ISTITUTO LOMBARDO
ACCADEMIA di SCIENZE e LETTERE



Rendiconti

CLASSE DI SCIENZE MATEMATICHE E NATURALI

Vol. 149
(2015)

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. 149
(2015)

Istituto Lombardo di Scienze e Lettere

MILANO

ISTITUTO LOMBARDO - ACCADEMIA DI SCIENZE E LETTERE

RENDICONTI

CLASSE DI SCIENZE MATEMATICHE E NATURALI

Responsabile scientifico
Carlo Domenico Pagani

Comitato di redazione
Silvio Beretta
Stefano Maiorana
Cinzia Bearzot
Carlo Domenico Pagani

Pubblicato con il contributo di
Politecnico di Milano
Università Cattolica del Sacro Cuore, Milano
Università Commerciale L. Bocconi, 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 2019



PAGEPress Publications
via A. Cavagna Sangiuliani, 5
27100 Pavia, Italy
T. +39.0382.464340
F: +39.0382.34872

OPTOGENETICA: CONTROLLARE I NEURONI CON LA LUCE

ANNA MORONI (*)

Nota presentata dal s.c. Martino Bolognesi
(Adunanza del 22 gennaio 2015)

SUNTO. – L'optogenetica è una tecnica in forte espansione nelle neuroscienze che permette di manipolare l'attività neuronale con la luce. Abbiamo creato mediante tecniche di ingegneria proteica un canale ionico selettivo al potassio (K^+) che permette di inibire l'attività elettrica dei neuroni con la luce. Il canale BLINK è stato ottenuto collegando il modulo LOV2 della proteina fototropina di pianta al canale ionico virale Kcv. In seguito a illuminazione con luce blu (450 nm), BLINK iperpolarizza il potenziale di membrana dei neuroni e ne impedisce il *firing*. Esperimenti pilota in un modello murino di dolore neuropatico hanno mostrano che BLINK può essere impiegato per ridurre la sensazione di dolore a lungo termine.

***

ABSTRACT. – Optogenetics is a booming technique in neuroscience that allows manipualtion of neuronal activity by light. Neuronal activation can be achieved by the activation of light-gated cation channels while neuronal inhibition relies on the activation of chloride pumps and channels. We have engineered a light-gated potassium (K^+) channel (BLINK) by linking the plant photoreceptor module LOV2 to the viral channel Kcv. Upon illumination with blue light (450 nm), BLINK channel hyperpolarizes neurons to E_K and this effect persists for several minutes even in the dark. Pilot experiments in a mouse pain model show that this protracted light-off activity can be successfully employed for long term pain relief after activation of the channel by a short pulse of light.

(*) Dipartimento di Bioscienze, Università degli Studi di Milano, Italia.
E-mail: anna.moroni@unimi.it

Introduzione

Da anni molte aree della biologia e della medicina sono alla ricerca di un sistema non invasivo che permetta di controllare le funzioni delle cellule con la luce [1]. Un progresso notevole in questo campo è stato raggiunto recentemente dall'optogenetica, una tecnologia che utilizza proteine geneticamente codificate sensibili alla luce per controllare un ampio spettro di bersagli che vanno dalle singole proteine alle complesse cascate di trasduzione del segnale [2]. Un'applicazione frequente dell'optogenetica è nell'ambito della neurobiologia, dove la luce viene utilizzata per controllare l'attività dei neuroni o di altre cellule eccitabili che esprimono proteine fotoattivabili [3]. La stimolazione a distanza dei circuiti neuronali è comunemente ottenuta attraverso canali cationici regolati dalla luce, channelrodopsin (ChR) che depolarizzano la cellula [4]. L'inibizione invece è ottenuta principalmente attraverso pompe ioniche fotosensibili, che trasportano ioni e iperpolarizzano le cellule. Le pompe come batterio-rhodopsina e alorhodopsina, utilizzano a questo scopo l'energia luminosa per spostare protoni (H^+) o ioni cloruro (Cl^-) contro i loro gradienti [5]. Sebbene in linea di principio siano adatte per iperpolarizzare le cellule e per controllarne l'eccitabilità, le pompe ioniche a base di opsina sono piuttosto inefficienti come strumenti optogenetici perché muovendo un solo ione per fotociclo, non riducono in maniera rapida la resistenza d'ingresso delle membrane cellulari. Inoltre, il funzionamento delle pompe crea gradienti ionici anomali nella cellula. Uno strumento alternativo per la riduzione efficiente delle correnti eccitatorie è stato ingegnerizzato trasformando le ChR in canali selettivi per lo ione cloro [6,7]. Questi canali si sono dimostrati efficaci per iperpolarizzare le cellule ma il loro uso è purtroppo limitato ad una certa classe di neuroni, cioè quelli con un gradiente favorevole per l'ingresso di Cl^- [8]. Un'altra limitazione all'uso di questi canali è la loro stretta dipendenza dal pH. A causa di queste carenze, sia delle pompe che dei canali di Cl^-, la comunità optogenetica è ancora alla ricerca di un canale più efficiente e che possa essere utilizzato per l'iperpolarizzazione di tutti i tipi di cellule. Dato il ruolo universale dei canali per il K^+ nel terminare i potenziali d'azione e prevenire l'attività di firing delle cellule eccitabili [9], un canale per il K^+ controllato dalla luce sarebbe lo strumento optogenetico ideale per l'inibizione neuronale. Diversi laboratori hanno affrontato questo problema e progettato allo scopo canali per il K^+ sintetici e luce-attivati. Ad esem-

pio, è stato ingegnerizzato il canale SPARK, legando ad esso una molecola di azobenzene collegata ad uno ione tetraetilammonio che blocca il poro. L'assorbimento della luce, determina la contrazione dell'azobenzene che rimuove il bloccante dal poro attivando il canale [10,11]. Altri gruppi hanno invece utilizzato aminoacidi non naturali sensibili alla luce inseriti nelle proteine canale per indurne un gating foto-attivabile [12]. Infine, si è provato a coesprimere il canale con una proteina che funziona da interruttore fotoattivabile (lumitossina) che rilascia in prossimità del canale una tossina inibitoria [13].

Tutti questi canali sono in grado d'iperpolarizzare le cellule e inibire il firing neuronale. Tuttavia, ciascuno di essi presenta alcuni svantaggi, che ne limitano l'applicazione. Il canale SPARK, ad esempio, richiede l'aggiunta di azobenzene come co-fattore esogeno [10,11]; questo può limitarne l'applicazione. Il canale che funziona con la lumitossina è già attivo anche al buio e ha pertanto una gamma dinamica molto ristretta, il che rende questo costrutto piuttosto inefficace [13]. Infine, l'attivazione da luce di un aminoacido non naturale inserito nel canale non è reversibile [12].

Nel complesso, questa breve panoramica degli strumenti optogenetici utilizzati per l'iperpolarizzazione delle cellule sottolinea che il campo è ancora alla ricerca di un canale K^+ completamente codificato geneticamente, attivato in modo reversibile e perfettamenete chiuso al buio.

Risultati

Ispirati dalla necessità di un canale K^+ con le suddette caratteristiche, abbiamo recentemente ingegnerizzato un canale sintetico, in cui un modulo "sensore", il dominio LOV2 della fototropina vegetale, è stato collegato al canale per il K^+ Kcv, che funge da modulo "effettore". Il design di questo canale sintetico è stato ispirato da risultati precedenti in cui avevamo dimostrato che i canali del K^+ sono elementi modulari in cui il poro, che conduce gli ioni, è collegato ai domini regolatori, che ne controllano l'apertura e la chiusura [14]. Qualsiasi modifica conformazionale del dominio regolatorio viene trasmessa all'unità del poro, alterando il flusso ionico. Questa architettura naturale dei canali di K^+ può essere imitata in proteine sintetiche accoppiando al poro del canale un "sensore" esogeno, prelevato cioè da altre proteine [14]. Con questa logica avevamo costruito in passato, canali ionici sintetici attivati da vari

stimoli: voltaggio, calcio intracellulare e ROS [14,15,16]. L'elemento centrale di questi canali è un poro selettivo al K^+ scoperto in precedenza in una classe di virus, Phycodnaviridae, che infetta le alghe [17]. I canali virali sono strutturalmente semplici e funzionalmente molto robusti, mantenendo la loro funzione anche in seguito a significative modifiche strutturali. I canali virali rappresentano pertanto un elemento essenziale per il successo dei progetti d'ingegneria [14,15,16]. Tale successo è in parte dovuto alla conoscenza dettagliata del loro funzionamento. Negli ultimi dieci anni, nel nostro laboratorio si è studiato a fondo la relazione struttura-funzione di queste piccole proteine [17,18] arrivando a comprenderne i cambiamenti conformazionali alla base del meccnismo di aperutra e chiusura [19].

Il progetto d'ingegneria proteica più impegnativo è stata la costruzione *ex novo* di un canale K^+ sensibile alla luce blu. In questo progetto abbiamo collegato il poro del canale virale Kcv al dominio LOV2 (Luce - Ossigeno- Voltaggio) dalla fototropina, un recettore della luce blu di pianta. La fusione delle due componenti proteiche ha richiesto diverse fasi di ottimizzazione, che sono state effettuate sia in lievito con l'ausilio della tecnica della complementazione di mutanti incapaci di assorbire K^+, sia misurando le correnti ioniche in sistemi eterologhi con la tecnica del patch clamp. La *Fig. 1* mostra lo schema generale del canale che abbiamo chiamato BLINK-1, e l'evidenza sperimentale dell'attivazione/deattivazione, reversibile del canale in risposta alle transizioni luce/buio in una cellula di mammifero. La sensibilità alla luce blu del canale è dovuta al cromoforo flavina mononucleotide, FMN, associata al dominio LOV2. In seguito all'assorbimento di luce blu, la flavina si lega in modo covalente alla proteina che subisce un cambiamento conformazionale favorendo il movimento di un'alfa elica (Jα). Questo cambiamento conformazionale indotto dalla luce nel dominio LOV2 era già stato utilizzato da altri come componente costruttivo di proteine optogenetiche sintetiche [20]. La descrizione dettagliata delle proprietà di base del canale BLINK-1 attivato dalla luce blu è riportata nel lavoro pubblicato nel 2015 sulla rivista Science [21]. I dati evidenziano alcune caratteristiche funzionali positive di questo canale sintetico:

i) è completamente codificato geneticamente,
ii) è chiuso al buio e si attiva in risposta all'illuminazione con luce blu,
iii) non si disattiva durante illuminazione prolungata,
iv) l'attivazione del canale è completamente reversibile al buio,

v) l'attivazione è molto sensibile alla luce e la metà dell'attivazione massima si ottiene con 25 $\mu W/mm^2$,
vi) la conduttanza unitaria è elevata >100 pS,
vii) il canale può essere espresso in zebrafish e utilizzato *in vivo* per la modulazione del comportamento dei pesci.

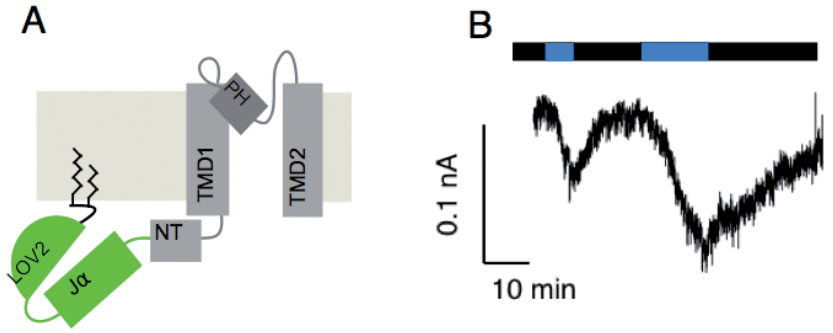


Fig. 1 – Schema costruttivo e funzione del canale per il K^+ sensibile alla luce blu BLINK-1. (A) Ogni monomero comprende il canale virale Kcv (grigio) con domini transmembrana (TMD1, TMD2), elica del poro (PH) e N-terminale citosolico (NT), il dominio LOV2 (verde) dalla fototropina, l'elica Jα e un dominio di miristilazione (nero). (B) Quando il canale è espresso transientemente in cellule HEK293 di mammifero, il passaggio da buio a luce blu determina l'apertura del canale con un conseguente aumento della conduttanza della cellula al K^+, che si inverte al buio (da Cosentino et al.*, 2015).*

Ulteriori applicazioni del canale BLINK1 hanno rivela- to alcuni difetti di questa proteina sintetica. Uno dei limiti rilevati è la sua bassa espressione nelle cellule neuronali di mammifero, limite che ha impedito l'applicazione del nuovo strumento optogenetico in modelli animali quali topo e ratto. Uno degli obiettivi principali delle successive modifiche alla proteina BLINK-1 è stato migliorarne l' espressione in neuroni di topo. Dopo aver provato diversi segnali di trafficking cellulare, abbiamo ottenuto un nuovo canale chiamato BLINK2, che ha dato risultati positive in mammifero [22]. I principali risultati riassunti in breve sono:

– BLINK2 si esprime in neuroni di mammifero (topo e ratto). In collaborazione con Monica Di Luca, (Università degli Studi di Milano) abbiamo infettato le colture neuronali ippocampali primarie di ratto con un costrutto virale (AAV) che esprime BLINK2 sotto il controllo del promotore umano Synapsin (hSyn) (AAV - hSyn-

BLINK2). L'analisi delle immagini confocali mostra che BLINK2 è espresso sulla superficie dei neuroni ed è principalmente localizzato nel distretto somatodendritico.

– BLINK2 può essere usato per silenziare i neuroni. Il canale è stato espresso da Raffaella Tonini (IIT, Genova) nel nucleo dorsale del rafe (DRN) del mesencefalo di topo. Registrazioni elettriche su fettina hanno mostrato che una breve esposizione alla luce blu induce una rapida iperpolarizzazione della membrana e un completo silenziamento dell'attività elettrica del neurone. I dati mostrano inoltre che questa inibizione è di lunga durata e che il recupero al buio è molto lento (dell'ordine delle decine di minuti).
– L'attivazione di BLINK2 altera il comportamento nei modelli animali. In una linea transgenica stabile di zebrafish, che esprime BLINK2, abbiamo ottenuto l'espressione mirata di BLINK2 in motoneuroni e l'alterazione della risposta di fuga degli embrioni. Inoltre, BLINK2 è stato provato anche in ratto. Studi comportamentali hanno dimostrato che un'attivazione di BLINK2 nei neuroni sensoriali riduce notevolmente la sensazione di dolore dell'animale. Questo ci permette di ipotizzare un impiego futuro di BLINK2 nella terapia del dolore periferico neuropatico.

BIBLIOGRAFIA

[1] Tischer, D., Weiner, O.D. (2014) Illuminating cell signaling with optogenetic tools. Nat. Rev. Mol. Cell Biol. 15:551-558.
[2] Zhou, X.X. et al. (2015) Investigating neuronal function with optically controllable proteins. Frant. Mol. Neurosci. 8:1-15.
[3] Fenno, L., Yizahar, O., Deisseroth, K. (2011) The development and application of optogenetics. Annu. Rev. Neurosci. 34:389-412.
[4] Nagel, G. et al. (2005) Channelrhodopsins direct light-gated cation channels. Biochem. Soc. Trans. 33:863-866.
[5] Kandori, H. (2015) Ion-pumping microbial rhodopsins. Front Mol. Biosci. 52:doi 10.3389/fmolb.2015.00052.
[6] Berndt, A. et al. (2014) Structure-guided transformation of channelrhodopsin into a light-activated chloride channel. Science 344:420-424.
[7] Wietek, J. et al. (2014) Conversion of channelrhodopsin into a light-gated chloride channel. Science 344:420-424.
[8] Hübner, C. et al (2001) Disruption of KCC2 reveals an essential role of K-Cl cotransport already in early synaptic inhibition. Neuron 30:515-524.

[9] Hille, B. (2001) Ionic channels of excitable membranes. Sinauer Sunderland MA.
[10] Banghart, M., et al. (2004) Light-activated ion channels for remote control of neuronal firing. Nature Neuroscience 7:1381-1386.
[11] Janovjak, H. et al. (2010) A light-gated, potassium-selective glutamate receptor for the optical inhibition of neuronal firing. Nat. Neuroscience 13:1027-1032.
[12] Kang, J.Y. et al. (2013) In vivo expression of a light-activatable potassium channel using unnatural amino acids. Neurone 80:358-370.
[13] Schmidt, D. et al. (2013) A fully genetically encoded protein architecture for optical control of peptide ligand concentration. Nat. Commun. 5: doi:10.1038/ncomms4019.
[14] Arrigoni, C. et al. (2013) The voltage-sensing domain of a phosphatase gates the pore of a potassium channel. J. Gen. Physiol. 141:389-3895.
[15] DiFrancesco, M.L. et al. (2015) Engineering a Ca^{2+} sensitive (bio) sensor from the pore-moduke of a potassium channel. Sensors 15:4913-4924.
[16] Schroeder, I. et al. (2013) Creation of a ROS-insensitive Kcv channel. Biochemistry 52:3031-3037.
[17] Plugge, B., et al. (2000). A potassium ion channel protein encoded by chlorella virus PBCV-1. Science 287:1641-1644.
[18] Tayefeh, S. et al. (2009) Model Development for the Viral Kcv Potassium Channel. Biophys. J. 96:485-498.
[19] Hoffgaard, F. et al. (2015) Tectonics of a K^+ channel: The importance of the N-terminus for channel gating. Biochim. Biophys. Acta 1848:3197-3204.
[20] Wu, Y.I. et al. (2009) A genetically encoded photoactivatable Rac controls the motility of living cells. Nature 461:104-108.
[21] Cosentino, C. et al. (2015) Engineering of a light-gated potassium channel. Science 348:707-710.
[22] Alberio, L. et al. (2018) A light-gated potassium channel for sustained neuronal inhibition. Nature Methods 15:969-976.

ALL RELATIVISTIC TRAJECTORIES OF BODIES ARE GEODESIC – *ET CETERA*

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

(Adunanza del 5 febbraio 2015)

SUNTO. — Si dimostra in vari modi che in relatività generale le traiettorie dei corpi sono sempre geodetiche, e pertanto non generano onde gravitazionali. Si dimostra poi che le soluzioni delle equazioni di Einstein a carattere ondulatorio non hanno alcuna reale esistenza fisica. Si dimostra infine la totale inaffidabilità dei modelli inflazionari. In Appendice alcune osservazioni complementari.

I dati sperimentali e osservativi confermano le nostre deduzioni.

ABSTRACT. — We prove in various ways that in general relativity (GR) the trajectories of the bodies are always geodesic — and therefore no gravitational wave (GW) is emitted. Then, we prove that the solutions of the Einstein field equations with a wave character do not have any physical existence. We prove finally the full unreliableness of the inflationary models. In Appendix some complementary remarks.

The experimental and observational data corroborate our deductions.

PPACS:General relativity

1. — In sects. **2**÷ **5** we give several demonstrations that all the relativistic trajectories of bodies are *geodesic*. This property represents an evident proof that the gravitational waves (GWs) do not have a physical existence. The solutions of Einstein field equations with a wave character are only formal undulations quite destitute of a physical reality; various demonstrations of this fact are exposed in sects. **6**÷ **9**. In sect. **10** a proof of the unreliableness of the inflationary models.

The experimental and observational data (sects. **11** and **12**) corroborate our conclusions. The widespread, but erroneous, belief in the real-

(*) Dipartimento di Fisica, Università di Milano, Via Celoria, 16 - 20133 Milano (Italy). Email angelo.loinger@mi.infn.it

(**) Liceo Classico "G. Berchet", Via della Commenda, 26 - 20122 Milano (Italy). Email: martiz64@libero.it

ity of the GWs has its origin in a superficial, but false, analogy with the electromagnetic waves.

In *Appendix* some complementary remarks.

2. – According to a clever treatment of the EIH-method developed by Infeld [1], we write, first of all, the Einstein field equations employing tensor densities:

$$(1)\quad \mathcal{R}_{\mu\nu} - \frac{1}{2}\, g_{\mu\nu}\mathcal{R} = -8\pi \mathcal{T}_{\mu\nu}\,; \quad (\mu,\nu = 0,1,2,3)\,; \quad (c = G = 1)\,;$$

$$(1')\quad \mathcal{R}_{\mu\nu} =: \sqrt{-g}\, R_{\mu\nu} \quad ; \quad \mathcal{R} =: \sqrt{-g}\, R \quad ; \quad \mathcal{T}_{\mu\nu} =: \sqrt{-g}\, T_{\mu\nu} \quad .$$

If $\delta(\mathbf{x} - \xi) =: \delta(x^1 - \xi^1)\delta(x^2 - \xi^2)\delta(x^3 - \xi^3)$ is the three-dimensional Dirac's generalized function, and ξ^1, ξ^2, ξ^3 are the space coordinates of a particle, we write for a "cloud" composed of s particles:

$$(2)\qquad \mathcal{T}^{\mu\nu} = \sum_{p=1}^{s} \overset{p}{\mathcal{T}}{}^{\mu\nu} \quad ,$$

$$(3)\qquad \overset{p}{\mathcal{T}}{}^{\mu\nu} = \overset{p}{m}(t)\, \frac{\mathrm{d}\,\xi^{p\,\mu}}{\mathrm{d}\tau}\, \frac{\mathrm{d}\,\xi^{p\,\nu}}{\mathrm{d}\tau}\, \overset{p}{\delta}(\mathbf{x} - \xi) \quad ;$$

now, if the world-lines of the particles never intersect, it is not difficult to verify that the differential equations of motion of the particles:

$$(4)\qquad \sum_{p=1}^{s} \overset{p}{\mathcal{T}}{}^{\mu\nu}{}_{;\nu} = 0 \quad , \quad (\mu = 0,1,2,3) \quad ,$$

where the semicolon denotes a covariant derivative, give the equations of *geodesic* lines. No limitation exists for the values of the kinematical elements (velocities, accelerations, time derivative of the accelerations, *etc.*). The transition from a discrete to a continuous "dust" implies simply the substitution:

$$(5)\qquad \mathcal{T}^{\mu\nu} \to \varrho(t,\mathbf{x})\, \frac{\mathrm{d}\xi^{\mu}(t,\mathbf{x})}{\mathrm{d}\tau}\, \frac{\mathrm{d}\xi^{\nu}(t,\mathbf{x})}{\mathrm{d}\tau}\, \sqrt{-g} \quad ,$$

where ϱ is the mass density. –

We see that the gravitational self-force theory, which is based on a conceptually wrong analogy with the electromagnetic self-force of a charge, does not make any sense.

A last remark: in the *linearized* version of GR, the "dust" particles describe *straight* lines in a Minkowskian spacetime.

3. – Let us consider a system of non-interacting bodies moving in a Minkowskian spacetime. If $q^\mu(\tau)$, $\mu = 0, 1, 2, 3)$, are the translational coordinates of one of them as functions of proper time τ, we have that

$$\mathcal{L}_{(0)} := \eta_{\mu\nu} \frac{\mathrm{d}q^\mu}{\mathrm{d}\tau} \frac{\mathrm{d}q^\nu}{\mathrm{d}\tau} = c^2 \tag{6}$$

is a first integral of Lagrange equations

$$\frac{\partial \mathcal{L}_{(0)}}{\partial q^\mu} - \frac{\partial}{\partial \tau} \frac{\partial L_{(0)}}{\partial \left(\mathrm{d}q^\mu/\mathrm{d}\tau\right)} = 0 \quad , \tag{7}$$

from which:

$$\frac{\mathrm{d}^2 q^\mu}{\mathrm{d}\tau^2} = 0 \quad , \tag{8}$$

i.e. a rectilinear and uniform motion.

Quite analogously, if we consider a system of bodies interacting *only* gravitationally and moving in the Riemann-Einstein manifold created by them, we have that

$$\mathcal{L} := g_{\mu\nu}\left[q(\tau)\right] \frac{\mathrm{d}q^\mu}{\mathrm{d}\tau} \frac{\mathrm{d}q^\nu}{\mathrm{d}\tau} = c^2 \tag{9}$$

is a first integral of Lagrange equations

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q^\mu} - \frac{\partial}{\partial \tau} \frac{\partial L}{\partial \left(\mathrm{d}q^\mu/\mathrm{d}\tau\right)} = 0 \quad , \tag{10}$$

which coincides with the *geodesic* equations

$$\frac{\mathrm{d}^2 q^\mu}{\mathrm{d}\tau^2} + \Gamma^\mu_{\varrho\sigma} \frac{\mathrm{d}q^\varrho}{\mathrm{d}\tau} \frac{\mathrm{d}q^\sigma}{\mathrm{d}\tau} = 0 \quad . \tag{11}$$

4. – Consider a continuous "cloud of dust", described by a material energy-tensor $T^{\mu\nu} = \varrho\, v^\mu v^\nu$, where ϱ is the invariant mass density and v^μ the four-velocity of the "dust" elements. A thin spacetime tube of world lines represents the motion of a "dust" corpuscle. Now, as it is known, this motion follows a *geodesic* trajectory. Consequently, *no GW is emitted*. With a suitable choice of the reference frame, it is possible to prove that also the motions of the corpuscles of an electrically charged "dust"

can be geodesically represented; nay, this result can be extended to the corpuscles of a "dust" which interact through any field of force [2].

5. – We read in Weyl [3] a penetrant analysis of a fundamental property of the general-relativistic coordinate systems. He wrote [3*b*)]: "... the concept of relative motion of several bodies has, as the postulate of general relativity shows, no more foundation than the concept of absolute motion of a single body. Let us imagine the four-dimensional world as a mass of plasticine traversed by individual fibers, the world lines of the material particles. Except for the condition that no two world lines intersect, their pattern may be arbitrarily given. The plasticine can then be continuously deformed so that not only one but all fibers become vertical straight lines." It is clear that this consideration implies that there exists always a coordinate transformation, which allows us to pass from any coordinate system for which some bodies are in motion to a *co-moving* coordinate system for which all these bodies are at rest.

Now, no class of privileged coordinate systems exists in GR, and any *physical* effect must be frame independent [4]. Consequently, the fact that bodies at rest cannot generate gravitational waves has a general significance: no coordinate system exists for which the motions of the bodies generate gravitational waves.

Remark that these considerations hold for the general case in which both gravitational and non-gravitational forces are present. For a different proof, founded on the Einstein field equations, that *all* the general-relativistic motions can be *geodesically* described, see our paper of ref. [2].

An immediate corollary: the gravitational field of a body, whose motion is geodesic, moves *en bloc* with the body, and is propagated *instantaneously*. In special relativity we have a partial analogue: the *static*-electromagnetic fields created by an electric charge in a rectilinear and uniform motion (a Minkowskian geodesic motion) move *along with* the charge, and are propagated *instantaneously* [5]. (This corresponds perfectly to the results found by an observer in a rectilinear and uniform motion, who travels with respect to the charge at rest).

This fact has been considered a paradox by some physicists, who have tried to get rid of it with the gratuitous surmise that it holds only for infinite spatio-temporal motions of the electric charge.

An instantaneous propagation of a field is not always in contradiction with the theory of relativity.

6. – The *wave-like nature* of undulatory metric tensors (with $R_{\iota\kappa\lambda\mu} \neq 0$, of course) *depends* on the reference system, *i.e.* is only a mathematical property of particular frames. Accordingly, these metric tensors do not represent physical GWs [6]. Remark further that the propagation velocity of any metric tensor depends on the reference system: with a suitable choice of general coordinates, this velocity can take any value between zero and the infinite.

We have here two precise consequences of the *general covariance* of GR.

7. – A famous thesis by Lorentz and Levi-Civita (which has been formally proved [7]) affirms that in Einstein field equations the material energy-tensor $T_{\mu\nu}$ is "balanced exactly" by $[R_{\mu\nu} - (1/2)g_{\mu\nu}\, R]\,/\kappa$, *which is the true gravitational energy-tensor*.

As Levi-Civita [8] emphasized, these facts have a momentous consequence: free waves and other purely gravitational phenomena are excluded. When the matter tensor $T_{\mu\nu}$ vanishes, the same must happen to the gravitational energy-tensor $[R_{\mu\nu} - (1/2)g_{\mu\nu}\, R]\,/\kappa$. "This fact entails a total absence of stresses, of energy flow, and also of a simple localization of energy." [8].

8. – In 1930 Levi-Civita [9] demonstrated that the functions $z(x), [x \equiv (x^0, x^1, x^2, x^3)]$, of the characteristic hypersurfaces $z(x) = 0$ of Einstein field equations are solutions of the Hamiltonian equation

$$H := \frac{1}{2}\, g^{\lambda\mu}(x)\, \frac{\partial z(x)}{\partial x^\lambda}\, \frac{\partial z(x)}{\partial x^\mu} = 0 \quad . \tag{12}$$

According to Levi-Civita, the equation $z(x) = 0$ gives the law of motion of an *electromagnetic* wave-front. This interpretation is quite obvious when $g^{\lambda\mu}(x)$ has a *non*-undulatory form. If $g^{\lambda\mu}(x)$ has a wavy form, there is no reason to repudiate the above interpretation, because the undulatory nature of $g^{\lambda\mu}(x)$ *depends on the chosen system of coordinates*.

Remark that Levi-Civita's conception is the natural extension of that valid for the null lines of *spacial* relativity.

Thus, also the general relativity contains the basic law of *geometric optics – and independently of Maxwell equations*.

9. – Any electromagnetic ray is a null geodesic in any spacetime – as it

is well known –, in particular, in the spacetime created by itself. Consequently, *no* undulatory, purely gravitational, and *autonomous* field is generated by the propagation of any electromagnetic wave in any spacetime manifold.

If the matter tensor $T_{\mu\nu}$ coincides with the electromagnetic energy-tensor $E_{\mu\nu}$, the Einstein field equations have as a necessary consequence that the equation

$$g^{\lambda\mu}\,\frac{\partial z(x)}{\partial x^{\lambda}}\,\frac{\partial z(x)}{\partial x^{\mu}} = 0 \tag{13}$$

is the equation of the characteristics of both Einstein and Maxwell equations [10]. (For Maxwell equations see Whittaker [11]).

10. – The *inflationary models* [12] are based on the following postulates: *i*) the existence of GWs; *ii*) the existence of a "quantum gravity", *i.e.* of a quantized GR; *iii*) the existence of quantum vacuum fluctuations of the Einsteinian metrics.

These postulates are destitute of any physical reality, as we shall prove.

Ad i) The non-existence of GWs has been demonstrated *ad abundantiam* in the previous sections.

Ad ii) The coefficients $g_{\mu\nu}, (\mu, \nu = 0, 1, 2, 3)$, of the Einsteinian metrics are *conceptually different* from the fields of any field theory, whose substrate is the fixed Minkowskian spacetime. The $g_{\mu\nu}$'s "are" the spacetime – a "plastic" spacetime –, they cannot be promoted to operator quantities. Therefore any reasonable program of a quantized GR is doomed to a failure. (See paper [13] for a detailed treatment of the question). The locution "quantum gravity" designs currently an inconsistent patchwork of disparate concepts and results of the quantum field theories acritically applied to general relativity.

Ad iii) the negation of statement *iii*) is an immediate corollary of *Ad ii*).

A final criticism: all the inflationary models lack of quantitative, mathematical treatments of the end of the action of the *inflation field* with the transition to Friedmann model.

11. – According to some authors (see, *e.g.*, [14]) an *indirect* experimental proof of the existence of GWs is given by the time decrease of the or-

bital period P_b of the binary pulsar B PSR1913+16. Since we have demonstrated, and in various ways, that in GR the GWs are non-existing physical objects, it is clear that the rate of change of P_b must have other causes, different from the emission of GWs, maybe the viscous losses of the unseen pulsar-companion, if it were, *e.g.*, a helium star. For a detailed treatment of the question, see paper [15].

A very good agreement between the measured value of $\mathrm{d}P_b/\mathrm{d}t$ and its theoretical evaluation has been obtained making use of the well-known quadrupole formula of the linearized approximation of GR – (for a standard derivation of this formula see [16]). Also post-Newtonian computations [17] give excellent agreement with the experimental results. However, these concordances are rather suspect, because both theoretical methods are misleading from the standpoint of the *exact* formulation of GR; in particular, they employ the unreliable notion of a gravitational *pseudo* energy-tensor (see Appendix, α)).

12. – The vain experimental researches for GWs by the gigantic LIGO-Virgo Collaboration have recently produced a paper entitled "Improved Upper Limits of the Stochastic Gravitational-Wave Background from 2009-2010 LIGO and Virgo Data" [18]. Stimulated by the (fictive) inflationary interpretation of the BICEP2 experiment [12], the LIGO-Virgo scientists aim at the discovery of the hypothesized stochastic GWs, that would be generated by superpositions of contributions by astrophysical and cosmological sources. However, they write in the abstract: "Consistent with predictions from most stochastic gravitational-wave background models, the data display no evidence of a stochastic gravitational-wave signal". And in the *Conclusions*: "With Advanced LIGO and Advanced Virgo detectors on the horizon, the sensitivity of interferometers to the SGWB will improve substantially in the coming years". Thus, they believe that their efforts will give a positive result. In reality, they are the victims of an *idée fixe*, and therefore they do not realize that the gravitational waves – like the phlogiston and the cosmic ether – belong to a past stage of the physical research.

APPENDIX – Some complementary remarks

α) *Pseudo* (*i.e.* false) gravitational momentum-energy-stress tensor: a spurious notion, which has been formulated in various ways, more or less "re-

fined", and which has been unobjectionably rejected by Levi-Civita [8] with a stringent mathematical consideration. We have an object which is covariant only under *linear* coordinate-transformations, and that can be exactly reduced to zero at any point of the spacetime manifold. Further, we can create this pseudo tensor in a flat spacetime – *i.e.*, in the absence of gravitation – by simply employing curvilinear coordinates. Many authors have utilized it by assuming restrictions of its application field, giving origin to hybrid (and meaningless) formulae, containing generally-covariant terms and terms which are covariant only under linear coordinate-transformations.

β) At the ends of the Thirties of past century, Einstein, Rosen, Infeld and other relativists had lost the belief in the real existence of the GWs. Thus, in the following years various sceptical considerations on the GWs were developed. In particular, Infeld and his pupil Scheidegger were very active in this field; the Einstein-Infeld-Hoffmann method (see Infeld [1]) played a fundamental role. This method is a perturbative treatment of Einstein field equations: one develops all the functions φ's that appear in these equations into a power series of a small parameter λ:

$$(A1) \qquad \varphi(x,\lambda) = \sum_{l=0}^{\infty} \lambda^l \underset{l}{\varphi}(x) \quad ;$$

thus, in particular ($\mu,\nu = 0,1,2,3$):

$$(A2) \qquad g_{\mu\nu}(x) = \eta_{\mu\nu} + \sum_{n=1}^{\infty} \lambda^n \underset{n}{h}_{\mu\nu}(x) \quad ,$$

if $\eta_{\mu\nu}$ is the usual Minkowski tensor.

