the AC one (Hettler 1996).

the transport of energy between Lauffen and Francfort. Within the Prüfungskommission, Weber was therefore aware of the Einsteins' lightning system. He might even have heard Jakob speak during a lecture, and might have known him as well through papers about his patents which had been published in the electrical engineering journals. A bond, perhaps a direct one, might therefore have been created as soon as October 1891 between Weber, Professor of Experimental Physics at the ETH in Zürich and the Einsteins.

This assumption could be confirmed by two elements concerning Albert Einstein's life as a young man. First, after Einstein failed to enter the ETH in Zürich in October 1895 (at the age of sixteen and a half years), an editorial note in the *CP* 1 specified that he was nevertheless given permission to attend Prof. Weber's lectures *"Yet* [Einstein] *must have done well on the scientific part [of the exam], since physics professor H. F. Weber gave Einstein permission to attend his lectures if Einstein stayed in Zürich"*, which was not allowed under regulation, as specified in note 8 (*CP* 1, p 11). This informal proposal might confirm the existence of a bond between the Einstein family and Weber, or that Galileo Ferraris interceded with Weber, in response to the *"piccola raccomandazione privata"* ("*short private recommendation*") Einstein had asked him on 12th August 1895 to the attention of the latter.[7] Second, Fölsing makes it clear that Jakob played a part in Albert's decision to enter the ETH in Zürich and underlines the fact that his books of geometry do appear in the library of Albert Einstein who annotated them (Fölsing n. 34, §2). Thus, Albert's demonstration of a mathematical theorem on the developable quality of a cylindrical surface is dated 1891-1895 by the publishers on the basis of *"Einstein's assertion that he started to study plane geometry at the age of twelve [1891]… He never took a course in solid geometry, but the subject was among the required topics of the ETH entrance exam, which he took in 1895"* (*CP* 1 Doc. 3). The prospect of Einstein

[7] This request from Einstein appeared in a letter which belongs to the Galileo Ferraris archives in Milan, discovered by Andrea Silvestri, professor at the Milan *Politecnico* and at the time manager of the school's historical records. Published on 27th November 2005 as a Sunday supplement to Sole-24 Ore the Milanese newspaper, it was reprinted in the *Politecnico's* paper to pay tribute to Einstein on 1st December 2005, along with a note by Andrea Silvestri (Silvestri 2005). This letter is signed *"Alberto Einstein, presso* [from the] *Ing. Einstein Garrone, Pavia."*

entering ETH Zürich may have arisen as soon as 1891 at the Frankfurt Exhibition when Albert was only 12 years old.

2.2 The Einsteins moving to Milan and Pavia

In 1891, the Einsteins had been turned towards Italy for a few years already (Pyenson 1985; Hettler 1996), since they had among other things carried out the lighting for the town of Varese in 1887. Their leaving Munich for Italy was a decision Jakob made, as Maja, Albert 's sister, remembered it. Jakob had established contacts with engineers from the Turin or Milan polytechnics and with high-ranking individuals from the fields of politics and industry so as to make it possible for the Munich company to be transferred to Pavia and Milan. According to Pyenson, their leaving Munich had been prompted by contract losses in the town lighting system in 1893. It had also been caused by the crisis affecting electricity companies in Germany and by the wave of restructuring that followed, as deemed by Hettler. At the same time, new opportunities had come up in Italy. Indeed, the industry in the north of the peninsula (Piedmont and Lombardy) started to turn to Germany to purchase industrial equipment, as war over the tariff issue had been raging against France. The Italian State, who was quickly developing the country's infrastructure in the road and rail transport sectors on credit, was looking for investors. Italy turned to Germany and Switzerland for its financing (Milza 2014). The Einsteins' company which settled in Italy as from 1894, can be considered as a case study of this period.

Albert Einstein, who was then a fifteen-year old boy, joined his family in Milan in December 1894. He left the Luitpold Gymnasium on his own initiative, and thus stopped attending school for the rest of the year. He was not left on his own though as he seemed *"occasionally even to have helped in Uncle Jakob's design office"* (Fölsing 1997, p 35). This is probably when young Albert became familiar with scientific journals: the weekly German journal *Elektrotechnische Zeitschrift* and the French journal *La lumière électrique.* Jakob whose name appeared in these journals must have them in his design office: they contained market news, calls for tenders, exhibitions, patents, recent book reviews, technical data, drawing boards of electrical systems, etc. They can also be found in all the Polytechnic Universities Schools. In Italy, *Elettricità*, a Milanese journal and *Elettricista*, a

Florentine one, supplemented the German and French journals. The French journal - four volumes of six hundred pages every year - served as a benchmark at the time and it was unique insofar as it presented electrodynamic theories (Maxwell, Hertz, Helmholtz, etc.) through lectures intended for engineers.[8] This is most likely the first time Albert had the opportunity to come into contact with electricity and electromagnetism, from the theoretical and applied angles. It seems he wrote one first paper in summer 1895, while preparing his entrance exam to ETH Zürich, entitled *"On the investigation of the state of the ether in a magnetic field"* (*CP* 1 Doc. 5). This paper he told his uncle César Koch about, confirms the fact that in doing some reading, he had become quite familiar with this subject.

After leaving Munich, the Einsteins settled in Milan in the autumn of 1894 at the *Palazzo Ricordi*, 2 via Berchet, located at the corner of via Ugo Foscolo (*CP* 1, liii n. 19), just steps away from Milan Cathedral. They would divide their time between Milan and Pavia, where their new factory had just been completed.[9] In March 1894, they became partners with the engineer Lorenzo Garrone in order to set up the *Officine Elettrotecniche Nazionali Einstein, Garrone e C.* registered with the Pavia Chamber of Commerce. This company designed *"dynamos, electric DC and AC engines, arc lamps, voltmeters and ammeters, manual and automatic regulators, switches, metering devices, long distance transmission of electricity, etc."* and employed eighty people.[10] At the beginning of 1895, they moved to Pavia, via Ugo Foscolo, where Hermann rented the house of the renowned poet (*CP* 1, liv n. 20) while obviously keeping his 2 via Berchet address in Milan for the company's office.[11] In 1896, the company had an office in Milan at 41 via Manzoni in the *Borromeo-d'Adda* Palace located six

[8] As for example the papers of some forty pages that Camille Raveau devoted to Helmholtz's work, as part of *Recherches récentes sur la théorie électromagnétique de la lumière* (Raveau 1893) (Recent Research on the Electromagnetic Theory of Light) published within three months. In particular, a paper concerning Helmholtz' Least Action Principle in electrodynamics follows a paper presenting Jacob's arc lamps device (p 320).

[9] Information about Einstein's life in Italy is given in (Silvestri 2005) and (Fregonese 2005), as well as a detailed bibliography.

[10] http://www.pv.camcom.gov.it/index.phtml?Id_VMenu=568

[11] As confirmed by the address on the company card that was enclosed to the letter Albert Einstein sent to Ferraris (Silvestri 2005).

hundred feet from the *Politecnico* (located at *Piazza Cavour* at the time), and offices in Pavia and Turin, as indicated in the catalogue whose cover was reprinted in (Bevilacqua 2005). Following some problems which arose in Pavia concerning the purchase of a concession to use water from the *Ticino River* and contracts for the lighting of private buildings (Bevilacqua 2005), the company was absorbed in September 1896 by the *Carlo Monti e C.*,[12] which had been registered at the Chamber of Commerce of Milan in May 1895, and whose headquarters was also located at 41 via Manzoni. After it was acquired, the Monti Company became the *Carlo Monti e C. e Rosati*.[13] Even if it looks like he kept on working within the new company for a while, Hermann Einstein was not one of the new company's three managers though. Note that the merger was completed under the leadership of some prominent figures. Sections 12 to 14 of document n. 310 of Milan Commercial Court, dated 2nd November 1896, regarding the new company stipulated that the loss of a quarter of the business value would automatically result in its liquidation under the auspices of Aureliano Scrosati,[14] Giuseppe Colombo (who will be discussed again further on in the report) and Giovanni Battista Pirelli.[15]

2.3 21 Via Bigli in Milan

The Einstein family moved back to Milan in October 1896, at 21 via Bigli. It was not until 23rd February 1899 that Hermann, as the only one person with signing authority, registered a new company with the Milan Chamber of Commerce, whose transfer from Pavia he justified by

---

[12] Carlo Monti graduated from the Milan *Politecnico* in 1882. The school yearbook (Bollettino 1927) presented him as *direttore dell'Officine illuminazione della Società Edison* and managing director of *Ing. Monti e C.*

[13] *Ing. Carlo Monti e C. e Rosati*. The capital was increased to ITL 250,000 when a partnership was formed with Ferdinando Rosati. An advertisement under this company's name was placed at the end of the first volume of the *Atti della Associazione Elettrotecnica Italiana* (*AEI*) in 1898.

[14] Aureliano Scrosati was a renowned lawyer who counted among his clients several industrialists (among whom Carlo Erba in particular).

[15] Giovanni Battista Pirelli (1848-1932), a graduate of the Milan *Politecnico* (The Polytechnic University of Milan) in 1870, founded the first Italian tyre industry in Milan in 1872. In 1880, he launched the manufacturing of insulated electrical cables (Gatti 2008).

a '*a greater opportunity*'.[16] The production workshops were located at 160 via Antonio Lecchi and its executive office at 21 via Bigli.[17]

The Einsteins' address in Milan is that of a famous palace located a few steps away from the Scala theatre. The building was sold in 1879 by Gian Giacomo Poldi Pezzoli to Prince Luigi Alberico Trivulzio who was thus the Einsteins' landlord.[18] Countess Clara Maffei, a famous public figure in Milan intellectual and political life, used to rent a flat there, after separating from Andrea Maffei, from 1849 until she died in 1886. Her 'salon', one of the most famous in Milan, attracted the patriotic and reform-minded political elite of the Lombardy region, renowned artists for instance, such as Giuseppe Verdi or entrepreneurs, such as Giuseppe Colombo (Cambria 1982). In a letter her friend Carlo Tenca sent to the Countess on 22 October 1882, he described to her with a great amount of enthusiasm the creation of an electricity company and pointed out the fact that the first house to be lighted by electricity would be the house of Giuseppe Colombo, its founder. On 26th December 1883, Colombo and his team (to which Carlo Monti belonged) designed the electric lighting for *La Gioconda*, an opera by Almicare Ponchielli and *Flick e Flock*, a ballet by choreographer Paolo Taglioni (Colombo 2014; Righi 2014) thanks to the electricity produced by the dynamos of the *Santa Radegonda* plant.

The flat the Einsteins occupied at this address was composed of *"eleven rooms with two sumptuous reception room communicating through a large archway"* (Bevilacqua 2005), which may be considered as surprisingly luxurious when we know the family had to face one setback after another in the industrial sector, which made Maja say that at this time *"The family had hardly anything left"* (*CP* 1, p xvii). Therefore, it seems that, as soon as they arrived in Milan, the Einstein were in relation with prominent figures who provided them which such standards of living. In Maja's memories, there is one which proves the existence of these influential relationships: *"The hot*

16 The creation of *Einstein & Co* was recorded in the register of the Chamber of Commerce in Milan on 4th July 1899 (N. 15739).

17 In 1889, Hermann built an electricity-producing plant in Canneto sull'Oglio in Mantua and in April 1900 he built another one on the Isola della Scala on the commune of Verona (*CP* 1, lv n. 29); in September 1900, he took Albert to visit them (*CP* 1 Doc. 74) probably to prepare his son to take over.

18 Cadastral data from the city of Milan from Mr. Simone Iudica and Mr. Ciro da Rosa.

summer of 1895 was spent in Airolo on the Gotthard, where young Albert gained a fatherly friend in the Italian minister Luzzatti, who happened to be staying there" (*CP* 1, lxv and n. 65). Luigi Luzzatti (1841-1927) was a professor of statistics and political economics at the Milan *Politecnico* when it was founded in 1863.[19] He was a colleague of Colombo and he succeeded him for a transitional period on two occasions, first in 1892, as Finance Minister of the Kingdom of Italy, then in 1896, as Treasury Minister.

2.4 Two essential actors: Giuseppe Colombo and Galileo Ferraris

Giuseppe Colombo, State Secretary and Speaker of the Chamber of Deputies, appointed twice Minister, was the rector of the *Politecnico* from 1897 until he died in 1921. He was also a town councillor in Milan.

Colombo was a leading actor in the Italian industrial landscape in the field of electricity. After studying at the Pavia University, he began his career in 1857 in the *Società d'incoraggiamento d'Arti e Mestieri*, where he was teaching descriptive geometry, then he was appointed professor at the Milan *Politecnico*, when it was founded in 1863 and where he was teaching mechanics and industrial machinery (Lori 1941). He had been a member of the *Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere* since 1862, its Vice-President two times (1890-1891; 1894-1895) and its President three times (1892-1893; 1896-1897; 1920). Colombo is the founder of the *Comitato promotore per l'Applicazione dell'Energia Elettrica in Italia* (1881). This committee was the prelude to the setting up in January 1884 of the first Italian electricity company, the *Società generale italiana di elettricità sistema Edison*, over which he would preside.

On his part Galileo Ferraris (1847-1897), professor at the *Museo Industriale di Torino* as from 1873,[20] helped develop many technical

---

[19] The *Politecnico*, founded in 1863, whose name at the time was *Regio Istituto Tecnico Superiore*, graduate about sixty engineers every year, among whom ten electrical engineers or so as from 1887. It was founded with the help of the *Società d'incoraggiamento d'Arti e Mestieri*, the *Istituto Lombardo* and the *Osservatorio di Brera*.

[20] In 1906, the Museo Industriale di Torino, a school modeled on the *École des Arts et Métiers* in France, merged with the *Reale Scuola per Applicazione degli Ingegneri di Torino*. This new school was renamed the *Politecnico di Torino.*

innovations, among which the first turning-field electric motor in 1885. He also carried out an in-depth study of the Gaulard & Gibbs's transformer and suggested the power plants generating alternate current use it in order to carry the electrical current. He was also a recognized expert in various types of lamps for electric lighting. In 1887, he was one of the prominent figures appointed to lead the Frankfurt commission, responsible for deciding on tenders (mentioned above), and took part in the *Prüfungskommission* who met there in 1891. He served as vice-president of the Congress which was held at this exhibition. At this exhibition, he also led a large delegation of Italian engineers from the *Politecnic* Italian schools. He was a town councillor in Turin and was also elected Senator.

Following their visit to the Paris Exposition of 1881, where Thomas Edison had given his demonstration, Colombo and Ferraris became the promoters of electric lighting in Italy. Colombo had been negotiating with Edison in the US to get an exclusive license for Italy on the 'Edison's system' of incandescent light bulbs, the electric power supply and distribution systems. At his instigation, Milan became the first city to be lighted by electricity in Europe. In 1897 when Ferraris died, Colombo took over management of the *Associazione Elettrotecnica Italiana* (AEI), an association they created officially on 26th December 1896.[21] This assembly brought together entrepreneurs, academics, professional traders and about five hundred members, divided into six sections (Turin, Milan, Genoa, Rome, Naples, Palermo) one-third of them in Milan. The Einsteins' partner in Pavia was Lorenzo Garrone, a collaborator of these two prominent figures. He was a civil engineer, graduated from the *Reale Scuola per Applicazione degli Ingegneri di Torino* in 1881 and director of the *AEI* Turin section in 1900 (Gatti 2007-2009).

We can wonder whether the Einsteins could have managed to settle in Pavia and Milan without entering into direct contact with Colombo and/or Ferraris. Let us note that while it is likely the Einsteins were in relation with Colombo in Milan, so had they been before with Ferraris: Jakob Einstein wrote to him twice on 26th

[21] The *Atti della Associazione Elettrotecnica Italiana* were edited as from 1898 (approximately 250 pages every year with papers, lecture announcements, technical drawings, chapter updates, General Assembly, etc.).

January and 8th March 1888, about a dispute with Italian engineers concerning the public lighting in Varese.[22]

3. The Besso-Cantoni family, the financial community and the Polytechnic Schools

Michele Besso's uncles held prominent positions in the financial, industrial and scientific sectors, and they were involved in the development of electrification in Italy. The community of the *Politecnico* engineers also played an important part in Michele's family. This information is essential to understand Michele Besso's choices and the circumstances under which he met with Albert Einstein. The biography of the Besso family and Michele's life are indeed partly documented in Speziali's introduction, yet Michele had two uncles who played a remarkable role which has been ignored or undervalued: Vittorio Cantoni and Giuseppe Jung. But first of all, we will focus on Michele's family on his father's side, which will provide some more information about his life.

3.1 The Besso family

Michele Angelo Besso was born in Riesbach near Zürich on 25 March 1873 (as mentions the registration file at the University of Roma) and according to Speziali, his parents, Giuseppe Besso (1839-1901) and Erminia Cantoni, settled in Trieste - his father's hometown - in 1879. His father had an executive position in the *Assicurazioni Generali*, after managing a subsidiary of this same company in Zürich. Giuseppe's brothers were Marco, Beniamino and Davide, thus Michele's uncles. Davide Besso (1845-1906) was appointed professor of mathematics in 1871, when *Leonardo da Vinci,* Rome Technical Institute located in the Palazzo Cesarini and Borgia, was founded. Then, he was a professor in Modena. He was the founder of the *Periodico di Matematiche*, a journal designed for teaching mathematics in secondary education. Beniamino and Marco had significant responsibilities that need to be mentioned.

---

[22] These letters written on the behalf of the *Elektrotechnische Fabrik J. Einstein and Comp*., are listed in (Gobbo 2005) together with a biography of Ferraris.

3.1.1 Beniamino Besso

Beniamino Besso (1844-1908) was an engineer, who entered in 1869 as a non-resident member the *Società degli Ingegneri e degli Industriali di Torino* (founded in 1866). The following year, he was an engineer at the *Officio Studi e progetti delle Ferrovie dell'Alta Italia*. In 1871, he wrote a small illustrated handbook entitled *Il Cenisio, illustrato e descritto* (Besso 1871 a). This small handbook which presented the technical construction of the Fréjus tunnel (Mont Cenis), was published on the very year the tunnel was inaugurated, on 17th September 1871. Beniamino Besso also wrote a book about *Electricity and its Applications* (Besso 1871 b). Speziali presents Beniamino as the director of the Sardinian railways. As the development of the railways played a strategic role in the newly unified Italy (the kingdom of Piedmont-Sardinia being largely instrumental in leading the Italian unification movement), Beniamino had a key political role.[23]

He was also the author of a famous popular science book, re-edited six times within ten years, entitled *The Great Inventions and Discoveries* (Besso 1864). It was in this book that Michele probably learned to read. Indeed, Speziali reports that Michele was *"a precocious child and curious of everything"*, who *"learnt to read when he was about five, in a book which revealed* [to him] *almost everything you could know 90 years ago about physics, technology and astronomy without resorting to mathematical formulae"*. Actually, the first edition of *the Great Inventions* dated back exactly 89 years before Michele Besso's quote in 1953.