To determine the motions of the point-masses of a discretized "dust" we have two perturbative approaches at our disposal: *i*) in the original EIH approach one searches the solutions of $R_{\mu\nu} = 0$, in perfect analogy with the mass-point solutions of Laplace equation $\triangle U = 0$; *ii*) in Infeld's approach one follows the procedure of sect. **2**. (Remark that the employment of Dirac's delta-functions is analogous to their employment in Newton theory).

In the approximations higher than the second there are terms describing a gravitational-radiation damping. However, one can perform *at any stage* a suitable coordinate transformation which reduces them to zero: the equations of motion acquire a "Newton-like" form [19] . This result is conceptually fundamental: it gives a significant corroboration of

our *exact* result of sect. **2**. The objection that Infeld has not postulated an "Ausstrahlungs-bedingung" is meaningless: in GR we can perform any continuous coordinate transformation.

γ) *Linearized approximation – or linear version – of GR*. There are two methods of deduction, the usual one [20] and that of Weyl [21]. In the first, one starts from the approximate equality $g_{\mu\nu} \approx \eta_{\mu\nu} + \varepsilon h_{\mu\nu}$, where ε is a small parameter, and one remarks that the symmetric field $h_{\mu\nu}$ is covariant *only* under the Lorentz transformations of the coordinates. Weyl [21] deduces the linear version of GR quite *independently* of the Einstein field equations. He proves that there is a linear field theory of gravitation in a Minkowskian spacetime, which has the gauge-invariance property

$$h^*_{\mu\nu} = h_{\mu\nu} + \frac{\partial \lambda_\mu}{\partial x^\nu} + \frac{\partial \lambda_\nu}{\partial x^\mu} \quad , \tag{A3}$$

where the four functions χ_μ are arbitrary, that gives the same equations of the conventional procedure [20]. However, in his paper [21] Weyl adds a conceptually fundamental remark: the trajectories of the particles of a "cloud of dust" are Minkowskian geodetics, *i.e.* their four-velocities u^μ satisfy the equations $\mathrm{d}u^\mu/\mathrm{d}s = 0$: rectilinear and uniform motions. "From the standpoint of Einstein's theory this is as it should be, because *the gravitational force arises only when one continues the approximation beyond the linear stage*." (It is clear that this conclusion does not concern the computations of the geodesics of a *test*-particle, or of a light-ray, in a *given* approximate field $g_{\mu\nu} \approx \eta_{\mu\nu} + \varepsilon h_{\mu\nu}$).

Of course, the field $h_{\mu\nu}$ can be quantized, but by virtue of the classical equations $\mathrm{d}u^\mu/\mathrm{d}s = 0$ *no* GW is emitted – the *graviton* is a science-fiction object.

REFERENCES

[1] L. Infeld, *Acta Phys. Polonica*, **13** (1954) 187 – and the references therein. See also L. Infeld and J. Plebanski, *Motion and relativity* (Pergamon Press, Oxford, *etc.*) 1960.

[2] A. Loinger and T. Marsico, *arXiv:1066.3844* [physics.gen-ph] 19 Jun 2010.

[3] *a*) H. Weyl, *Raum-Zeit-Materie*, Siebente Auflage (Springer-Verlag, Berlin, *etc.*) 1988, p.268, *b*)*Idem*, *Philosophy of Mathematics and Natural Science* (Princeton University Press, Princeton) 1949, p.105; *c*) *Idem*, *Mathematische Analyse des Raumproblems* (J. Springer, Berlin) 1923, Siebente Vorlesung; an Italian translation by A. Loinger: *Analisi matematica del problema dello spazio* (Zanichelli,

Bologna) 1991, Settima lezione.
[4] D. Hilbert, *Gött Nachr.*: Erste Mitteilung (20. Nov. 1915); zweite Mitteilung (23. Dez. 1916) — *Math. Annalen*, **92** (1924) 1; also in *Gesammelte Abhandlungen*, Dritter Band (J. Springer, Berlin) 1935, p.258.
[5] See, *e.g.*, R. Becker and F. Sauter, *Electromagnetic Fields and Interactions*, vol. I (Blaisdell Publ. Company, New York, *etc.*) 1964, sect. **69**; J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics* (J. Wiley and Sons, Inc., New York, *etc.*) 1967, sect. **14.1**. See further A. Loinger, *arXiv:physics/0506024*, June 4th, 2005.
[6] A. Loinger, *arXiv:gr-qc/9909091*, Sept. 30th, 1999.
[7] A. Loinger, *arXiv:1109.5268* [physics.gen-ph], 24 Sep 2011.
[8] T. Levi-Civita, *Rend. Lincei*, **26** (1917) 381; see *arXiv:physics/9906004* for an English translation , June 2nd, 1999.
[9] T. Levi-Civita, *Rend. Acc. Lincei*, s.6a, Vol.XI (1930), 3; *ibidem*, 113.
[10] A. Loinger and T. Marsico, *arXiv:1106.2210* [physics.gen-ph] 11 Jun 2011.
[11] E.T. Whittaker, *Proc. Cambridge Phil. Soc.*, *XXIV/1* (1927) 32.
[12] See, *e.g.*, the references in BICEP2 *Coll.*, *PRL* **112**, 241101 (2014).
[13] A. Loinger, *arXiv:physics/0308042* — August 12th, 2003.
[14] J.M. Weisberg and J.H. Taylor, *Binary Radio Pulsars*, *ASP Conference Series*, *Vol. TDB*, 2004. Also in *arXiv:astro-ph/0407149* — July 7th, 2004.
[15] A. Loinger, *arXiv:physics/0502089* — February 16th, 2005.
[16] L. Landau et E. Lifchitz, *Théorie du Champ* (Éditions MIR, Moscou) 1966, sect. **104**.
[17] For a standard treatment of the methods, see, *e.g.*, L. Blanchet, *arXiv:0907.3596* [gr-qc] — March 11th, 2010.
[18] LIGO-Virgo *Coll.*, *arXiv:1406.4556* [gr-qc] August 12th, 2014.
[19] A. Scheidegger, *Revs. Mod. Phys.*, **25** (1953) 451.
[20] See, *e.g.*, W. Pauli, *Teoria della Relatività* (Boringhieri ed., Torino) 1958, sect. **60**.
[21] H. Weyl, *Amer. J. Math.*, **66** (1944) 591.

PER IL CENTESIMO ANNIVERSARIO DELLA TEORIA DELLE RELAZIONI STATISTICHE DI CORRADO GINI

Nota del m.e. EUGENIO REGAZZINI (*) e del s.c. DONATO CIFARELLI (**)

(Adunanza del 5 febbraio 2015)

Sunto. – A cento anni dalla pubblicazione dei primi lavori di Corrado Gini sulle relazioni statistiche e sulla misura della loro intensità, questa Nota si propone di chiarire il valore pionieristico di tali lavori e di ricordarne alcuni sviluppi, particolarmente significativi, in tema di metrizzazione di spazi di distribuzioni di probabilità e in tema di analisi della dipendenza monotona fra le componenti di un vettore aleatorio.

* * *

Abstract. – This Note aims at highlighting Gini's contributions to definition and measurement of the intensity of a statistical relationship, on the occcasion of the centennial anniversary of the publication of his early papers on that topic. The Note stresses the precursory value of those contributions and mentions some of their most significant developments apropos of metrization of spaces of probability distributions and anaysis of monotone dependence.

1. Nel triennio 1914-1916 Corrado Gini tracciò le linee generali di una metodologia unitaria per lo studio di alcune proprietà, particolarmente significative, di relazioni statistiche che legano due caratteri comuni a tutte le unità di una popolazione. Cfr. [15]-[18]. La formulazione di una relazione statistica scaturisce, in generale, dalla combinazione di un complesso di conoscenze e opinioni *a priori* (o iniziali) con l'osservazione dei

(*) Dipartimento di Matematica "F. Casorati", Università degli Studi di Pavia, Italia. E-mail: eugenio.regazzini@unipv.it

(**) Università "L. Bocconi", Milano, Italia. E-mail: michele.cifarelli@unibocconi.it

due caratteri in ciascuna delle unità che compongono la popolazione o parte di essa. Quindi, la sua espressione più comune sarà nella forma di funzione aleatoria governata da una legge di probabilità che, in casi estremi, potrà anche ridursi ad una relazione rigida del tipo delle cosiddette *leggi deterministiche*. Il valore di leggi siffatte, che non intendono esprimere alcunché di necessario ed immutabile, è legato all'impiego che se ne può fare per formulare previsioni probabilistiche, le uniche ad essere dotate di senso effettivo. Come detto sopra, alla base di una legge statistica vi è generalmente anche un processo di osservazione in relazione al quale si pone il problema, non secondario, di come elaborare i dati, che da tale processo scaturiscono, in modo da estrarne l'informazione necessaria e sufficiente in vista di qualche obiettivo prefissato. Il contributo di Gini, che ci accingiamo a rievocare, è ascrivibile a quest'ultimo ordine di studi (detti di statistica descrittiva) nell'intento duplice di predisporre strumenti idonei per: l'analisi della monotonia globale della relazione statistica fra due caratteri ordinati (*concordanza* o *discordanza*, nella terminologia di Gini, a seconda che s'indaghi sul crescere o sul decrescere della relazione); lo studio della discrepanza (*connessione*, nel linguaggio di Gini) tra la distribuzione empiricamente accertata della coppia di caratteri e quella che si avrebbe se essi si combinassero fra loro secondo quanto prescritto dalla condizione d'*indipendenza in distribuzione* (condizione d'*indipendenza stocastica* col linguaggio delle probabilità). A commento della distinzione proposta, in [15] sostiene: ≪Se non vi é connessione tra le modalità di due caratteri, non vi puó essere tra queste né concordanza, né discordanza; essendovi invece connessione, potrà esservi concordanza rispetto a tutte le modalità, oppure discordanza rispetto a tutte le modalità...L'esame della concordanza...appare dunque come una ricerca subordinata all'esame della connessione≫. Confrontando le analisi che il Gini fa dei due succitati temi, quella dedicata alla monotonia della relazione statistica sembra essere la più interessante, e bisognosa di aggiustamenti che ne rendano più soddisfacenti tutte le conclusioni. Infatti il programma del Gini, chiaro e trasparente nell'indicazione degli obiettivi, richiede una tipologia di strumenti tecnici e conoscenze i quali, ancorché elementari per un probabilista o statistico moderno, non potevano essere, un secolo fa, in possesso dell'Autore. Della definizione di uno di tali strumenti egli si occupa diffusamente nel primo dei lavori citati all'inizio, a proposito della misura della connessione. Si allude all'indice di *dissomiglianza* che, riscoperto anche fuori dal campo della statistica, e in forme più generali di quelle indicate dal Gini, è divenuto in anni recenti oggetto di

indagine approfondita soprattutto da parte di cultori dell'analisi matematica. Di questo parleremo nell'ultimo paragrafo, dopo aver diffusamente trattato dell'aspetto della monotonia di una relazione statistica e della sua quantificazione. In mezzo, tra questa presentazione introduttiva e l'inizio della descrizione dei lavori centenari da riportare all'attenzione, diamo alcune notizie sulla vita di Corrado Gini e sulla sua figura scientifica.

2. Nato a Motta di Livenza (Treviso) il 23 maggio 1884, si laurea in giurisprudenza a Bologna con una tesi dal titolo *Il sesso dal punto di vista statistico*, che consegue il premio Vittorio Emanuele per le scienze sociali e politiche (1907) alla stessa Università di Bologna. Notevolmente ampliata, la tesi è pubblicata nel 1908 in un volume di ben cinquecento pagine recante lo stesso titolo seguito dal sottotitolo, molto appropriato in questo caso: *Le leggi della produzione dei sessi*. Cfr. [12]. L'approfondimento del tema conduce il Nostro allo studio della probabilità e, segnatamente, a ripensarne il valore in relazione alle applicazioni statistiche, pervenendo ad una concezione radicalmente frequentista alla quale resterà fedele fino alla fine. Ne tratta in un certo numero di lavori a stampa e, soprattutto, nel congresso della Società Filosofica Italiana tenutosi a Parma nel 1907, di fronte ad eminenti esponenti della matematica e della fisica, sotto l'autorevole presidenza di Federigo Enriques (1871-1946). Come egli stesso ebbe a ricordare in occasione delle celebrazioni per il suo ottantesimo anniversario (v. [20]), fu proprio l'impressione suscitata durante i lavori di quel congresso ad appianargli la strada verso una rapida ascesa alla cattedra universitaria di statistica (Cagliari, 1910). All'atto della nomina, oltre ai lavori sulla probabilità, può vantare articoli di notevole rilevanza sull'analisi della variabilità e della concentrazione dei caratteri trasferibili (reddito, ricchezza, ad esempio), che, sviluppati negli anni del periodo cagliaritano (1909-1913), gli daranno duratura fama internazionale. Inoltre, nel 1911 pubblica un lavoro sul rapporto dei sessi alla nascita [13] nel quale fa uso di una originale metodologia che oggi si direbbe bayesiana-empirica, partendo, in modo pionieristico, da una distribuzione iniziale di tipo beta. Già questa scelta costituisce una notevole innovazione rispetto al punto di vista tradizionale sul problema delle probabilità inverse. Si trasferisce a Padova nel 1913, dove intraprende, tra altre cose, gli studi sulle relazioni statistiche e promuove di un attivo laboratorio di statistica. Nel 1925, all'apice della carriera accademica e di una prestigiosa notorietà internazionale, si trasferisce a Roma dove, oltre alla cattedra di Politica e Statistica Economica, è

chiamato dal Governo a riformare l'intero sistema statistico italiano. L'incarico ha per esito la costituzione dell'Istituto Centrale di Statistica, nel 1926, che Gini presiede fino al 1932, insieme ad altre importanti posizioni in organismi ufficiali nazionali e internazionali. A quel tempo, la cosiddetta scuola statistica italiana, con Gini ormai identificata, incomincia a chiudersi ai nuovi indirizzi che, provenendo dal Regno Unito, in pochi anni raggiungono posizione predominante in Europa, nella parti più avanzate dell'impero britannico e, soprattutto, negli Stati Uniti. All'origine della chiusura italiana si possono vedere motivazioni diverse tra loro. Da una parte vi è la giusta esigenza di salvaguardare taluni principi di logica statistica dei quali l'indirizzo anglosassone manifestamente non si cura. Dall'altra parte vi è però una questione di visione e competenza matematica, a sfavore degli statistici italiani, che facilita invece gli angloamericani nel dare soluzioni ardite e attraenti a problemi di ordine pratico avvertiti, con modalità non molto dissimili, sia da cultori di scienze naturali o sociali, sia da decisori nei campi dell'economia, della gestione e della tecnologia. Il divario si rende palese alla fine del secondo conflitto mondiale e la Facoltà di Statistica di Roma - presieduta dal Gini fin dalla fondazione (1936), con breve interruzione per il processo di epurazione a cui è sottoposto - cerca di farvi fronte con la chiamata di Giuseppe Pompilj (1913-1968) a ricoprire una cattedra di geometria. Il Pompilj, infatti, pur avendo alle spalle un'attività di ricerca prevalentemente nel campo della geometria algebrica sotto la guida di Enriques, si è appassionato alla statistica matematica d'impronta anglosassone grazie a letture spontanee che, da prigioniero di guerra, ha potuto compiere in un campo britannico dislocato in India. A Pompilj riesce, nonostante la prematura scomparsa, di dar vita ad un gruppo di ricerca statistica, opportunamente collegato ad ambienti scientifici internazionali, che, fra altre cose, si dedica anche allo sviluppo di antiche idee giniane, ma da un punto di vista e con un linguaggio più aggiornati di quanto non siano quelli della scuola statistica italiana tradizionale. Fra i risultati più significativi si possono citare quelli di Dall'Aglio sugli estremi di certi momenti definiti per gli elementi di una classe di Fréchet. Cfr. [7]. Da parte sua, Gini scrive numerosi saggi e libri anche nel dopoguerra, spaziando dalla statistica alla demografia, dalla sociologia all'economia ed alla politica economica. Si vedano il necrologio [4] e il volume [3] per una valutazione complessiva della produzione scientifica di questa fase. Per quanto riguarda la statistica, si limita a riproporre con stile e linguaggio immutati, e dunque ormai estranei alle nuove generazioni, alcuni dei lavori giovanili. Si spegne a Roma, improvvisamente, il 13 marzo 1965.

3. Ritornando ai lavori di statistica, si lascia ancora apprezzare l'originalità di certi contenuti, che, presentati con linguaggio moderno e strumenti matematici adeguati, potrebbero divenire sorgente di ispirazione per nuove ricerche e, soprattutto, stimolo a rivedere posizioni cristallizzate, da ormai troppo tempo accettate acriticamente. Con questo spirito diamo inizio alla descrizione dei contributi di Gini allo studio della monotonia di una relazione statistica.

Elemento primo di quasi tutte le considerazioni che verranno svolte è il concetto di *distribuzione* (di frequenza, generalmente) su un sottoinsieme Ω di $\mathbb{R}^2$, inteso come insieme di tutte le coppie ordinate di numeri reali, munito di una topologia equivalente a quella euclidea. Più propriamente, Ω è da pensarsi come boreliano di $\mathbb{R}^2$. La suddetta distribuzione di frequenze, φ' in simboli, è da pensarsi come funzione reale, numerabilmente additiva sulla classe $\mathcal{D} := \{\Omega \cap B : \quad B \in \mathcal{B}(\mathbb{R}^2) :=$ classe di tutti i boreliani di $\mathbb{R}^2\}$, e tale che $\varphi'(\Omega) = 1$. Spesso, φ', appositamente definita in modo da specificare che le coppie (x, y) logicamente possibili sono tutte e soltanto quelle contenute in Ω, verrà sostituita con φ, definita su $\mathcal{B}(\mathbb{R}^2)$ da

$$\varphi(B) := \varphi'(B \cap \Omega) \qquad (B \in \mathcal{B}(\mathbb{R}^2)).$$

Ovviamente, si ha $\varphi(\Omega^c) = 0$ dove, per un generico insieme A, con A^c si denota il complementare, rispetto a $\mathbb{R}^2$ nel nostro caso. È noto che una qualunque φ su $\mathcal{B}(\mathbb{R}^2)$ è completamente caratterizzata dalla *funzione di ripartizione* (f.r., per brevità), intesa come funzione reale definita su $\mathbb{R}^2$ da

$$F(x, y) := \varphi((-\infty, x] \times (-\infty, y]) \qquad ((x, y) \in \mathbb{R}^2).$$

Dalla conoscenza di φ [F, rispettivamente] associata ad una data coppia di caratteri quantitativi si estrae subito quella delle distribuzioni [f.r., rispettivamente] marginali: φ_1 [F_1, rispettivamente] per il primo carattere, φ_2 [F_2, rispettivamente] per il secondo. Infatti,

$$\mathcal{B}(\mathbb{R}) \ni A' \mapsto \varphi_1(A') = \varphi(A' \times \mathbb{R}) \,, \qquad R \ni x \mapsto F_1(x) = \lim_{y \to +\infty} F(x, y) \,;$$

$$\mathcal{B}(\mathbb{R}) \ni A'' \mapsto \varphi_2(A'') = \varphi(\mathbb{R} \times A'') \,, \qquad R \ni y \mapsto F_2(y) = \lim_{x \to +\infty} F(x, y).$$

Punto fermo dell'impostazione giniana è che l'analisi della monotonia della relazione statistica fra due caratteri vada fatta nell'ambito delle distribuzioni bidimensionali con marginali uguali a quelle dei due caratteri presi in considerazione. In altri termini, Gini è consapevole del fatto che la possibilità di raggiungere il massimo assoluto di concordanza o discordanza dipende dalla coppia di marginali assegnate, che potrebbero anche non consentirlo. Perciò, la valutazione del grado di monotonia proprio di una specifica distribuzione su $\mathbb{R}^2$ con marginali assegnate andrà fatta in termini relativi con riferimento al massimo consentito da quelle marginali. Posta in questi termini, la questione suggerisce di procedere con l'ausilio della corrispondente classe di Fréchet, dal ben noto matematico francese Maurice R. Fréchet (1878-1973) che ne studiò le proprietà più idonee a risolvere anche i problemi di Gini: cfr. [11]. In realtà, la definizione di tali classi era già stata data da Wassily Hoeffding (1914-1991) in un lavoro risalente al 1940 (cfr. [21]) e prima ancora era stata chiaramente considerata in un lavoro poco noto (cfr. [8], Sezione 8) di Bruno de Finetti (1906-1985). Date le distribuzioni non degeneri φ_1 e φ_2, su $\mathbb{R}$, la *classe di Fréchet* $\mathcal{F}(\varphi_1, \varphi_2)$ [o anche, $\mathcal{F}(F_1, F_2)$] da esse generata, nell'ordine dato, è l'insieme di tutte le distribuzioni su $\mathbb{R}^2$ che ammettono φ_1 come prima marginale e φ_2 come seconda marginale. Si noti che $\mathcal{F}(\varphi_1, \varphi_2) \neq \mathcal{F}(\varphi_2, \varphi_1)$ se $\varphi_1 \neq \varphi_2$. La classe è non vuota, infatti la distribuzione corrispondente all'indipendenza dei due caratteri (data da $\varphi_1 \otimes \varphi_2$) banalmente vi appartiene. Ma essa ne contiene altre due particolarmente importanti ai nostri fini, e cioè $\underline{h}$ e $\overline{h}$ generate, rispettivamente, dalle f.r.

$$\underline{H}(x,y) := (F_1(x) + F_2(y) - 1) \vee 0 \qquad \text{e}$$
$$\overline{H}(x,y) := F_1(x) \wedge F_2(y) \qquad ((x,y) \in \mathbb{R}^2).$$

Per incominciare, esse rappresentano gli elementi minimo e massimo di $\mathcal{F}(\varphi_1, \varphi_2)$, nel senso che, per ogni (x, y) in $\mathbb{R}^2$, si ha

$$\underline{H}(x,y) \leq F(x,y) \leq \overline{H}(x,y).$$

Questo fatto si ricollega all'idea di *ordinamento* (parziale) di *concordanza* (o *discordanza*) fra due distribuzioni aventi marginali uguali, che Gini mostra di avere ben chiaro in mente. Si tratta di questo: se $\varphi^{(1)}$ e $\varphi^{(2)}$ sono elementi distinti di $\mathcal{F}(\varphi_1, \varphi_2)$ le cui f.r. $F^{(1)}$ e, rispettivamente, $F^{(2)}$ soddisfano

$$F^{(1)}(x,y) \leq F^{(2)}(x,y)$$

per ogni (x, y) di $\mathbb{R}^2$, essendo necessariamente diverse per qualche coppia, allora vale anche $\varphi^{(1)}((x, +\infty) \times (y, +\infty)) \leq \varphi^{(2)}((x, +\infty) \times (y, +\infty))$ per ogni (x, y) in $\mathbb{R}^2$, etc.., e ciò indica inequivocabilmente che $\varphi^{(2)}$ si concentra, più di quanto non faccia $\varphi^{(1)}$, nelle regioni di $\mathbb{R}^2$ in cui grandi (piccoli, rispettivamente) valori del primo carattere si associano a grandi (piccoli, rispettivamente) valori del secondo. In modo diverso, tale cirostanza si esprime dicendo che $\varphi^{(2)}$ è *più concordante* di $\varphi^{(1)}$, o che $\varphi^{(1)}$ è *più discordante* di $\varphi^{(2)}$. Applicato questo ordinamento a $\mathcal{F}(\varphi_1, \varphi_2)$, si conclude che, rispetto ad esso, $\overline{h}$ è l'elemento più concordante e $\underline{h}$ l'elemento più discordante tra tutti gli elementi di $\mathcal{F}(\varphi_1, \varphi_2)$. Lo studio del supporto (topologico) di questi elementi estremi chiarisce ulteriormente in che senso essi siano associabili alle relazioni statistiche monotone più strette compatibili con una data coppia di marginali. Si ricorda che il supporto topologico di una distribuzione è inteso come insieme (chiuso) di tutti i punti in ogni intorno dei quali essa depone massa positiva; in simboli, il supporto di μ sarà indicato con $S(\mu)$. Ritornando alla generica φ in $\mathcal{F}(\varphi_1, \varphi_2)$, ad ogni x e y nel supporto di φ_1 e, rispettivamente, di φ_2 si associano gli insiemi

$$\mathcal{L}_x(\varphi) := \text{insieme delle coppie } (x, v) \text{ contenute nel supporto di } \varphi,$$

$$\mathcal{L}^y(\varphi) := \text{insieme delle coppie } (u, y) \text{ appartenenti al supporto di } \varphi.$$

Nel caso degli elementi estremi, Fréchet pone in evidenza le proprietà seguenti: $\mathcal{L}_x(\overline{h})$, $\mathcal{L}^y(\overline{h})$, $\mathcal{L}_x(\underline{h})$ e $\mathcal{L}^y(\underline{h})$ sono limitati; inoltre, se x_1, x_2 sono nel supporto di φ_1 e y_1, y_2 in quello di φ_2 e soddisfano le disuguaglianze $x_1 < x_2$, $y_1 < y_2$, si ha

$$\text{(1)} \qquad \begin{array}{ll} \sup \mathcal{L}_{x_1}(\overline{h}) & \leq \inf \mathcal{L}_{x_2}(\overline{h}) \\ \sup \mathcal{L}^{y_1}(\overline{h}) & \leq \inf \mathcal{L}^{y_2}(\overline{h}) \end{array}$$

e

$$\text{(2)} \qquad \begin{array}{ll} \sup \mathcal{L}_{x_2}(\underline{h}) & \leq \inf \mathcal{L}_{x_1}(\underline{h}) \\ \sup \mathcal{L}^{y_2}(\underline{h}) & \leq \inf \mathcal{L}^{y_1}(\underline{h}). \end{array}$$

Di conseguenza, i supporti di $\overline{h}$ e di $\underline{h}$ si possono inscrivere in due curve l'una non decrescente e l'altra non crescente, generalmente non riconducibili a grafici di funzioni in senso proprio. Chiariamo. Se φ_1 e φ_2 sono uguali, la *dipendenza funzionale* nei casi estremi si presenta, come pure

quando F_1 e F_2 hanno supporto convesso e sono ivi continue, ma, fuori da queste situazioni, anche gli estremi della classe di Fréchet potrebbero associare ad una determinazione del primo carattere più determinazioni del secondo, etc., dando luogo ad un oggetto che Fréchet propone di chiamare *funzione statisticamente monotona* (f.s.m., per brevità), non decrescente nel caso di $\overline{h}$ e non crescente in quello di $\underline{h}$. Sempre Fréchet ne suggerisce immagini geometriche la cui scelta, in larga parte convenzionale, non ha comunque ripercussioni sulla parte sostanziale dei ragionamenti. Ricorrendo alla rappresentazione cartesiana, si pongono in ascissa le determinazioni contenute nel supporto del primo carattere e in ordinata quelle del secondo. La rappresentazione geometrica del supporto di ciascuna delle distribuzioni estreme non presenta problemi in corrispondenza alle coppie (x, y) in cui x e y sono punti *interni* del supporto di φ_1 e, rispettivamente, del supporto di φ_2. Altrimenti, esisteranno almeno due punti, in almeno uno dei suddetti supporti, che risultano essere estremi di un intervallo aperto privo di punti dello stesso supporto. Per fissare le idee, verifichino questa circostanza i punti x_1 e x_2 con $x_1 < x_2$ contenuti nel supporto di φ_1. Allora, a proposito della rappresentazione del supporto di $\overline{h}$ si congiungono con un segmento rettilineo (non decrescente, per le (1)) i punti $(x_1, \sup \mathcal{L}_{x_1}(\overline{h}))$ e $(x_2, \inf \mathcal{L}_{x_1}(\overline{h}))$. Inoltre, in corrispondenza ad ogni x nel supporto di φ_1, tale che $\inf \mathcal{L}_x(\overline{h}) < \sup \mathcal{L}_x(\overline{h})$, si congiungono con un segmento rettilineo verticale gli estremi $(x, \inf \mathcal{L}_x(\overline{h}))$ e $(x, \sup \mathcal{L}_x(\overline{h}))$. Si ottiene così un insieme "continuo" di punti disposti in modo da far pensare ad una curva non decrescente $\overline{\Gamma}$ (cfr. Figura 1) da interpretarsi come diagramma della f.s.m. non decrescente corrispondente al massimo della classe di Fréchet $\mathcal{F}(\varphi_1, \varphi_2)$[1] .

Tenendo conto delle (2), in modo analogo si può costruire la curva $\underline{\Gamma}$ (cfr. Figura 2) della f.s.m. non crescente associata all'elemento minimo $\underline{h}$ della stessa classe.

Le curve $\overline{\Gamma}$ e $\underline{\Gamma}$ contengono i supporti di $\overline{h}$ e, rispettivamente, $\underline{h}$, in modo che la scelta di tali costruzioni, fra tante altre possibili, non influisca sulle conclusioni di eventuali ragionamenti che dipendessero dai supporti effettivi.

[1]Come spiegato diffusamnete nel Capitolo 2 di [30], si tratta del grafico del *sub-differenziale* di una funzione convessa

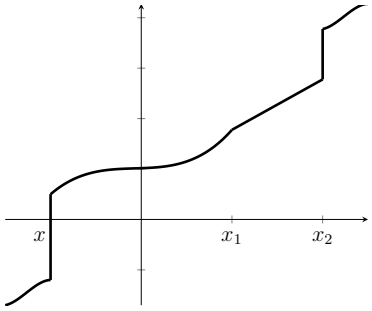


Figura 1 – La curva $\overline{\Gamma}$*. In ascissa si legga il supporto di* φ_1*, in ordinata quello di* φ_2*. Diagramma della f.s.m. associata ad* $\overline{h}$*, in cui* (x_1, x_2) *non contiene punti del supporto di* φ_1*.*

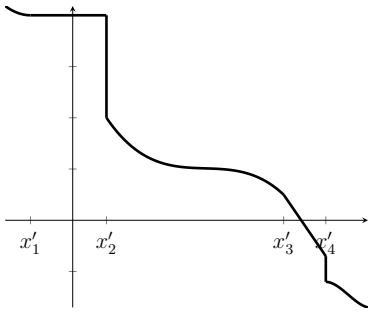


Figura 2 – La curva $\underline{\Gamma}$*. In ascissa si legga il supporto di* φ_1*, in ordinata quello di* φ_2*. Diagramma della f.s.m. associata ad* $\underline{h}$*, in cui* (x'_1, x'_2) *e* (x'_3, x'_4) *non contengono punti del supporto di* φ_1*.*

4. Si hanno ora gli elementi per definire un indice sommario, idoneo a segnalare se un generico elemento φ di $\mathcal{F}(\varphi_1, \varphi_2)$ sia vicino ad $\overline{h}$ [$\underline{h}$, rispettivamente] e, di conseguenza, i due caratteri aventi φ per distribuzione si possano pensare legati statisticamente in senso monotono non decrescente [non crescente, rispettivamente]. Il problema si riduce in parte a come valutare questa vicinanza. L'idea che proporremo per risolverlo è della stessa natura di quella originaria di Gini, ma se ne distacca sotto il profilo della realizzazione tecnica. Noi, infatti, ci baseremo esclusivamente sulle proprietà della classe di Fréchet, evitando di introdurre, ad

esempio, il concetto di *contrario* di un carattere, che non sembra idoneo alla scopo fuori dai casi in cui la f.s.m. è (almeno approssimativamente) lineare. Partiamo dunque dalla valutazione dell'allontanamento di φ da $\underline{h}$. Lo "scarto" di un punto $P \equiv (x, y)$ appartenente a $S(\varphi_1) \times S(\varphi_2)$ da $\underline{h}$ si può ragionevolmente apprezzare considerando

$$\sigma_g(P, \underline{\Gamma}) := \inf\{g(d(P, Q)) : Q \in \mathcal{L}^y(\underline{\Gamma})\} + \inf\{g(d(P, Q)) : Q \in \mathcal{L}_x(\overline{\Gamma})\}$$

dove: g è una funzione definita su $\mathbb{R}$, ivi continua, non decrescente e convessa tale che $g(x) = 0$ per $x \leq 0$ e $g(x) > 0$ per $x > 0$; d denota la distanza euclidea su $\mathbb{R}^2$. La ragione per cui σ_g è definita come somma di due diversi tipi di "scarto" risiede nell'opportunità di tener conto complessivamente degli scarti (generalmente diversi) connessi a ciascuna delle due interpretazioni causali che si potrebbero dare di una relazione statistica. Per quanto concerne la scelta di g, si può dire che essa andrebbe fatta in relazione alle conseguenze (quando si sappiano valutare) dello scarto "puro" corrispondente all'identità $g(x) = x$ per $x > 0$. Ad esempio, nella teoria della correlazione è frequente l'uso di $g(x) = x^2$ per $x > 0$. Tuttavia, una misura utile della discrepanza di g da $\underline{h}$ dovrà tenere conto, in maniera riassuntiva, di tutti gli scarti $\sigma_g(P, \underline{\Gamma})$ al variare di P, e del fatto che il punto P è distribuito secondo φ. Quindi, un indicatore conveniente della proprietà considerata è dato da

$$(3) \qquad c_g(\varphi) := \int_{S(\varphi)} \sigma_g(P, \underline{\Gamma})\varphi(dP) \qquad (\varphi \in \mathcal{F}(\varphi_1, \varphi_2)).$$

L'integrale è ben definito, grazie alle precisate proprietà di g e alla definizione di σ_g, ma potrebbe essere infinito. È fondamentale, poi, osservare che $P \mapsto \sigma_g(P, \underline{\Gamma})$ è continua e *quasi monotona* sull'interno D dell'involucro convesso di $S(\varphi_1) \times S(\varphi_2)$, nel senso che se $(x_i, y_i) \in D$ per $i = 1, 2$ con $x_1 < x_2$ e $y_1 < y_2$, allora

$$\sigma_g((x_2, y_2), \underline{\Gamma}) - \sigma_g((x_2, y_1), \underline{\Gamma}) - \sigma_g((x_1, y_2), \underline{\Gamma}) + \sigma_g((x_1, y_1), \underline{\Gamma}) \geq 0.$$

Cfr. [5].