Beniamino's wife, Amalia Goldmann Besso, was a renowned

[23] It is worth noting that the city of Modane, marking the entrance of the tunnel on the French side, was equipped with public lighting in 1885. The entrance on the Italian side, in Bardonecchia (Sanesi 1982, Biscossa 2005), was implemented by the Einsteins around 1887. Lorenzo Garrone also contributed to implementing the lighting of Bardonecchia. Let us also remember that it was in Airolo, at the Italian end of the Gotthard railway tunnel that the Einsteins got the chance to meet the Italian Finance Minister Luzzatti in 1895. So obviously, the Einsteins had connections with the railway community. It is also worth noting that Galileo Ferraris and Beniamino Besso must have known each other. When he was a student at the *Museo Industriale* in Turin, Ferraris visited the tunnel construction site in 1868 and in 1870 attended the banquet in honour of the engineers who had built the Fréjus tunnel (Gobbo 2005), organized by the *Società degli Ingegneri e degli Industriali* (of which he would be a member eventually).

painter, to whom the online *Treccani* encyclopedia pays tribute in a paper. It states that she moved to Rome with Beniamino in 1883. An exhibition entitled *Artiste del Novecento, tra visione e identità ebraica,* was dedicated to her by the city of Rome in 2014.[24]

According to Speziali, when Michele enrolled in the University *La Sapienza* in Rome in March 1891, he went to stay with Beniamino and Amalia. His registration file in the University Archives in Rome reads that he enrolled on 24 March 1891 in a first-year mathematics programme as 'future engineer' producing proof that he had completed his *'maturità'* [A-levels] *"awarded on 9th July 1890 by the Ginnasio comunale superiore di Trieste, and recognized as equivalent by the faculty."*[25] He earned outstanding grades at University: 28/30 in projective and analytic geometry with del Re; 30/30 in algebra avec Biolchini; 28/30 in experimental physics with Blaserna who was the Dean of the Faculty of Science at the time.[26] However, Michele did not continue with his studies in Rome, where he could have specialized at the *Scuola d'applicazione per gli Ingegneri in Roma*, founded in 1873 and run by Luigi Cremona, who had previously been a professor at the Milan *Politecnico*. We will see further on the possible reasons which led him to join the ETH in Zürich in 1891, from which he graduated in 1895. Once again, he earned the highest grades (6/6) in experimental physics and mathematics in the classes given by Weber and Hurwitz.

3.1.2 Marco Besso

In 1909 Marco Besso (1843-1920) was president of the *Assicurazioni Generali*, the largest insurance company in Italy. He thus played a central role in the Italian financial world, as his correspondence testifies. The latter, whose record is kept in his

[24] The paintings lent by the Marco Besso Foundation, depict Amalia's journey around the world in 1912 with her nephew Salvatore, Marco's son.

[25] Speziali reports that Michele had been suspended from school when he was 16 for, together with a classmate, circulating a petition against his maths teacher whom he considered incompetent.

[26] Pietro Blaserna was also the founder and director of the Physics Institute located at via Panisperna in 1880. He played a key role in scientific development in Italy after 1870 (Battimelli 2013).

foundation,[27] is composed of many letters, both official and friendly, from Finance Minister Luigi Luzzatti (with whom the Einsteins were in a relationship as well, as previously noted). There are also a few letters sent by Salvatore Majorana (the father of the physicist Quirino and the grandfather of the physicist Ettore) who was then Minister of Agriculture, Trade and Industry. These letters, dated May 1879, were about the setting up of mutual assistance societies for workers. Indeed companies, such as the one the Einsteins had in Pavia, were expected to set up a fund to provide this type of aid. Therefore, the tie between the Einsteins as entrepreneurs and the Bessos through the *Assicurazioni Generali*, could be a useful avenue to explore further. Marco Besso was to be the president of several other companies and serve in several Boards of Directors, in the financial sector, but in the industrial electricity sector too. *"As a figurehead"* of the *Generali*, Marco also went down in the history of the electrification of Italy for having raised the capital needed to found, in 1891, the *Società veneta di telefoni e di elettricità di Venezia*, which, together with the development of the telephone, challenged the monopoly of the local company in electric lighting (Mori 1992, p 269). He married Ernesta Maurogonato (1853-1916) who was the daughter of Bersabea Ascoli, the latter being the sister of Graziadio Ascoli, the renowned linguist (1829-1907), who would call Marco *"my dearest nephew"* in his letters.[28] On a proposal by the Ministers, Marco was appointed a Knight then an Officer and a Grand Officer of the Crown of Italy.

3.2 The Cantoni family

Michele's mother, Erminia Cantoni, was Angelo Cantoni (born in Vicenza on 10th September 1825-21st October 1887) and Elisa Maroni's daughter. Speziali gives no information on this branch of the family except that they came from Mantua. Yet, Erminia had two brothers, Vittorio and Tullo, and three sisters Bice, Maria and Emma.

[27] The foundation houses a rich library dedicated to the various editions of Dante's works and to studies on this author, and to various original documents as well on the region of Lazio (province of Rome), gathered by Marco Besso.

[28] During the unification of Italy, he had defended an Italian language which would take into consideration the linguistic specificities of the various kingdoms.

While Vittorio Cantoni was known through his active work in the electrification of Italy, he had not been related to Michele's family yet. It is worth giving bibliographical information about him, for he probably played a major role in the eyes of Michele.

Bice married Giuseppe Jung (1845-1926) in 1879, the professor of mathematics from the Milan *Politecnico*. Jung was presented as Michele Besso's maternal uncle (*CP* 1 Doc. 94, p 280, n. 8) when Einstein mentioned him in his letters to Mileva as from March 1901. We will see that his relationship with Einstein went on afterwards.

Tullo Cantoni, born on 27th September 1866 in Vicenza, was Erminia, Bice and Vittorio's youngest brother. He completed his final third year of law studies at the University of Bologna in 1888, after studying at the University of Rome.[29] Tullo, who also inherited the title of Count of Mamiani della Rovere, was mayor of the town of Arona from 1914 to 1917.[30]

Maria (1855-1940) married her cousin Achille Cantoni (1848-1914). In 1905 Arrigo, (1877-1953), one of their five children, took a degree in architecture at the *Reale Scuola per Applicazione degli Ingegneri di Torino*. It was propably he who in 1912 submitted a project for the new train station in Milan. After the First World War, he became teacher of experimental physics in secondary school and in particular, he wrote *L'esperimento fisico nelle scuole medie*, published in 1938 by Hoepli, the renowned editor from Milan. It should be noted that Einstein met him in 1922 as reported by Besso: *"The latest news I had of you was given to me by my cousin Arrigo Cantoni who was greatly pleased by your friendly welcome "* (*EB* Doc. 65).

Lastly, Emma (27th September 1866-1946), married Eugenio Norsa (1856-1933).

We note that Michele's brothers and sisters were named after their uncles and aunts: Vittorio Beniamino, Marco Tullo, Luisa Margherita (which are the first names of two daughters of Giuseppe Jung). In addition, Marco Besso archives in Rome own the photography

---

[29] Archivio storico, Università degli studi di Bologna, Fascicolo degli studenti n. 923, in 1888.

[30] Tullo lived in the villa Cantoni with his wife Irma Finzi and their children. His son, Vittorio Angelo, born in 1899 and Irma both disappeared on 15 September 1943 «*vittime del razzismo nazista*» (victims of Nazi racism) as specified on the war memorial in Arona.

reproduced in the Annex. We see here that the paternal and maternal branches of Michele's family are reunited. They were brought together in Arona in the villa Cantoni, one of the most beautiful on the shores of Lake Maggiore (Lodari 2002, p. 115-117). Vittorio Cantoni had this villa built in the late 1880s.[31]

3.2.1 Vittorio Cantoni

Vittorio was born on 30th August 1857 in Milan. In 1874, at the age of 17, he entered the ETH in Zürich, which he graduated from on 23rd March 1878. He married Albertina Solal in 1900. His student file at the ETH contained an important piece of information: Michele's father, Giuseppe Besso, was his contact person in Switzerland. Vittorio was probably staying at Michele's parents while studying and when he left Zürich, Michele was 5 years old. Vittorio entered the ETH Zürich mechanical engineering section but the following year he changed for the civil engineering section. It is worth noting that he passed Weber's physics exams with the highest score possible of 6 out of 6 during his second year in 1875-1876.[32] Back in Italy, Vittorio graduated from the Milan *Politecnico* on 9th September 1879. He was able to attend the classes of Giuseppe Colombo, who had just finished writing his famous electrical engineering handbook for engineers (Colombo 1877-1878) published by Hoepli.[33]

Very soon, Vittorio assumed significant responsibilities. In 1886, he installed a Gaulard-Gibbs transformer for the construction of the hydroelectric power plant in Tivoli, near Rome. He was then appointed chief engineer of the first electricity line between Tivoli and Rome – first AC transmission line in Italy (28 km) – designed to transport the electricity produced by the waterfalls on the way from Tivoli to Rome and provide city lighting (Marcillac 1893). This line was inaugurated on 4th July 1892 before 500 leading figures.

---

31 Angelo's father had bought this piece of land from the Borromeos in 1873. The architecture and the garden of this villa have been described by Paolo Cornaglia in (Lodari 2002, p 115-118).

32 Vittorio Cantoni, Anmeldung zur Aufnahme in das Eidgenössische Polytechnikum.

33 This book is considered the standard reference and an extended version of four volumes is still being published today.