Perciò, grazie al Teorema 1 in [2], si può enunciare la

Proposition 1. *Se, oltre alle condizioni già specificate per g, vale che* $c_g(\overline{h})$ *è finita, allora per ogni coppia di elementi* $\varphi^{(1)}$ *e* $\varphi^{(2)}$ *di* $\mathcal{F}(\varphi_1, \varphi_2)$ *tali che* $\varphi^{(2)}$ *sia più concordante di* $\varphi^{(1)}$*, si ha* $c_g(\varphi^{(1)}) \leq c_g(\varphi^{(2)}) \leq c_g(\overline{h})$*, e il massimo* $c_g(\overline{h})$ *è raggiunto solo in presenza di* $\overline{h}$*.*

La proposizione afferma che $c(\cdot)$ è monotona non decrescente rispetto all'ordinamento della concordanza in una assegnata classe di Fréchet. La proprietà è fondamentale ai fini della costruzione di un indicatore sommario della monotonia della relazione statistica prodotta da un elemento qualunque di detta classe. La costruzione, per essere completata, richiede che si guardi anche all'allontanamento da $\overline{\Gamma}$. A questo proposito, se si definisce $\sigma_g(P, \overline{\Gamma})$ allo stesso modo di $\sigma_g(P, \underline{\Gamma})$, prendendo come riferimento la f.s.m. non decrescente al posto della non crescente, si perviene alla media

$$(4) \qquad d_g(\varphi) := \int_{S(\varphi)} \sigma_g(P, \overline{\Gamma}) \varphi(dP) \qquad (\varphi \in \mathcal{F}(\varphi_1, \varphi_2))$$

per la quale vale la

Proposition 2. *Se, oltre alle condizioni per g, vale che* $d_g(\underline{h}) < +\infty$*, allora per la stessa coppia* $\varphi^{(1)}$ *e* $\varphi^{(2)}$ *della* Proposizione 1 *si ha* $d_g(\underline{h}) \geq d_g(\varphi^{(1)}) \geq d_g(\varphi^{(2)})$*, e il massimo* $d_g(\underline{h})$ *è raggiunto solo in presenza di* $\underline{h}$*.*

Si direbbe quindi che d_g è utile alla costruzione sopra accennata quando si guarda all'allontanamento dalla relazione di massima concordanza compatibile con la coppia di marginali assegnate. Acquista un senso ben preciso anche la differenza

$$\Delta_g(\varphi) := c_g(\varphi) - d_g(\varphi)$$

per ogni $\varphi \in \mathcal{F}(\varphi_1, \varphi_2)$ se sono finite $c_g(\overline{h})$ e $d_g(\underline{h})$. Infatti, alla luce delle precedenti proposizioni, si può dire che se $\Delta_g(\varphi)$ ha valore non lontano da $c_g(\overline{h})$ [$-d_g(\underline{h})$, rispettivamente], φ giustifica l'esistenza di una relazione statistica crescente [decrescente, rispettivamente] fra due caratteri distribuiti secondo φ. Se $\Delta_g(\varphi)$ assume il valore zero si dice che i due caratteri sono vicendevolmente *indifferenti*, occupando la loro distribuzione una posizione intermedia fra le estreme rispetto al problema della mo-

notonia delle relazioni statistiche[2]. Conclusioni analoghe sarebbe lecito trarre nel caso in cui $|\Delta_g(\varphi)|$ fosse piccolo, ma rimarrebbero comunque due zone di valori facilmente individuabili in cui la sola indicazione fornita da Δ non è sufficiente. In questi ultimi casi, essa andrebbe integrata in un acconcio ragionamento di statistica inferenziale, il cui completamento esula però dagli scopi di questa relazione. Ci limitiamo ad osservare che un'indagine approfondita sulla questione sarebbe nuova. Si osserva infine che il criterio basato su $\Delta_g(\cdot)$ sopra descritto ha notevoli punti di contatto coi criteri α, β e γ del Gini, ove l'intervento del concetto di carattere contrario venga evitato col ricorso all'elemento minimo della classe di Fréchet, e al posto di ragionare in termini d'indipendenza in distribuzione si ragioni in termini di indifferenza, concetti più idonei rispetto agli obiettivi della ricerca sulla monotonia.

5. L'indicazione fornita da un indice generalmente migliora in espressività quando è possibile normalizzarlo col valore massimo che esso raggiunge in corrispondenza all'estremo della proprietà per la cui "misura" viene proposto. La realizzazione di questo punto, ben presente nel programma originario del Gini, era all'epoca causa di difficoltà di calcolo e di concetto. Le seconde si possono dire ben superate grazie alla conoscenza delle classi di Fréchet e relative proprietà. In un tentativo di semplificazione dei calcoli richiesti per la determinazione dei massimi, Tommaso Salvemini (1906-1994) propose nel 1939 un metodo basato su certe tabelle, che egli stesso ideò e chiamò di *cograduazione* e *contrograduazione*. Cfr. [26]. Altro non sono che una rappresentazione delle distribuzioni $\overline{h}$ e, rispettivamente, $\underline{h}$ nel caso in cui Ω è finito. Anche lo studio già citato di Dall'Aglio, ben più generale del precedente, va visto come un passo decisivo verso la risoluzione dello stesso problema. Il quale si può ritenere ora risolto in base alle Proposizioni 1 e 2, che, a loro volta, sono corollari di risultati del citato articolo [2] di Stamatis Cambanis (1943-1995), Gordon Simons e William Stout. Seguendo la terminologia di Gini, si dice di *omofilia* ogni indice ottenuto dalla normalizzazione di $\Delta(\cdot)$. Più precisamente:

[2]La questione della caratterizzazione della situazione d'indifferenza meriterebbe di essere approfondita. Ad esempio, andrebbe considerata, in alternativa, anche la definizione: una distribuzione $\overline{\varphi}$ in $\Gamma(\varphi_1, \varphi_2)$ realizza l'indifferenza reciproca dei due caratteri X e Y se $\sigma_g(P, \underline{\Gamma})$ e $\sigma_g(P, \overline{\Gamma})$ hanno la stessa distribuzione quando (X, Y) si distribuisce secondo $\bar{\varphi}$. Ovviamente, questa definizione è più restrittiva di quella data nel testo.

Siano φ_1, φ_2 *distribuzioni su* $\mathbb{R}$ *e sia* $g\colon \mathbb{R}_+ \to \mathbb{R}$ *una funzione continua, strettamente crescente, convessa e nulla nell'origine, tali che* $c_g(\overline{h})$ *e* $d_g(\underline{h})$ *risultino finiti; allora, si dice* indice di omofilia *il funzionale*

$$\mathcal{F}(\varphi_1, \varphi_2) \ni \varphi \mapsto O_g(\varphi) = \frac{\Delta_g(\varphi)}{c_g(\overline{h})} \mathbb{1}_{(\Delta_g(\varphi)>0)} + \frac{\Delta_g(\varphi)}{d_g(\underline{h})} \mathbb{1}_{(\Delta_g(\varphi)<0)} \,. \tag{5}$$

Esso è sempre diverso da zero a meno che φ costituisca un caso d'indifferenza fra i due caratteri; il suo valore assoluto non supera 1; vale 1 solo se $\varphi = \overline{h}$ e, quindi, i due caratteri sono "legati" da una f.s.m. non decrescente; vale -1 solo se $\varphi = \underline{h}$ e, quindi, i due caratteri sono "legati" da una f.s.m. non crescente.

Gini propone poi di riservare il termine di *indici di correlazione* a quegli indici ottenuti normalizzando $\Delta(\cdot)$ col massimo raggiungibile sull'intera classe delle distribuzioni su $\mathbb{R}^2$. Sarebbe dunque sbagliato usare indici simili per valutare l'esistenza di una relazione monotona qualunque fra i caratteri. Potrebbe infatti accadere che, pur esistendo, non possa esser segnalata da un indice che raggiunge il valore estremo solo in corrispondenza ad uno specifico tipo di relazione statistica non realizzabile dalle distribuzioni effettive dei due caratteri. Questa considerazione prelude ad una doverosa discussione sul valore del celebre *coefficiente di correlazione lineare* (Bravais, Pearson) in rapporto al corrispondente indice di omofilia.

6. È ben noto che il coefficiente di correlazione lineare per due caratteri distribuiti secondo φ con marginali non degeneri φ_1 e φ_2 è definito, quando la varianza di ciascuno di essi è finita, dalla formula

$$\rho(\varphi) = \frac{\mathrm{Cov}(\varphi)}{\sigma_1 \cdot \sigma_2}$$

dove $\mathrm{Cov}(\cdot)$ denota la *covarianza* e σ_i la radice aritmetica della *varianza* determinata da φ_i ($i = 1, 2$). Il suo valore assoluto non supera 1, e vale 1 solo se ciascun carattere è trasformazione affine dell'altro. Ovviamente, non è detto che le marginali φ_1, φ_2 consentano a $|\,\mathrm{Cov}(\varphi)|$, neppure nei casi estremi, di raggiungere $\sigma_1 \cdot \sigma_2$ al variare di φ in $\mathcal{F}(\varphi_1, \varphi_2)$ e, quindi, $\rho(\cdot)$ non può in generale essere interpretato come indice di omofilia.

Sarebbe quindi interessante trovare condizioni in presenza delle quali ρ possa assolvere al compito di indice di omofilia su $\mathcal{F}(\varphi_1, \varphi_2)$. La prima è che $\overline{\Gamma}$ e $\underline{\Gamma}$ siano rette inclinate, circostanza necessaria e sufficiente affinché le situazioni estreme della correlazione lineare siano raggiungibili su $\mathcal{F}(\varphi_1, \varphi_2)$. Come mostrato in [5], ciò si può presentare se e solo se esistono parametri $a > 0$, $\alpha = -a$, b e β in $\mathbb{R}$ tali che

$$F_2(x) = F_1\Big(\frac{x-b}{a}\Big) = 1 - F_1\Big(\frac{x-\beta}{\alpha} - 0\Big) \tag{6}$$

e F_1 ha momento secondo finito. La specificità delle condizioni (6) è sufficiente a mettere in giusta luce la differenza fra analisi della correlazione lineare e analisi della concordanza/discordanza secondo Gini. Conviene comunque completare il ragionamento dimostrando che l'uguaglianza $\rho(F) = O_g(\varphi)$ con $g(x) = x^2$, $x > 0$, vale per ogni $\varphi \in \mathcal{F}(\varphi_1, \varphi_2)$ se F_1 e F_2 soddisfano (6). Dapprima, si osserva che la seconda di (6) implica $a \int_{\mathbb{R}} x dF_1(x) + b = \alpha \int_{\mathbb{R}} x dF_1(x) + \beta$, la quale, insieme alla prima porge $\int_{\mathbb{R}} x dF_2(x) = a \int_{\mathbb{R}} x dF_1(x) + b$ e, per $k = 1, 2$, $\int_{\mathbb{R}} (ax+b)^k dF_1(x) = \int_{\mathbb{R}} (\alpha x+\beta)^k dF_1(x)$ e $\sigma_2^2 = a^2\sigma_1^2$. Inoltre, i punti (x, y) di $\overline{\Gamma}$ [$\underline{\Gamma}$, rispettivamente] soddisfano $y = ax + b$ [$y = \alpha x + \beta$, rispettivamente] e, quindi,

$$\sigma_g(P, \underline{\Gamma}) = \Big|y - \alpha x - \beta\Big|^2 + \Big|x - \frac{y-\beta}{\alpha}\Big|^2$$
$$\sigma_g(P, \overline{\Gamma}) = \Big|y - ax - b\Big|^2 + \Big|x - \frac{y-b}{a}\Big|^2.$$

Da quanto precede segue

$$\Delta_g(\varphi) = 4a\Big(1 + \frac{1}{a^2}\Big)\,\mathrm{Cov}(\varphi)$$

e

$$c_g(\overline{h}) = 4a^2\Big(1 + \frac{1}{a^2}\Big)\sigma_1^2 = d_g(\underline{h})$$

sicché

$$O_g(\varphi) = \frac{4a\,\mathrm{Cov}(\varphi)}{4a\sigma_1 a\sigma_1} = \frac{\mathrm{Cov}(\varphi)}{\sigma_1 \cdot \sigma_2}.$$

In conclusione; *Se $g(x) = x^2$ per $x \geq 0$ e se F_1 ha momento secondo finito, allora $O_g(\varphi) = \rho(\varphi)$ vale per ogni φ in $\mathcal{F}(\varphi_1, \varphi_2)$ se e solo se F_1 e*

F_2 *soddisfano* (6).
Un caso notevole in cui tutte queste condizioni sono soddisfatte si ha se φ_1 e φ_2 sono *gaussiane.*

7. Le stesse condizioni sono verificate in almeno altre due situazioni rilevanti. La prima si ha quando delle n unità di una popolazione statistica o di un campione vengono considerati due caratteri (eventualmente qualitativi) ordinati, le cui modalità vengono sostituite — in accordo all'ordine prestabilito — con *gradi* (o *ranghi*) da 1 a n. Il caso più semplice da descrivere è quello in cui la stessa modalità si presenta in corrispondenza ad una sola unità (assenza di ripetizioni). Ne discende che l'i-esima unità si presenta — con frequenza$= 1/n$ — come caratterizzata dalla coppia (R_i, S_i) essendo R_i [S_i, rispettivamente] il grado della modalità del primo [secondo, rispettivamente] carattere. È facile vedere che in questa situazione l'indice di omofilia (5) si riduce al generico *indice di cograduazione* G_g [terminologia proposta estendendo quella adottata da Gini in [14] nello studio del caso particolare in cui $g(x) = x$ per $x \geq 0$]:

$$
\begin{aligned}
G_g(F) &= O_g(F) \\
&= \frac{\sum_{i=1}^{n} \left\{ g\left(\left| \frac{n+1-R_i-S_i}{n} \right| \right) - g\left(\left| \frac{R_i-S_i}{n} \right| \right) \right\}}{\sum_{i=1}^{n} \left\{ g\left(\left| \frac{n+1-R_i-S_i}{n} \right| \right) \right\}}
\end{aligned} \tag{7}
$$

dove $F \in \mathcal{F}(\varphi_1, \varphi_2)$ con $F_1 = F_2 = k/n$ sull'intervallo $[k, k+1)$ per $k = 1, \ldots, n-1$. Come caso particolare rilevante della (7), oltre al già citato indice di Gini, va segnalato il *coefficiente di correlazione per ranghi* dovuto a Charles Spearmann (1863-1945) corrispondente alla specificazione $g(x) = x^2$ per $x \geq 0$. Cfr. [28]. La (5) può essere anche usata — senza alcun accorgimento particolare — nel caso di marginali F_i ($i = 1, 2$) con supporto contenuto in $\{1, \ldots, n\}$ e codominio incluso in $\{0, 1/n, \ldots, 1\}$.

La seconda delle due situazioni nominate all'inizio del paragrafo si ricollega ad una idealizzazione che consente di estendere la nozione di grado alle modalità di un carattere reale retto da una generica funzione di frequenza cumulata, diciamo G. In accordo alle definizioni accolte nella prima parte, se n continua ad indicare il numero delle unità esaminate, per grado corrispondente ad x si intenderà il numero (non necessariamente

intero) $n \cdot G(x)$. Quando G è f.r. continua su $\mathbb{R}$ e ξ è un numero aleatorio con f.r. G, è ben noto che il grado $n \cdot G(x)$ ha distribuzione (continua) uniforme su $[0, n]$. Quindi, al posto della $\mathcal{F}(F_1, F_2)$, nell'ipotesi che F_1 e F_2 siano continue, si va a considerare la classe $\mathcal{CF}(F_1, F_2)$ di tutte le f.r. di $(F_1(\xi_1), F_2(\xi_2))$ al variare della legge di (ξ_1, ξ_2) in $\mathcal{F}(F_1, F_2)$. Ciascun elemento (inteso come f.r.) di $\mathcal{CF}(F_1, F_2)$ è, in accordo ad un linguaggio ormai consolidato, una *copula*: quella ottenuta dalla f.r. F verrà indicata con $C = C_F$. Per le cose già dette, le marginali di C_F sono uniformi su $[0, 1]$, sicché riescono soddisfatte le condizioni di cui si parla all'inizio del paragrafo. Va anche detto che ogni indice di omofilia definito su $\mathcal{CF}(F_1, F_2)$ è coerente con l'ordinamento di concordanza/discordanza introdotto nel terzo paragrafo. Cfr. [5], a giustificazione di ciò che molti Autori hanno fatto finora definendo, come indici di concordanza/discordanza tra due caratteri distribuiti rispettivamente secondo F_1 e F_2, opportuni funzionali su $\mathcal{CF}(F_1, F_2)$. In genere, in tal modo si ottengono espressioni più semplici. Ad esempio, l'indice di omofilia (5) su $\mathcal{CF}(F_1, F_2)$ ha la forma

$$O_g(C) = \frac{\int_{(0,1)^2} \{g(|y + x - 1|) - g(|y - x|)\} dC(x, y)}{\int_0^1 g(x) dx}$$

per ogni $C \in \mathcal{CF}(F_1, F_2)$. L'impostazione consistente nel definire indici di concordanza per elementi di $\mathcal{F}(F_1, F_2)$ tramite funzionali su $\mathcal{CF}(F_1, F_2)$ è stata seguita, ad es., in [27], [6], [22] e in [25] contenente una trattazione sistematica delle copule e, quindi, indicazioni tecniche per estendere il suddetto espediente anche a situazioni diverse da quelle particolari accennate in questo paragrafo. Con tale impostazione, la cui manifestazione più elementare è costituita dalla sostituzione delle modalità effettive con gradi, fa comunque perdere qualcosa rispetto a quella che opera direttamente su $\mathcal{F}(F_1, F_2)$ con indici di omofilia. In particolare, se i caratteri hanno modalità reali il passaggio a ranghi o, più in generale, a copule, non tiene conto della forma effettiva delle situazioni estreme. Comunque si vogliano considerare queste osservazioni a favore del punto di vista completo del Gini, a conclusione della trattazione si può dire asseverato il fatto che tale punto di vista consente di abbracciare in maniera unitaria l'aspetto della monotonia di una relazione statistica e le proposte di indici atti a quantificarlo.

8. Come detto nel primo paragrafo, la definizione dell'indice di disso-

miglianza è strettamente legata allo studio della connessione di due caratteri, che Gini intendeva sviluppare attraverso qualche misura della "discrepanza" fra la distribuzione di uno dei due caratteri e la distribuzione *condizionata* dello stesso data una generica determinazione dell'altro [distribuzione *parziale*, nel suo linguaggio]. Quindi, l'indice di dissomiglianza viene proposto allo scopo di dare un senso preciso alla desiderata misura della discrepanza fra le suddette distribuzioni. Tale indice, ritrovato successivamente e indipendentemente da altri Autori al di fuori del campo strettamente statistico, si può considerare contributo duraturo, ancorché fortuito, del Gini ad un campo inconsueto per uno statistico d'inizio Novecento: il capitolo della (moderna) teoria delle probabilità riguardante l'analisi degli spazi di misure di probabilità e della convergenza di successioni da essi estratte. La definizione segue un'idea guida ben precisa che, col linguaggio più consono delle probabilità, si potrebbe descrivere con le parole della breve *Note* B di Paul Lévy (1886-1971) contenuta in [10]. Il linguaggio delle probabilità consente anche un più facile raccordo con gli impieghi più recenti del concetto di dissomiglianza. Dati due elementi aleatori X e Y distribuiti, rispettivamente, secondo ν_1 e ν_2 nello stesso spazio metrico S con distanza d_S, la "diversità" degli stessi non è generalmente apprezzabile sulla base della conoscenza delle sole marginali ν_1 e ν_2. Ogni misura accettabile della diversità richiede la conoscenza della distribuzione del numero aleatorio $d_S(X, Y)$ o, perlomeno, di una sua media ottenuta attraverso la legge congiunta del vettore aleatorio (X, Y). L'altro aspetto caratterizzante la definizione giniana è la considerazione che, per estrarre da una misura della diversità di due elementi aleatori quanto sia dovuto soltanto alla dissomiglianza delle leggi marginali ν_1 e ν_2, si debba ricorrere all'estremo inferiore della suddetta media al variare della legge di (X, Y) nella classe di tutti gli accoppiamenti possibili di tali marginali [idea di classe di Fréchet *in nuce*]. Vi si scorge lo stesso programma scientifico che culminerà, verso la fine degli anni sessanta in un celebre teorema di Volker Strassen [29]. Nonostante la ristrettezza degli strumenti matematici a sua disposizione, Gini definisce l'indice di dissomiglianza con sufficiente precisione in base alla suddetta proprietà estremante e ricerca il minimo in casi molto particolari di distribuzioni con supporto finito sull'asse reale [$d_S(X, Y) = |X - Y|$]. Ritornando all'ambito più generale, in cui si richiede soltanto che S sia spazio metrico *separabile*, dato $p \geq 1$, l'indice di dissomiglianza $G_p(\nu_1, \nu_2)$ di ordine p

tra ν_1 e ν_2 è quindi definito da
(8)
$$G_p(\nu_1,\nu_2) = \Big(\inf \Big\{ \int_{S^2} d(x,y)^p \nu(dxdy) : \ \nu \in \mathcal{F}(\nu_1,\nu_2) \Big\} \Big)^{1/p}$$
purché siano finiti gli integrali $\int_S d(x,y_0)^p \nu_1(dx)$ e $\int_S d(x_0,y)^p \nu_2(dy)$ per qualche scelta di x_0 e y_0 in S. Si può dimostrare che G_p è una distanza sullo spazio $[S]_p$ delle misure di probabilità, sui boreliani di S, che soddisfano la suddetta condizione di finitezza per i momenti marginali di d. Oggidì, (8) con $p = 1$ è quasi universalmente nota come *distanza di Wasserstein*, con riferimento a [32]. La natura di distanza per l'indice di dissomiglianza tra distribuzioni sull'asse reale era però già stata messa in evidenza, ad es., da Giampiero Landenna nel 1956. Cfr. [23].

Un'importante generalizzazione dell'indice di dissomiglianza, motivato da questioni di ottimizzazione di specifici processi economici, è dovuta al matematico sovietico Leonid V. Kantorovič (1912-1986). L'attività di questo vigoroso e originale studioso, rimasta per molto tempo sconosciuta, anche per ragioni di segretezza militare, alla comunità scientifica, riguardò per una parte significativa la ripartizione ottimale di risorse e nel 1975 gli valse il premio Nobel per l'economia [condiviso con Tjalling C. Koopmaus (1910-1985)]. A lui si deve l'invenzione della programmazione lineare, verso la fine degli anni '30 del secolo scorso e, per quanto riguarda la presente relazione, lo studio, a partire dall'inizio degli anni '40, di problemi come il seguente, che riducono indirettamente la distanza fra due misure di probabilità al costo ottimale di trasporto dell'una sull'altra: ≪Data una funzione di danno (costo) $c\colon\ S^2 \ \to \ [0,+\infty)$ e due qualunque misure di probabilità ν_1 e ν_2, ci si prefigge di appurare l'esistenza e, in caso affermativo, di determinare le distribuzioni in $\mathcal{F}(\nu_1,\nu_2)$ per cui risulta minimo il costo medio $\int_{S^2} c(x,y)\nu(dxdy)$ al variare di ν in $\mathcal{F}(\nu_1,\nu_2)$ ≫. Se si prende $c = d_S^p$, il problema si riduce a quello formulato da Gini. Fra i contributi più rilevanti di Kantorovič alla materia si deve ricordare un teorema di dualità risalente al 1958, che ha giocato un ruolo molto importante in applicazioni all'analisi matematica delle distanze di cui stiamo parlando. Per questi si vedano [9] e i più recenti trattati [1] e [31]. A Kantorovič va riconosciuto anche il merito di aver messo in luce la connessione del suo problema col più classico problema del trasporto ottimo di Gaspard Monge (1746-1818). Si veda [24], dove Monge pone e studia la questione del cammino ottimale, rispetto al costo di trasporto, che le particelle di un materiale da costruzione dovrebbero compiere da un luogo determinato di estrazione verso una parte determinata di una

costruzione. Nell'arco temporale, che dalla fine del '700 arriva ai giorni nostri, si colloca, a buon diritto, anche la proposta fatta un secolo fa dal Gini. Come risultato degli avanzamenti e dei ritorni che si sono avvicendati lungo quell'arco, la distanza determinata dall'indice di dissomiglianza è spesso richiamata, oltre che col nome di Wasserstein, anche con quelli di Monge e Kantorovič.

9. Alla fine di questa relazione viene spontaneo esprimere ammirazione per il lavoro di Gini sulla teoria delle relazioni statistiche, soprattutto per originalità e profondità di ragionamento e per la notevole abilità di arrivare a conclusioni significative, pur nella sostanziale mancanza di mezzi tecnici adeguati. In particolare, colpisce positivamente la chiarezza con cui in tale lavoro vengono comunque precisate le idee di fondo sottostanti le definizioni dei concetti principali come, ad esempio, quello di ordinamento di concordanza/discordanza e di indice di dissomiglianza.

Riferimenti bibliografici

[1] Ambrosio, L., Gigli, N. and Savaré, G.. (2005) *Gradient Flows in Metric Spaces and in the Space of Probability Measures* Birkhäuser.

[2] Cambanis, S., Simons, G. and Stout, W.. (1976) Inequalities for $\mathcal{E}k(X, Y)$ when the marginals are fixed. *Z. Wahrscheinlichkeitstheorie verw. Gebiete* **36** 285-294.

[3] Cassata, F.. (2006) *Il Fascismo Razionale (Corrado Gini fra Scienza e Politica)*. Carocci, Roma.

[4] Castellano, V.. (1965) Corrado Gini: a memoir. *Metron* **24** 3-84.

[5] Cifarelli, D.M. and Regazzini, E.. (1990) Some contributions to the theory of monotone dependence. *CNR-IAM* **90** 17.

[6] Conti, P.. (1993) On some descriptive aspects of measures of monotone dependence. *Metron* **51** 43-60.

[7] Dall'Aglio, G.. (1956) Sugli estremi dei momenti delle funzioni di ripartizione doppia. *Annali della Scuola Normale Superiore di Pisa* **10** 35-74.

[8] de Finetti, B.. (1937) A proposito di "correlazione". *Supplemento Statistico ai Nuovi Problemi di Politica, Storia ed Economia* **3** 41-57.

[9] Dudley, R.M.. (2002) *Real Analysis and Probability*. Cambridge University Press, Cambridge.

[10] Frechét, M.. (1937) *Généralités sur les Probabilités (Premier Livre). Variables Aléatoires.* Gauthier-Villors, Paris.

[11] Frechét, M.. (1951) Sur les tableaux de corrélation dont les marges sont données. *Ann. Univ. Lyon*(A) **14** 53-77.

[12] Gini, C.. (1908) *Il Sesso dal Punto di Vista Statistico. Le Leggi della Produzione dei Sessi*. Sandron, Milano.

[13] Gini, C.. (1911) Considerazioni sulle probabilità a posteriori e applicazioni al rapporto dei sessi nelle nascite umane (con un'appendice di L. Galvani). *Studi Economico-Giuridici dell'Università di Cagliari* **3** 133-171.

[14] Gini, C.. (1914) *Di Una Misura delle Relazioni tra le Graduatorie di Due Caratteri: l'Indice di Cograduazione*. Cecchini, Roma.

[15] Gini, C.. (1914) Di una misura della dissomiglianza tra due gruppi di quantità e delle sue applicazioni allo studio delle relazioni statistiche. *Atti del R. Istituto Veneto di Scienze, Lettere e Arti* **74** 185-213.

[16] Gini, C.. (1914) Indici di omofilia e di rassomiglianza e loro relazioni col coefficiente di correlazione e con indici di attrazione. *Atti del R. Istituto Veneto di Scienze, Lettere e Arti* **74** 583-610.

[17] Gini, C.. (1915) Nuovi contributi alla teoria delle relazioni statistiche. *Atti del R. Istituto Veneto di Scienze, Lettere e Arti* **74** 1903-1942.

[18] Gini, C.. (1915) Sul criterio di concordanza tra due caratteri. *Atti del R. Istituto Veneto di Scienze, Lettere e Arti* **75** 309-331.

[19] Gini, C.. (1916) Indici di concordanza. *Atti del R. Istituto Veneto di Scienze, Lettere e Arti* **75** 1419-1461.

[20] Gini, C.. (1964) Le applicazioni induttive del calcolo delle probabilità. *Rivista di Politica Economica* **54** 1059-1083.

[21] Hoeffding, W.. (1940) Masstalovariate korrelations theorie. *Sehr. Math. Inst. Univ. Berlin* **5** 181-233.

[22] Kruskal, W.H.. (1958) Ordinal measures of association. *Journal of the American Statistical Association* **53** 814-861.

[23] Landenna, G.. (1956) La dissomiglianza. *Statistica* **16** 21-57.

[24] Monge, G.. (1781) Mémoire sur la théorie des déblais et des remblais. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de Paris* 666-705.

[25] Nelsen, R.B.. (2006) *An Introduction to Copulas* (2nd ed.) Springer, New York.

[26] Salvemini, T.. (1939) Sugli indici di omofilia. *Atti della I Riunione Scientifica della Società Italiana di Statistica* in *Supplemento Statistico ai Nuovi Problemi di Politica, Storia ed Economia* **5** 105-115.

[27] Schweizer, B. and Wolff, E.F.. (1981) On nonparametric measures of dependence for random variables. *Ann. Statist.* **9** 879-885.

[28] Spearmann, C.. (1906) A footrule for measuring correlation. *British Journal of Psychology* **2** 89.

[29] Strassen, V.. (1965) The existence of probability measures with given marginals. *Ann. Math. Statist.* **36** 423-439.

[30] Villani, C.. (2003) *Topics in Optimal Transportation*. Graduate Studies in Mathematics (v.58) AMS, Providence.

[31] Villani, C.. (2009) *Optimal Transport, Old and New*. Springer, Berlin.

[32] Wasserstein, L.. (1969) Markov processes over denumerable products of spaces describing large systems of automata. *Problems of Information Transmission* **5** 47-52.

Istituto Lombardo (Rend. Scienze) 149, 43-68 (2015)

AL TRAMONTO DEL GEOCENTRISMO ASTRONOMIA NELLE CINQUECENTINE DELL'ISTITUTO LOMBARDO

Nota del m.e. GIANNANTONIO SACCHI LANDRIANI (*) e ELIO ANTONELLO (**)

(Adunanza del 5 marzo 2015)

SUNTO. – Nella presente nota vengono presentate opere edite nel XVI secolo, comunemente dette Cinquecentine, raccolte nella Biblioteca dell'Istituto Lombardo. Si tratta di opere dedicate all'Astronomia concepita nel quadro dell'antica teoria geocentrica, prima della rivoluzione Copernicana. Vengono presentati anche alcuni documenti di quel periodo, relativi a strumenti quali astrolabi e meridiane.

***

ABSTRACT. – In this paper we present some scientific books, edited in XVI century, of the Istituto Lombardo library. These books are devoted to Astronomy conceived in the field of the ancient geocentric theory, just before the heliocentric Copernican revolution. We present also some documents of that period relative to instruments as astrolabes and sundials.

1. INTRODUZIONE

Quanto segue è premessa, alla nota su Cinquecentine di Astronomia appartenenti alla nostra biblioteca.[1]

(*) Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere, Milano, Italy.
E-mail: giansacchi.landriani@gmail.com
(**) INAF-Osservatorio Astronomico di Brera - Merate, Italy.
E-mail: elio.antonello@brera.inaf.it

1 Nelle didascalie delle figure di frontespizi sono indicate con la simbologia

Le precedenti comunicazioni su nostre Cinquecentine, hanno toccato temi della Matematica, della Meccanica, delle Scienze Naturali, della Medicina.

Sino ad ora il nostro lavoro ha portato, salvo particolari casi, ad una rassegna bibliografica di opere ricche di contributi storici e figurativi.

È doveroso ricordare la costante collaborazione della nostra Cancelliera e del nostro Bibliotecario e i preziosi contributi di colleghi: Bottani e Rambaldi per un'approfondita comunicazione sulle figure di Tartaglia e Cardano, De Bernardi per le scienze naturali.

Vorremmo giustificare la nostra attenzione a congetture nate in una cultura lontana e scientificamente superata. Si osservi che l'iniziale semplice curiosità di sfogliare i documenti del Cinquecento ha portato a subire il fascino di opere, nate allo svanire di antiche certezze, ma tormentate dallo spirito rinascimentale. Per approfondire dal punto di vista critico la nostra catalogazione sarà necessario l'aiuto dei colleghi umanisti soprattutto per affrontare il latino decadente dei testi denso di neologismi.

In particolare dedicheremo la nostra attenzione al *forsennato* tramonto del sistema geocentrico nel corso del Cinquecento e accenneremo all'alba della teoria eliocentrica.

L'esplosione editoriale del XVI secolo e la vasta notorietà del problema di svelare il mistero del cielo stellato hanno favorito la notevole diffusione di queste opere, come si può desumere dall'elevato numero di esemplari citati nei cataloghi centrali.[2] Le evoluzioni concettuali, geometriche e cinematiche di Macrobio (390-430), Gerolamo Fracastoro (1476-1553), Oronzio Fineo (1494-1555), Pietro Apiano (1495-1552), Thyco Brahe (1546-1601) ed altri - ereditate da Aristotele (348-322 a.C.) e Tolomeo (100-175 circa) - costringevano ad una strenua difesa della centralità della terra e del sole visto quale lucente pianeta. Difesa strenua perché sostenuta da un gran numero di scrupolose osservazioni dei movimenti dei pianeti e delle stelle. L'elaborazione dei dati era affi-

---

[n it/ICCU/xxx…] e [n EDIT 16/xxx…], dove n è il numero di copie indicate nel Catalogo Centrale o rispettivamente nel Catalogo Edit 16 seguite dal rispettivo (xxx) codice identificativo.

[2] ICCU Istituto Centrale del Catalogo Unico, EDIT 16 catalogo centrale delle Edizioni del XVI secolo.

data alla geometria greca e ad elementi di trigonometria, disciplina quest'ultima di antica e misteriosa origine.

Verso la fine del Cinquecento albeggia la teoria eliocentrica con l'emergere della figura di Copernico (1473-1543), ancora tuttavia legato alle orbite circolari e soprattutto timido pubblicista delle sue affermazioni. Timidezza dettata, pare, dal timore di compromettersi all'occhiuta vigilanza del Sant'Uffizio. La Chiesa peraltro non sembra essere intervenuta forse impegnata a difendere la tradizione biblica ma attenta alla nuova teoria.

Sino ad allora gli astronomi erano in sostanza osservatori a occhio nudo del cielo. Il valore dell'esperienza era percepito, ma non pienamente definito. Non esaustivo era l'ausilio della matematica.

È necessario attendere il secolo successivo per vedere Galileo (1564-1642) valersi del primo, seppur elementare, telescopio, e, con Newton, dar vita alla fisica sperimentale, mentre Keplero (1571-1630), coevo di Galileo, definiva, come noto, le orbite ellittiche dei pianeti, e intuiva la gravitazione tra i corpi celesti quale principio del moto non rettilineo. Più tardi Eulero, Lagrange, D'Alembert, Laplace inaugureranno la Fisica-Matematica e la Meccanica Celeste.