Vittorio worked toward its implementation with Guglielmo Mengarini, professor at the Engineering School of Rome.[34] Mengarini was, just like Galileo Ferraris, a member of the *Prüfungskommission* in Frankfurt and in 1896 he would be the Vice-President of the AEI together with Colombo, before becoming its President in 1903. Therefore it is almost certain that Vittorio was part of the delegation of engineers who accompanied Ferraris to Francfort and that he had the opportunity to speak directly to his former professor Weber about technical matters related to the installation of an alternate current power line (since Weber oversaw the work of the *Prüfungskommission* in this sector, as mentioned above).

At that time, Vittorio was an engineer of the hydraulic power company run by Carlo Esterle (1853-1918). The latter who succeeded Colombo in 1897 to lead the Edison company, was appointed member of the Board of Directors of the *Società per lo Sviluppo delle imprese elettriche in Italia* in 1899.[35] This company hired Michele Besso from 1900 to 1901, according to Speziali: *"Indeed, in 1899, Besso went to Milan to work in a company that generates electrical energy over long distances. From 1900 to 1901, Michele was a technical adviser for the Società per lo sviluppo delle industrie* [imprese] *elettriche in Italia, whose headquarters is located in the capital of Lombardy.*[36] *Over these two years, he actively participated in developing safety measures – as imposed by the Italian insurance companies – regarding the electrical installations."* Note also that Marco Besso was a member of the Boards of Directors of the *Sviluppo* (Savallo 1902 p 657). In the light of this, it appears that Michele's entering the ETH Zürich in 1891 and the employment opportunities he found in Milan between 1899 and 1901, had a direct connection with Vittorio (and Marco).

---

[34] Mengarini introduced the first electrical engineering courses at the Engineering School of Rome in 1891, optional at the beginning, in the year when Michele was a student there. Before that, like Ferraris and Colombo, he had also been to the Exposition of Paris in 1881.

[35] Marco Besso was to be the President of this company too in 1914 (Scolari 1967). This company played an important role in mediating conflicts between Italian and foreign industrial groups, as to the sharing of their spheres of influence. When it was set up, some organisations from Milan provided 20% of the funding and an Austro-German group provided the rest (Pavese 1993).

[36] That does not seem to have been the case: this company was not recorded by the Chamber of Commerce in Milan.

3.2.2 Giuseppe Jung

Giuseppe Jung is Michele's maternal uncle by marriage. The Jung family have been the subject of recent academic studies (De Ianni 2009; Raspagliesi 2012) which provide, among others, the family genealogy. On 4th April 1901, Einstein mentioned Jung to Mileva: *"The day before yesterday he* [Besso] *went on my behalf to see his uncle Prof. Jung, one of the most influential professors of Italy & also gave him our paper. I met the man once before & must admit that he impressed me as quite an insignificant person. He promised that he will write to the most important professors of Italy (physicists), Righi & Batelli, on my behalf, i.e., ask them whether they need an assistant. This is already quite a lot, because he seems to be on very friendly terms with them"* (*CP* 1 Doc. 96). The paper he gave Jung was probably the paper on capillarity, which was Einstein's first paper published in *Annalen der Physik* in March 1901 (Einstein 1901).

It should be noted that Einstein probably got the chance to meet Jung as soon as 1897 in Zürich, during the first international mathematics symposium.[37] It was organized at the ETH Zürich by Einstein and Besso's professors: Carl Friedrich Geiser, Adolf Hurwitz, Ferdinand Rudio, Heinrich Weber, Albin Herzog. It was placed under the auspices of Henri Poincaré for France and Felix Klein for Germany (Décaillot 2008). The names of Michele Besso and Giuseppe Jung were on the list of participants and Jung's address was mentioned on it: 9 via Borgonuovo in Milan, about a hundred metres away from the Einstein family.

From the 1873 academic year onwards,[38] Giuseppe Jung assumed the professorship dedicated to graphic statics, left vacant at the Milan *Politecnico* by Luigi Cremona who had been called to run the Engineering School of Rome.[39] He became a correspondent of the *Istituto Lombardo, Accademia di Scienze e Lettere* in 1879, then a per-

[37] <http://www.mathunion.org/ICM/>

[38] Before holding this professorship, Jung used to be a teacher at the *Liceo Parini* (High School Parini) in Milan (previously *Regio Ginnasio di Brera*). He also gave a lecture to the students who wanted a direct entry to the *Politecnico*, without attending the first two years at the Faculty of Mathematics at the University of Pavia.

[39] Jung wrote the introduction to the third edition of Cremona's book on graphic statics (Cremona 1879). This discipline allows solutions to be reached using geometry construction to solve differential equations without resorting to the accurate analytical method and it is particularly adapted to engineering calculations.

manent member in 1893 and a resident in 1908. So he was also a colleague of Colombo at the *Politecnico* and at the *Istituto Lombardo*.

The list of Jung's publications (Maggi 1927) was quoted in the tribute paid to him in 1927 in the *Rendiconti of the Istituto*, after his death in January 1926. In November 1926, his youngest daughter, Maria Vittoria, donated Giuseppe's personal library, a part of it to the mathematics library of the *Politecnico*, another part of it to the mathematics department library of the University of Milan who recorded the writings in 1935. This large donation which was composed of approximately 450 books and some 2,500 papers (essentially reprints of papers) can be found in details in these libraries' entry registers. Such a large amount of papers appears to indicate that Jung was in contact with many colleagues, thereby confirming Einstein's impression that he was indeed *"one of the most influential professors of Italy"*.

The list of the 2,500 reprints in the donation was, as expected, only composed of papers about mathematics, with one notable exception: the full list of Einstein's publication reprints from 1901 to 1906, with a total of twelve papers.[40] There had been no evidence until then of an ongoing interaction between Einstein and Jung beyond the '*essay*' given to him by Besso as mentioned above. Could it be that Einstein might have kept up the hope of getting a post as assistant in Italy, before obtaining his first post at the University of Bern in 1908 and in this view might have maintained ties with Jung? Unfortunately, based on the information gathered indirectly from a former head of the library at that time, a decision was made in the late 1970s to send these papers to the shredder, considering their poor state of conservation.

Jung was one of the five (and for instance the first on the list) along with Luigi Berzolari, Antonio Federico Jorini, Francesco Gerbaldi and Giulio Vivanti, to propose on 4th May 1922 the appointment of Albert Einstein as a foreign member of the *Istituto Lombardo*, along with Gösta Mittag-Leffler, Paul Painlevé and three Italian members (to achieve parity in the appointments), who were mathematicians as well: Guido Fubini, Giuseppe Peano et Gaetano Scorza. The *Istituto Lombardo* has records of the arguments presented for this proposal in its archives:

[40] Ref. 3400 and from 2766 to 2776 in the *Politecnico* register of entries in 1926. Einstein's papers completed the donation of Jung's reprints, except for the first one concerning capillarity, which was separated from the others.

"Albert Einstein needs no introduction. Even though the theory of relativity has had precedents just like all theories, there can be no doubt nonetheless that Einstein has had the merit of boldly laying down the fundamental postulates that the laws of physics are invariant in a uniform translatory motion of a frame of reference and the principle of invariant light speed in vacuum. Later on, while the theory whose foundations he had laid was undergoing strong development, the need to expand its scope of application led him to modify his assumptions by stating that the laws of physics are invariant compared to changes in more general frames of reference. The debate this new theory has triggered in the scientific world, the lively curiosity with which the results of experiments are expected, the recognition achieved even outside the scientific circle, all this shows that this wealth of exceptional achievements is universally attributed to Einstein's views, so that even those who do not agree with him on some particular issue recognize him as a reformer of natural philosophy."[41] The election took place in July 1922, shortly before Einstein was awarded the Nobel Prize.[42]

4. The Einstein-Besso tie before 1904

We may wonder under what circumstances Einstein and Besso got the chance to meet. We will in what follows give some insights on how to

[41] *"Il nome di Albert Einstein non ha bisogno di commenti. Sebbene la teoria della relatività abbia avuto, come ogni altra, i suoi precursori, tuttavia spetta senza dubbio ad Einstein il merito di avere arditamente enunciato i postulati fondamentali dell'indipendenza dei fenomeni fisici da ogni traslazione rettilinea uniforme del sistema di riferimento, e della costanza assoluta della velocità della luce nel vuoto. Più tardi, mentre la teoria, di cui egli aveva posto le basi, prendeva un rigoglioso sviluppo, la necessità di estenderne la portata lo conduceva a modificare i suoi postulati affermando l'invarianza dei fenomeni fisici rispetto a sistemi di riferimento più generali. Le discussioni a cui la nuova teoria ha dato origine in tutto il mondo scientifico, la viva curiosità con cui ne sono attese le conferme sperimentali, l'eco che essa ha destato anche fuori del campo degli scienziati, tutto ciò dimostra la somma importanza che viene universalmente attribuita alle vedute dell'Einstein, che anche coloro, i quali dissentono da lui in qualche particolare, riconoscono come un rinnovatore della filosofia naturale. Non deve poi dimenticarsi che, prima ancora che il nome dell'Einstein divenisse popolare, esso era già noto ed apprezzato nel mondo scientifico per importanti contributi a vari rami della fisica"*. Proposta per la nomina di tre Soci corrispondenti stranieri nella Sezione si scienze matematiche, archives of the *Istituto Lombardo*, 1922.

[42] Einstein and Mittag-Leffler were elected with fourteen votes out of sixteen, the other members were elected unanimously.

answer this question. We will then focus on the scientific subjects they discussed together, in order to gain a better understanding of the nature of their collaboration which had remained informal but started to grow in Milan in 1899-1901. We will also see that Einstein encouraged Michele to complete a thesis. Finally, we will establish that according to Mileva's correspondence, Einstein was working in Milan, in a world-class science library, the *Istituto Lombardo, Accademia di Scienze e Lettere*.

4.1 The Einstein-Besso meeting

It is a letter sent by Albert Einstein to Michele Besso on 6th March 1952 which provides initial information on their meeting. Einstein had just been contacted by Carl Seelig who was writing out a biography about his younger years in Switzerland; he sent a few remarks to Michele: *"I know already that the brave Seelig is looking into my childhood days. It must be said that we would discuss scientific matters each day when returning home from the office.* […] *In Bern, I would attend evenings of philosophical readings and discussion with C. Habicht and Solovine on a regular basis, during which we would deal mostly with Hume (in a very accurate German edition). This reading has had some influence on my development, as well as Poincaré and Mach. You're the one who recommended this book to me during my studies, after we met at the home of Mrs Caprotti"* (*EB* L. 182). In his foreword, Speziali believes this meeting occurred *"in 1897, in Zürich"* while *"Einstein was 18 and Besso 24"*. But in his introduction, in a contradictory way, he says *"We were in 1896, in early autumn. Besso, who often went to Zürich, was friend with a family of music lovers, the Hünis, where he played the violin. It was while he was spending an evening there - the exact date could not be ascertained – that he met Albert Einstein for the first time* (italics in the original). *He was then 23 years old, while Einstein who was born on 14 March 1879, was only 17"* (*EB* p xxii).

In a letter he sent to Eduard Lüscher on 23rd September 1943, Michele Besso wrote that his first meeting with Albert Einstein dated back to the year after he had finished school in Aarau.[43] In a letter he sent to Einstein on 10th October 1945 (*EB* Doc. 145), Besso stressed the fact that they had been friends for fifty years, since about 1895,

[43] Doc. 71-969-3, Einstein Archives, Jerusalem.

and that this friendship was born from a discussion they had on the wave and particle models of light: *"Isn't that again the starting point* [of the discussion] *we had fifty years ago, between Newton and Huygens?"*. After the death of his friend, Einstein wrote to Michele's son and sister that *"Our friendship was born when I was a student in Zürich where we met regularly at musical evenings"*.

Albert Einstein mentioned a meeting in the home of Mrs Caprotti. Selina Caprotti, whose maiden name was Hüber,[44] got married in Zürich in 1871 to Carlo Caprotti (1845-1926), director of the large textile mills *Cotonificio Caprotti* in Ponte d'Albiate near Milan, as recorded in the archives online of the Caprotti family.[45] The presence of Michele in the home of Selina Caprotti brings into play Michele's maternal branch. In the book he dedicated to the Cantoni villa mentioned above, Cornaglia pointed out that Angelo Cantoni, Erminia's father, a banker in Milan, was involved in the textile industry, more particularly in the processing of cotton in Legnano (Lodari 2002). If this information is correct, there could be a family or at least a professional tie between Angelo Cantoni and Eugenio Cantoni (1824-1888) from Gallarate, made baron by Victor Emmanuel II in 1871, and who ran the largest Italian textile company, the *Cotonificio Cantoni*, the first Italian company to be quoted on the Stock Exchange, whose historical headquarters is in Legnano.[46] Thus, the Caprottis and the Cantonis had a relationship. Let us note that Giuseppe Frua (1855-1937) worked alternately in both companies, until he started together with Ernesto De Angeli (1849-1907), the De Angeli-Frua textile printing company. We also note that Carlo Caprotti and Selina Hüber belonged to the same generation as Michele's parents, Giuseppe Besso and Erminia Cantoni, and that both couples got married one year apart in Zürich.

The date when Albert and Michele first met is an element it would be desirable to clarify. Let us recall that Besso's and Einstein's

---

[44] The surname Hüber is mentioned three times in the Einstein-Besso correspondence: for instance, Eugen Hüber *"who designed the Swiss Civil Code"* (*EB* Doc. 201) and Rudolph Hüber, Mathematics teacher in a Gymnasium in Bern (*EB* Doc. 100, n. 2).

[45] Archives online <www.giuseppecaprotti.it>; in particular <www.giuseppe caprotti.it/wp-content/uploads/albero-genealogico-caprotti1.pdf> to see a family tree online of the Caprottis.

[46] As from 1871 Eugenio Cantoni funded a Chair of Economics at the Milan *Politecnico*, which had been held, under a different name, by Luigi Luzzatti in 1863 (*cf* §2.3).

uncles (Vittorio Cantoni and Jakob Einstein) were both polytechnic engineers (from ETH Zürich and Milan for Vittorio, from Stuttgart for Jakob) who had been either Weber's student (Vittorio), or probably in contact with him (Jakob) and that these people might have been able to meet as from 1891 at the Frankfurt Exhibition. Jakob and Vittorio are also connected to Ferraris, himself close to Weber. Moreover it was probably during this exhibition that Jakob introduced his nephew Albert to Ferraris.[47] Jakob, who was a member of the Polytechnic Engineers' Association in Munich, must have maintained relations with the *Politecnico* and the industrial circles in Milan as well. Giuseppe Jung, Vittorio's brother-in-law, was himself a professor at the Milan *Politecnico*. The Einstein and Cantoni families were tied together by the polytechnic community and the electricity sector. Since Michele Besso graduated from ETH Zürich in March 1895 while Albert Einstein was about to sit the entrance exam in October, Michele would have been the right person to support Albert while he was preparing his entrance exam to ETH Zürich, and he might have done so as early as 1895.[48]

4.2 Some topics covered by Einstein and Besso before 1904

We can see in the letters he sent to Mileva from Milan that Einstein was interested in a wide variety of topics: electrodynamics by Helmholtz and Hertz (1898-1899), the "relative motion of matter and ether" in relation with experiments (1898-1901), the Drude model of electrical conduction in relation with thermoelectrics (1900-1901), molecular forces, topic of a first thesis which had not been completed with Alfred Kleiner (1900-1901), the interaction of radiation with matter in relation with the works of Planck and Lenard (in spring 1901), etc.. In addition to scientific papers, Einstein also read several handbooks propounding the contemporary theories (Hertz 1892; Ostwald 1893; Drude 1894; Helmholtz 1895;

[47] From the very first lines of his letter to Ferraris dated August 1895 (*cf. n.* 7), Einstein thanks the "*Molto Illustrissimo Sig. Professore*" Ferraris for remembering him, as it was reported to him by the "*Ing. Vitali*" following a conversation with Ferraris.

[48] Note that in the autumn of 1901, Einstein himself was the private teacher of a young Englishman named Louis Cahan, at Dr Nuesch's private school in Schaffhouse, in order to help him prepare his entrance examination to ETH Zürich.

Meyer 1895; Boltzmann 1896-1898, etc.), most of them focusing on electrodynamics and molecular hypotheses. To him, these readings continuously conjured up criticisms or new ideas, and his letters to Mileva ended with considerations sometimes general, sometimes specific, on these topics.

In Milan, between 1899 and 1901, Albert would discuss these topics with Michele on a regular basis, as he wrote to Mileva in the late summer of 1900: *"I am spending many evenings at Michele's"* (*CP* 1 Doc. 74). These meetings were an opportunity for extensive discussions on physical issues. Indeed, as of early April 1901, Einstein wrote to Mileva: *"Yesterday evening I talked shop with him with great interest for almost four hours. We talked about the fundamental separation of luminiferous ether and matter, the definition of absolute rest, molecular forces, surface phenomena, dissociation. He is very interested in our investigations, even though he often misses the overall picture because of petty considerations. This is inherent in the petty disposition of his being, which constantly torments him with all kinds of nervous notions*" (*CP* 1 Doc. 96). These discussions were important to Einstein who in October 1900 told Mileva of Michele's *"truly outstanding intelligence"* (*CP* 1 Doc. 79).

The copious correspondance between Einstein and Besso amounts to 215 letters which have been found by Speziali, who believes a hundred of them are still missing. The first letter was sent by Einstein in January 1903, and Michele replied to it as of early February from Trieste (the second listed letter sent by Besso is dated 1911). This letter of 1903 is thus by now the unique testimony of the specific and technical nature of the first years of collaboration. In three pages, Michele described, following a request by Einstein concerning molecular dissociation (one of their topics in Milan) a list of six scientific papers explicitly referred to, with comments in writing, graphs and value tables. It is likely that the two friends collaborated in a similar way on other scientific topics and that a significant aspect of their work involved not only discussing freely scientific topics, but also compiling an extensive bibliography, which is the core of all research work.