2. Il cosmo

2.1. Le sfere omocentriche di Eudosso, Callippo e Aristotele

Nel periodo che stiamo considerando, il Cinquecento, la concezione del cosmo era ancora basata sulle idee aristoteliche. La Terra era una sfera ferma al centro dell'universo, come si vede in una famosa figura riportata nel libro *Cosmographia* di Pietro Apiano[3] (*Figg. 1* e *2*). Essa era circondata dagli altri elementi fondamentali e da un sistema di sfere cristalline sulle quali stavano, nell'ordine, la Luna, Mercurio, Venere, il Sole, Marte, Giove e Saturno; infine c'era la sfera delle stelle

[3] Petrus Apianus (1495 – 1552) fu un umanista tedesco noto per i lavori di matematica, astronomia e cartografia. Nato Peter Bienewitz, latinizzò il nome (*biene* = *apis*, ape). Il suo libro *Cosmographicus liber* (1524) ebbe grande diffusione come numero di stampe e traduzioni. Apiano fu anche stampatore di opere geografiche e cartografiche di qualità. Ottenne ampi riconoscimenti in vita come uomo di scienza.

fisse. Il complesso del cosmo era posto in movimento dal primum mobile, oltre il quale stava la sede dei beati e di Dio, ed era considerato perfetto ed immutabile nella sua combinazione di moti circolari uniformi.

La parte del cosmo al di sotto della Luna, o mondo sublunare, era il regno della trasformazione e corruzione dei quattro elementi: il fuoco, l'acqua, l'aria, e infine la terra, ed erano caratterizzati da quattro proprietà: il secco (terra e fuoco), l'umido (aria ed acqua), il freddo (acqua e terra), e il caldo (fuoco e aria), come rappresentato nel libro di Oronzio Fineo[4] (*Figg. 3* e *4*). La tendenza naturale del fuoco e dell'aria era salire verso l'alto, mentre quella dell'acqua e della terra era cadere verso il centro della Terra. Invece, il sistema delle sfere celesti cristalline, eterno e incorruttibile, era formato da un elemento, l'etere, che non tendeva né verso il basso né verso l'alto, per cui ogni corpo celeste poteva muoversi solo di moto circolare uniforme.

Il fuoco, diffuso in una sfera posta subito sotto quella della Luna, era una sostanza sottile e trasparente, e quindi non era visibile in condizioni 'normali'. La sfera andava però soggetta ed eventi di corruzione, dai quali scaturivano fenomeni ignei ben visibili come i fulmini, le meteore e i bolidi celesti, e le comete. In altre parole, tale corruzione spiegava gli eventi luminosi nell'atmosfera che non potevano essere di origine terrestre, o comunque fenomeni (come le comete) incompatibili con la perfezione e immutabilità delle sfere superiori. Si potevano generare perfino delle pietre, i meteoriti.

Le comete erano solitamente considerate un presagio di sventura e foriere di sciagure, come le terribili epidemie di peste che avevano segnato la storia dell'umanità. Fin dall'antichità classica l'origine di tali calamità era stata considerata una corruzione o un morbo di origine celeste, come ricordato da Virgilio (*Eneide*, III, v. 138; *Georgiche*, III, v. 478). Fino al Seicento gli astronomi furono soprattutto astrologi, e l'astrologia era una branca molto importante del sapere di allora (*Fig. 5*). Eseguivano calcoli piuttosto complicati, per i quali era necessaria una notevole abilità matematica, al fine di trovare il legame tra gli eventi

[4] Oronce Finé (1494-1555), anche Orontius Finaeus o Finnaeus, fu un matematico e cartografo francese. Scrisse molti libri di matematica e astronomia, che, pur contenendo pochi studi originali, contribuirono a diffondere enormemente la conoscenza delle materie scientifiche. Fu anche inventore e costruttore di strumenti.

incombenti sull'umanità, la posizione degli astri e i fenomeni celesti. Infatti, quanto avveniva sulla Terra era visto come un riflesso di ciò che si poteva leggere un po' in anticipo, e con una certa fatica, in cielo.[5]

Una cinquecentina dell'Istituto Lombardo è intitolata *Gnomologia* (*Fig. 6*); il termine, derivato dal greco, indica una raccolta di sentenze. Il libro consiste in citazioni tratte da vari dialoghi di Platone. Nel *Timeo,* Platone aveva esposto le proprie idee sulla formazione del cosmo, sulla storia della sua evoluzione e degli uomini che lo abitano, sull'importanza del numero e dell'armonia cosmica. Per esempio, secondo Platone era stato proprio grazie all'osservazione del cielo che l'umanità aveva imparato a contare (e così erano nate l'aritmetica e la matematica) e a riflettere (e così era nata la filosofia): "Ora, le osservazioni del giorno e della notte, dei mesi e dei periodi degli anni, degli equinozi e dei solstizi hanno procurato il numero, e hanno fornito la riflessione sul tempo e la ricerca sulla natura dell'universo: da queste cose abbiamo ottenuto il genere della filosofia" (Platone, *Timeo* [47 a, b]). Tali considerazioni erano ulteriormente ribadite nel dialogo *Epinomide* (opera di un allievo): "Come abbiamo imparato a contare … Fra le realtà che il dio ci mostra, c'è qualcosa di più bello del vedere sorgere il sole e poi prendere parte allo spettacolo della notte, che offre una visione del tutto differente? … E poiché il cielo si rinnova ciclicamente, senza cessare di far seguire infinite notti a infiniti giorni, non smetterà di insegnare agli uomini l'uno e il due, prima che anche l'uomo più tardo non abbia imparato a contare in modo decente …" (*Epinomide*, [978 b, c, d]).

Le concezioni di Platone erano state in parte criticate da Aristotele, ma altri autori, come i neoplatonici, ne avevano mantenuto l'impostazio-

---

[5] Lo stesso Galileo fu autore di oroscopi, o 'temi natali'. Luca Gaurico (1475-1558) può essere considerato un tipico rappresentante di questa categoria; scrisse numerosi 'temi natali', facendone un uso piuttosto disinvolto, per non dire sfacciato, ma pubblicò anche diversi lavori teorici, sia come autore sia come curatore. Praticare l'astrologia era un modo per avere un guadagno sicuro, facendo leva (ieri come oggi) sulla psicologia umana e sulla sua attitudine di fronte all'incertezza del futuro, in particolare di coloro che detenevano il potere politico. Comunque, nel 1586 il papa Sisto V emanò la bolla *Coeli et terrae* con la quale venivano condannate l'astrologia giudiziale (o giudiziaria) e la divinazione, che esprimevano giudizi sul futuro dell'uomo, perché ciò andava contro il suo libero arbitrio, e perché solo Dio conosceva il futuro. Era considerata accettabile l'astrologia naturale, che studiava gli eventi celesti con finalità pratiche, per esempio in campo medico.

ne filosofica. E' il caso di Macrobio[6] (*Figg. 7* e *8*) e del suo commento piuttosto esteso al *Somnium Scipionis* di Cicerone; il libro ebbe una certa fortuna nel Medioevo, vista la diffusione di temi platonici e neoplatonici nel pensiero medievale. Nel *De Re Publica*, Cicerone aveva descritto la visione avuta in sogno da Scipione Emiliano prima di distruggere Cartagine. L'Emiliano raccontava di aver incontrato in cielo il nonno adottivo Scipione l'Africano. Il nonno gli aveva mostrato la sede dei beati, la Via Lattea (il grande cerchio che incrocia quello dello zodiaco tra Toro e Gemelli da una parte, e Scorpione e Sagittario dall'altra), e la struttura del cosmo. L'Emiliano era particolarmente colpito dalla Terra, piccolissima vista dalle stelle; Macrobio, nel Libro II, aveva commentato in dettaglio le zone climatiche terrestri, con due fasce temperate abitabili molto strette (cioè, aventi piccola estensione lungo i meridiani) rispetto alle due zone polari gelide, e rispetto alla fascia torrida equatoriale molto estesa.[7] E' da notare che, alla fine dell'Impero, pochi autori cristiani erano convinti che la Terra fosse piatta; c'era però discussione sull'esistenza o meno degli abitanti degli antipodi, e già Aristotele aveva escluso l'abitabilità dell'emisfero australe. A proposito della forma della Terra, ricordiamo che Apiano nella *Cosmographia* aveva segnalato l'ombra della Terra proiettata sulla Luna durante un'eclissi del nostro satellite quale dimostrazione diretta della sua sfericità; infatti, la forma dell'ombra non era compatibile, per esempio, con un poligono (triangolo, quadrato, esagono).

Com'era fatto il sistema delle sfere omocentriche? Il modello, elaborato da Eudosso e modificato poi da Callippo, nel IV sec. a.C., era costituito da 33 sfere, tre o quattro per ogni pianeta, e ognuna era in moto uniforme attorno a un proprio asse, diverso da quello delle altre. Il sistema era molto complicato perché doveva spiegare le irregolarità del moto

---

[6] Ambrogio Teodosio Macrobio (Ambrosius Theodosius Macrobius, circa 390-430) fu un filosofo e funzionario dell'Impero. Oltre ai *Commentarii in Somnium Scipionis*, scrisse il dialogo *Saturnalia* e un'opera di grammatica sul verbo greco e latino.

[7] La concezione del cosmo all'epoca dell'Impero era stata discussa in dettaglio per esempio da Plinio (I sec. d.C.). In particolare, egli scrisse della divisione della Terra e del cielo circostante "in cinque parti, chiamate zone", dove "un freddo ostile e un gelo eterno opprimono tutte le terre sottoposte alle due parti più esterne, verso l'uno e l'altro polo: il nostro, che è chiamato Settentrione, e l'altro, opposto, che ha nome Australe … Mentre la fascia mediana, dove passa l'orbita del Sole, bruciata dalle fiamme e surriscaldata dalla vicinanza della fonte di calore, è torrida. Solo le due circostanti, cioè quelle comprese fra la zona surriscaldata e le zone gelate, sono temperate e non comunicano fra loro per l'ardore del cielo" (Plinio, *Storia Naturale*, I, 68).

planetario, in particolare quello apparente retrogrado. Osservando un pianeta esterno del Sistema Solare, come Marte, quando la Terra si trova tra il pianeta e il Sole (in opposizione), e seguendone il movimento per alcuni mesi, lo vediamo spostarsi, lentamente, verso est rispetto alle stelle, finché rallenta e prende a muoversi verso ovest, e quindi dopo un paio di mesi riprende il lento moto verso est. Questo fenomeno è facilmente spiegabile nel sistema eliocentrico come un effetto di prospettiva legato alle diverse velocità orbitali della Terra e di Marte, ma diventa complicato se lo si vuole giustificare nei sistemi geocentrici. A Schiaparelli è generalmente riconosciuto dagli storici dell'astronomia il merito di aver spiegato in modo chiaro il principio di funzionamento del sistema delle sfere omocentriche; tra l'altro, illustrò la sua idea proprio all'Istituto Lombardo durante un'adunanza nel 1874 (Schiaparelli, 1875; Dreyer, 1970).

Aristotele (*Fig. 9*) aveva aumentato il numero delle sfere portandolo a 54, e aveva esposto le sue idee sul cosmo, che abbiamo ricordato all'inizio, nella *Fisica* e nel *De caelo*. Nel Cinquecento, Fracastoro[8] (*Fig. 10*) introdusse altre sfere fino a un totale addirittura di 77. Tuttavia, nel sistema che stiamo considerando, un pianeta si trova sempre alla stessa distanza dalla Terra, e quindi il modello non era in grado di spiegare la variazione della luminosità dell'astro lungo la sua orbita, dovuta proprio alla variazione della sua distanza dalla Terra. Per Fracastoro, per esempio, le variazioni di luminosità dipendevano da una diversa densità nelle varie parti del cielo (Delambre, 1819, p. 387).

2.2. Il sistema tolemaico

Durante il Rinascimento era divenuto familiare anche il modello tolemaico, pur esso complicato, con epicicli e deferenti in moto circo-

[8] Il veronese Girolamo Fracastoro (1483-1553) studiò all'Università di Padova all'inizio del Cinquecento, quando vi si trovava come studente anche Copernico. Visse a Verona, dedicandosi, con un'attività poliedrica, alla medicina, all'astronomia, alla filosofia e alla poesia. Pubblicò gli studi di astronomia, *Homocentrica*, nel 1538. "Si può sperare che Fracastoro comprendesse il suo sistema in tutti i particolari, ma certo non aveva il dono di dare ai suoi lettori una chiara idea di ogni dettaglio dell'ingombrante meccanismo … L'oscurità della descrizione può essere stata tra le cause del totale insuccesso del libro" (Dreyer, p. 271). La cinquecentina contenente l'*Homocentrica* (Fig. 10) è l'Opera Omnia di Fracastoro pubblicata, in varie edizioni, dopo la sua morte; la sua diffusione sarebbe quindi da ascriversi forse più agli altri testi, come quelli di medicina, inclusi nel libro.

lare uniforme. Un pianeta si muove lungo un cerchio (epiciclo) il cui centro si sposta lungo un altro cerchio (deferente); in particolare, il centro geometrico del deferente non era la Terra, bensì un punto simmetrico tra la Terra e l'equante. A sua volta, l'equante era definito come punto rispetto al quale la rivoluzione lungo il deferente avveniva con velocità angolare costante. In questo modo si salvava il principio dei moti circolari uniformi che doveva stare alla base del moto (all'apparenza irregolare) di rivoluzione dei pianeti. Quello di Tolomeo (II sec. d.C.) era però essenzialmente un modello matematico, mentre quello 'vero' era l'aristotelico. Il sistema degli epicicli spiegava la variazione di distanza, ma era incompatibile con il sistema delle sfere cristalline.

Nel Cinquecento, il polacco Copernico (1473-1543) aveva costruito il suo modello eliocentrico secondo l'approccio tolemaico, cioè complicato dalla presenza di molti epicicli e deferenti in moto circolare uniforme, e anch'esso era considerato per lo più un modello matematico. Il suo libro *De Revolutionibus* venne pubblicato nel 1543. Anni dopo, il danese Tycho Brahe (1546-1601), non soddisfatto del modello copernicano, pensò ancora alla Terra posta al centro dell'Universo, ma con Mercurio e Venere in orbita intorno al Sole, il quale a sua volta era in orbita intorno alla Terra; anche i pianeti esterni, Marte, Giove e Saturno, avevano il Sole come centro della loro orbita. Brahe lasciò in eredità a Keplero (1571-1630) una grande quantità di osservazioni accurate, compiute nei suoi Osservatori con l'aiuto di vari collaboratori, perché sviluppasse questa sua idea che meglio rappresentava i dati osservativi allora disponibili. Però Keplero capì che un pianeta come Marte, così 'difficile' nei sistemi geocentrici, diventava un caso semplice se pensato su un'orbita ellittica intorno al Sole, dando così ragione al principio copernicano, ma allo stesso tempo semplificando parecchio il modello. Keplero pubblicò i primi risultati nel 1609, lo stesso anno in cui Galileo (1564-1642) puntava per la prima volta il telescopio verso il cielo.

Come affermato da Dreyer, quello "dal 1543 al 1609 fu un periodo di transizione, in attesa che il sistema di Copernico venisse liberato dai suoi elementi caduchi e rafforzato da Keplero" (Dreyer, p. 316). Ci furono uomini di scienza che accettarono il principio copernicano, e altri che ammettevano il moto diurno della Terra ma non quello orbitale. "Per molti anni dopo la pubblicazione dell'opera di Copernico, l'astronomia non fece alcun progresso; un'opinione valeva l'altra" (Dreyer, p. 328), e "benché l'astronomia e l'astrologia attraessero un gran numero di studiosi …, la teologia veniva ancora considerata l'alfa

e l'omega. E la teologia era venuta a significare la più letterale accettazione di ogni parola della Scrittura; per i protestanti di necessità, poiché essi avevano negato l'autorità dei Papi e dei Concili; per i cattolici romani a causa del desiderio di definire con maggior precisione le loro dottrine … In questo momento veniva a cadere ogni possibilità di parlare di Rinascimento cristiano" in Europa (Dreyer, pp. 322-323).

3. Strumenti e tecniche

Fino all'avvento del telescopio di Galileo, le osservazioni astronomiche erano state effettuate ad occhio nudo con l'ausilio di alcuni strumenti specifici per la misura della posizione degli oggetti celesti, e di altri che agevolassero l'osservazione. Giacomo Leopardi, per esempio, nelle *Operette Morali* notava che Copernico guardava in cielo "per mezzo d'un cannoncello di carta; perché non erano ancora inventati i cannocchiali" (*Il Copernico,* Scena Seconda); ci sono illustrazioni in alcuni codici medioevali che mostrano tale operazione. Il tubo aveva lo scopo di migliorare la visibilità di stelle e pianeti, perché eliminava molta parte della luce parassita che colpiva la pupilla (cioè, la luce proveniente da altri oggetti celesti o dall'ambiente circostante, oppure diffusa dal cielo).

3.1. Planisferi, astrolabi, torqueto

Il planisfero è la rappresentazione proiettata su un piano della sfera terrestre (nel caso del planisfero geografico), o della sfera celeste (nel caso degli astrolabi). Ci sono vari libri dedicati a tali strumenti, come quelli di Gallucci[9] (*Fig. 11*) e Guidobaldo Del Monte[10]. Il planisfero geografico aveva una struttura a griglia con linee radiali che rappresentavano i meridiani, e archi concentrici che rappresentavano i

[9] Giovanni Paolo Gallucci (1538-1621) visse a Venezia, dove si dedicò in particolare all'insegnamento privato dei giovani nobili, pubblicò traduzioni in volgare di testi scientifici, di storia naturale e di arte militare, e un libro divulgativo dalla ricca iconografia per spiegare i fenomeni celesti anche ai non esperti. Scrisse vari libri sulla costruzione e uso di orologi e strumenti astronomici.

[10] Guidobaldo Del Monte (1545-1607) fu un matematico, filosofo ed astronomo; visse per lo più a Pesaro; fu amico e corrispondente di Galileo. Scrisse libri di meccanica (*Mechanicorum liber*), ed è ricordato per il rigoroso controllo sperimentale cui

paralleli. Al centro era imperniato un indice che serviva a determinare le distanze tra la città di riferimento e i vari luoghi sulla Terra, su scala molto grande (*Figg. 12, 13* e *14*).

Con il termine *astrolabio* (in greco *astrolábon*, che prende/comprende le stelle) sono stati chiamati strumenti diversi tra loro, adibiti a rilevare le posizioni degli astri oppure utilizzati nel calcolo astronomico: *astrolabio piano*, *astrolabio universale* e di *Rojas*, *astrolabio nautico*. Nato in epoca ellenistica, fu sviluppato nell'Islam in diverse varianti, e le traduzioni di testi arabi ne diffusero la conoscenza in Europa, in epoca medioevale; solo nel XVII secolo, con la costruzione di orologi meccanici accurati e l'elaborazione di nuovi metodi di calcolo, lo strumento divenne obsoleto. Ignazio Danti[11] descrisse la costruzione e l'uso di tali strumenti (*Fig. 15*). Un astrolabio piano (*Figg. 16, 17*) si riferisce alle *coordinate altazimutali* dell'osservatore, cioè la posizione di un oggetto celeste è definita rispetto all'orizzonte del luogo e allo zenit. Lo strumento era valido quindi solo per la latitudine del luogo. Si cercò di superare l'inconveniente con gli astrolabi universali, che erano applicabili alle altre latitudini, ma risultarono poco pratici. Ricordiamo infine che l'*astrolabio nautico,* diverso dall'*astrolabio piano*, era usato per misurare la *distanza zenitale* del Sole o di una stella, in particolare la Polare, nel momento del transito al meridiano, al fine di determinare la latitudine toccata dalla nave (Museo Galileo, 2015).

Il torqueto astronomico (*Fig. 18*) era uno strumento piuttosto complesso, prodotto in Europa dalla fine del XIII secolo, e poteva essere usato per misurare un oggetto celeste nei tre sistemi di coordinate altazimutale, equatoriale ed eclittico. Nel caso equatoriale le coordinate sono riferite al piano dell'equatore terrestre e alla direzione del Polo Nord celeste; nel caso eclittico sono riferite al piano dell'orbita terrestre (eclittica) e alla direzione del Polo dell'orbita. Lo strumento era utile anche come calcolatore analogico, per passare da uno dei sistemi di coordinate all'altro.

---

sottoponeva le sue conclusioni. Nel *Planisphaeriorum universalium theorica* tentava un miglioramento dei planisferi universali.

[11] Ignazio o Egnatio Danti (1536-1586), domenicano, dal 1583 vescovo di Alatri, è stato un matematico, astronomo e cosmografo. Insegnò matematica all'Università di Bologna, dove costruì la prima meridiana di San Petronio. A Roma fece parte della commissione per la riforma del calendario voluta da Gregorio XIII, e disegnò i cartoni per gli affreschi delle carte geografiche in Vaticano.

3.2. Orologi

Fin dall'antichità, la specializzazione dell'attività umana e la crescente complessità della società avevano resa necessaria la suddivisione del tempo giornaliero in unità facilmente misurabili. Questo era possibile con la meridiana, osservando la posizione dell'ombra dello gnomone illuminato dal Sole, come illustrato da Giovanni Battista Vimercati (*Fig. 19*). La lunghezza dell'ombra varia in funzione della data e del momento della giornata. Per esempio, nel caso della meridiana orizzontale, alle latitudini intermedie, lontano dall'equatore e dai poli, la lunghezza passa da un valore minimo al solstizio d'estate a un valore massimo al solstizio d'inverno, e, durante la giornata, l'ombra compie una curva raggiungendo il valore più piccolo al momento del mezzogiorno locale; agli equinozi, l'estremo dell'ombra percorre una linea retta (*Fig. 20*).[12]

Per determinare le ore notturne si misurava la posizione relativa delle stelle usando il notturlabio, o notturnale, od orologio notturno. La posizione delle stelle, infatti, dipende dalla data e dal momento di osservazione durante la notte. In particolare, venivano puntate le stelle principali dell'Orsa Maggiore in riferimento alla Polare. L'*instrumentum syderale* di Pietro Apiano è una delle prime descrizioni di tale "orologio" (*Fig. 21*).

3.3. Tavole astronomiche

In epoca alto-medievale c'era stato un regresso delle scienze in Europa; l'astronomia era stata coltivata da cultori islamici in Asia, e nei secoli XI e XII alcuni dei principali astronomi si trovavano nella Spagna musulmana. Il re Alfonso X di Castiglia, detto il Saggio (1252-

[12] Con questa meridiana la durata di un'ora è sempre la stessa. Per molti secoli però si era continuato ad usare il sistema antico di dividere il periodo di luce, dall'alba al tramonto, in dodici ore tra loro uguali, e la notte altrettanto. Di conseguenza, le ore diurne estive erano lunghe e quelle invernali brevi: per esempio, alla latitudine di Milano, al solstizio d'estate un'ora diurna durava circa 76 minuti, e al solstizio d'inverno circa 43 minuti. Nel caso di tale applicazione, le rette sul piano della meridiana hanno un andamento diverso. Aggiungiamo inoltre che, nel Ducato di Milano e in altre località italiane, fino al XVIII secolo si mantenne l'antica consuetudine di iniziare il giorno (e quindi il conto delle ore) al tramonto del Sole. Per una discussione dettagliata della proposta di introdurre l'attuale sistema ('francese') invece dell'antico romano anche a Milano, si veda il saggio storico-erudito (ma anche gustoso) di Longo (1766, p. 444) su *Il Caffè*.

1284) è ricordato in particolare per il grande interesse verso l'astronomia e la cultura.[13] Egli chiamò alla sua corte, a Toledo, astronomi ebrei, cristiani e musulmani, per lavorare alle sue dipendenze in vista della preparazione di nuove tavole astronomiche, poi chiamate *Tavole alfonsine* (*Fig. 22*), elaborate con lo scopo di migliorare e aggiornare quelle tolemaiche contenute nell'*Almagesto*. Il lavoro terminò nel 1252, l'anno in cui Alfonso divenne re. Le Tavole fornivano, tra l'altro, le posizioni del Sole, dei pianeti e delle stelle fisse, congiunzioni astronomiche, caratteristiche di eclissi, durata di ere storiche (regni), calendario e tabelle di conversione; il meridiano di riferimento era quello di Toledo, e i calcoli erano riferiti all'anno 1256. I principi teorici su cui il lavoro era stato impostato erano sempre quelli di Tolomeo; inoltre, era stata considerata una precessione media degli equinozi che era circa la metà del reale, con in più la complicazione della 'trepidazione', una supposta oscillazione (in realtà inesistente) degli equinozi stessi (Delambre, 1819, p. 248). Le Tavole godettero di grande fama per tre secoli; furono diffuse dapprima come codici manoscritti, e vennero stampate per la prima volta nel 1483. Erano le migliori tavole allora esistenti, per cui vennero continuamente usate, riviste e integrate sia dagli astronomi sia dai navigatori (era ormai l'epoca delle scoperte geografiche), in base alle nuove osservazioni, ed erano usate anche per fini astrologici.

L'edizione accresciuta del 1545 stampata a Parigi (a cura di P. Hamellius), rispetto a quella di Venezia del 1492 (a cura di J.L. Santritter), include, tra l'altro, alcune tavole di Giovanni Bianchini e di Luca Gaurico.[14] Contiene anche una breve discussione della data dell'equinozio di primavera, del conseguente problema della data di Pasqua, e su come correggere i difetti del calendario giuliano. Infatti, tale calendario, in uso fin dai tempi di Giulio Cesare, aveva accumulato progressivamente una discrepanza temporale di una decina di giorni tra la data 'ufficiale' dell'equinozio di primavera (21 marzo) e l'evento astronomico reale dell'equinozio nel XVI secolo (circa 10 marzo).[15] Ciò costituiva

[13] Alfonso X patrocinò la composizione di un'estesa letteratura, che segnò l'inizio della prosa castigliana, in vari campi del sapere (poetico, giuridico, storico e scientifico), contribuendovi anche in prima persona, e supervisionando il lavoro degli autori letterati cristiani, ebrei e musulmani.

[14] Giovanni Bianchini (1410-1469) fu matematico e astronomo dell'Università di Ferrara. Per Gaurico, v. nota 5.

[15] Un calendario assume per la durata di un anno un numero intero di giorni,

un problema per il calcolo della data di Pasqua, perché essa dovrebbe cadere la prima domenica dopo il plenilunio della primavera astronomica, cioè il primo plenilunio dopo l'equinozio vero. Il papa Gregorio XIII istituì allora una commissione per riformare il calendario, e nel 1582, con la bolla *Inter gravissimas*, promulgò il nuovo sistema, in uso tutt'oggi. Al 1582 furono tolti 10 giorni, e il giorno successivo a giovedì 4 ottobre fu venerdì 15 ottobre, e venne introdotta una correzione nella determinazione degli anni bisestili.[16]

3.4 Trattati di ottica

Il libro *Opticae Thesaurus* (*Fig. 23*) contiene tre trattati: *a)* uno sull'ottica e su altri argomenti correlati, composto da Ibn al-Haytham (autore dell'XI secolo noto come Alhazen), dove sono discusse la percezione visiva, la teoria della luce e dei colori, la riflessione e la rifrazione; *b)* un trattato in cui è discusso il crepuscolo; *c)* un testo contenente i lavori di ottica di Witelo[17] (*Vitellonis Thuringopoloni opticae libri decem*). Il lavoro di quest'ultimo autore (*Fig. 24*) tratta in particolare della prospettiva, e fu utilizzato da artisti rinascimentali come il Ghiberti.

---

mentre l'anno tropico medio, cioè il tempo perché il Sole compia un'orbita apparente uniforme di 360 gradi esatti, dura 365,24218 giorni. Già nell'antichità con la riforma giuliana avevano cercato di superare il problema introducendo l'anno bisestile di 366 giorni alternato a tre anni comuni di 365 giorni; questo però implica una durata media dell'anno di 365,25 giorni, e la differenza rispetto all'anno tropico (come era stimato all'epoca) spiega l'accumulo avvenuto nell'arco di sedici secoli.

16 Sono solitamente bisestili gli anni divisibili per 4, come, per esempio, il 1932. Nel sistema giuliano la cadenza di anni bisestili era leggermente in eccesso, e la soluzione era quindi ridurla togliendo qualcuno degli anni bisestili. Nella cinquecentina del 1574 si proponeva di non considerare bisestili, ma comuni, gli anni 1660, 1796, 1932, 2068, ecc. (separati tra loro di 136 anni). La riforma gregoriana introdusse la regola mnemonica che non erano bisestili gli anni secolari non divisibili per 400, per esempio 1700, 1800, 1900; in questo caso la separazione media tra gli 'ex'-bisestili è 133 anni. Resta comunque ancora una piccola discrepanza, perché l'anno medio gregoriano risulta così di 365,2425 giorni; gli effetti però si vedono su tempi scala molto lunghi, con l'accumulo di un giorno ogni 3000 anni circa. Eventualmente, sarà argomento di discussione nei prossimi millenni considerare comune qualche altro anno bisestile.

17 Erazmus Ciolek Witelo (circa 1230 – 1280) fu un matematico, fisico, filosofo e teologo, nato in Slesia e vissuto in Turingia. Il suo lavoro *Perspectiva* si basava su quello di Alhazen.

Ci sembra opportuno concludere questa parte riallacciandoci a Keplero. L'astronomo nel 1604 aveva scritto infatti un supplemento ai libri di Witelo, *Ad Vitellionem paralipomena, quibus Astronomiae pars optica traditur* (una copia del libro è conservata all'Osservatorio Astronomico di Brera), dove aveva discusso, oltre alla percezione visiva e alla teoria della luce, anche argomenti prettamente astronomici. Keplero riprenderà tali argomenti nell'*Astronomia Nova*, il testo del 1609 che, insieme alle osservazioni al telescopio di Galileo, contribuirà in modo determinante alla rivoluzione scientifica del XVII secolo.

4. Osservazioni generali

È sorprendente l'atteggiamento degli studiosi del Cinquecento, privi di strumenti se non del proprio occhio e di qualche astrolabio, intenti a rappresentare l'universo e a proporre diversi modelli del sistema planetario geocentrico. Erano anche Astrologi, il che proietta un'ombra sulla loro figura di cultori della scienza nell'attuale accezione. Ma erano dotati di splendida immaginazione.

Soprattutto volevano svelare il sistema dell'universo. Le loro congetture non furono completamente dimenticate e in parte suggerirono la realizzazione di capacità operative d'almeno quattro secoli dopo. Oggi sappiamo navigare nel nostro sistema planetario e osservare lontane galassie perché grandi sognatori di un tempo remoto hanno guardato e amato le stelle.

Il che conforta coloro che ancora oggi credono nella necessità di coltivare le scienze prive di riscontri immediati in termini di risultati concreti e di profitti economici. E credo sia questo il fascino che le Cinquecentine trasmettono a noi più eruditi ma non più sapienti di loro. Anche i perdenti strenui difensori di quanto sarebbe stato negato nel volgere di pochi decenni, meritano il nostro profondo rispetto. Ricordano che la ricerca ha in sé un grande valore che non implica necessariamente il trovare.

BIBLIOGRAFIA

Copernicus N., ex Officina Henricpetrina 1566, *De revolutionibus orbium cœlestium libri VI… per M. Georgium Ioachimum Rheticum ad Ioan. Schonerum scripta.* Osservatorio Astronomico di Brera in Milano, n. 160.36 in folio.

Delambre M., 1819, *Histoire del l'astronomie du Moyen Age*, Paris: Courcier.

Dizionario Biografico degli Italiani, http://www.treccani.it/enciclopedia/, alle voci: Luca Gaurico, Girolamo Fracastoro, Giovanni Paolo Gallucci, Guidobaldo del Monte, Ignazio Danti.

Dreyer J.L.E., 1970, *Storia dell'astronomia da Talete a Keplero,* Milano: G. Feltrinelli Editore.

EDIT 16, Catalogo centrale di Edizioni del XVI secolo.

Keplero J., 1604, *Ad Vitellionem paralipomena, quibus Astronomiae pars optica traditur,* Francofurti, apud Claudium Marnium & haeredes Ioannis Aubrii. Osservatorio Astronomico di Brera n. 170.106 -in quarto ICCU, Istituto Centrale del Catalogo Unico.

Leopardi G., 1835, *Operette Morali*, *Il Copernico.*

Longo A., 1766, *Dissertazione sugli orologi*, in Il Caffè o sia brevi e varj discorsi già distribuiti in fogli periodici, Tomo Primo, Venezia: Pizzolato.

Museo Galileo, http://catalogo.museogalileo.it (gennaio 2015).

Schiaparelli G.V., 1875, *Le sfere omocentriche di Eudosso, di Callippo e di Aristotele. Memoria di G.V. Schiaparelli letta al Reale Istituto Lombardo di Scienze e Lettere nell'adunanza del 26 novembre 1874,* Milano: Ulrico Hoepli, Pubblicazioni del Reale Osservatorio di Brera in Milano, n. 9.

Platone, *Tutte le opere*, a cura di E.V. Maltese, Roma, Newton Compton, 1995.

Plinio, *Storia Naturale*, I, Cosmologia e geografia, Libri 1-6, trad. di A. Barchiesi, Giulio Einaudi Editore.



Fig. 1 – Frontespizio.



Fig. 2 – Cosmo

PETRI APIANI (1495-1552) COSMOGRAPHIA-Antuerpiae (1539?) 1524
Astronomo, matematico, cartografo sassone h.23 cm.


ORONTII FINEI
DELPHINATIS, REGII
MATHEMATICARVM PROFES-
soris, de solaribus Horologiis,
& Quadrantibus, Libri
quatuor.
Sequens pagina summa librorum
capita tibi expediet.
PARISIIS,
Apud Guilielmum Cauellat, in pingui Gallina,
ex aduerso collegij Cameracensis.
1560.

Fig. 3 – ORONZIO FINEO (Briançon 1494-Parigi 1555) De solaribus Horologiis & Quadrantibus, Libri quatuor PARISIIS h.27 cm.

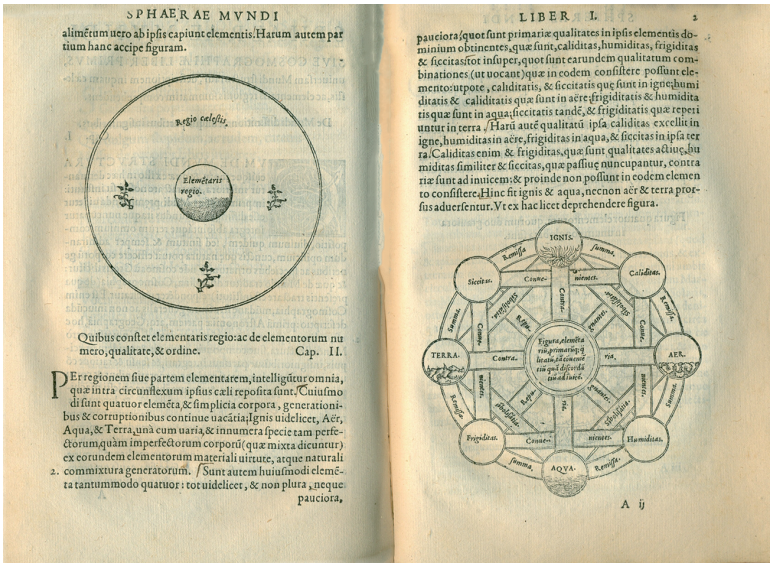

SPHAERAE MVNDI
alimẽtum uero ab ipsis capiunt elementis. Harum autem par
tium hanc accipe figuram.
Regio celestis.
Elemẽtaris regio.
Quibus constet elementaris regio: ac de elementorum nu
mero, qualitate, & ordine. Cap. II.
PEr regionem siue partem elementarem, intelligitur omnia,
quæ intra circunflexum ipsius cæli reposita sunt. Cuiusmo
di sunt quatuor elemẽta, & simplicia corpora, generationi
bus & corruptionibus continue uacãtia; Ignis uidelicet, Aër,
Aqua, & Terra, unà cum uaria, & innumera specie tam perfe-
ctorum, quàm imperfectorum corporũ (quæ mixta dicuntur)
ex eorundem elementorum materiali uirtute, atque naturali
2. commixtura generatorum. Sunt autem huiusmodi elemẽ-
ta tantummodo quatuor: tot uidelicet, & non plura, neque
pauciora,
LIBER I. 2
pauciora, quot sunt primariæ qualitates in ipsis elementis do-
minium obtinentes, quæ sunt, calliditas, humiditas, frigiditas
& siccitas. Sit insuper, quot sunt earundem qualitatum com-
binationes (ut uocant) quæ in eodem consistere possunt ele-
mento: utpote, caliditatis, & siccitatis quæ sunt in igne; humi
ditatis & caliditatis quæ sunt in aëre; frigiditatis & humidita
tis quæ sunt in aqua; siccitatis tandẽ, & frigiditatis quæ reperi
untur in terra. Harũ autẽ qualitatũ ipsa caliditas excellit in
igne, humiditas in aëre, frigiditas in aqua, & siccitas in ipsa ter
ra. Caliditas enim & frigiditas, quæ sunt qualitates actiuæ, hu
miditas similiter & siccitas, quæ passiuæ nuncupantur, contra
riæ sunt ad inuicem: & proinde non possunt in eodem elemen
to consistere. Hinc fit ignis & aqua, necnon aër & terra pror-
sus aduersentur. Vt ex hac licet deprehendere figura.
IGNIS.
AER.
TERRA.
AQVA.
Figura elementa
ris primarij q
litatis, & eorum
tis quæ discordia
tes dicuntur.
A ij

Fig. 4 – O. FINEO IDEM Sphaerae mundi Liber I ELEMENTI.


SPHAERAE MVNDI

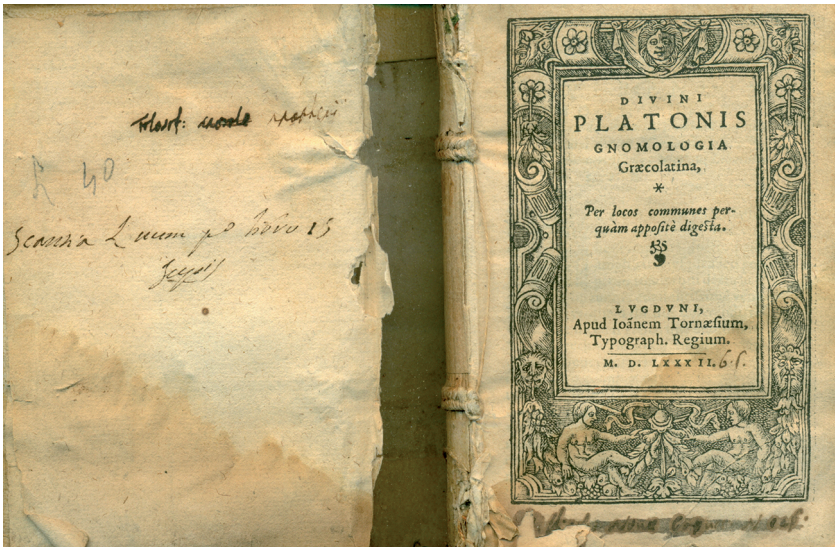
Firmamentum.
Saturnus.
Iupiter.
Mars.
Sol.
Venus.
Mercurius.
Luna.
Ignis.
Aer.
Aqua et terra.

3. Solent autem ipſi planetæ, proprias habere figuras ſiue characteres, quibus ſæpius exprimuntur; peculiares inſuper ſibi uendicare naturas, ſiue qualitates ſatque ſeptem metallis, aut illorum coloribus, ut ſequens indicat tabella comparati.

♄.	Saturnus.	Frigidus & ſiccus, malenolus.	plumbeus.
♃.	Iuppiter.	Calidus & humidus, benenolus.	ſtanneus.
♂.	Mars.	Calidus & ſiccus, malewolus.	calybeus.
☉.	Sol.	Calidus & ſiccus, benewolus.	aureus.
♀.	Venus.	Frigida & humida, benewola.	cuprea.
☿.	Mercurius.	Eius cum quo gradatur natura.	argentiuiui.
☾.	Luna.	Frigida & humida, benenola.	argentea.

Quænam

Fig. 5 – ORONZIO FINEO IDEM SPHAERAE MUNDI LIBER I CAP. III.


DIVINI
PLATONIS
GNOMOLOGIA
Græcolatina,

Per locos communes perquàm appositè digesta.

LVGDVNI,
Apud Ioãnem Tornæsium,
Typograph. Regium.
M. D. LXXXII.

Fig. 6 – PLATONE (Atene 428 a.C.-348 a.C.) GNOMOLOGIA PLATONIS Apud Ioinem Tornæsium -Lugduni 1582 h. 11.5 cm.


ISTITUTO LOMBARDO ACCADEMIA
DI SCIENZE E LETTERE
LUINI
6

MACROBII
AMBROSII AVRELII
Theodosii, uiri consularis, & illustris,

In Somnium Scipionis, Lib. II.
Saturnaliorum. Lib. VII.

Ex uarijs, ac uetustissimis codicibus recogniti, & aucti.

VIRTVTE DVCE, COMITE FORTVNA.

VENETIIS, apud Io. Gryphium.
M D LXXIIII.

Fig. 7 – MACROBII AMBROSII (390-430 circa) In Somnium Scipionis lib. II Saturnaliorum lib. VII Venetiis, ap.Gryphium 1574 h. 15,5 cm.


100 IN SOMNIVM SCIPIONIS

sis assignet. Esto cum zodiacus circulus, cui ascriptum est A, inter hunc septem alij orbes locentur. Et zodiacus ab A, per ordinem affixis notis, quibus ascribentur literæ sequentes, in partes duodecim diuidatur: istiusmodi spatium quod inter A, & B, clauditur, Arieti deputatum: quod intra B, & C, Tauro: quod inter C, & D, Geminis: Cancro quod sequitur, & reliquis per ordinem cætera. His constitutis, iam de singulis zodiaci notis & literis, singulæ deorsum lineæ per omnes circulos ad ultimum usque di-

cantur

LIBER I. 101

cantur: proculdubio per orbes singulos duodenas partes diuidet transitus linearum. In quocunque igitur circulo seu sol in illo, seu luna uel de uagis quæcunque discurrat, cum ad spatium uenerit, quod inter lineas clauditur, ab A, & B, notis & literis defluentes, in Ariete esse dicetur, quia illic constituta spatium Arietes in zodiaco designatum superticem, sicut descripsimus, habebit. Similiter in quacunq; migrauerit partem, in signo, sub quo fuerit, esse dicetur.

Atq; hæc ipsa descriptio eodem cõpendio nos docebit, cur eũdem zodiacũ, eademq; signa, aliæ tempore lõgiore, aliæ breuiore percurrant. Quoties.n. plures orbes intra se locantur, sicut maximus est ille, qui primus est, & minimus qui locum ultimum tenet: ita de medijs, qui summo propior est, inferioribus maior: qui uicinior est ultimo, breuior superioribus habetur. Et inter hos igitur septẽ sphæras gradũ celeritas suæ singulis ordo positionis ascripsit. Ideo stellæ quæ per spatia grandiora discurrunt, ambitũ suum tempore prolixiore conficiunt: quæ per angusta, breuiore. constat enim nulla inter eas celerius ceteris tardiusue procedere. Sed cum sit omnibus idem motus meandi: tantã eius diuersitatem temporis, sola spatiorũ diuersitas facit. nam, ut de medijs nunc prætermittamus, ne eadem sæpe repetãtur, quòd eadem signa Saturnus annis triginta, luna diebus uiginti octo ambit, & permeat, sola causa in quãtitate est circulorũ: quorũ alter maximus, alter minimus. Ergo cæterarum singulæ, pro spatij sui modo, tẽpus meandi aut extẽdunt, aut contrahunt. Hoc loco diligens rerum discussor inueniet, quod requirat. inspectis enim zodiaci notis, quas mõstrat in præsidium fidei adhocata descriptio. Quis uerò, inquit, circi cœlestis duodecim partes aut inuenit,

Cur aliæ stellæ breuiori tẽpore zodiaci signa percurrant, aliæ longiori.

Quomodo zodiacus induodecim partes diuisus.

Fig. 8 – IDEM Liber I ZODIACO pagg.100-101.

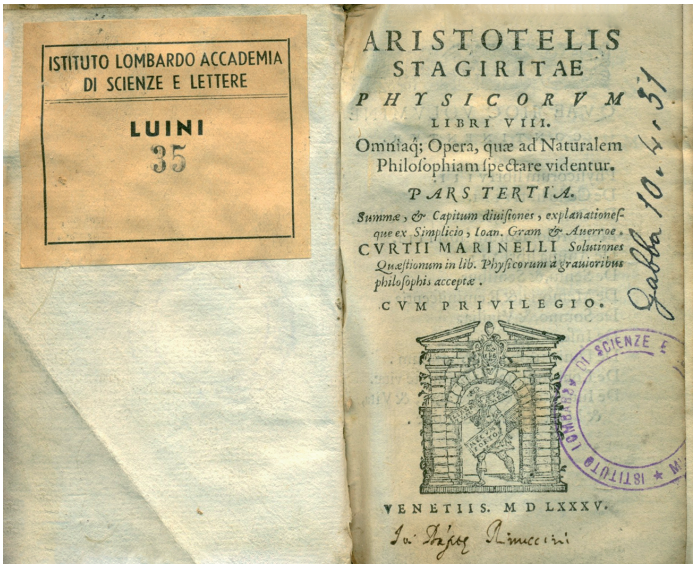

ISTITUTO LOMBARDO ACCADEMIA
DI SCIENZE E LETTERE
LUINI
35
ARISTOTELIS
STAGIRITAE
PHYSICORVM
LIBRI VIII.
Omniaq; Opera, quæ ad Naturalem
Philosophiam spectare videntur.
PARS TERTIA.
Summæ, & Capitum diuisiones, explanationesque ex Simplicio, Ioan. Gram & Auerroe.
CVRTII MARINELLI Solutiones
Quæstionum in lib. Physicorum à grauioribus
philosophis acceptæ.
CVM PRIVILEGIO.
VENETIIS. M D LXXXV.

Fig. 9 – CURTII MARINELLI (Nardi 1476-1563)
ARISTOTELIS STAGIRITÆ PHYSICORUM LIBER VIII PARS TERTIA
VENETIIS 1585 h. 11.5.

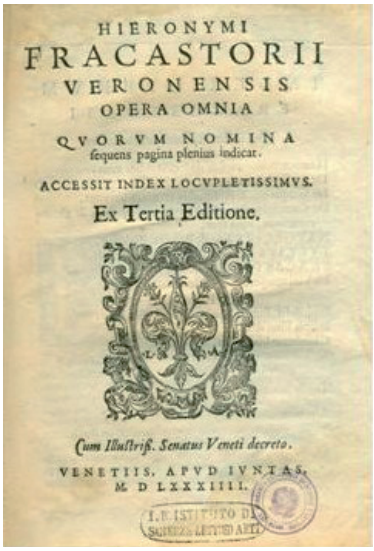

HIERONYMI
FRACASTORII
VERONENSIS
OPERA OMNIA
QVORVM NOMINA
sequens pagina plenius indicat.
ACCESSIT INDEX LOCVPLETISSIMVS.
Ex Tertia Editione.
Cum Illustriss. Senatus Veneti decreto.
VENETIIS, APVD IVNTAS.
M D LXXXIIII.

Fig. 10 – HIERONYMI FRACASTORII (Verona 1476-Affi 1553)
OPERA OMNIA VENETIIS AP. IUNTAS 1584.



Fig. 11 – Frontespizio.

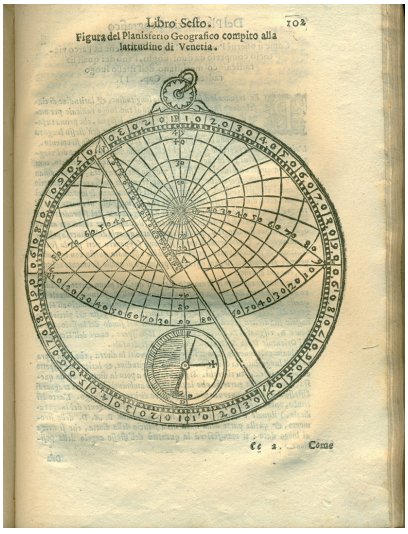


Fig. 12 – Planisfero.

GIO.PAOLO GALLUCCI (Salò 1538-Venezia 1621) DELLA FABRICA ET USO DI DIVERSI Stromenti di Astronomia et Cosmografia, In Venetia Appresso Ruberto Meietti 1597 h. 21,5.

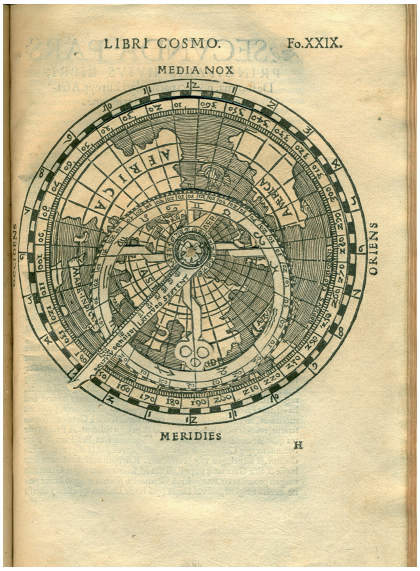


Fig. 13 – Uso planisfero.

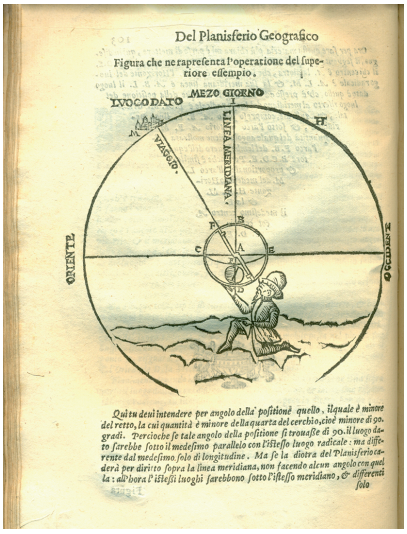


Fig. 14 – PLANISFERO GEOGRAFICO CON MAPPA DEI CONTINENTI.

.

GIO.PAOLO GALLUCCI (Salò 1538-Venezia 1621) DELLA FABRICA ET USO DI DIVERSI Stromenti di Astronomia et Cosmografia LUINI159
In Venetia Appresso Ruberto Meietti 1597 h. 21,5.

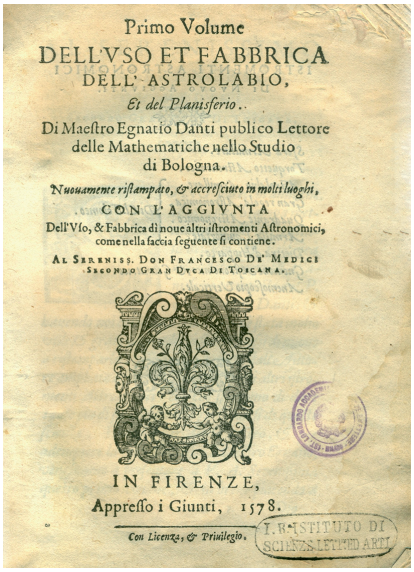

Primo Volume
DELL'VSO ET FABBRICA
DELL' ASTROLABIO,
Et del Planisferio.
Di Maestro Egnatio Danti publico Lettore
delle Mathematiche nello Studio
di Bologna.
Nouamente ristampato, & accresciuto in molti luoghi,
CON L'AGGIVNTA
Dell'Vso, & Fabbrica di noue altri istromenti Astronomici,
come nella faccia seguente si contiene.
AL SERENISS. DON FRANCESCO DE' MEDICI
SECONDO GRAN DVCA DI TOSCANA.
IN FIRENZE,
Appresso i Giunti, 1578.
Con Licenza, & Priuilegio.
R. ISTITVTO DI SCIENZE LETTERE ED ARTI

Fig. 15 – Frontespizio.

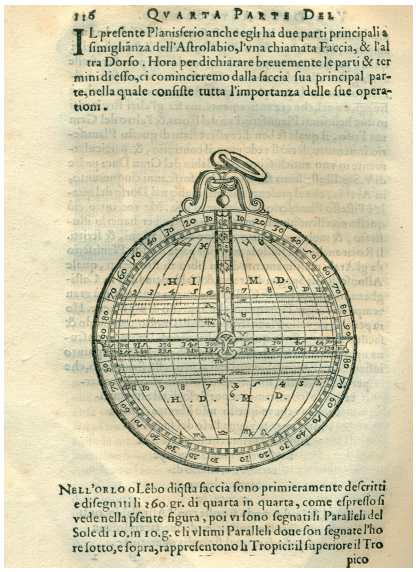

116 QVARTA PARTE DEL
IL presente Planisferio anche egli ha due parti principali a
similitudine dell'Astrolabio, l'vna chiamata Faccia, & l'al
tra Dorso. Hora per dichiarare breuemente le parti & ter
mini di esso, ci cominciaremo dalla faccia sua principal par-
te, nella quale consiste tutta l'importanza delle sue opera-
tioni.
NELL'ORLO o Lembo di questa faccia sono primieramente descritti
e disegnati li 360. gr. di quarta in quarta, come espresso si
vede nella presente figura, poi vi sono segnati li Paralleli del
Sole di 10. in 10. g. e li vltimi Paralleli doue son segnate l'ho
re sotto, e sopra, rappresentono li Tropici: il superiore il Tro
pico

Fig. 16 – Planisfero.


VSO DELL'ASTROLABIO. 151
poi mettasi il regolo doue la linea gia tirata interseca il Tropi-
co del Capricorno fino al punto nella parte di Ponente segna
to G. & tirasi fra li due punti vna linea occulta, e ponendo il
compasso nel centro E. descriue il circolo Equinozziale, che
passi à punto doue la linea gia detta interseca la linea Meridia-
na nel punto K. Di nuouo tirasi vn'altra linea occulta dal pũ
to, doue la prima linea, che viene al centro interseca l'Equi-
nozziale, fino al punto L. & dal centro fino doue questa viti
ma linea interseca la linea Meridiana. Descriue il terzo cer-
chio, che sarà il Tropico del Cancro.
EQVINOZZIALE, ET TROPICI.

Fig. 17 – Uso astrolabio.

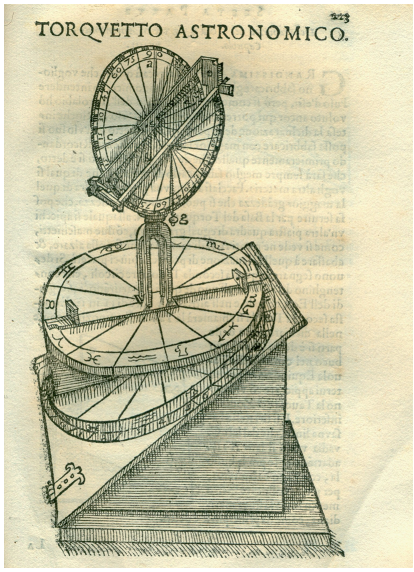

TORQVETTO ASTRONOMICO. 223

Fig. 18 – Torquetto.

EGNATIO DANTI Dell'uso e fabbrica dell'ASTROLABIO in FIRENZE
Appresso i Giunti, 1578 h. 21,5 cm.

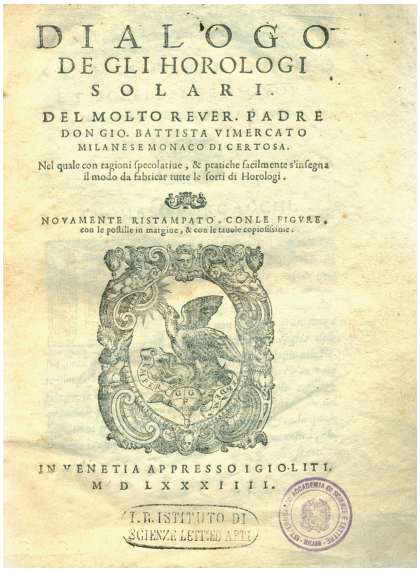

DIALOGO
DE GLI HOROLOGI
SOLARI.
DEL MOLTO REVER. PADRE
DON GIO. BATTISTA VIMERCATO
MILANESE MONACO DI CERTOSA.
Nel quale con ragioni speculatiue, & pratiche facilmente s'insegna il modo da fabricar tutte le sorti di Horologi.
NOVAMENTE RISTAMPATO, CONLE FIGVRE, con le postille in margine, & con le tauole copiosissime.
IN VENETIA APPRESSO I GIOLITI.
M D LXXXIIII.
R. ISTITUTO DI SCIENZE LETTERE ARTI

Fig. 19 – Frontespizio.

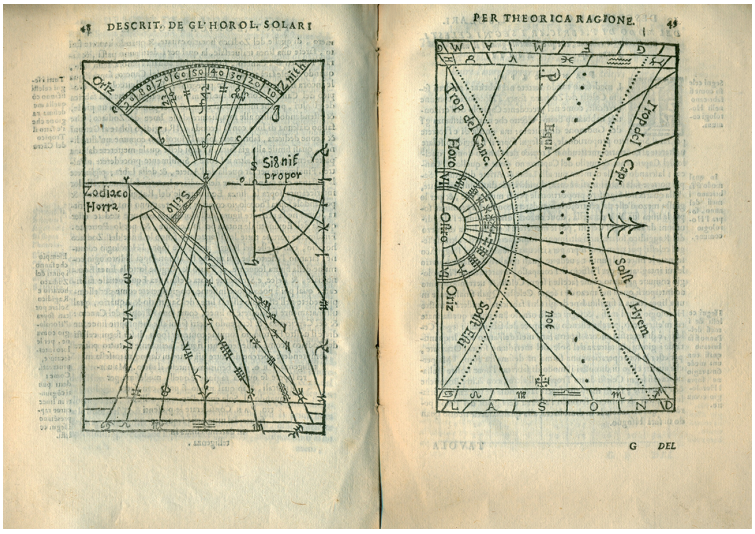

DESCRIT. DE GL'HOROL. SOLARI
PER THEORICA RAGIONE.
Zodiaco Horiz.
Sig. nif proper
Prop. del
Hor. Ori.
Solst. Hyem.
G DEL

Fig. 20 – Meridiana.

GIO.BATTISTA VIMERCATO DIALOGO DEGLIOROLOGI SOLARI
h. 21,5 cm. In VENETIA APPRESSO IGIOLITI 1584.

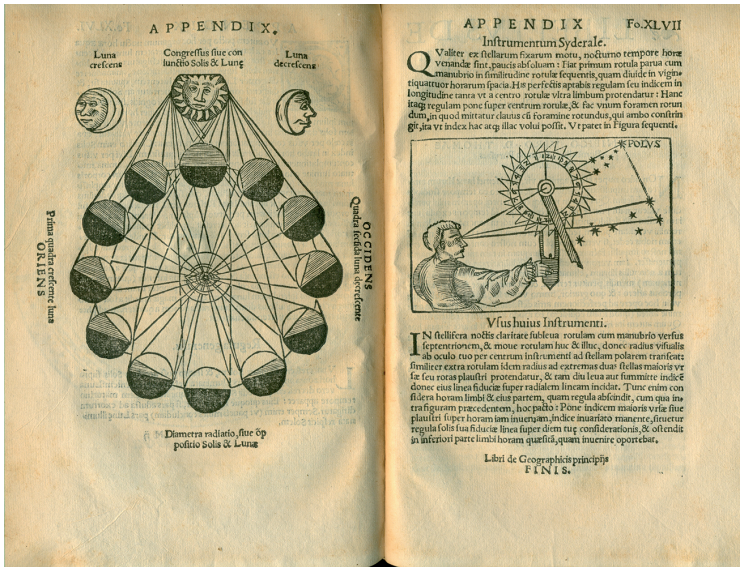


Fig. 21 – Pietro Apiano Instrumentum Syderale Væneunt Antuerpiæ in pingui gallina Arnoldo Berckmãno 1539. h. 23,7 cm.

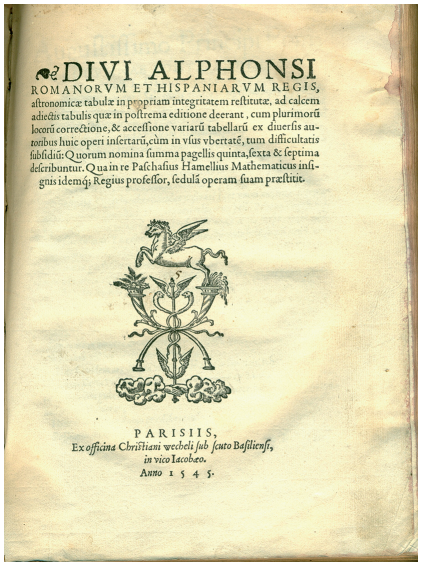


Fig. 22 – Alfonsine Pariis (1252) 1545.

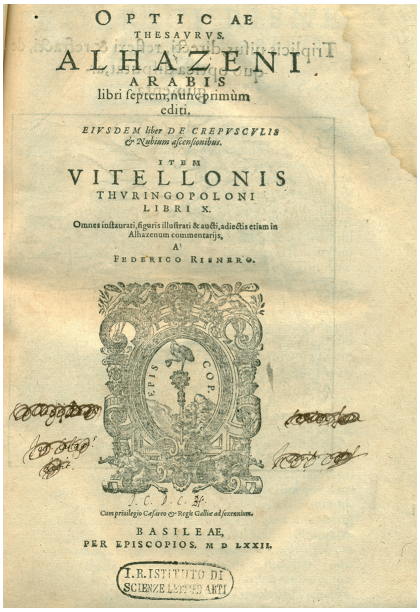

OPTICAE
THESAVRVS
ALHAZENI
ARABIS
libri septem, nunc primùm
editi.
EIVSDEM liber DE CREPVSCVLIS
& Nubium ascensionibus.
ITEM
VITELLONIS
THVRINGOPOLONI
LIBRI X.
Omnes instaurati, figuris illustrati & aucti, adiectis etiam in
Alhazenum commentarijs,
A'
FEDERICO RISNERO.
Cum priuilegio Cæsareo & Regis Gallie ad sexennium.
BASILEAE,
PER EPISCOPIOS. M D LXXII.
I.R. ISTITUTO DI SCIENZE LETTERE ED ARTI

Fig. 23 – Frontespizio.

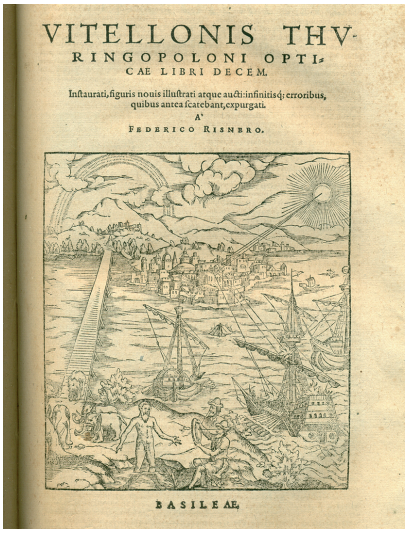

VITELLONIS THV-
RINGOPOLONI OPTI-
CAE LIBRI DECEM.
Instaurati, figuris nouis illustrati atque aucti: infinitisq; erroribus,
quibus antea scatebant, expurgati.
A'
FEDERICO RISNERO.
BASILEAE.

Fig. 24 – Figura interna.

ALHAZENI & VITELLONIS – OPTICAE THESAURUS
BASILEÆ PER EPISCOPIOS, 1572 h. 33 cm.

PERMO-TRIASSIC EVOLUTION OF THE ADRIA MARGIN IN NORTHERN ALBANIA

Nota del m.e. MAURIZIO GAETANI (*)

(Adunanza del 26 marzo 2015)

SUNTO. – Nell'Albania settentrionale e nell'adiacente Montenegro affiorano rocce che possono essere intrepretate come parti del margine orientale del promontorio di Adria verso l'Oceano della Neo-Tetide. Secondo le più recenti interpretazioni palinspastiche, la Piattaforma Dinarica è contornata durante il Triassico da aree a tendenza bacinale, quali Budva e Cukali. La zona di Cukali sarebbe adiacente alla zona di Korabi, che costituirebbe l'estremo lembo di litosfera continentale verso l'oceano. Le ofioliti della Zona della Mirdita, alloctone, traggono la loro origine dalla fascia di litosfera oceanica del Vardar. L'oceano della Neo-Tetide iniziò ad aprirsi lungo il margine di Adria nelle Albanidi nell'Anisico superiore (Triassico medio).

***

ABSTRACT. – In the northern Albania and surrounding Montenegro are cropping out rocks that may be referred to the eastern margin of Adria promontory, facing the Neo-Tethys Ocean. According to present palinspasthic interpretation, the Dinaric Platform is surrounded by areas (Budva and Cukali zones) with basinal trend during the Triassic. The Cukali zone in this interpretation is situated nearby the Korabi zone, who represents the easternmost sector of continental lithosphere towards the ocean. The ophiolites of the Mirdita zone are allochtonous and originate from the oceanic lithosphere of Vardar. The early opening of the Neo-Tethys Ocean along this sector of the Adria margin is dated to the late Anisian (Middle Triassic).

(*) Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere, Milano, Italy.
E-mail: info@istitutolombardo.it

1. Introduction

Albania and surroundings areas contains good exposures to analyse the Permian and Triassic evolution of the Adria continental margin. A cross-section may be restored west to east. Moving from the zones of Adriatic Carbonate Platform and Budva, cropping out in the nearby Montenegro, the section go through the Dinaric Carbonate Platform exposed in the Albanian Alps, the Cukali and Korabi zones, and the distal part of the continental margin preserved in the sole of the Mirdita nappe, with its original source in the Vardar zone and its ophiolites.

2. The isopic zones (*Fig. 1*)

2.1 Adriatic Carbonate Platform/Kruja zone

Oldest rocks cropping out near the island of Vis are referred to the Middle Triassic Porphyrite-Chert Formation (Radoicic & D'Argenio 1999; Tari 2002). They are overlain by anhydrites possibly of Carnian age, in turn followed by peritidal dolostone of the Lisani Supersequence (Čadjenović *et al.* 2008) of Norian age.

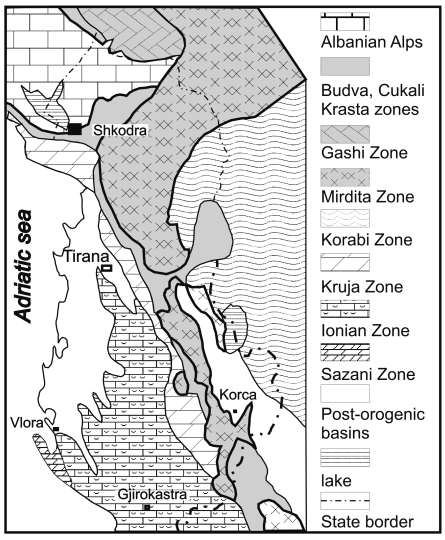


Fig. 1 – Index map.

2.2 Budva zone

Recognized first by Bukowski (1927) as Budva-Cukali, it was always considered as a basin-prone area, with older outcrops of Early Triassic age (Dimitrijević 1997). However, recently Krystyn *et al.* (2014) reported the presence of Upper Permian deep-water sediments with conodonts, pushing back to the latest Palaeozoic the evidence for the existence of a basinal succession.

Bottom to top the succession is as follows:

– Uppermost Permian. Mixture of bioclastic layers and fine grained siliceous sponge bearing wackestone of deeper water character (Krystyn *et al.* 2014).
– Lower Triassic. Sandstone, marl, dolostone and oolitic limestone; thickness of about 200 m (Dimitrijević 1997). The age of overlaying "Anisian Flysch" of Dimitrijević M. (1967) should be reconsidered, being possibly Early Triassic in age (Gaetani *et al.* 2015).
– Middle Triassic. With the incepting of Anisian, terrigenous inputs decreased and volcanics outpoured (basalts overlain by andesites and dacites). Bulog Limestone locally occurs as well as radiolarites and cherty limestone, with a total thickness around 200 m.
– Upper Triassic. Cherty limestone with Halobiids and conodonts (Cafiero & De Capoa Bonardi 1980 a,b).

2.3 Albanian Alps

They represents the southern tip of the Karst Zone (Auboin *et al.* 1970), presently known as Dinaric Carbonate Platform or included in the wider Adriatic/Dinaric Carbonate Platform (Karst Zone/ Dinaric Carbonate Platform (Auboin *et al.* 1970; Dimitrijevic MD 1997; Radoicic and d'Argenio 1999; Gawlick *et al.* 2012). They stratigraphy has been recently revised (Gaetani *et al.* 2015).

Bottom to top, the succession is as follows.

– Middle Permian. Shallow water massive calcarenite, with fusulinids, microproblematica, and occasionally conodonts. Severely disrupted by tectonics, thickness at least 100-150 m.
– Upper Permian. Presently not recognized.
– Lower Triassic. Very thick succession of shale and siltstone, with four major conglomerate intercalations. Locally, oolitic limestone lenses. Thickness not less than 500 m.