This bibliographic search was not limited to recent science journals, but it covered scientific publications too. Besso lent books to Einstein, since in April 1901, he wrote to Mileva he had "*studied electrochemistry and chemical reactions from Michele's 'Ostwald'*" (*CP* 1

Doc. 97) and at the end of 1901 from Schaffhouse, he wrote: *"Michele gave me a book on the theory of ether, written in 1885."* Giuseppe Jung, Michele's uncle, might have played a role too in transmitting these books. Thus, Einstein read Eduard Heine's book (Heine 1878-1881) in September 1900, concerning heat transfer in a cylinder (*CP* 1 Doc 76 et *CP* 1 p 262). He wrote to Mileva *"By now I have studied the entire Boltzmann and a part of spherical harmonics, in which I have now even got quite interested. Beggars can't be choosers"* then sent her back to Heine in May 1901, for her to complete her ETH degree. This book can be found in Jung's personal library.[49]

4.3 Michele Besso's thesis

For his part, Einstein also worked for Michele, as he explained in the post-scriptum of a letter he sent to Mileva, dated 30th August or 6th September 1900: *"I am investigating the following interesting problem for Michele: How does the radiation of electric energy into space take place in the case of a sinusoïdal alternate current? About the amplitude of the waves produced as a function of the frequency of vibration, etc."* (*CP* 1 Doc. 74). On 3rd October 1900, one month later, he wrote to Mileva about Michele *"I tried hard to prod him into becoming 'Dozent', but I doubt very much that he'll do it. He simply doesn't want to let himself and his family be supported by his father, this is after all quite natural"* (*CP* 1 Doc. 79). Einstein, who then began to write his own thesis about molecular forces with Kleiner, obviously prodded Besso into starting his thesis work. Michele did mention he had started a thesis in a letter sent to Einstein in 1928: *"The last two times we met, you reminded me of my doctoral thesis which in fact was never completed, – for long periods I have been thinking of the many more ties, of all different kinds, that bind us together"* (EB L. 92). If the work carried out by Einstein on behalf of Michele mentioned above was related to Michele's thesis, then the latter might have worked on wireless transmission, i.e. the propagation of radio waves, a booming topic at the time, a field in which the Italian engineers and scientists

[49] This book can only be found in the Milan Observatory in Brera, in a library that Einstein apparently did not visit as he showed no interest for astronomical subjects in his letters to Mileva. Besides, it did not own the physics journals he was interested in.

Guglielmo Marconi (1874-1937) and Augusto Righi (1850-1920) had been pioneers.[50]

In the years 1895-1899, Besso had probably little opportunity to devote time to research, as he was appointed to his first position in 1896 at Rieter in Winterthur, an industrial machinery manufacture, met his wife Anna Winteler through Einstein in June 1897, had his son Vero in 1898, changed firms and moved to a different country to settle in Milan as from 1899. In addition to that, being six years older than Einstein, Besso could not wait too long before embarking on a thesis. Yet it was exactly in 1900, when Einstein was pushing him to become '*Dozent*' – and this required a thesis – that Michele's situation grew more stable. But Michele's father died in October 1901 and Michele moved to Trieste. This would imply that it is likely that Michele, urged by Einstein, did embark on a thesis in autumn 1900, and gave up on it one year later.

4.4 Albert Einstein and the Istituto Lombardo *library*

The letters Einstein sent to Mileva indicate he was in Milan three times a year: in September (before classes resumed at ETH Zürich), at Christmas, then from mid-March until the end of April (semester break). So Einstein would spend approximately three months a year there, pursuing his reflections on science and bibliographic research. On 10th April 1901, he wrote to Mileva from Milan: *"Last week I studied electrochemistry and chemical reactions from Michele's 'Ostwald', and the electron theory of metals in the library"* (*CP* 1 Doc. 97). Therefore, a natural question that arises, and which to our knowledge has not been examined, is to know in which library Einstein was working in Milan.

Some evidence can be found from these letters:

1) On 28th September 1899, concerning the relative motion: *" I too have done much bookworming & puzzling out, which was in part very interesting. I also wrote to Professor Wien in Aachen about the paper on the*

[50] This might be the reason why the books on wireless telegraphy can be found among the few books in physics in Jung's library: A. Broca (*La télégraphie sans fils*, Paris, Gauthier-Villars, 1899), H. Poincaré (*La théorie de Maxwell et les oscillations hertziennes*, Paris, Carré et Naud, 1899) and R. Colson (*Traité élémentaire d'électricité,* 1900), which mentions this subject at the end of this third edition.

relative motion of the luminiferous ether against ponderable matter, which the 'Principal' treated in such a stepmotherly fashion. I read a very interesting paper published by this man on the same topic in 1898 " (*CP* 1 Doc. 57). Thus this library must have had the *Annalen der Physik und Chemie* in which was published (Wien 1898).

2) On 4th April 1901, concerning Drude: "*On the other hand, I have in my hands a study by Paul Drude on the electron theory, which is written to my heart's design, even though it contains some very sloppy things. Drude is a man of genius, there is no doubt about that. He also assumes that it is mainly the negative electric nuclei without ponderable mass which determine the thermal and electric phenomena in metals, exactly as it occurred to me shortly before my departure from Zürich*" (*CP* 1 Doc. 96). Thus in Milan Einstein would work on the papers (Drude 1900a; 1900b) (as indicated in *CP* 1) which appeared in the *Annalen der Physik*, which replaced the *Annalen der Physik und Chemie* in 1900.
3) On 10th April, after expressing doubts regarding Planck's resonators: *"It is easy to explain what is setting me against Planck's considerations on the nature of radiation, an assumption I cannot really warm up to. Maybe his newest theory is more general. I intend to have a go at it"* (*CP* 1 Doc. 97). Even if the communication delivered by Planck on 15th December 1900 (Planck 1900) before the German Physical Society, when he presented the quantization of radiation energy on Hertzian Resonators, was not available in Milan, it would be reported in the *Beiblätter zu den Annalen der Physik* in March 1901 (Planck 1901a) and published in the March issue of the *Annalen* (Planck 1901b). As it seems Einstein was aware of the existence of this theory, it is likely this library also owned the *Beiblätter*.
4) On 4th April, again: "*Now I need to go to the library or it'll be too late*". This sentence not only confirms the fact that he would visit a certain library in particular, but also that it was close to where he lived (which does not mean it could be a discriminating criterion).

At that time it was only the library of the *Istituto Lombardo*, *Accademia di Scienze e Lettere* in Milan that owned these journals.[51] It was located in the *Brera* Palace five hundred meters from Einstein's

[51] This library is today located at 25 via Borgonuovo, in the Institute's headquarters, in the Palace *Landriani*, opposite the *Brera* Palace entrance.

home. It should be noted that the *Istituto Lombardo* held a very rich collection of periodicals, but lacked academic reference works in German. For instance, Ostwald's publication was not available (which might explain why Einstein borrowed it from Besso), nor were Helmholtz's, Boltzmann's or Mach's publications and Einstein intended to have them sent to him from Zürich to Milan in September 1899 (*CP* 1 Doc. 54). There is thus a strong correlation between the *Istituto Lombardo* library's collection - a library Einstein could have access to thanks to Michele's family for instance, and the information found in the letters sent to Mileva.

Let us recall that the *Istituto Lombardo* was founded following the French model of the *Institut de France* by Napoleon Bonaparte in 1797 *"who wanted for the Cisalpine Republic* an '*Istituto Nazionale', entrusted to collect discoveries and improve arts and sciences"* (Robbiati 2013).[52] The *Brera* Palace houses the *Istituto Lombardo* and the *Braidense* library too (and its one million books which date back to the 15th century), the Observatory of Milan (and its library of 30,000 volumes), the Botanical Garden, the *Accademia di Belle Arti di Brera*, and its famous Picture Gallery, founded by Napoleon too.

We appreciate better now a quote from Reiser who summed up the years Einstein spent in Milan as follows: *"Milan was a paradise of freedom and beauty. He read much now, with that complete passion and devotion with which young men read. But he also enjoyed the landscape of Northern Italy, and the sun and warmth, which he loved about all things. For the first time in his life, he studied the plastic and graphic arts: the last supper of Leonardo da Vinci at Santa Maria delle Grazie, the collections at Brera – a world of classical beauty!"* (Reiser 1931, p 42). If Einstein showed an interest in the art collection at *Brera*, however it was not the main link he had established with the *Brera* Palace.

4.5 The shift in the orientation of Albert Einstein's thesis in April 1901

We can therefore approach Einstein's work in Milan by bringing together the scientific information provided by his letters to Mileva

[52] At the origin, the Istituto Lombardo was divided into three classes: Physical Sciences and Mathematics, Moral and Political Sciences, Literature and Plastic Arts. Its first president was Alessandro Volta in 1804.

with the collection of the *Istituto Lombardo* library. In particular, this allows a better understanding of the reason why the submission of his initial thesis on molecular forces was delayed and reoriented in April 1901. In December 1900, Mileva was indeed expecting the submission of Albert's manuscript for Easter 1901: *"Albert is still here* [in Zürich] *and is going to stay until he finishes his doctoral thesis, which will probably take until Easter"* (*CP* 1 Doc. 85). But in April 1901, from Milan, Einstein told his friend Marcel Grossmann he was extending his subject to weakly compressed gases. In a letter of 14th April, he wrote: *"As for science, I have a few splendid ideas, which only now need proper incubation. I am now convinced that my theory of atomic attraction forces can also be extended to gases* […]. *That will also bring the problem of the inner kinship between molecular forces and Newtonian action-at-a-distance forces much nearer to its solution. It is possible that experiments already done by others for other purposes will suffice for the testing of the theory. In that case I shall utilize the already existing results in my doctoral dissertation. It is a glorious feeling to perceive the unity of a complex of phenomena which appear as completely separate entities to direct sensory observation"* (*CP* 1 Doc. 100). On the next day, he wrote to Mileva in similar terms: *"As for science, I've got an extremely lucky idea, which will make it possible to apply our theory of molecular forces to gases as well* […]. *I can hardly await the outcome of this investigation. If it leads to something, we will know almost as much about molecular forces as about gravitational forces, and only the law of radius will still remain unknown"* (*CP* 1 Doc. 101).