– Middle Triassic. During the Anisian the area was gradually transgressed by a carbonate ramp, with initially still some shaly intercalations. The ramp drowned to deeper condition around the boundary Pelsonian/Illyrian (i.e. middle to late Anisian). Some volcanic effusion occurred nearby, but no lavas have been detected, only tuffitic layers are intercalated in the cherty limestones. Towards the end of the Ladinian, sediments gradually filled the basinal area and the carbonate platform spread over all the area, continuing for the remaining part of Triassic,
– Only during the earliest Carnian, locally an intraplatform depression was filled by black limestone and dolostone, with slumpings and breccias, testifying to still active extensional movements.

2.4 Cukali Zone

The outcropping succession starts with debris flows (few tens of m thick) with semiconsolidated blocks containing middle Anisian (Pelsonian) foraminifers (Theodhori 1988; Meço and Aliaj 2000). It is overlain by a succession suggesting the drowning to deep waters during the late Anisian and continues in open sea conditions through the whole Triassic (Gjata *et al.* 1987; Theodhori 1988; Marcucci *et al.* 1994; Chiari *et al.* 1996; Meço and Aliaj 2000). Volcanics outpouring is also Middle Triassic. Meço (2005, text-fig. 10) quotes a section in which Norian platy limestone are tectonically overlying thick limestone with fusulinids of Permian age. Is this an evidence that Cukali zone was in shallow water conditions during the Permian or is just a block fallen in the basin from the margin of the carbonate platform?

The overall picture for the Cukali Zone is therefore of an area that was already in basinal conditions at least since the Anisian and continued in basinal condition through all the Triassic.

2.5 Korabi Zone

A very complex zone because of the heavy tectonics dismembering the zone, due to the overthrusting movements of the Mirdita above the Korabi (Collaku *et al.* 1992). Several subzones have been detected, in which Palaeozoic sediments are prevailing. According to Meço and Aliaj (2000) in the Caja subzone, the Devonian succession

is unconformably covered by about 100 m of conglomerate and sandstone (?Permian/Triassic), in turn overlain by up to 400 m thick sandstone to pelitic successions with limestone intercalations, bearing Olenekian/early Anisian conodonts. No younger Triassic rocks are known from that area (Meço and Aliaj 2000). In the Korabi Highland subzone, instead, a mostly terrigenous Lower Triassic is overlain by a mixed volcanic/carbonatic succession, with platy and cherty limestone of open sea environment. Ladinian and Carnian conodonts have been etched out (Meço 2010).

2.6 Mirdita Zone

In the marginal area of the Mirdita Zone it crops out the Rubik Complex, also named sub ophiolite mélange (Bortolotti *et al.* 2005). Within the blocks forming the sole of the nappe, slabs of Olenekian-Middle Triassic succession are recognized in many places (Kçira, Qerreti, Rubiku, Miraka among others) (Shallo 1992; Kellici and de Wever 1994; Muttoni *et al.* 1996; Chiari *et al.* 1994, 1996; Germani 1997; Gawlick *et al.* 2008). The pelagic deposition started in the Spathian (late Olenekian) (Muttoni *et al.* 1996; Germani 1997), and volcanics outpoured since the middle Anisian, with picritic basalts as pillow-lava. Evidence of new oceanic crust starts from the late Anisian (Chiari *et al.* 1996; Gawlick *et al.* 2008).

Ophiolite units thrust on the Rubik complex. In the ophiolites are recognized Western and Eastern units, according to their geological and petrochemical features (Shallo 1992; Beccaluva *et al.* 1994; Bortolotti *et al.* 1996, 2006). The Western unit is characterized by thrust slices including, bottom to top, the metamorphic sole, lherzolitic mantle tectonites, mafic–ultramafic cumulates, a discontinuous sheeted dyke complex, and a volcanic sequence (Beccaluva *et al.* 1994; Saccani *et al.* 2004). The volcanic sequence is the most spread (Nicolas *et al.* 1999).

The Eastern unit shows a sequence up to 10 km thick, including, at the base, harzburgitic mantle tectonites with well-developed metamorphic sole at their base, a thick intrusive sequence, a sheeted dyke complex and a volcanic sequence (Shallo 1992; Beccaluva *et al.* 1994; Bortolotti *et al.* 2006; Saccani *et al.* 2004).

3. Conclusions

The geological evolution summarized in the previous chapter may be interpreted as the evolution of a continental margin that underwent extensional movements (*Figs. 2 and 3*). These rifiting movements were active during latest Middle Permian, Early Triassic (mostly Olenekian), and around the boundary Pelsonian/Illyrian (i.e. middle/late Anisian). The acme of the extensional movements was reached during the Olenekian. However, it cannot be excluded that a transcurrent component was active during the Olenekian. Could we start to consider the Scutari-Pec transversal zone (Dercourt 1967) in some way already active during the Early Triassic? In a single ocean model, the extension is strictly related to the incepting of oceanization that started in the Middle Triassic (Bortolotti *et al.* 2005; Gawlick *et al.* 2008; Xhomo *et al.* 2008, amongst others).

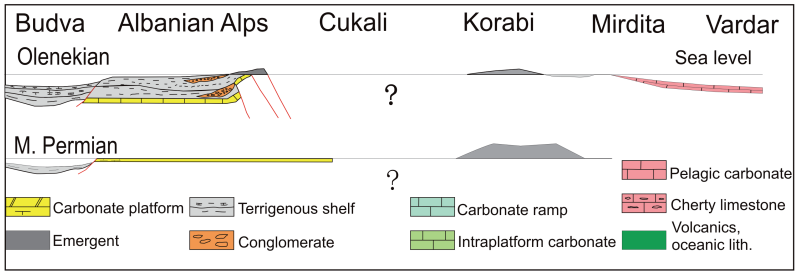


Fig. 2 – Palinspastic interpretation of the Adria margin evolution from Middle Permian to Early Triassic

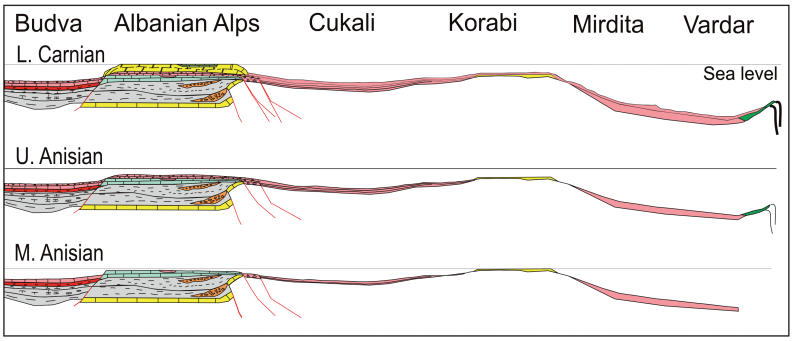


Fig. 3 – Palinspastic interpretation of the Adria margin evolution from Middle Triassic to earliest Carnian.

REFERENCES

Auboin, J., Blanchet, R., Cadet, J-P., Celet, P., Charvet, T., Chorowicz, T., Cousin, M. and Rampnoux, J-P. 1970. Essai sur la géologie des Dinarides. *Bulletin de la Societé Géologique de France* (7) **12,** 1060-1095.

Beccaluva L., Coltorti M., Premiti I., Saccani E., Siena F. & Zeda O. 1994. Mid-ocean ridge and supra-subduction affinities in ophiolitic belts from Albania. *Ofioliti* **19**, 77-96.

Bortolotti, V., Kodra A., Marroni M. *et al.* 1996. Geology and petrology of the ophiolitic sequences in the Mirdita region, northern Albania. *Ofioliti* **21**, 3-20.

Bortolotti, V., Marroni, M., Pandolfi, L. and Principi, G. 2005. Mesozoic to Tertiary tectonic history of the Mirdita ophiolites, northern Albania. *The Island Arc,* **14**, 471-493.

Bortolotti, V., Chiari, M., Kodra, A., Marcucci, M., Marroni, M., Mustafa, F., Prela, M. Pandolfi L., Principi, GF. Saccani E. 2006. Triassic MORB magmatism in Southern Mirdita (Albania). *Ofioliti*, **31**, 1-9.

Bukowski, G., 1927. Geologishe Detailkarte des Gebirge um Budua. *Jahrbuch der geologischen Bundesanstalt, Wien*, 57, 1-2: 195-204.

Cafiero B. & De Capoa Bonardi P. (1980a). I conodonti dei calcari ad Halobia del Trias superiore del Montenegro (Crna-Gora, Jugoslavia). *Rivista It. Paleont. Strat*., 86/3: 563-576.

Cafiero B. & De Capoa Bonardi P. (1980b). Stratigraphy of the pelagic Triassic in Budva-Kotor area (Crna Gora, Yougoslavia). *Boll. Soc. Paleont. Ital*., **19/2**: 179-204.

Čadjenović D., Kilibarda Z., Radulović N. (2008) - Late Triassic to Late Jurassic evolution of the Adriatic Carbonate Platform and Budva Basin, Southern Montenegro. *Sedimentary Geology*, 204 : 1-17.

Chiari, M., Marcucci, M. and Prela, M. 1994. The Mirdita Ophiolite project: 2. The Radiolarian assemblage in the cherts at Fushe Arrez and Shabaj (Mirdita area, Albania). *Ofioliti*, **19**, 313-318.

Chiari, M., Marcucci, M., Cortese, G., Ondrejiçkova, A. and Kodra, A. 1996. Triassic radiolarian assemblages in the Rubik area and Cukali Zone, Albania. *Ofioliti* **21**, 77-84.

Collaku, A., Cadet, JP., Bonneau, M. and Jolivet, L. 1992. L'difice structural de l'Albanie Septenrionale: Des éléments de réponse sur la modalité de mise en place des ophiolites. *Bulletin de la Societé Géologique de France*, **163**, 455-468.

Dercourt, J. 1967. Sur l'accident de Scutari-Pec, la signification paléogeographique de quelques series condensées en Albanie septentrionale. *Annales de la Societé Géologique du Nord*, **9**, 1-109.

Dimitrijević, MN. 1967. Sedimentološko-stratigrafski problemi srednjotriaskog fliša u terenima izmedu Skadarskog jezera i Jadranskog mora (Sedimentologic problems of Middle Triassic flysch in the terrains between Scutari Lake and the Adriatic Sea). *Geološki glasnik, Zavod za geološka istrazivanja Crne Gore*, **5,** 223-311.

Dimitrijević, MD. 1997. Geology of Yugoslavia. Geological Institute Gemini, Belgrade, 1-187.

Gaetani M., Meco S., Rettori R., Henderson C.M., Tulone A. (2015) - The Permian and Triassic in the Albanian Alps. *Acta Geologica Polonica*, 56/2 *Acta Geologica Polonica*, **65**, 271-295.

Gawlick, H-J., Frisch, W., Hoxha, L., Dumitrica, P., Krystyn, L., Lein, R., Missoni, S. and Schlagentweit, F. 2008. Mirdita Zone ophiolites and associated sediments in Albania reveal Neotethys ocean origin. *International Journal Earth Sciences*, **97**, 865-881.

Gawlick, H-J., Gorican, S., Missoni, S. and Lein, R. 2012. Late Anisian platform drowning and radiolarite deposition as a consequence of the opening of the Neotethys ocean (High Karst nappe, Montenegro). *Bulletin de la Societé Géologique de France,* **183**, 349-358.

Germani, D. 1997. New data on ammonoids and biostratigraphy of the classic Spathian Kçira sections (Albania). *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia,* **103**, 267-292.

Gjata, Th., Theodhori, P., Kici, V., Marku, D., Pirdeni, A., Kanani, J., Dodona, E. and Zeraj, I. 1987. Stratigrafia dhe kushtet e formimit të depozitimeve triasike në Albanidet Lindore. *Buletin i Shkencave Gjeologjike*, **2**, 79-90.

Kellici, I. and de Wever, P. 1994. Ouverture triasique du bassin de la Mirdita (Albanie) révélée par les radiolaires. *C.R. Academie Sciences Paris*, **318**, 1669-1676.

Krystyn, L., Đaković, M., Horacek, M., Lein, R., Cadenović, D., Radulović, N. 2014. Pelagically influenced Late Permian and Early Triassic deposits in Montenegro: remnant of Internal Dinarid Neotethys or Paleotethys relict*? Berichte Institut Erdwissenshaften K.-F.-Univ. Graz*, **20/1**, 114.

Marcucci, M., Kodra, A., Pirdeni, A. and Gjata, Th. 1994. Radiolarian assemblages in the Triassic and Jurassic cherts of Albania. *Ofioliti*, Special Issue on "Albanian ophiolites, state of the art and perspectives" (Beccaluva Ed), **19**, 105-114.

Meço, S. 1999. Conodont biostratigraphy of Triassic Pelagic strata, Albania. *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, **105**, 251-266.

Meço, S. 2005. Upper Triassic conodonts and lithofacies from Albania. *Geologica et Palaeontologica*, **39**: 35-53.

Meço, S. 2010. Litho-biostratigraphy and conodonts of Palaeozoic/Triassic deposits in Albania. *Palaeontographica, Abt. A*, **290**, 131-197.

Meço, S. and Aliaj, S. 2000. Geology of Albania. 246 pp, Gebrueder Borntraeger, Berlin.

Muttoni, G., Kent, DV., Meço, S., Nicora, A., Gaetani, M., Balini, M., Germani, D. and Rettori, R. 1996. Magneto-biostratigraphy of the Spathian to Anisian (Lower to Middle Triassic) Kçira section, Albania. *Geophysical Journal International*, **127**, 503-514.

Nicolas A., Boudier F. & Meshii A. 1999. Slow spreading accretion and mantle denudation in the Mirdita ophiolite (Albania). *Journal of Geophysical Research* **104**, 15 155-67.

Radoicic, R. and d'Argenio, B. 1999. An outline of the geology of the External Dinarides and their Mesozoic-Early Tertiary facies. *Rendiconti Accademia Scienze Fis. Mat. Napoli*, **64**, 181-243.

Saccani E., Beccaluva L., Coltorti M. & Siena F. 2004. Petrogenesis and tectono-magmatic significance of the Albanide-Hellenide Subpelagonian ophiolites. *Ofioliti* **29**, 75-93.

Shallo, M. 1992. Geological Evolution of the Albanian ophiolites and their platform

periphery. *Geologisches Rundschau,* **81**, 681-694.

Tari V. 2002. Evolution of the northern and western Dinarides: a tectonostratigraphic approach *EGU Stephan Mueller Special Publication Series*, **1**, 223-236, 2002. European Geosciences Union

Theodhori, P. 1988. Kushtet e sedimentimit dhe evolucioni paleogjeografik mesozoik ne Nenzonen e Cukalit. 183 pp. Sherbimi Gjelogjik Shqiptar,Tirana. [unpublished]

Xhomo, A., Kodra, A. Xhafa, Z., Shallo, M., (Eds) 2008. Gjelogjia e Shqiperise. Stratigrafia, Magmatizmi, Metamorfismi, Tektonika, Neotektonika,Evolucioni Paleogjeografik dhe Gjeodinamik. 464 pp., Sherbimi Gjelogjik Shqiptar, Tirana.

GLI STUDI DI ALDO PERRONCITO SULLA RIGENERAZIONE DEL NERVO PERIFERICO

VALENTINA CANI (*)

Nota presentata dal m.e. Paolo Mazzarello
(Adunanza del 7 maggio 2015)

SUNTO. – Le rigenerazioni animali costituirono un partecipato oggetto di indagine nel corso del XVIII secolo in tutta Europa. Lazzaro Spallanzani fu uno dei più attivi indagatori del tema e riuscì a dimostrare le capacità rigenerative di molti invertebrati e anche di alcuni vertebrati. All'inizio del XX secolo nel laboratorio di Patologia Generale dell'Università di Pavia diretto da Camillo Golgi, un giovane ricercatore, e poi neolaureato Aldo Perroncito, conseguì dei risultati straordinari riuscendo per la prima volta a comprendere e a descrivere il processo di rigenerazione dei nervi periferici dopo il taglio sperimentale. Le sue ricerche ebbero un grande impatto anche per le successive applicazioni chirurgiche, in effetti i suoi studi aprirono la strada ai primi tentativi di operazione su pazienti feriti al fronte durante la Prima Guerra Mondiale per il ripristino funzionale dei nervi lesi condotti dai medici pavesi Giovanni Verga e Guido Sala.

***

ABSTRACT. – Animal regeneration was a major subject of investigation in the 18th century Europe. Lazzaro Spallanzani was one of the most active experimenters, he was able to demonstrate the regenerative abilities of many invertebrates and even some vertebrates. At the beginning of the 20th century in the General Pathology laboratory of the University of Pavia directed by Camillo Golgi, a young researcher, Aldo Perroncito, succeeded for the first time in understanding and describing the process of regeneration of peripheral nerves after experimental cut. His research had a great impact also for the subsequent surgical applications. Perroncito's studies paved the way for the first attempts at operations on patients wounded during the World War I for the functional restoration of the injured nerves conducted by the University of Pavia graduated medical doctors Giovanni Verga and Guido Sala.

(*) Università degli Studi di Pavia, Italy. E-mail: valentina.cani@unipv.it

1. Lo studio delle rigenerazioni animali nel Settecento

Nel corso del Settecento il fenomeno delle rigenerazioni animali fu oggetto di ampi dibattiti in tutta Europa. Il naturalista francese René Antoine Ferchault de Réaumur notò la capacità dei gamberi di rigenerare le zampe perse e il ginevrino Abraham Trembley scoprì che l'*Hydra* era in grado di riprodurre non solo porzioni amputate ma anche individui completi "vedi [1], pagg. 52-53". Nella seconda metà del secolo anche Lazzaro Spallanzani - professore e direttore del Museo di Storia Naturale dell'Università di Pavia dal 1769 al 1799 - si dedicò con successo a questo genere di studi. Con una notevole abilità sperimentale riuscì a osservare le capacità rigenerative non solo degli invertebrati ma anche di alcuni vertebrati, ottenendo la riproduzione del capo e della coda nei lombrichi, del capo nelle chiocciole, degli arti e delle mascelle dei tritoni, delle zampe delle giovani rane e dei rospi. Le sue esperienze sulla riproduzione della teste delle lumache, in particolare, fecero grande scalpore sollevando anche interrogativi di ordine filosofico, come il destino dell'anima di questi animali durante gli esperimenti, nei momenti in cui il corpo rimaneva privo della testa "vedi [2], pagg. 54-57; [3]". Nel 1768 Spallanzani pubblicò il *Prodromo di un'opera da imprimersi sopra le riproduzioni animali* a cui però, nonostante le intenzioni e il grande interesse dei contemporanei, non fece seguito un trattato più organico.

Il successo di tali esperienze fu probabilmente terreno fertile anche per i suoi studenti che muovevano i primi passi nell'osservazione sperimentale. Tra costoro Giuseppe Baronio, laureatosi a Pavia nel 1780, si dedicò alla rigenerazione di parti asportate sperimentalmente spingendosi fino a tentativi di trapianti autoplastici e eteroplastici "vedi [4]". Nell'Ottocento fiorirono gli studi sugli innesti animali, cui si dedicò anche il medico e antropologo Paolo Mantegazza, docente di patologia generale a Pavia tra il 1860 e il 1869 che ebbe tra i suoi allievi anche due astri della biologia cellulare, Giulio Bizzozero e Camillo Golgi. "vedi [5, 6, 7]".

2. Alcuni contributi ottocenteschi allo studio della rigenerazione nell'uomo

I mammiferi hanno una capacità rigenerativa limitata a pochi tessuti. Nell'uomo oltre ai processi di rigenerazione fisiologica si possono verificare eventi rigenerativi in seguito a patologie e traumi a carico di determinati

organi. Negli anni Ottanta dell'Ottocento, l'Università di Pavia segnò un ulteriore passo in avanti in questo campo di studi grazie alle ricerche compiute da Camillo Golgi che dimostrò la potenzialità rigenerativa del rene osservando il processo di "cariocinesi", da poco teorizzato dal biologo tedesco Walther Flemming, in preparati istologici appartenenti a un paziente colpito da "nefrite parenchimatosa" che aveva attraversato una fase di miglioramento della malattia. Golgi interpretò la nuova formazione di cellule come il segnale di un processo rigenerativo degli elementi epiteliari del parenchima renale "vedi [5] e [8] pagg. 218-219".

Un rilevante contributo teorico giunse qualche anno più tardi dall'Università di Torino grazie agli studi di Giulio Bizzozero, laureatosi appena ventenne a Pavia dove aveva diretto il laboratorio di Patologia Sperimentale frequentato anche da Golgi, con cui strinse un sodalizio scientifico destinato a durare anche dopo la partenza del giovane ricercatore per l'ateneo piemontese. Nel 1894 Bizzozero presentò uno schema di suddivisione dei tessuti in base al loro potenziale generativo e rigenerativo che diventò un elemento fondamentale per la biologia cellulare. Nei tessuti "labili" erano inclusi quelli le cui cellule sono soggette a continue suddivisioni e moltiplicazioni come le cellule del sangue, gli epiteli di rivestimento e alcuni tipi di ghiandole; in quelli "stabili" vi erano quelli con cellule in grado di moltiplicarsi in condizioni fisiologiche solo fino alla nascita, o poco più tardi, come il pancreas, alcune ghiandole, il fegato, il rene la cui generazione era riattivata solo in seguito a processi patologici. Il terzo tipo di tessuti, definiti "perenni", comprendeva quelli con cellule che non erano in grado di riattivarsi nemmeno in seguito a eventi patologici: tra questi rientrava il tessuto nervoso "vedi [5], [9]". Fu a Pavia che un'altra giovane promessa degli studi biologici, Aldo Perroncito, dimostrò per la prima volta il meccanismo di rigenerazione dei tessuti del sistema nervoso periferico.

3. Aldo Perroncito

Aldo Perroncito nacque a Torino nel 1882 da una famiglia legata a doppio filo alla scienza. Il padre era Edoardo, parassitologo di fama e docente nella Scuola superiore di veterinaria del capoluogo piemontese, la madre, Erminia Aletti, era cognata di Camillo Golgi e nipote di Giulio Bizzozero. Sembrava quindi quasi scontato che, terminati gli studi, il giovane si iscrivesse alla facoltà di Medicina; nel 1899 si trasferì

a Pavia dove, fin dal primo anno di studi, frequentò il laboratorio di patologia generale e istologia diretto da Camillo Golgi e si dedicò ben presto allo studio delle terminazioni nervose (*Fig. 1*). Dopo la laurea, conseguita nel 1901 con una dissertazione dedicata alla rigenerazione dei nervi, divenne assistente nell'Istituto di Patologia Generale, e si dedicò, come molto giovani ricercatori in quegli anni, allo studio dell'apparato reticolare interno, la struttura intracellulare da poco scoperta da Golgi, indagandone i meccanismi citocinetici "vedi [10]".



Fig. 1 – Aldo Perroncito, Università di Pavia, Museo per la Storia dell'Università.

Nel 1910 partì per un periodo di perfezionamento all'estero in cui lavorò presso l'Istituto fisiologico di Berlino e in quello di Parassitologia della facoltà medica di Parigi frequentando anche l'Istituto Pasteur per compiere ricerche batteriologiche. Al suo rientro a Pavia fu per qualche anno incaricato dei corsi di Istologia, Patologia Generale, Biologia Generale e Parassitologia e, nel 1915, fu nominato professore straordinario di Patologia Generale a Cagliari, dove ottenne la cattedra nel 1918. In Sardegna si impegnò nella lotta alla malaria, endemica sull'isola, e organizzò una campagna di contrasto alla malattia, cercando di organizzare un sistema organico di profilassi e cura nelle zone minerarie del sud dell'isola a Nebida e Masua "vedi [11, 12, 13]". Il suo impegno nella lotta alla diffusa affezione gli valse una medaglia di bronzo al merito della Sanità Pubblica.

Durante la guerra prestò servizio in diversi ospedali da campo e si dedicò alla costruzione di laboratori castrensi e stabilimenti di bonifica. Nel 1917 fu ricoverato a Pavia, nell'ospedale militare, per l'aggravarsi dei sintomi di un'infezione tubercolare da cui non si rimise mai completamente e che lo portò a una morte prematura una decina di anni più tardi.

Nel 1922 Perroncito tornò a Pavia come successore di Golgi e divenne preside della facoltà di Medicina nel 1925. Le sue condizioni di salute peggiorarono qualche anno più tardi, sembrò dapprima rimettersi ma le complicanze dovute all'infezione tubercolare mai sopita lo costrinsero a sottoporsi a un intervento chirurgico a Torino; dopo una brevissima convalescenza tornò subito al lavoro, ma il male si aggravò poco tempo dopo e Perroncito morì a Pavia il 21 gennaio 1929 "vedi [14]".

4. Perroncito e la rigenerazione del nervo periferico

Alla fine dell'Ottocento, nel laboratorio di Patologia Generale, due allievi di Golgi, Giovanni Marenghi e Francesco Purpura, si dedicarono allo studio del meccanismo della rigenerazione dei nervi periferici arrivando a conclusioni contrastanti. Marenghi era convinto che il fenomeno derivasse dallo sviluppo di vie collaterali e non dal ripristino della continuità anatomica del nervo reciso nella cicatrice che si formava dopo il taglio. Purpura invece, impiegando la reazione nera, aveva osservato una continuità anatomica del nervo neoformato, che andava ad attraversare la cicatrice e si portava nel moncone distale. I suoi risultati però erano validi solo per le fibre amieliniche, le uniche in grado di colorarsi, anche se con molta difficoltà, con la reazione nera "vedi [8], pagg. 482-483".

Perroncito cominciò a dedicarsi allo studio delle terminazioni nervose mentre era ancora studente e ne fece anche il tema della sua dissertazione per la laurea, intitolata *La rigenerazione dei nervi*, che ottenne con lode nel 1905. Tramite indagini istologiche condotte serialmente riuscì a descrivere per la prima volta in modo esaustivo tutte fasi del processo rigenerativo. Dopo il taglio sperimantale osservò l'emergere, dall'estremità prossimale tagliata, di formazioni di aspetto spiraliforme, poi chiamate anche *spirali di Perroncito*. Riuscì così a dimostrare che le fibre nervose costituitesi dopo il taglio derivavano da quelle preesistenti, in collegamento con la cellula d'origine "vedi [15-16]". In letteratura sono stati più volte ripresi gli studi condotti sulle rigenerazioni

da Santiago Ramón y Cajal ma è da attribuire a Perroncito il merito di aver raggiunto per primo conclusioni rilevanti. Fu lo stesso ricercatore spagnolo del resto a riconoscere la priorità del giovane italiano e a proporre che la divisione delle fibre del moncone centrale nelle prime ore dopo il taglio fosse definita *fenomeno di Perroncito* "vedi [8], pag. 483; [17], pag. 21" (*Fig. 2*).

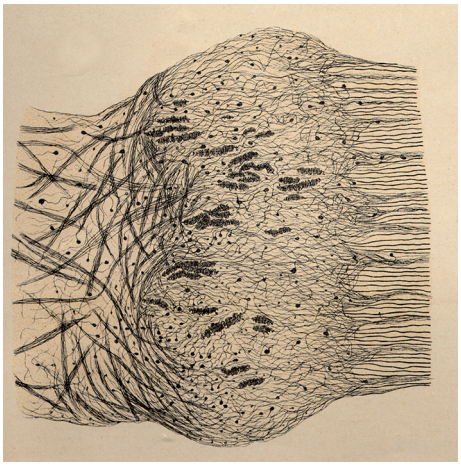


Fig. 2 – Aldo Perroncito, tavola esplicativa delle fasi iniziali del processo di rigenerazione del nervo periferico dopo taglio sperimentale, particolare della tav. 6, in Aldo Perroncito, La rigenerazione dei nervi*, Hoepli, Milano, 1908.*

Grazie ai suoi fondamentali studi il ricercatore pavese ottenne importanti riconoscimenti internazionali: nel 1907, a venticinque anni, Perroncito ottenne il premio Warren della scuola medica di Boston e nel 1910 il premio Lallemand dell'Académie des Sciences di Parigi.

5. Il trattamento delle lesioni del nervo periferico

Nel momento in cui le ricerche di Perroncito iniziarono ad avere risonanza anche in campo internazionale entrò nel laboratorio di patologia generale Giovanni Verga, assistente nell'Istituto di Patologia Chirurgica dimostrativa nell'ospedale San Matteo, deciso a tornare a dedicare del tempo alla ricerca nel laboratorio che aveva già frequentato da studente. Forte anche della sua formazione chirurgica studiò spe-

rimentalmente la rigenerazione vagliando diverse tecniche in grado di facilitarne il processo, con l'obiettivo di utilizzarle sui pazienti con lesioni dei nervi periferici sui quali non si era mai riusciti a intervenire date le scarse conoscenze sul processo rigenerativo "vedi [18]".

Verga ottenne ottimi risultati nella fase sperimentale in laboratorio e durante la Prima guerra mondiale, insieme al neurologo Guido Sala, operò molti traumatizzati al fronte con lesioni al nervo periferico. I due raccolsero i numerosi interventi in uno studio clinico pionieristico in Italia per la casistica e i risultati riportati che fu comunicato sia alla Società Medico-Chirurgica di Pavia sia all'Istituto Lombardo "vedi [16, 17]".

Conclusioni

Il rapporto fra guerra e medicina è stato documentato in molti casi particolari. Lo studio dei meccanismi di rigenerazione del nervo periferico avviato da Perroncito ne è un esempio notevole. Lo sviluppo della tecnica chirurgica di riparazione del nervo periferico costituisce inoltre un interessante caso storico di transizione dalla ricerca di base all'applicazione clinica. Nel giro di pochi anni infatti, durante il periodo bellico, le ricerche sperimentali di Aldo Perroncito dimostrarono tutto il loro potenziale terapeutico nel reparto neurologico dell'Ospedale militare del Collegio Borromeo.

BIBLIOGRAFIA

1. Paolo Mazzarello, Lucio Fregonese (a cura di), *Pavia e le svolte della scienza*, Libreria CLU, Pavia, 2011.
2. Paolo Mazzarello, *Costantinopoli 178: la congiura e la beffa. L'intrigo Spallanzani*, Bollati Boringhieri, Torino, 2004.
3. Maria Teresa Monti, *Spallanzani e le rigenerazioni animali. L'inchiesta, la comunicazione, la rete*, Olschki, Firenze, 2005.
4. Luigi Belloni, Dalle 'riproduzioni animali' di Lazzaro Spallanzani agli 'innesti animali' di Giuseppe Baronio, in: *Lazzaro Spallanzani e la biologia del Settecento. Teorie, esperimenti, istituzioni scientifiche. Atti del Convegno di studi Reggio Emilia, Modena, Scandiano, Pavia 23-27 marzo 1981*, Giuseppe Montalenti, Paolo Rossi editori, 189-199, Olschki, Firenze,1982.
5. Paolo Mazzarello et al., La rigenerazione del nervo periferico: il contributo della scuola pavese, *Neurological Sciences*, 2004: 25: 423-425.

6. Carla Garbarino, Paolo Mazzarello, A strange horn between Paolo Mantegazza and Charles Darwin, *Endeavour*, 2013: 37(3): 184-187.
7. Maria Carla Garbarino, Paolo Mazzarello, Uno strano trapianto tra Darwin e Mantegazza, *Istituto Lombardo (Rend. Scienze)*, 2013: 147, pp. 127-137.
8. Paolo Mazzarello, *Il Nobel dimenticato*, Bollati Boringhieri, Torino, 2019.
9. Paolo Mazzarello, Alessandro L. Calligaro, Alberto Calligaro, Giulio Bizzozero: a pioneer of cell biology, *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 2001: 2(10), pp. 776-81.
10. Aldo Perroncito, Condriosomi, cromidii e apparato reticolare interno nelle cellule spermatiche. Nota preventiva, *Rendiconti del R. Istituto lombardo di scienze e lettere*, 2018: s. 2: XLI, pp. 988-991.
11. Aldo Perroncito, Esperimento di bonifica umana in località intensamente malarica, *Rendiconti del R. Istituto lombardo di scienze e lettere*, 1923: LVI, s. 2, pp. 787-792.
12. Aldo Perroncito, Esperimento di bonifica umana in località intensamente malarica. Nota II, *Rendiconti del R. Istituto lombardo di scienze e lettere*, 1924: LVII, pp. 616-618.
13. Eugenia Tognotti, *Per una storia della malaria in Italia. Il caso della Sardegna*. Franco Angeli, Milano, 2008.
14. Valentina Cani, Antonella Berzero, Perroncito Aldo, in *Dizionario Biografico degli Italiani*, vol. 82, Istituto della Enciclopedia Italiana, Roma, 2015, pp. 442-444.
15. Aldo Perroncito, La rigenerazione delle fibre nervose, *Archivio per le scienze mediche*, 1905: XXIX, pp. 597-606.
16. Aldo Perroncito, La rigenerazione delle fibre nervose. III nota preventiva, *Archivio per le scienze mediche*, 1906: XXX, pp. 452-462.
17. Javier De Felipe, Edward G. Jones, Cajal's Degeneration and Regeneration of the Nervous System, Oxford University Press, New York, 1991.
18. Paolo Mazzarello, José Maria Pascual, Giovanni Verga, Un Pioniere della Chirurgia del Nervo Periferico, in: *Divulgatori di conoscenza, di idee e di metodi. I docenti dell'Università di Pavia raccontati attraverso le loro carte*, a cura di Fabio Zucca, Alessandra Baretta, Maria Piera Milani, Edizioni Unicopli, Milano, 2014, pp. 57-79.
19. Guido Sala, Giovanni Verga, Le lesioni dei nervi periferici per ferite d'arma da fuoco (parte prima), *Memorie dell'Istituto Lombardo di Scienze e Lettere (Classe di Scienze Matematiche e Naturali)*, 1916: 21, pp. 337-400; Idem, Le lesioni dei nervi periferici per ferite d'arma da fuoco (parte seconda).
20. Guido Sala, Giovanni Verga, Le lesioni dei nervi periferici per ferite d'arma da fuoco (parte seconda), *Memorie dell'Istituto Lombardo di Scienze e Lettere (Classe di Scienze Matematiche e Naturali*), 1917: 22, pp. 17-157.

Istituto Lombardo (Rend. Scienze) 149, 87-89 (2015)

HUNTINGTON, STORIA DI UN GENE ANTICO[1]

Nota del s.c. ELENA CATTANEO (*)

(Adunanza del 7 maggio 2015)

SUNTO. – Huntington è il gene che muta nella malattia di Huntington. Il nostro laboratorio sta studiando la sua funzione fisiologica durante lo sviluppo e nell'età adulta e in che modo la sua mutazione provoca la morte dei neuroni striatali e corticali con l'obiettivo finale di contribuire all'identificazione di una terapia.

***

ABSTRACT. – Huntington is the gene that mutates in Huntington's Disease. Our laboratory is studying its physiological function during development and in adulthood and how its mutation causes the death of the striatal and cortical neurons with the ultimate goal of contributing toward the identification of a therapy.

Da oltre 20 anni il laboratorio studia la Corea di Huntington con l'obiettivo di contribuire a comprenderne la fisiopatologia e proporre strategie farmacologiche, geniche, cellulari che ne rallentino il decorso o ne blocchino l'insorgenza.

La malattia, a trasmissione genetica e neurodegenerativa, è causata da una anomala espansione di triplette nucleotidiche CAG nella proteina codificata dal gene che prende il nome di huntingtina. Come conseguenza, i neuroni del cervello vanno incontro a una progressiva neurodegenerazione, con una maggiore vulnerabilità per i neuroni della corteccia e del corpo striato.

(*) Università degli Studi di Milano, Italy. E-mail: elena.cattaneo@unimi.it

1 Sintesi dell'intervento.

Due sono le strategie di ricerca adottate dal laboratorio per lo studio della malattia. Da un lato lo studio del gene sano, la sua evoluzione, il suo ruolo fisiologico nel tessuto nervoso oltre all'analisi delle specifiche alterazioni molecolari evocate dal gene malato. Dall'altro, lo sviluppo di approcci basati su staminali pluripotenti (embrionali e riprogrammate) e su staminali neurali umane per la produzione degli specifici neuroni che degenerano nella malattia.

Nell'ambito della prima strategia nel 2004 il laboratorio ha aperto un nuovo filone di ricerca volto allo studio del gene durante l'evoluzione. L'ipotesi sottesa è che il tratto CAG del gene Huntington abbia un ruolo nell'evoluzione e nello sviluppo del cervello umano.

La storia del gene comincia 800 milioni di anni fa in un'ameba pluricellulare. Ci troviamo in tempi molto antichi, ancor prima della grande divisione tra organismi protostomi (insetti, crostacei, molluschi e vermi) e deuterostomi (rettili, anfibi, pesci, uccelli e mammiferi). Nei mammiferi, che hanno un sistema nervoso più complesso e strutturato dei pesci, il CAG aumenta di numero. Una dopo l'altra, si aggiungono nuove triplette CAG alle 4 acquisite da pesci, anfibi, rettili ed uccelli. Ci sono 6 CAG nell'opossum, 7 nel topo, 8 nel ratto, 10 nel cane e nella pecora, 12 nell'elefante e 15 nel toro.

Dalle creature ameboidi il gene è arrivato all'uomo, modificandosi mediante l'aggiunta di nuovi CAG e portando con sé vantaggi evolutivi, crescenti, fino ad un limite tollerabile. Conoscere le origini di questo gene, indagare presumibilmente l'eventuale possibilità che possa aver influenzato la nostra storia evolutiva ci permetterà di svelare alcuni piccoli misteri dell'evoluzione umana.

Sappiamo che il tratto CAG del gene Huntington umano è polimorfico. Questo significa che ognuno di noi ha un numero diverso di triplette sempre però compreso fra 9 e 35. Tuttavia, quando il numero di ripetizioni del tratto CAG supera un valore limite, oltre 35, la malattia si manifesta. A degenerare sono prevalentemente i neuroni della corteccia e del corpo striato, le aree cerebrali sede del controllo del movimento e delle funzioni cognitive superiori. I sintomi includono disturbi cognitivi, di personalità e della memoria. In seguito i movimenti diventano incontrollabili, compaiono spasmi e l'andatura lascia il posto ad una sinuosa ed irrefrenabile "danza". Nelle fasi avanzate il corpo perde ogni autonomia e rallenta fino a diventare immobile.

Attività del gene Huntington: dall'embrione all'adulto

Nei mammiferi il gene Huntington è importante lungo tutte le fasi della vita. Senza di esso non nasceremmo. Il gene regola lo sviluppo embrionale precoce e lo sviluppo del cervello. Diversi studi dimostrano che il gene regola la formazione dell'epiblasto e del cervello. Anche nel cervello adulto svolge diverse attività. Nel 2000 il gruppo di Scott Zeitlin alla Virginia University ha dimostrato che l'inattivazione del gene nel cervello del topo adulto causa neurodegenerazione. Il gene è quindi critico per la sopravvivenza dei neuroni. Nello stesso anno i nostri studi hanno dimostrato che il gene Huntington sano protegge le cellule nervose da stimoli dannosi e tossici. L'anno seguente, abbiamo identificato anche un'azione neuroprotettiva del gene perché regola la produzione di BDNF e due anni dopo abbiamo scoperto il meccanismo alla base che coinvolge il *Neuron Restrictive Silencer Element* (NRSE), un silenziatore genico localizzato nel gene del BDNF. L'huntingtina sana mantiene spento questo silenziatore permettendo la produzione di BDNF. Quella mutata, invece, perde questa capacità e il silenziatore attivo spegne il gene del BDNF. Abbiamo anche dimostrato che questo effetto si estende a un gruppo di altri geni neuronali che sono regolati dall'NRSE ed implicati nell'attività delle sinapsi. Tutto lascia ben supporre che il gene sano abbia attività molto importanti per il cervello. Rimane, però, ancora da verificare se l'inserimento del tratto CAG e la sua espansione abbiano contribuito a conferire queste proprietà all'antico gene delle amebe primitive giunto fino a noi oggi.

Per mimare lo sviluppo del Sistema Nervoso ed indagare la funzione del gene e del suo tratto CAG durante l'evoluzione abbiamo usato cellule staminali embrionali e protocolli di differenziamento che consentono di riprodurre *in vitro* i primi passaggi di sviluppo del Sistema Nervoso Centrale. I nostri studi rivelano che, se private del gene Huntington, le cellule staminali perdono la capacità di formare rosette neurali, strutture che *in vitro* mimano la formazione del tubo neurale. L'huntingtina "evolutivamente più vecchia" in grado di ripristinare rosette neurali è quella dell'anfiosso (2 CAG). Queste rosette diventano più forti in presenza di huntingtina di organismi che portano tratti CAG più lunghi. Infatti, le rosette più grandi e strutturate si riformano quando rimettiamo in quelle cellule un gene Huntington sano del topo o dell'uomo. Questo esperimento ci ha rivelato che il gene Huntington sano dei mammiferi ha assunto funzioni che riguardano la formazione e, forse, l'evoluzione del tubo neurale.

UN PROGETTO PER IL RILIEVO ARCHEOLOGICO DEL SITO DI MASADA IN ISRAELE

Nota del m.s. SANDRO PARRINELLO (*)

(Adunanza del 7 maggio 2015)

SUNTO. – Il testo propone una riflessione sul disegno ed il rilievo architettonico come strumento per lo studio dei reperti archeologici. La descrizione del sito di Masada e delle vicende che ne hanno caratterizzato la storia più recente fino alla definizione delle strategie documentali messe a sistema per lo sviluppo di un percorso di conoscenza condotto a cavallo tra didattica e ricerca.

***

ABSTRACT. – The text proposes a reflection on drawing and architectural survey as a tool for the study of archaeological sites. The description of the Masada site and the events that have characterized its most recent history till to the definition of the documentary strategies have established a system for the development of a path of knowledge developed in synergy between didactic and research.

1. PREMESSA SUL RILIEVO ARCHEOLOGICO

Lo studioso dell'architettura è senza dubbio attratto dallo studio dell'antico. Questa ricerca è sempre stata svolta sia con l'ausilio di fonti storiche e letterarie, sia mediante la conoscenza diretta dei resti della produzione architettonica del passato, mediante il disegno e la rilevazione. Come dimostrano gli studi degli umanisti rinascimentali del quindicesimo secolo, artisti e architetti documentavano con schizzi, misurazioni e

(*) DICAr - Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, Università di Pavia, Italy. E-mail: sandro.parrinello@unipv.it

rappresentazioni di vario tipo, oltre che con accurate descrizioni letterarie, le vestigia del passato. Fino al XVII secolo sono tuttavia le grandi problematiche legate all'architettura e non all'archeologia ad essere oggetto delle indagini dei trattatisti i quali, pur interessandosi dell'architettura antica, elaborano teorie e metodiche suffragate in parte dal rilevamento dei resti degli antichi edifici. L'attività del rilievo appare spesso come una esercitazione scolastica, fondamentale per la formazione degli architetti, ma raramente queste esperienze assumono una valenza di lavoro autonomo finalizzato allo studio archeologico. Verso la fine del XVII secolo si sviluppano esigenze di più accurati studi sull'architettura antica e si avvisa la necessità di avere a disposizione analisi più attente, basate su rilievi dettagliati dei resti dell'antichità: il rilievo architettonico, quale strumento di conoscenza e divulgazione culturale, diviene oggetto di numerose opere a stampa anche a carattere divulgativo. Nel XVIII secolo la scoperta e l'esplorazione delle città sepolte dall'eruzione del Vesuvio di Pompei ed Ercolano (Italia) contribuirono allo sviluppo di una ricerca più sistematica dei resti antichi, portata avanti in seguito, su basi più o meno scientifiche, fino alle scoperte di Schliemann che operò negli anni 1870-1880 a Troia (Turchia) e Micene (Grecia).

Nei primissimi anni dell' Ottocento vennero realizzate importanti esperienze dai rilevatori al seguito delle campagne napoleoniche; le restituzioni di Vivant Dénon delle vestigia egizie sono un esempio di fedeltà all'oggetto, con una accurata considerazione dello stato di conservazione degli edifici fino alla rappresentazione delle lesioni delle singole pietre.[1] Nel 1812 l'esploratore svizzero Johann Ludwig Burkhardt[2] rivelò al mondo occidentale le splendide architetture rupestri di Petra, conservatesi per la maggior parte quasi intatte sia per le caratteristiche geomorfologiche del sito sia per la singolare tecnica di realizzazione monolitica. Il grande successo dei primi resoconti, arricchiti da ottime illustrazioni grafiche[3] e, soprattutto, da una serie di splendide litografie realizzate da David Roberts[4] edite fra il 1842 ed il 1849 (tratte da dise-

1 D.V. Denon, *Voyage dans la Basse et la Haute Egypte*, ed. It. Firenze, 1808.

2 J.L. Burkhardt , *Travels in Syria and the Holy Land*, London, 1822, pp. 420-434

3 L.M. Leonde, *Journey through Arabia Petrea to Mount Sinai and the axcavated city of Petra the Edom of the Prophecies*, 2nd ed. , London, 1838. C.f.r. anche L. Marino, *I disegnatori di Petra*, in AA. VV. *Il disegno luogo della memoria*, atti del convegno di Firenze, 21-23 settembre 1995, Firenze, Alinea, 1995.

4 Raccolta di vedute di D. Roberts, Londra, 1839, cfr. D. Roberts, *Journey to*

gni realizzati nel 1839 durante una apposita spedizione dall'Egitto alla Terrasanta), contribuì ad incrementare l'interesse per la mitica città.

Il XIX secolo è caratterizzato anche dallo sviluppo della attività dei *pensionnaires* accreditati presso l'Accademia di Francia a Roma.[5] La caratteristica di questi studi consiste nel rilievo del rudere e nella successiva operazione di "restauro", ovvero di ricostruzione del monumento a livello grafico, basata sui reperti dell'eventuale scavo e soprattutto sui dettami delle teorie degli ordini classici.

Tra il 1895 ed i primissimi anni del Novecento, con la scoperta del mondo preclassico, architetti - archeologi dalle specifiche competenze operano nei cantieri più importanti quali Susa, Babilonia, Assur e Bogazkoy. Con Evans, autore della eccezionale scoperta del mondo minoico (1900-1905), operano vari architetti tra i quali Théodore Fyfe, Christian Doll e Piet de Jong, che contribuiscono alla redazione dei rilievi e delle suggestive rappresentazioni grafiche oltre che alle audaci ricostruzioni *in situ*.[6]

Il disegno dell'antico e la creazione di strumenti rappresentativi attraverso i quali apprendere le ragioni compositive dell'architettura storica, hanno portato nel corso dell'ultimo secolo ha sviluppare numerose metodologie di rappresentazione grafica per la trasposizione del sistema reale rappresentato, in disegno da assimilare per consentire poi l'espressione dell'idea che sottende il progetto.[7]

Nel quadro di un generale contesto che tende oggi a rivalutare la specificità della figura e delle competenze del rilevatore per gli aspetti della conservazione e del restauro, si assiste ad un progressivo crescente interesse per questa figura professionale nel campo delle indagini archeologiche che, nell'ambito specifico, tende ad assumere un ruolo rilevante ed a ritagliarsi un autonomo spazio di ricerca.

Petra end the Holy Land, introduzione e commenti di E. Nistri, trad. inglese di Paula Boomsliter, Firenze, 1997.

5 M. Docci, D. Maestri, *Storia del rilevamento architettonico e urbano*, Laterza, Bari, 1993, p. 221.

6 D. Laroche, Alla scoperta dell'antichità preclassica, in "Rassegna" ("L'Archeologia degli architetti"), XV, n. 55/3, 1993, pp. 68-73.

7 Per una trattatistica generale sullo sviluppo della disciplina del rilievo architettonico Cfr. M. Docci, D. Maestri, *Storia del rilevamento architettonico e urbano*, Cit.; Cfr. anche S. Bertocci, M. Bini, *Manuale di rilievo architettonico e urbano*, Città Studi Edizioni, Novara, 2012.

L'archeologia è tradizionalmente suddivisa in discipline a seconda del periodo o della cultura oggetto di studio, oppure a seconda di particolari tecniche di indagine, di specifiche problematiche o ancora utilizza definizioni che si basano sulle tipologie dei materiali oggetto di studio. Si descrive quindi la disciplina in rapporto a ben precise specificità di settore che, in ogni caso, trattano del recupero sistematico e dello studio di reperti, 'antichità' in generale, e dunque di manufatti visti nel loro contesto. Il termine 'contesto' ha oggi implicazioni culturali, cronologiche, ma anche spaziali ed ambientali, pertanto l'architetto, per una propria specifica competenza ed attitudine a descrivere i fenomeni in termini di spazio e ambiente, fa parte a buon diritto degli studiosi che, nello specifico campo di ciascun progetto di indagine archeologica, hanno un ruolo fondamentale al pari delle altre specifiche figure professionali come gli addetti allo scavo ed i responsabili della registrazione dei reperti, operando assieme alle numerose figure di specialisti archeologi, storici, restauratori e coloro che si occupano delle scienze di laboratorio.[8]

Con lo sviluppo delle metodologie di indagine stratigrafica e dei metodi di ricerca correlati, che hanno comportato in genere una maggiore attenzione alle tracce della cultura materiale,[9] si è giunti ad applicare le stesse metodologie di indagine allo studio delle strutture in elevato e quindi all'architettura in genere e non soltanto ai reperti allo stato di rudere: i campi di applicazione delle indagini architettoniche, strutturali, tipologiche, geometriche e formali, tipiche degli studi architettonici, hanno trovato quindi fertili e proficue applicazioni in archeologia.

Rilevare la struttura muraria ed i suoi corredi funzionali ed estetici, costituisce un'operazione che se condotta correttamente e finalizzata al confronto con strutture murarie, tessiture dei paramenti, caratteristi-

[8] Si intendono, ad esempio, gli specialisti della datazione radiometrica o dell'identificazione dei pollini o della microfauna.

[9] La principale tecnica di indagine archeologica è quella dello scavo stratigrafico che consente di rimuovere strati di terreno che si sono depositati nel bacino di un sito, generalmente antropizzato, rispettandone la relativa successione cronologica, e di documentare i materiali che vi sono rinvenuti, collocandoli in una sequenza cronologica relativa. L'indagine archeologica utilizza anche il confronto formale e stilistico con altri oggetti simili (ad esempio reperti fuori contesto), l'insieme delle tecniche scientifiche archeometriche, e può usufruire di tecniche di rilevamento e di datazione o di analisi scientifiche, come sopra esposto, elaborate da altre discipline.

che costruttive e di finitura presenti nello stesso ambito territoriale, diviene per lo studio storico ed architettonico, oltre che sotto il profilo archeologico della cultura materiale, una condizione essenziale per la lettura delle strutture, utile soprattutto nel corso di analisi che investano siti di grande interesse ed estensione che presentano, come il caso di Masada in Israele, resti di edilizia a carattere monumentale sia tracce di edilizia minore o diffusa nel territorio.

Le tecnologie infografiche ed i sistemi di rilevamento digitale hanno inoltre trovato fertili applicazioni in vari campi delle indagini archeologiche e, in primo luogo, offrono una quantità di applicazioni relative alle problematiche inerenti la gestione della vasta documentazione di scavo e di rilievo che ogni campagna produce. Uno dei principali obiettivi è in generale quello di costruire basi di dati, relative alla documentazione dei siti, facilmente consultabili ed aggiornabili, costruite in maniera da offrire la possibilità di consultazione e di gestione, anche *on line*, per gruppi di ricerca che, proprio per il carattere di interdisciplinarità delle ricerche, possono svilupparsi anche a livello internazionale. Questi risultano indispensabili strumenti per la gestione e la conservazione della documentazione di rilievo, sia degli appunti presi sul campo, sia dei rilievi realizzati con strumentazioni digitali, dai *file* sorgente agli elaborati intermedi e finali, delle immagini e delle foto, e possono offrire, se ben congegnati, la possibilità di effettuare ricerche ed indagini finalizzate alle esigenze didattiche o di studio di vari gruppi di interesse. L'adozione di tali strumenti, adattati alle esigenze dello specifico campo di indagine, consente, in prospettiva, la valorizzazione del cospicuo patrimonio iconografico e documentario che viene prodotto dal team di studiosi che operano in un determinato sito.

Elemento fortemente caratterizzante è infine la previsione della georeferenziazione G.P.S. dei dati topografici relativi ai soggetti trattati dagli elaborati grafici, che consente un rapido aggiornamento delle basi cartografiche con eventuali nuove acquisizioni (campagne di scavo). Le mappe digitali possono costituire la base di raccolta di sistemi di dati G.I.S. utili ad incrementare le possibilità di indagini che partano direttamente dalla cartografia di riferimento del sito e possano prevedere la restituzione di carte tematiche relative ai vari livelli di indagine.[10] Una

[10] Sono note le potenzialità offerte dai sistemi S.I.T o G.I.S. nel campo dell'archeologia in generale e, nello specifico, nel settore del rilievo archeologico e nei campi

banca dati digitale dovrebbe costituire quindi la necessaria base informativa per la gestione di un'area archeologica, soprattutto in funzione della programmazione degli interventi di scavo, delle necessarie operazioni di manutenzione ordinaria e straordinaria, per la realizzazione di un programma di "attenzione" costante allo stato del sito finalizzato alla corretta conservazione dello stesso.

2. Il sito di Masada

La caratteristica essenziale delle indagini che si occupano di grandi aree e complessi archeologici, come il sito di Masada inteso nel suo complesso territoriale, è quella di occuparsi di tutti i periodi testimoniati dalla stratificazione archeologica: nessun tipo di monumento, nessuna attività e nessun periodo risulta prioritario, poiché l'indagine conoscitiva che si prevede di mettere in atto parte, in primo luogo, dalla conoscenza del territorio in tutte le sue forme ed i suoi aspetti.

Il sito di Masada, individuato da un viaggiatore nel 1828 sugli aspri rilievi che si innalzano ad Est del Mar Morto, nella Giudea sud-orientale, si trova attualmente in territorio israeliano a circa cento chilometri a sud-est di Gerusalemme. Il sito fu oggetto di studi da parte del grande specialista Schülte nel 1933[11] e la grande fortezza venne meglio identificata e studiata dopo i primi scavi realizzati dal 1963 al 1965 dalla missione guidata dall'archeologo israeliano Yigael Yadin.[12] Dal 1966 Masada ed il suo territorio divennero un'area protetta dal Ministero delle Antichità e dal 1998 fu dichiarata National Parks, Nature Reserves, National Sites and Memorial Sites. Divenuta sito protetto dall'UNESCO nel 2000 oggi è un

---

dell'analisi urbana e territoriale. La loro utilizzazione sta espandendosi fino a connotarli come un necessario strumento per l'organizzazione delle informazioni nel settore specifico del rilievo e della gestione dei dati per la pianificazione della conservazione dei siti di maggior interesse anche a livello territoriale.

[11] A. Schülte, «Zeitschrift das deutschen Palästina - Vereins», LVI, 1933; M. Avi – Yonah, N. Avigad, Y. Aharoni, L. Dunayevsky, S. Gutman, *The Archaeological Survey of Msada, 1955 – 56*, «Israel Exploration Journal»,VII, 1957; Y. Yadin, *The excavation of Masada 1963 – 1964. Preliminary Report*, «Israel Exploration Journal», XV, 1965; Y. Yadin, *Masada. Herod's Fortress and the Zelot's last Stand*, London, 1966.

Macheronte: Győző Vörös, ***Machaerus I. History, Archaeology and Architecture of the Fortified Herodian Royal Palace and City overlooking the Dead Sea in Transjordan,*** Edizioni Terra Santa, Milano 2013.

grande parco archeologico, uno dei più visitati in Israele, dotato di un ampio Visitors Center e di una funivia per il rapido collegamento con il sito principale dell'area, la fortezza, che occupa la porzione a nord della sommità della montagna. Una grandiosa cisterna artificiale sotterranea, assieme a numerosi altri invasi per la conservazione dell'acqua, sia sulla sommità del sito sia sviluppati sulle scoscese pendici del rilievo, dimostrano la lunga frequentazione antropica del sito che, come è attestato anche dagli storici, in particolare da Giuseppe Flavio, venne usato come fortificazione fino dal secondo secolo a. C. essendo costituito da un rilievo roccioso isolato dotato di due sole vie di accesso.[13] Sulla sommità del rilievo, ad una altezza di circa quattrocento metri al di sopra della depressione del Mar Morto, si estende un pianoro della superficie di circa una decina di ettari (*Fig. 1*). Questo pianoro sommitale appare recinto da una singolare cortina muraria che sviluppa circa 1.300 metri, costituita da un doppio muro, composto dalla cortina esterna con torri di rinforzo e da un muro interno, collegati da murature trasversali disposte in maniera tale da formare una serie di vani comunicanti (sitema definito casamatta) una volta destinati a depositi, arsenali ed anche ad abitazioni (*Fig. 2*). Fra questi vani si distingue anche una sinagoga, ed alcune costruzioni destinate a colombari. All'interno del recinto fortificato appare ben evidente, nella zona Nord, un articolato complesso di costruzioni: il sistema dei magazzini, costituiti da due serie di fabbricati formati da lunghi vani (profondità variabile dai 20 ai 27 metri) modulati secondo una semplice viabilità interna, e grandi residenze disposte attorno a cortili, fra le quali emerge il cosiddetto Palazzo di Erode, risalente al I secolo a.C., un singolare complesso monumentale distribuito su tre terrazze del banco roccioso, sospese sul deserto con una incomparabile veduta del Mar Morto.[14]

---

[12] Yigael Yadin con William F. Albright, fu uno dei principali rappresentanti di quella che viene chiamata "Archeologia biblica". Condusse gli scavi di Nahal Hever, sulle sponde del mar Morto e assurse a notorietà internazionale dirigendo lo scavo di Masada tra il 1963 e il 1965.

[13] La storia di Masada è conosciuta principalmente dal lavoro di Giuseppe Flavio, lo storico ebreo del primo secolo d.C. Per la descrizione della Fortezza e degli apprastamenti di assedio dei romani cfr. Giseppe Flavio, La guerra giudaica, a cura di G. Vitucci, Arnoldo Mondadori Editore, ristampa 2012, cap. VII, 8, pp. 484-488.

[14] La fase principale più importante nuova costruzione del Palazzo Nord è datata alla metà anni '20 del 1° secolo a.C. Questo gruppo di edifici si trovano nel punto più alto della collina e costituiscono una acropoli difendibile della cittadella.

All'interno dell'area di Palazzo vi è anche un edificio termale articolato in vari ambienti (oggi in buona parte restaurati) aperti su di una corte, con piscina e cisterne. Un ulteriore complesso palaziale con varie residenze occupa la parte sud occidentale del recinto fortificato ed appare composto da vari ambienti con singolari lunghi atrii di ingresso.[15] Nella parte centrale dell'area vi sono i resti di un edificio di epoca bizantina, con una chiesa a pianta centrale, che testimonia l'occupazione del sito perlomeno fino a tale periodo.[16] Molto interessanti e sufficientemente ben conservati appaiono anche i resti del grandioso apparato di assedio realizzato dai romani fra il 72 ed il 73 d. C. costituito da un muro (circonvallazione) che circonda tutto il rilievo di Masada, rafforzato dalla presenza di ben otto campi militari fortificati con il tradizionale impianto quadrilatero. Fra le opere di assedio il resto più impressionante è costituito dalla rampa artificiale, realizzata in terra ed armata con strutture lignee (delle quali ancora rimangono tracce), che funzionava da piano inclinato per raggiungere le mura sulla cima del rilievo roccioso con una gigantesca torre d'assedio, resa famosa dagli scritti di Giuseppe Flavio. Lo straordinario stato di conservazione dell'intero complesso costituito dalla fortezza e dal territorio circostante con i resti delle opere di assedio ha fatto sì che tutta l'area venisse ritenuta di grande interesse e venisse dichiarata Patrimonio dell'umanità dall'UNESCO.[17]

---

15 Per la prima fase (c 35 a.C.) appartengono al nucleo del Palazzo occidentale tre palazzine, un edificio amministrativo, una caserma, tre colombari (utilizzati anche come torri di guardia), diversi grandi cisterne, e una piscina.

16 All'inizio della rivolta giudaica un gruppo di zeloti guidati da Menahem, occupano la fortezza di Masada, e molti ebrei si stabilirono lì dopo la caduta di Gerusalemme e la distruzione del Tempio. Flavio Silva, governatore romano, decise di eliminare questo ultimo centro residuo di resistenza ebraica ordinandone la conquista; su un sito roccioso sul versante occidentale di Masada fu costruita una rampa gigantesca per l'assedio delle mura. Cfr, cfr. Giseppe Flavio, La guerra giudaica, cit., Cap. VII, 8, p. 488.

17 UNESCO Declaration of Authenticity (2010): "This is a site that remained untouched for more than thirteen centuries. The buildings and other evidence of human settlement gradually collapsed and were covered over until they were revealed in the 1960s. There have been no additions or reconstruction, beyond an acceptable level of anastylosis, and inappropriate materials used in early conservation projects are being replaced. Limited restoration works have been carried out to aid visitor interpretation with original archaeological levels being clearly defined by a prominent black line set in the new mortar joints. Certain significant archaeological elements, such as the Roman camps and siegeworks, remain virtually untouched. The authenticity is therefore of a very high level".



Fig. 1 – Foto aerea di Masada da Nord nella quale si apprezza la relazione tra il sito archeologico e la depressione del Mar Morto.



Fig. 2 – Ortofoto aerea del complesso di Masada.

L'esame del territorio, sia come ricerca preliminare per individuare la presenza di resti archeologici, sia per acquisire dati statistici generali sulla storia del territorio stesso, prevede di avvalersi in questo caso

di un rilievo realizzato con scanner laser 3D che sarà integrato delle tradizionali metodologie di indagine (*Figg. 3-4*).[18]



Fig. 3 – Banca Dati 3D - Nuvola di punti laser scanner (visualizzata in scala di grigio) relativa ai rilievi condotti per l'area Nord del plateau di Masada.

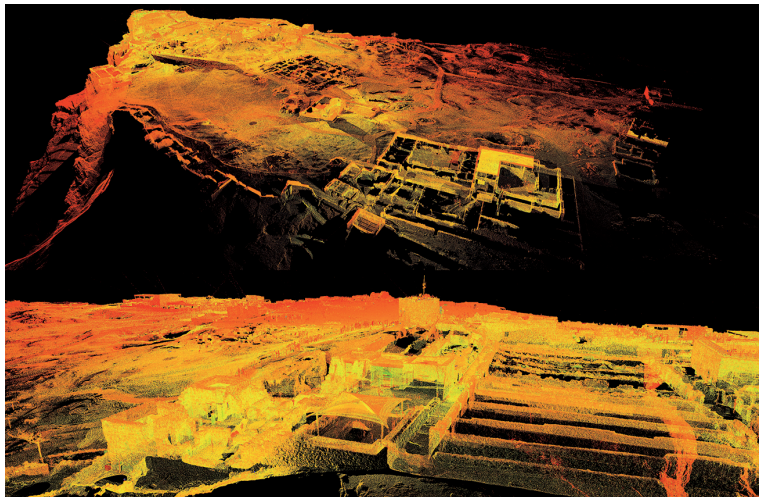


Fig. 4 – Vedute della nuvola di punti laser scanner.

[18] Il progetto di rilevamento digitale, non esclude tuttavia la tradizionale ricognizione archeologica di superficie (osservazione diretta), l'interpretazione delle fotografie aeree ed eventuali prospezioni geofisiche.

3. Un progetto per la documentazione di Masada

Il programma di ricerca per la documentazione del sito archeologico di Masada prevede un ciclo di campagne di rilevamento organizzate in un triennio di attività estendibile in caso di sviluppo di progetti satellite che permettano l'incremento dei fondi a disposizione per le ricerche. Ciascuna missione è organizzata nella volontà di creare seminari tematici dove la ricerca si possa mescolare alla didattica e dove possano partecipare sia studenti, in genere degli ultimi anni dei corsi di laurea magistrale, che dottorandi di ricerca, ricercatori e docenti. Queste missioni, previste nei mesi di Febbraio, sono state organizzate in accordo tra i tre responsabili del progetto appartenenti alle tre Università capofila, Stefano Bertocci per l'Università di Firenze, Sandro Parrinello per l'Università di Pavia e Rebeka Vidal per l'istituto Shenkar di Tel-Aviv, e si alternano ad altre missioni o workshop organizzate nei mesi di Settembre e Ottobre in Italia. Le attività italiane sono dedicate specificatamente alla formazione degli studenti tramite seminari tematici che permettano di approfondire lo studio delle tecnologie digitali nel campo della documentazione dei beni culturali mentre le attività condotte in Israele prevedono la messa in pratica di tali conoscenze operando su siti di interesse storico e archeologico.

Obiettivo generale delle ricerche in Israele è lo sviluppo e la sistematizzazione di una metodologia di acquisizione ed elaborazione dati relativi alle condizioni morfometriche del sito di Masada. Compresa dunque anche in forma apparente la complessità di un sistema così ampio, risulta necessaria un'organizzazione della struttura della ricerca inquadrando due aspetti principali: il primo riguardante gli obiettivi generali da un punto di vista tecnologico, relativi alle pratiche di rilevamento che si intendono sviluppare, il secondo che considera invece la dimensione del rilievo che, per un sito di così vaste dimensioni e così denso di elementi significanti, ricadrà su una pianificazione mirata delle attività.

La necessità di definire diversi ambiti specifici di interesse connessi all'immagine del luogo, corrisponde a quella necessità di inquadrare più informazioni possibili in grado di andare a ricostruire l'immagine complessa di questo sistema interconnesso di differenti realtà storiche, dal sito archeologico al moderno museo, nel quale ogni più modesto elemento si organizza secondo funzioni storiche che il rilievo deve poter sapere interpretare.

La banca dati dei rilievi realizzati, utile strumento di controllo per lo sviluppo dell'intero sito archeologico permetterà, in fase di elaborazione, di giungere a disegni affidabili su quanto presente oggi all'interno del museo all'aperto, consentendo inoltre la digitalizzazione e la virtualizzazione di ogni singolo elemento architettonico (*Figg. 5-6-7*).

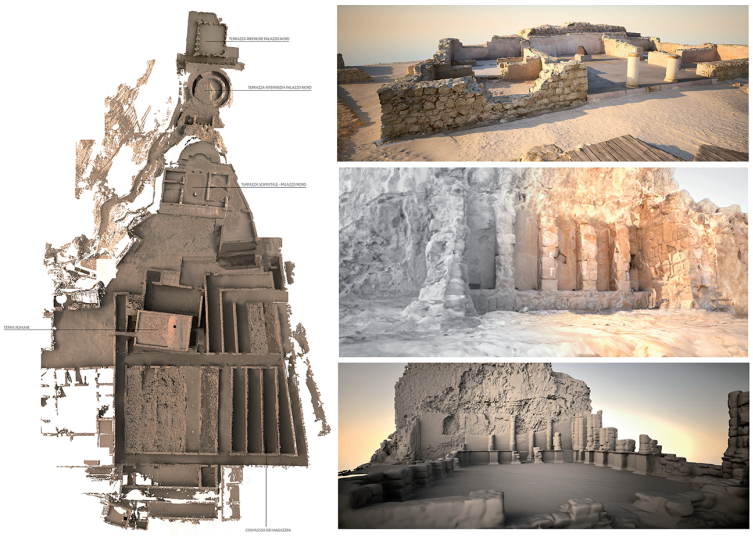


Fig. 5 – Modellazione 3D mediante mesh poligonale, della nuvola di punti relativa al Palazzo Nord di Masada e caratterizzazione delle superfici mediante applicazione di fotopiano.

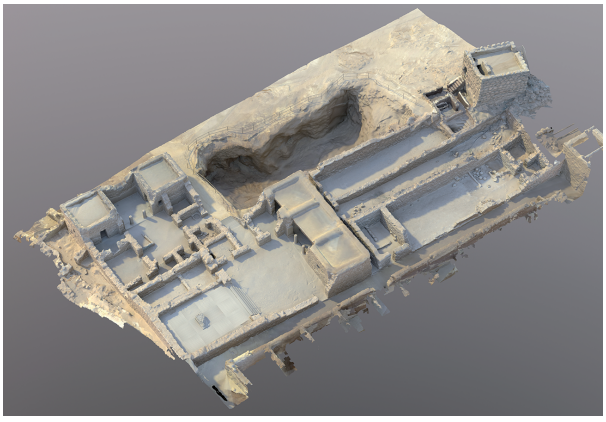


Fig. 6 – Modellazione del palazzo del Capitano mediante fotogrammetria structure from motion.

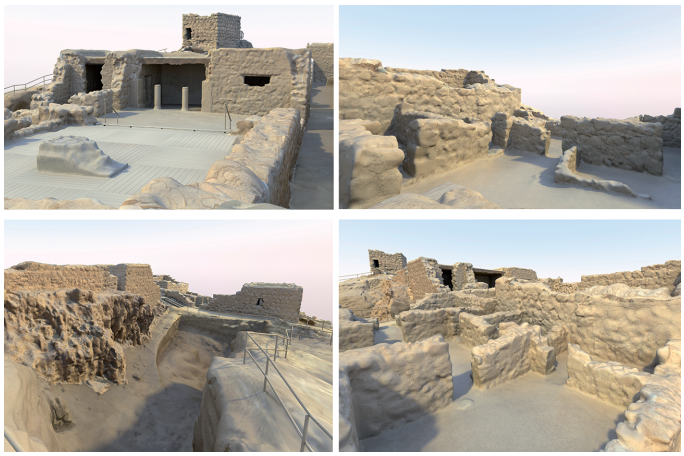


Fig. 7 – Visualizzazione del modello fotogrammetrico realizzato per l'area del palazzo del Capitano.