Albert Einstein, who was then 22, and doing bibliographic research at the *Istituto Lombardo*, could refer to Maximilian Reinganum's paper entitled *On molecular forces in weakly compressed gases* (Reinganum 1900), which could account for the reorientation of his thesis subject. Indeed Reinganum was considering the dissociation of molecules by taking into account 'planetary' *"gravitational forces"* in r^{-4}. In his opinion, the molecular size played no role in the dissociation processes (contradicting Boltzmann) and he considered them as centers of force. Einstein shared this view of the matter and reminded it to Mileva on 30th April 1901: *"I am very curious whether our conservative molecular forces will hold good for gases as well. If the mathematically so unclear concept of molecular size does not show up as well in the formation of trajectories of molecules coming close to each other as well, but the molecule can be conceived as center of force. We shall get quite a precise*

test of our view" (*CP* 1 Doc. 102). Reinganum's paper was published in the *Festschrift* of 11th December 1900, which commemorated the 25th anniversary of Lorentz's doctoral dissertation, and many leading scientists gathered to celebrate the event in Leyden. These communications were published in a volume of the *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles*, the *Istituto Lombardo* library received on 31st January 1901.[53] Besides, Reinganum was an author Eisntein knew already for he had certainly seen him quoted in Boltzmann's work. He was to read another paper by Reinganum the next month, in May 1901, in Winterthur, about an issue of great importance for him: Drude's classical free electron theory (*CP* 1 p 237; Doc. 111, n 9).

This reorientation of Einstein's thesis would prove effective, as expressed in a letter by Mileva to her friend Helena Savić, in November or December 1901: *"Albert has written a magnificient study, which he submitted as his dissertation. He will probably get his doctorate in a few months* […]. *It deals with the investigation of the molecular forces in gases using various phenomena"* (*CP* 1 Doc. 125).[54]

5. Conclusions

The bond between Albert Einstein's and Michele Besso's families came from the Polytechnic school environment from which Albert and Michele as well as their respective uncles Jakob Einstein and Vittorio Cantoni all graduated, and from the electric power industry in Italy. The meeting between Albert Einstein and Michele Besso has thus been put back in its right context. If they met before the autumn 1896, Michele may have been instrumental in Albert's initial training background.

The Einstein family moved to Milan and Pavia as a result of contacts already established a long time before with Italy. In this fast-developing

---

53 The *Festchrift* in honor of Lorentz also appeared in the mathematics library of the Milan *Politecnico* which at that time did not own the *Archives Néerlandaises des Sciences Exactes et Naturelles (Dutch Archives of Natural Sciences)*. It seems that this copy of the *Festschrift* belonged to Max Abraham, professor at the *Politecnico* from 1909 to 1915.

54 It was not submitted and Einstein obtained the refund of his registration fees from the University of Zürich on 1st February 1902 (*CP* 1 Doc. 132).

industrial landscape undergoing fundamental restructuring processes, the Einsteins were in contact with leading figures from the industrial electricity sector and the financial sector (Colombo, Ferraris, Luzzatti, etc.). These leading figures who were also related to Michele Besso 's family, certainly played a role in enabling the Einstein family to settle under excellent conditions, despite the difficulties of the family business.

Albert and Michele were reunited in Milan from 1899 to 1901. This period is important to understand Einstein's training background. He carried on a research projects that he had undertaken in Zürich and would discuss them regularly with Michele. It foreshadowed the informal collaboration they would engage in as from 1904 in Bern.

The *Istituto Lombardo*, *Accademia di Scienze e Lettere*, which provided the link between the industrial sector and scientific research, was a major player in the economic development of Lombardy. There were many members of the *Istituto* who taught at the *Politecnico*, for instance Michele's uncle, Giuseppe Jung with whom Einstein seemingly remained in contact after he left for Bern.

In Milan, Einstein was working on papers published in the scientific journals available at the *Istituto Lombardo* library located in the *Brera* Palace near his home. A crossed reading of the scientific observations Einstein sent to Mileva Marić with this library collection, sheds new light on that time of Albert Einstein's life, as for example, the shift in the orientation of his thesis.

As a conclusion, it should be noted that in Milan, Einstein enjoyed an extremely favourable scientific environment and very good working conditions which allowed him to develop his ideas. It is therefore important to deepen our knowledge of this Milanese period to understand better the development of his questioning mind.

Acknowledgements

I would like to thank most sincerely Professor Gianpiero Sironi, President of the *Istituto Lombardo, Accademia di Scienze e Lettere*, for his welcome and for having made himself available for our interviews, as well as the employees of the *Istituto*. I am most grateful to Professor Andrea Silvestri, for proofreading this text and for his most useful comments to clarify several points. I want to thank Valeria Cantoni, Tullo's great-granddaughter and Vittorio Cantoni,

Vittorio's grandson, for providing me with information on their family. I also wish to extend my thanks to Dottoressa Giuseppina Colombo, administrative manager of the *Brioschi* mathematics library at the Milan *Politecnico*, for her cooperation and Mr Andrea Sottile, from the *Ricci* mathematics library at the University of Milan, for his decisive help since the beginning. I also thank Matelda Lo Fiego for her documentary support, my colleague and friend Jean-Pierre Provost for our discussions, as well as my father for assisting me with the Italian translation. Lastly, my sincere gratitude goes to Claudine Dumaine for translating in English the original French text.

BIBLIOGRAPHY

Besso, B. 1864. *Le grandi invenzioni e scoperte, antiche e moderne, nelle scienze, nell'industria e nelle arti*, Treves, Milano.

Besso, B. 1871 a. *Il Cenisio illustrato e descritto*, Luigi Mattirolo, Torino.

Besso, B. 1871 b. *L'elettricità e le sue applicazioni*, Treves, Milano.

Bevilacqua, F. and Renn, J. (eds) 2005. *Albert Einstein, Ingegniere dell'universo*, Skira, Milano.

Battimelli, G. and Ianniello, M.G. 2013. *Fermi e dintorni, due secoli di fisica a Roma (1748-1960)*, Mondadori Università, Milano.

Bollettino della associazione fra gli ingegneri ed architetti ex-allievi del Politecnico milanese 1927, Milano.

Boltzmann, L. 1896-1898. *Vorlesungen über Gastheorie*, part 1 and 2, Johann Ambrosius Barth, Leipzig.

Cambria, R. 1982, *Giuseppe Colombo* in *Dizionario Biographico degli Italiani*, **27**. <http://www.treccani.it/enciclopedia/giuseppe-colombo_(Dizionario-Biografico)/>

Colombo, A. 2014. *Milano si accende. Quando la luce elettrica illuminò i sogni degli italiani*, Bompiani.

Colombo, G. 1877-1878. *Manuale dell'Ingegnere civile e industriale*, Hoepli, Milano.

Cremona, L. and Jung, G. 1879. *Le figure reciproche nella statica grafica*, 3rd ed, Hoepli, Milano.

Décaillot, A.-M. 2008. *Cantor et la France: correspondance du mathématicien allemand avec les Français à la fin du XIXe siècle*, Kimé, Paris.

De Ianni, N. 2009. *Il ministro soldato. Vita di Guido Jung*, Rubbettino, Napoli.

Drude, P. 1894. *Physiks des aethers auf elektromagnetischer Grundlage*, Ferdinand Encke, Stuttgart.

Drude, P. 1900a. Zur Elektronen Theorie der Metalle, I. Teil, *Ann. Phys.* **1**: 566-613.

Drude, P. 1900b. Zur Elektronen Theorie der Metalle, II. Teil, *Ann. Phys.* **3**: 369-402.

Einstein, A. 1982. How I created the theory of relativity, English translation Y. Ono from notes of J. Ishiwara, *Physics Today*, **35**(8): 45-47.

Einstein, A. 1901. Folgerungen aus den Capillaritätserscheinungen, *Ann. Phys.* **3** :513-523.

Einstein, A. 1905. Zur Elektrodynamik bewegter Körper, *Ann. Phys.* **17**: 891-921.
Fölsing, A. 1997. *Albert Einstein, a biography*, English translation by Osers, E., Penguin Books, New-York.
Frank, P. 1947. *Einstein, his life and time*, Alfred Knopf, New-York.
Fregonese, L. 2005. *Gioventù felice in terra pavese. Le lettere di Albert Einstein al Museo per la Storia dell'Università di Pavia,* Cisalpino-Istituto editoriale universitario, Milano.
Gatti E., and Robbiati, A. (eds) 2007-2009. *Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere*, 3 vol., Libri Scheiwiller, Milano.
Gobbo, R. 2005. L'archivio di Galileo Ferraris, *Rassegna degli archive di stato*, nuova serie 1, **1-2**, Roma.
Heine, E. 1878-1881. *Handbuch der Kugelfunctionen, Theorie und Anwendungen* Reimer, Berlin.
Helmholtz, H. 1895. *Wissenschaftliche Abhandlungen*, vol. 3, Barth, Leipzig.
Hertz, H. 1892. *Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft*, Barth, Leipzig.
Hettler, N. 1996. *Die Elektrotechnische Firma J. Einstein u. Cie – 1876-1894*, Green e-Book, Universität Stuttgart.
Lodari, R. 2002. *Giardini e ville del Lago Maggiore. Un paesaggio culturale tra Ottocento e Novecento*, Centro Studi Piemontesi, Torino.
Lori, F. 1941. *Storia del R. Politecnico di Milano*, Cordani, Milano.
Maggi, G.A. 1927. Giuseppe Jung, Commemorazione letta nell'adunanza del 14 aprile 1927, *Rendiconti Istituto Lombardo*, **60**: 291-307.
Marcillac, P. 1893. Le transport d'énergie électrique de Tivoli à Rome, *La lumière électrique*, **40**: 7-16.
Meyer, O.E. 1895. *Die kinetische Theorie der gase. In elemetarer Darstellung mit matematischen Zusätzen*, 2nd ed. vol. 1, Maruschke & Berendt, Breslau.
Milza, P. 2014. *Histoire de l'Italie, des origines à nos jours*, Maury, Millau.
Mori, G. (ed.) 1992. *Storia dell'industria elettrica in Italia. Le origini* 1882-1914, 2 vol., Laterza, Roma-Bari.
Offizieller Bericht ueber die Internationale Elektrotechnische Ausstellung in Frankfurt am Main 1891, 1894, Bd II, *Vorstand der Internationalen Elektrotechnischen Ausstellung in Frankfurt am Main*, Sauerländer, J. D., Frankfurt am Main.
Ostwald, W. 1893. *Lehrbuch der allegemeinen Chemie*. Vol. 2. *Chemische Energie*. 2nd ed. Wilhelm Engelmann, Leipzig.
Pais, A. 1982, *Subtle is the Lord: the science and life of Albert Einstein*, Clarendon, Oxford.
Pavese, C. 1993. *Carlo Esterle*. Dizionario Biografico degli Italiani, **43**. <http://www.treccani.it/enciclopedia/carlo-esterle_(Dizionario-Biografico)/>
Planck, M. 1900. Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum, *Verhandlungen der deutschen physikalischen Gesellschaft*, **2**: 237-245.
Planck, M. 1901a. Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum. *Beiblätter zu Ann. Phys.*, **25**(3): 190-191.
Planck, M. 1901b. Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum. *Ann. Phys.*, 3: 563-573.

Pyenson, L. 1985. *The young Albert Einstein, The advent of relativity*, Adam Hilger, Bristol.
Raspagliesi, R. 2012. *Guido Jung. Imprenditore ebreo e ministro fascista*, FrancoAngeli, Milano.
Raveau, C. 1893, *Lumière électrique,* **49**: 7-12, 169-172, 263-267, 320-324, 415-418, 466-474, 514-519, 569-573, 617-620.
Reiser, A. 1931. *Albert Einstein, A biographical portrait*. Throton Butterworth, London.
Reinganum, M. 1900. Molekuläre Anziehung in schwach comprimierten Gasen, *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles*, **5**: 574-582.
Renn, J. and Schulmann, R. (eds.) 1992. *Albert Einstein, Mileva Marić*: *The love letters*, translated by S. Smith, Princeton, Princeton University Press.
Righi, S. 2014. *La città illuminata : l'intuizione di Giuseppe Colombo, la Edison e l'elettrificazione dell'Italia*, Rizzoli, Milan.
Robbiati, A., Franceschini, M., Vailati, C., Terni, F. 2013. *L'Istituto Lombardo, Academy of Sciences and Letters*, Istituto Lombardo, Milano (Internal document).
Sanesi, E. 1982. L'impresa industriale di Hermann e Jacob Einstein a Pavia (1894-1896), *Bollettino della Società Pavese di Storia* **34**: 198-210.
Sauer, T. 2014. Marcel Grossmann and his contribution to the general theory of relativity. *Proceedings of the Thirteenth Marcel Grossman Meeting on General Relativity* edited by Jantzen, R. T., Rosquist, K. and Ruffini R., World Scientific, Singapore.
Savallo, G. 1902. *Nuova guida della città di Milano*, Milano.
Scolari Sellerio Jesurum, A. 1967. *Marco Besso. Dizionario Biografico degli Italiani* – **9**. <http://www.treccani.it/enciclopedia/marco-besso_(Dizionario-Biografico)/>
Seelig, C. 1956. *Albert Einstein*, *A documentary biography*, Staples Press, London.
Silvestri, A. 2005. *Omaggio ad Albert Einstein*, Politecnico di Milano, Milan.
Speziali, P. 1979 (ed.). *Albert Einstein, Michele Besso: Correspondance: 1903-1955*, Herman, Paris.
Stachel, J. (ed.) 1987. *The collected papers of Albert Einstein*, vol.1, *The early years*, 1879-1902, Princeton University Press, Princeton English translation by Beck, A. et Havas, P. 1987, Princeton University Press, Princeton.
Steen, J. 1991. *Eine neue Zeit, Die Internationale Elektrotechnische Ausstellung 1891*, Frankfurt am Main Historisches Museum, Frankfurt.
Wien, W. 1898. Ueber die Fragen, welche die translatorische Bewegung des Lichtäthers betreffen. *Ann. Phys. und Chem.* **65**: i-xvii (Beilage).

Annex. The Besso-Cantoni family

At the top Davide Besso. Second row from left to right: Giuseppe Jung, Eugenio Norsa and Vittorio Cantoni. Third row, the grandparents and parents of Michele Besso: Lisa Maroni- Cantoni, Salvatore Besso, the parents of Michele Erminia Cantoni and Giuseppe Besso, Regina Cusin-Besso and Angelo Cantoni. Below on the left side, Beniamino and his wife Amalia Goldmann Besso. At the lower right corner, Marco Besso. Photography: *Marco Besso Foundation, Rome.*



INDICE DEL VOLUME

SCALABRINO G., VEBER D., Vitamin B_{12} and normal prions: two fields apparently so far, but in reality so near 3

COLOMBO L., Semiconduttori nanostrutturati per applicazioni termoelettriche: un concetto innovativo dimostrato al computer 9

LOINGER A., MARSICO T., The dark energy explained by a Schwarzschildian cosmology - *et cetera* 23

CAGLIOTI G., BENEDEK G., COCCHIARELLA L., The perception of ambiguous images as a quantum information process 35

GRISONI M.M., Dall'epistolario di Carlo Ermes Visconti, note su vicende di monumenti milanesi 51

GUAGENTI GRANDORI E., Previsioni incerte decisioni difficili 95

DE BERNARDI F., SACCHI LANDRIANI G., Su alcune cinquecentine scientifiche della Biblioteca dell'Istituto Lombardo 113

BOTTANI C.E., I principi della dinamica di Tartaglia e Cardano nelle *cinquecentine* dell'Istituto Lombardo 131

RAMBALDI E.I., L'edizione cardaniana del Consiglio Nazionale delle Ricerche; un'occasione perduta 143

MONTI C., Le applicazioni delle nuove modalità operative miste al rilievo della Guglia Maggiore del Duomo di Milano 149

DE LORENZO V., La biologia sintetica come un nuovo quadro interpretativo dei sistemi viventi 167

BITTANTI S., Maxwell e gli anelli di Saturno 185

SECCHI A., Pancreas and islet transplantation: clinical indications and clinical results 201

TERENGHI G., Neuronal apoptosis and intervention strategies 219

LOINGER A., MARSICO T., On the relativistic gravitational collapse *et cetera* 229

BOTTARO A., Superhydrophobic surfaces for drag reduction 239

DE SILVESTRI S., Il laser: fulcro di grandi infrastrutture di ricerca 269

FUGANTI C., *L*-Tirosina: animale o vegetale? 277

BRACCO C., Einstein and Besso: from Zürich to Milan 285

INDICE PER MATERIA

ARCHITETTURA

Storia della scienza

GRISONI M.M., Dall'epistolario di Carlo Ermes Visconti, note su vicende di monumenti milanesi 51

INGEGNERIA

MONTI C., Le applicazioni delle nuove modalità operative miste al rilievo della Guglia Maggiore del Duomo di Milano 149

Processi decisionali

GUAGENTI GRANDORI E., Previsioni incerte decisioni difficili 95

SCIENZE BIOLOGICHE

DE LORENZO V., La biologia sintetica come un nuovo quadro interpretativo dei sistemi viventi 167

SCIENZE CHIMICHE

FUGANTI C., *L*-Tirosina: animale o vegetale? 277

SCIENZE FISICHE

COLOMBO L., Semiconduttori nanostrutturati per applicazioni termoelettriche: un concetto innovativo dimostrato al computer 9

CAGLIOTI G., BENEDEK G., COCCHIARELLA L., The perception of ambiguous images as a quantum information process 35

DE SILVESTRI S., Il laser: fulcro di grandi infrastrutture di ricerca 269

Collasso gravitazionale

LOINGER A., MARSICO T., On the relativistic gravitational collapse *et cetera* 229

Dark energy

LOINGER A., MARSICO T., The dark energy explained by a Schwarzschildian cosmology - *et cetera* 23

Fluidodinamica

BOTTARO A., Superhydrophobic surfaces for drag reduction 239

SCIENZE MEDICHE

SCALABRINO G., VEBER D., Vitamin B_{12} and normal prions: two fields apparently so far, but in reality so near 3

SECCHI A., Pancreas and islet transplantation: clinical indications and clinical results 201

TERENGHI G., Neuronal apoptosis and intervention strategies 219

SCIENZE NATURALI

DE BERNARDI F., SACCHI LANDRIANI G., Su alcune cinquecentine scientifiche della Biblioteca dell'Istituto Lombardo 113

STORIA DELLA SCIENZA

BOTTANI C.E., I principi della dinamica di Tartaglia e Cardano nelle *cinquecentine* dell'Istituto Lombardo 131

RAMBALDI E.I., L'edizione cardaniana del Consiglio Nazionale delle Ricerche; un'occasione perduta 143

BITTANTI S., Maxwell e gli anelli di Saturno 185

BRACCO C., Einstein and Besso: from Zürich to Milan 285

Finito di stampare nel mese di marzo 2016

Decreto Pres. Tribunale 10 gennaio 1961, n. 5504 registro cancelleria
Direttore responsabile: Adele Robbiati Bianchi