Questo fenomeno implica la possibilità di creare ulteriori piattaforme informative attraverso le quali operare una procedure di valorizzazione del sito stesso tramite web.

La possibilità di interagire virtualmente con l'architettura di Masada permette di sperimentare ciascuna scelta progettuale e di intervenire con simulazioni anche in relazione a sviluppi di pianificazione (*Fig. 8*). I siti UNESCO oggi necessitano di attività come queste per determinare con maggior metodo e controllo le politiche di gestione e di sviluppo del sito.



Fig. 8 – Interazione tra strumenti multimediali ed elementi costruttivi per lo sviluppo del sistema museale del complesso di Masada.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Stefano Bertocci, Sandro Parrinello. Digital Survey and Documentation of the Archaeological and Architectural Sities. Unesco World Heritage List. p. 1-240, Firenze:Edifir-Edizioni Firenze, 2015.

Stefano Bertocci, Sandro Parrinello, Rebeka Vital (a cura di), MASADA NOTEBOOKS REPORT OF THE RESEARCH PROJECT 2014. vol. II, Firenze:Edifir-Edizioni Firenze, 2014.

Stefano Bertocci, Sandro Parrinello, Rebeka Vital (a cura di). MASADA NOTEBOOKS REPORT OF THE RESEARCH PROJECT 2013. vol. I, Firenze:Edifir-Edizioni Firenze, 2013.

Bertocci Stefano, Bini Marco. Manuale di rilievo architettonico e urbano Torino, Città Studi Edizioni, De Agostini Scuola, 2012.

Sandro Parrinello, Francesca Picchio, Dalla fotografia digitale al modello 3D dell'architettura storica. DISEGNARE CON..., vol. 6, p. 1-14, ISSN: 1828-5961, doi: 10.6092/issn.1828-5961/3870, 2013.

Istituto Lombardo (Rend. Scienze) 149, 105-124 (2015)

OCCHIO E VISIONE: MERAVIGLIA DELLA NATURA O PROGETTO DIFETTOSO?

PIER GIORGIO GOBBI (*)

Nota presentata dal m.e. F. Borsa
(Adunanza del 28 maggio 2015)

SUNTO. – La prestazione complessiva del sistema visivo umano presenta diversi difetti, tra i quali aberrazioni, monocromatiche e cromatiche, dinamica limitata, ridotta risoluzione spaziale e temporale. Perché si è evoluto in questo modo? Potrebbe essere migliorato in qualche aspetto, ad esempio con il supporto della tecnologia? La risposta è articolata sulla base di un modello neuro-fisico sviluppato dall'autore, in grado di fornire stime quantitative delle prestazioni ottiche e visive dell'occhio umano, in accordo con le misurazioni sperimentali. La conclusione, impostata sul principio di utilità, è che il progetto risultante dall'evoluzione naturale è perfettamente calibrato per le primarie esigenze di sopravvivenza dell'uomo primitivo in condizioni di illuminazione diurna e risulta difficilmente migliorabile dall'intervento umano.

***

ABSTRACT. – The behavior of the human visual system exhibits some flaws, including monochromatic and chromatic aberrations, finite dynamic range, limited spatial and temporal resolution. Why did it evolve this way? Can it be improved somehow, for example with the support of technology? The answer is obtained from a neuro-physical model developed by the author, which provides quantitative estimates of the optical and visual performances of the human eye, in agreement with experimental records. The conclusion, based on the principle of utility, is that the evolutionary design of the visual system is perfectly tailored for the primary survival needs of our primitive ancestors in daylight illumination, and it can hardly be improved with the help of human technology.

(*) IRCCS Ospedale San Raffaele, Milano, Italy.
E-mail: gobbi.piergiorgio@hsr.it

1. Introduzione

Il titolo di questa memoria, che prospetta di sfiorare questioni inerenti ai «massimi sistemi», può evocare suggestioni di dispute filosofiche, magari fumose e inconcludenti. Niente di tutto ciò. Alla domanda del titolo cercherò di offrire una risposta il più possibile scientifica, fondata su dati quantitativi ed evidenze sperimentali; il fondamento è un modello psico-fisico – cioè congiuntamente ottico e neurologico – del meccanismo della visione umana.

Un'utile premessa discende da quanto riferiscono i neurofisiologi, per cui la visione è responsabile all'incirca del 90% degli stimoli e delle informazioni che pervengono in ogni momento al nostro cervello. La percentuale sembra piuttosto elevata, ma può risultare ragionevole quando si considerino sia la quantità di informazione intrinsecamente legata ad un'immagine (si pensi ad es. alla differenza di dimensioni tra un file audio e un file video), sia il fatto che l'occhio lavora effettivamente «in continuo» - almeno in stato di veglia -, mentre gli altri organi di senso, pur essendo costantemente attivi, di fatto producono stimoli significativi soltanto al di sopra di una certa soglia o in presenza di variazioni importanti del segnale percepito. In corrispondenza a questo flusso imponente di informazione, si valuta che circa un terzo della massa cerebrale sia coinvolto nei processi visivi. Se così preponderante è l'importanza che la visione riveste per il nostro sistema neurologico, è legittimo interrogarsi sulla qualità delle informazioni che da essa provengono.

Se consideriamo il primo corno del dilemma, quello per cui l'occhio umano rappresenta una meraviglia della natura, esso origina a partire dal XVII sec., quando lo studio scientifico della visione inizia a mostrare la straordinaria complessità dei fenomeni fisici e biologici che vi sono implicati, studio ancora lungi dall'essere completato. Nel XIX sec. la questione inerente all'occhio è stata al centro della querelle tra creazionisti ed evoluzionisti. Ecco due testimonianze, entrambe concordi nel magnificare la "perfezione" del sistema visivo.

Nel 1802 il teologo creazionista William Paley in *Natural Theology* scrive:

> there is to be seen, in every thing belonging to the eye and about it, an extraordinary degree of care

ed in esso vede "a miracle of design", alla stregua del meccanismo di un

orologio. Mezzo secolo più tardi, Charles Darwin cita la perfezione e la complessità dell'occhio tra le difficoltà alla sua teoria dell'evoluzione naturale:

> To suppose that the eye with all its inimitable contrivances for adjusting the focus to different distances, for admitting different amounts of light, and for the correction of spherical and chromatic aberration, could have been formed by natural selection, seems, I freely confess, absurd in the highest degree
>
> (da *On the Origin of Species*, ch. VI, *Organs of extreme perfection*, 1859).

In seguito, Darwin supererà l'impasse sviluppando la teoria del gradualismo.

D'altra parte, è lo stesso progresso scientifico e tecnologico ad accendere i riflettori sui limiti dell'occhio: man mano che progredisce la comprensione delle leggi dell'ottica (geometrica e fisica) e aumenta la capacità tecnica di produrre ottiche in vetro di qualità sempre migliore, si appalesano vari difetti delle strutture rifrattive dell'occhio, in primis le aberrazioni. L'occhio umano soffre di aberrazione sferica (la risoluzione peggiora con l'aumentare del foro pupillare) e di altre distorsioni monocromatiche tra cui astigmatismo e coma; per di più le aberrazioni cromatiche (longitudinale e trasversale) distorcono l'immagine retinica a seconda del colore di un oggetto e del diametro pupillare (colori diversi vanno a fuoco su piani diversi, tipicamente il blu davanti alla retina, il rosso dietro). Difetti che già nell'800 risultava relativamente semplice correggere ad es. in un obiettivo fotografico. In questi termini, il paragone tra l'ottica visiva e l'ottica strumentale risulta decisamente sfavorevole al "progetto occhio" elaborato dalla natura.

E' curioso notare a questo proposito che da secoli è invalso l'uso di spiegare ruolo e funzioni degli elementi costitutivi dell'occhio ricorrendo al paragone con una fotocamera: alla fine del '500 è G.B. Della Porta in *Magia Naturalis* il primo ad introdurre l'analogia tra l'occhio e una camera oscura con lente, ai tempi molto in voga per proiezioni pubbliche (anche se egli pone la sede dell'immagine nel cristallino). Oggi il paragone risulta ancora più efficace e completo con una videocamera digitale: in entrambi i casi si tratta di una "camera oscura" dove una lente proietta un'immagine capovolta del mondo esterno su una superficie sensibile alla luce. Si hanno così le sorprendenti equivalenze di *Tab. 1.*

Tab. 1 – Corrispondenze tra "componenti" del sistema visivo e di una videocamera.

Occhio	**Videocamera**
Cornea	Obiettivo fotografico (parte frontale)
Pupilla	Diaframma
Retina	Matrice CCD
Coni / Bastoncelli	Pixels CCD
Cristallino (variazione di forma)	Autofocus (traslazione di lenti)
Nervo ottico	Cavo di segnale
Corteccia cerebrale	Scheda di memoria e software di elaborazione

In *Tab. 2* sono riportati alcuni dei parametri tipici dell'occhio umano per avere elementi di raffronto con gli analoghi parametri di strumenti tecnologici. E' interessante come alcuni di essi siano assolutamente confrontabili, mentre altri decisamente discordanti (l'occhio è molto sensibile, capace di rilevare 5-9 fotoni entro 0.1 s, ma è pure molto lento; di rilievo il numero di fotorecettori in raffronto con i pixels di videocamere commerciali; la retina di forma sferica consente un amplissimo campo visivo).

Tab. 2. Valori tipici di alcuni parametri dell'occhio umano.

Lunghezza focale occhio	f=17 mm
Diametro pupilla	da 2 a 8 mm
Apertura numerica	da f/2.1 a f/8.5
Autofocus (a 20 anni)	da 10 cm a ∞
Diametro retina	D=32 mm
Numero fotorecettori	130 milioni
Numero fotorecettori a colori	6 milioni
Sensibilità ISO	da 0.25 a 60.000 ca
Tempo di risposta	0.1 s
Campo visivo	170° x 150° ca

Oltre a tali parametri andrebbero considerate le capacità di pulizia e lubrificazione autonome (film lacrimale), la possibilità di autoriparazione (epitelio corneale), la vita media di 80 anni (pur con progressivo degrado), l'alimentazione energetica molto efficiente, ecc. Tuttavia la tabella non aiuta a pervenire ad una valutazione assoluta delle proprietà dell'occhio. Come accennato, la mancata correzione delle aberrazioni costituisce un indubbio limite prestazionale. In un recente lavoro dedi-

cato a una revisione critica del progetto ottico dell'occhio (1), lo spagnolo Navarro arriva a sostenere, severamente ma non senza qualche ragione, che

> the eye presents a poor optical quality on axis…, is highly aberrated except for small pupils (<3 mm), young subjects, on-axis and under monochromatic illumination.

Praticamente, un mezzo disastro. Ma perché è così, se lo studio anatomico e funzionale dell'occhio rivela oggi un quadro complessivo di architettura e soluzioni adottate del tutto stupefacenti, inimmaginabili due secoli fa da Paley e Darwin?

Una prima giustificazione può essere prodotta in modo immediato sulla base di semplici considerazioni pratiche. Se si considerano le due aberrazioni che affliggono primariamente la prestazione visiva – aberrazione sferica e aberrazione cromatica longitudinale –, va notato che nella pratica tecnologica è possibile conseguirne l'annullamento quasi totale con l'impiego di doppietti, cioè di coppie di lenti, cementate tra loro o spaziate in aria, costituite di vetri con indici di rifrazione molto diversi, denominati *crown* (basso indice, tipicamente 1.55) e *flint* (alto indice). Con un opportuno progetto delle due lenti, si riesce ad ottenere che l'aberrazione sferica di un componente sia circa uguale ma di segno opposto a quella dell'altro, così da elidersi a vicenda, e così pure che le aberrazioni cromatiche longitudinali dei due elementi si compensino efficacemente su un ampio intervallo di lunghezze d'onda. Nel caso dell'occhio la possibilità è compromessa dall'uso, per i suoi elementi rifrattivi (cornea e cristallino), di tessuti biologici costituiti prevalentemente da polimeri organici ad alto contenuto di acqua (collagene di vari tipi); in questi materiali l'indice di rifrazione risulta molto simile a quello dell'acqua (1.333) ed il ventaglio di variabilità ottenibile mediante inclusione di altre molecole organiche è molto ridotto (tipicamente da 1.336 a 1.406).

Se ciò rappresenta un ostacolo insormontabile per quanto concerne l'aberrazione cromatica, così non è per la sferica, in quanto esistono altre modalità per correggere l'aberrazione sferica anche in elementi ottici singoli. Una possibilità è di progettare lenti con superfici che siano calotte non di una sfera bensì di un ellissoide (come un pallone da rugby), realizzando così lenti *asferiche*. Un'altra possibilità è di progettare lenti aventi indice di rifrazione non uniforme, ma con una variazio-

ne continua nel volume delle stesse, ottenendo cioè le cosiddette ottiche GRIN (GRaded INdex). Ebbene entrambe le modalità sono riscontrabili negli elementi rifrattivi dell'occhio. La superficie anteriore della cornea, che è responsabile dell'83% del potere rifrattivo totale dell'occhio, ha una superficie asferica di tipo prolata (più curva in asse che in periferia, come il pallone da rugby su una calotta lungo l'asse maggiore). Per contro il cristallino, oltre ad avere superfici pure prolate, esibisce una marcata variazione di indice sia assialmente (basso-alto-basso) che radialmente (decrescente dall'asse alla periferia). Entrambe le circostanze cooperano nella direzione di ridurre l'aberrazione sferica complessiva dell'occhio, rispetto al caso di cornea sferica e cristallino uniforme, ma non abbastanza da annullarla; una componente significativa permane, come sperimentabile da chiunque nella ridotta acuità visiva con grandi diametri pupillari (es: difficoltà di lettura con illuminazione fioca).

Per dirla con Navarro:

> the optical system of the eye seems to combine smart design principles with outstanding flaws… which contribute to deteriorate the final optical quality… Somehow, there could have been an opportunity (in the evolution) to have much better quality, but this was irreparably lost.

Ecco dunque ridefinita la questione posta nel titolo: davvero l'evoluzione avrebbe potuto scegliere un progetto migliore per l'ottica visiva? E se sì, quale sarebbe stato il vantaggio visivo e per quali plausibili motivi non è stato realizzato? Lo stesso autore citato, in un altro articolo (2), fornisce le linee guida di metodo per trovare una risposta:

> However, the brain, and not the eye, is the organ that is responsible for vision… Consequently, vision cannot be understood in terms of optics alone; on the contrary, optics serves to the neural system. Then, any explanation should necessarily consider the main neural process.

Una considerazione peraltro supportata dall'evidenza che embriologicamente l'occhio deriva da una differenziazione del sistema nervoso in fase di sviluppo.

La strada da percorrere per trovare risposta alla domanda iniziale si fa più complessa: non basta studiare la proiezione dell'immagine sulla retina e caratterizzarne le proprietà in rapporto all'oggetto che quell'immagine ha creato, occorre estendere l'analisi all'immagine *percepita*

dalla mente umana, includendo quindi il processo neuronale di interpretazione dell'immagine *proiettata*. E' l'ambito della psico-fisica che, a dispetto della sensazione di vaghezza che il nome può suscitare, è una disciplina scientifica rigorosa, volta a determinare relazioni quantitative tra una percezione soggettiva umana e lo stimolo esterno che l'ha generata. L'ipotesi di base è che il sistema percettivo umano sia assimilabile a uno strumento di misura che dà risultati (sotto forma di risposte e/o giudizi) che possono essere analizzati in modo sistematico. Ma come valutare – anche quantitativamente – questa immagine percepita, che non è accessibile all'esterno? Non c'è altra soluzione che farsela descrivere dal soggetto stesso che la percepisce.

E' quanto avviene correntemente nella diffusissima pratica di misurazione del *visus* di un soggetto, cioè di quantificazione della sua capacità visiva. La descrizione dell'immagine percepita è relativa a oggetti standard, scelti opportunamente, quali ad esempio i caratteri di una tavola optometrica. In questo caso la grandezza psico-fisica che viene misurata è l'acuità visiva (AV), cioè la capacità di risolvere spazialmente dettagli sempre più piccoli di un oggetto. La misura della AV è espressa in frazioni adimensionali (decimi in Europa, ventesimi in USA, sesti in UK), dove il valore di riferimento "1" (cioè 10 decimi) è relativo ad un angolo sotteso di 1 minuto d'arco (1/60° di grado, pari a ca. 0.3 mrad). Avere una AV di 10/10 equivale perciò a riuscire a risolvere dettagli con dimensione angolare di 1'; un valore di AV minore di 1 indica un visus inferiore, ad es. 5/10 corrisponde a una risoluzione di 2' e viceversa. Le «linee» di un ottotipo hanno caratteri di dimensione decrescente, in modo che ogni 3 linee la dimensione dimezzi, e dopo 10 linee sia ridotta a 1/10. La progressione delle linee è dunque logaritmica, non lineare (come logaritmiche sono tutte le risposte sensoriali: legge di Weber-Fechner); il rapporto dimensionale tra una linea e la successiva è costante (~1.25). Così facendo, si è considerata la grandezza psicofisica (AV) come funzione misurabile dello stimolo esterno (dimensione del carattere).

A questo punto è opportuno precisare la differenza tra *visus* e *refrazione*, due categorie d'uso corrente collegate tra loro ma spesso equivocate l'una con l'altra. Per refrazione (curiosamente, nel linguaggio medico è invalso l'uso del termine refrazione, mentre in ottica si usa rifrazione, pur condividendo entrambi la stessa radice semantica) si intende la procedura con cui si valuta il difetto ottico, ovvero si determina il potere della lente correttiva che produce il miglior risultato visi-

vo. L'emmetropia è la condizione in cui l'occhio vede al meglio delle proprie possibilità, senza bisogno di alcuna correzione. In tal caso l'immagine di un oggetto all'infinito (una stella) viene proiettata dall'ottica oculare (cornea e cristallino) esattamente sulla retina del soggetto. I difetti ottici di tipo sferico sono:

– miopia: è la condizione in cui l'immagine si forma davanti alla retina, vuoi per un'abnorme lunghezza del bulbo oculare, o per una cornea particolarmente curva. In tal caso per posizionare l'immagine sulla retina occorre utilizzare una lente correttiva divergente, caratterizzata da un potere diottrico negativo (lenti da -1, -2 , -5 D, ecc.);
– ipermetropia: è la condizione duale alla miopia: l'immagine si forma dietro la retina e la correzione impiega una lente correttiva convergente con potere diottrico positivo (lenti da +1, +2 D, ecc.).

Dunque la refrazione, misurata in diottrie, attiene all'immagine retinica proiettata mentre il visus, misurato in decimi di AV, valuta l'immagine percepita. La refrazione valuta solo l'ottica oculare, il visus l'intero sistema visivo. La relazione esistente tra le due quantità è estremamente complessa e dipende da una quantità di fattori di natura ottica, strutturale e neurofisica. Per di più la presenza di lesioni o patologie delle strutture neuro-oftalmiche può precludere ogni possibilità di inferenza da refrazione a visus: è chiaro infatti che l'emmetropia è condizione necessaria per avere un buon visus naturale (senza correzione con lenti!) ma non è condizione sufficiente, in quanto danni alla retina o al nervo ottico possono ridurre drasticamente il visus fino alla cecità.

2. Metodi

Uno strumento teorico capace, tra le altre cose, di quantificare la relazione esistente tra refrazione e visus di un soggetto neurologicamente normale, per varie situazioni di difetto visivo, è fornito dal modello CAGE-Barten, che ho sviluppato qualche anno fa (3). Più in generale il modello è in grado di quantificare le proprietà ottiche e percettive del sistema visivo umano. Come ovvio dalla digressione precedente, si tratta di un modello misto in quanto combinazione di un modello ottico di occhio (CAGE) che riproduce l'immagine retinica proiettata e di un modello neuro-fisico (Barten) che riproduce l'immagine percepita, simulando la trasduzione dello stimolo ottico in segnale elettrico (e biochimico) e la successiva elaborazione del segnale operata dalle strutture

neuronali (retina, nervo ottico, corteccia cerebrale). Mi limito ad illustrare brevemente le caratteristiche salienti del modello CAGE-Barten, giusto per agevolare la discussione dei risultati.

Modello ottico (CAGE): in letteratura si ha una vasta disponibilità di modelli ottici dell'occhio umano, con livelli di complessità e di accuratezza molto vari. Io mi sono avvalso di un modello storico ampiamente diffuso, il cosiddetto schema "esatto" di Gullstrand (4), un oculista svedese che vinse il premio Nobel per la fisiologia/medicina nel 1911 per i suoi "studi sui mezzi diottrici dell'occhio". Il modello di Gullstrand consta di 6 superfici, 2 per la cornea e 4 per il cristallino, con una zona centrale a indice più alto, per simulare il gradiente d'indice che si rileva nell'occhio umano. Per poter utilizzare il modello di Gullstrand per la riproduzione di immagini retiniche, occorre aggiungere alcune caratteristiche che ne estendano il campo di applicazione senza alterare le proprietà originarie. Tra queste, l'introduzione di superfici asferiche (tutte le interfacce dell'occhio umano lo sono) e l'introduzione della dispersione cromatica (il modello originario è monocromatico). I parametri asferici delle superfici sono stati ottenuti attraverso una complessa procedura di replicazione di immagini retiniche sperimentali (5). Un'ulteriore validazione del modello ottico è giunta dal confronto delle sue predizioni di aberrazione sferica con dati sperimentali. Il modello "potenziato" risultante è stato chiamato CAGE (Chromatic Aspherical Gullstrand Exact).

Modello psico-fisico (Barten): il nucleo del modello è derivato da quello sviluppato dall'olandese Barten negli anni '90 (6), basato sulla semplice assunzione che la risposta del sistemo visivo è quantitativamente determinata dal livello di rumore presente in esso. Il rumore, cioè la fluttuazione casuale del segnale visivo attorno al suo valor medio, è dovuto sia al flusso di fotoni incidente sulla retina (photon shot noise) che alle fotocorrenti lungo il nervo ottico, in molteplici percorsi paralleli dalla retina alla corteccia visiva. L'effetto del rumore è di stabilire una soglia sotto la quale un'immagine non può essere percepita senza un'alta probabilità d'errore (un effetto paragonabile al disturbo portato dalla nebbia all'aperto o dal flicker nell'immagine TV analogica). Il modello di Barten è concettualmente abbastanza semplice, ma la dipendenza da molte variabili (tra le quali: lo spettro dell'illuminazione, il livello di illuminanza retinica, le dimensioni spaziale e temporale dell'oggetto osservato) ne complica alquanto l'espressione analitica. Anche in questo caso il modello è stato opportunamente modificato per

risolverne alcune inconsistenze interne ed ampliarne le possibilità applicative.

I parametri numerici del modello di Barten modificato (una decina) sono stati ricavati da una procedura di best fitting di molte centinaia di dati psico-fisici tratti dalla letteratura e relativi a misura di curve di sensibilità al contrasto (CSF, Contrast Sensitiviy Function) in decine di soggetti. La rilevazione della curva CSF si basa sulla osservazione di barre sinusoidali di luminosità (*Fig. 1*) al posto di caratteri alfanumerici come nel caso di misura di AV. Tali barre sono variate in contrasto finché risultano non più percepibili dal soggetto sotto test, e la misura ripetuta variando la frequenza spaziale (spaziature tra le barre). In *Fig. 2* risulta evidente come la visibilità delle barre diminuisca col diminuire del contrasto e con l'aumentare del livello di rumore, fino ad essere preclusa del tutto. La curva CSF così ottenuta fornisce molte più informazioni della semplice misura di AV, la quale rappresenta soltanto un punto della curva CSF; inoltre l'impiego di barre sinusoidali elimina l'effetto "congettura" connesso all'uso di caratteri con un proprio livello di riconoscibilità, consentendo una misura più oggettiva. Per contro, la rilevazione della CSF risulta una procedura molto lunga e impegnativa, e solo raramente è effettuata nel corso di esami optometrici ordinari.

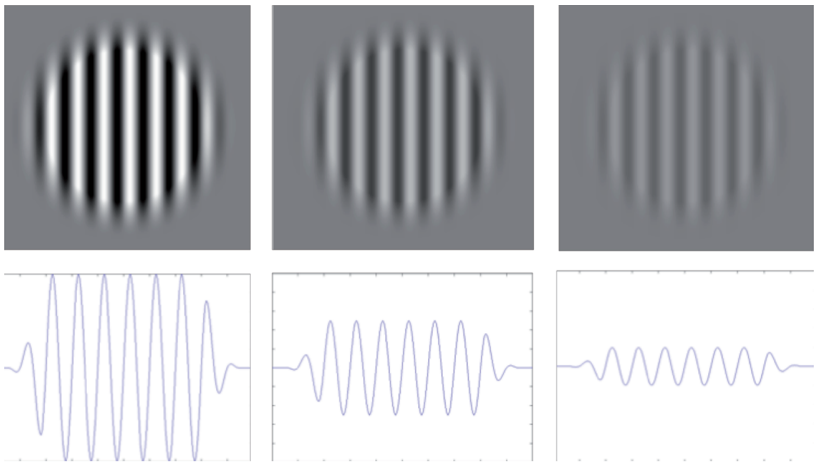


Fig. 1 – Barre sinusoidali di luminanza, a contrasto variabile. Il contrasto è definito come la variazione massima di luminanza (max – min) in rapporto alla somma delle luminanze massima e minima (max + min).
Nei tre esempi soprastanti il contrasto vale 100% (sinistra), 50% (centro) e 20% (destra).

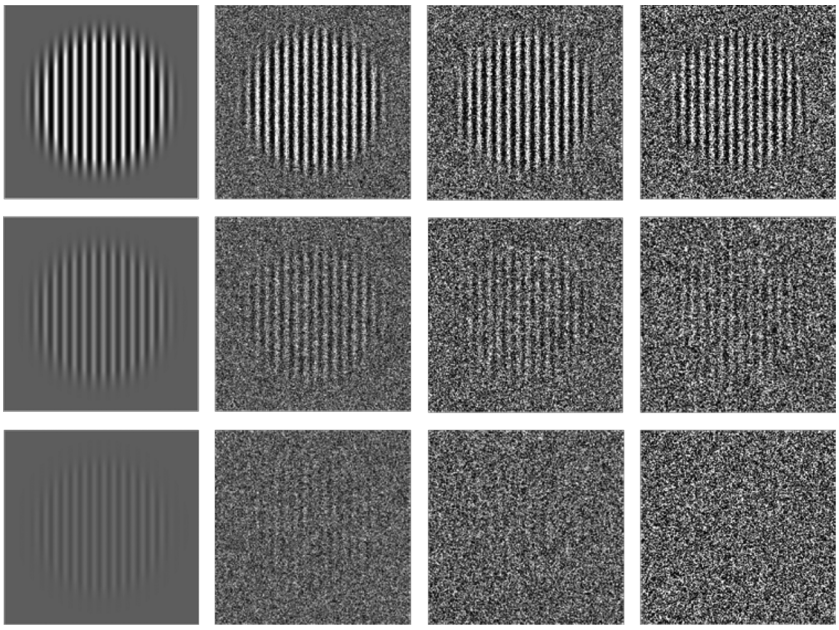


Fig. 2 – Barre sinusoidali di luminanza mostrate per diversi valori di contrasto (costante in ogni riga; dall'alto: 100%; 30% e 10%) e diversi livelli di rumore (costante in ogni colonna; da sinistra: 0; 20%; 33%; 50%). Il livello di rumore è definito come il rapporto tra il valore quadratico medio (RMS) del rumore e il valore medio del segnale di luminanza. Il rumore è discretizzato spazialmente ("pixelato") per rispettare la discretizzazione dei fotorecettori retinici.

In conclusione, il modello ottico può calcolare con accuratezza l'immagine retinica proiettata in un occhio qualsivoglia; tramite la CSF, calcolata dal modello psico-fisico per quello stesso occhio con pari accuratezza, è possibile ricostruire l'immagine percepita, cioè l'informazione visiva disponibile alla mente, dopo il processo di acquisizione ed elaborazione. Va sottolineato da ultimo che il modello CAGE-Barten è un modello puramente fisico, basato solo su una descrizione fisica dei processi neuro-ottici che hanno luogo nella visione; inoltre è deterministico e non basato su assunzioni euristiche sviluppate *ad hoc*.

3. Risultati

La *Fig. 3* mostra, a titolo dimostrativo, uno dei risultati ottenibili con il modello testé descritto: si tratta del confronto tra i valori di AV misurati sperimentalmente (barre) in una popolazione emmetrope (7), suddivisi per fasce d'età, e la predizione fornita dal modello nelle stesse condizioni ambientali della misura (linea continua). Pur trattandosi di dati non perfettamente omogenei (i dati si riferiscono ad ottotipi alfabetici, la predizione teorica è desunta dalla curva CSF), l'accordo è eccellente: la previsione del modello coincide con i valori riscontrati nella fascia d'età 18-40 anni, ovvero risulta superiore di neppure mezza linea di AV al valor medio tra 18 e 80 anni (linea tratteggiata). Per inciso il valore di AV si attesta intorno a 14/10.

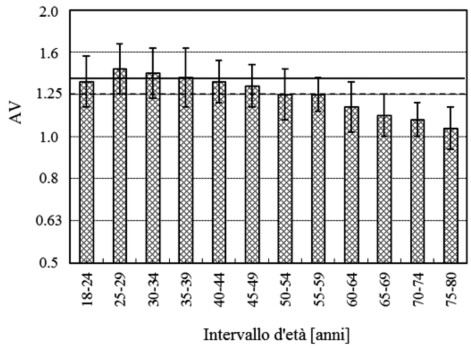


Fig. 3 – Andamento dell'acuità visiva in funzione dell'età anagrafica. Barre: dati sperimentali da Elliott et al. (7); linea tratteggiata: valor medio da 18 a 80 anni. Linea continua: previsione del modello CAGE-Barten.

Dati e simulazione di *Fig. 3* si riferiscono a una luminanza (luminosità dell'ottotipo) di 160 cd/m^2. La risposta della pupilla alla luminosità ambientale (riflesso pupillare) varia sensibilmente da individuo a individuo, sia pur entro l'intervallo obbligato di *Tab. 2* e dipende da pigmentazione dell'iride, errore refrattivo, condizioni emotive, ecc.; il modello assume un andamento medio del riflesso pupillare misurato nella popolazione. Se si graficano i valori di AV per ogni valore di luminanza ambientale, si ottiene la curva inferiore (A) di *Fig. 4*. L'asse orizzontale inferiore riporta i valori di luminanza (con scala logaritmica) mentre quello superiore indica i valori corrispondenti di diametro

pupillare medio. Per facilitare la lettura della *Fig. 4*, in *Tab. 3* sono riportati dei valori indicativi di luminanza relativi ad alcune situazioni ambientali comuni.

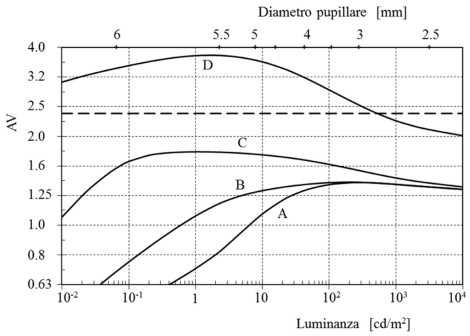


Fig. 4 – Grafico dell'acuità visiva in funzione della luminanza ambientale; lungo l'asse orizzontale superiore sono riportate le dimensioni del foro pupillare corrispondente ad ogni luminanza (valor medio). Tutte le curve sono calcolate per mezzo del modello CAGE-Barten. Curva A: occhio reale. Curva B: derivata dalla curva A senza aberrazione sferica. Curva C: derivata dalla B senza aberrazione cromatica. Curva D: derivata dalla C senza elaborazione neuronale dell'informazione visiva. Retta tratteggiata: limite massimo di acuità visiva fissato dalla densità dei coni in fovea (soglia di aliasing).

Tab. 3. Valori di luminanza corrispondenti ad alcune condizioni di illuminazione.

Ambiente	**Luminanza [cd/m²]**
Nevaio assolato	10.000
Cielo sereno con atmosfera tersa	10.000
Luna piena	3.000
Cielo nuvoloso	1.000
Cielo nuvoloso cupo	100
Interno di giorno	100
Esterno di notte	0,01
Visione fotopica (solo coni)	>3
Visione mesopica (coni + bastoncelli)	0,001 – 3
Visione scotopica (solo bastoncelli)	<0,001

La curva A di *Fig. 4* mostra che l'acuità visiva è massima attorno a 300 cd/m² e declina rapidamente col diminuire della luminanza, rimanendo superiore a 8/10 in tutto l'intervallo della visione fotopica. Il

lieve declino alle luminanze più elevate è da attribuire al fenomeno ottico della diffrazione, in corrispondenza a dimensioni pupillari molto piccole. (E' a causa della diffrazione che una lente non può concentrare un fascio di luce in un punto di dimensione zero, come pure un fascio di luce non può propagarsi perfettamente collimato, ma diverge in modo più o meno accentuato).

Una peculiarità del modello CAGE-Barten risiede nella possibilità di valutare gli effetti sulla visione di vari fattori limitanti, tra quelli citati. Ad esempio, si può modificare o addirittura annullare un'aberrazione, indipendentemente da ogni altro parametro, e calcolare la variazione risultante della prestazione visiva; è come disporre di una scatola nera provvista di manopole con cui poter variare i parametri progettuali dell'occhio, in una sorta di sfida virtuale all'evoluzione per fare di meglio! Gli unici effetti che non possono essere eliminati sono quelli legati a leggi fisiche fondamentali della natura: la diffrazione e il rumore.

La curva B di *Fig. 4* si riferisce al caso di un occhio totalmente privo di aberrazione sferica, un risultato in linea di principio alla portata della chirurgia fotorefrattiva corneale. Per luminanze maggiori di 100 cd/m^2 le curve A e B sono indistinguibili, in conseguenza del fatto che per piccoli diametri pupillari l'aberrazione sferica dell'occhio è trascurabile. Le due curve si discostano al di sotto di 100 cd/m^2, con un vantaggio di prestazione che cresce col diminuire della luminanza, fino a due linee di AV (vale a dire due righe di un ottotipo alfabetico) in condizioni di penombra (1 cd/m^2). La curva B di fatto preclude ogni possibilità di migliorare la massima acuità visiva con un rimodellamento della superficie corneale.

Il secondo passo è naturalmente di azzerare anche l'aberrazione cromatica longitudinale, in aggiunta all'aberrazione sferica, un traguardo peraltro quasi irrealizzabile su un occhio reale mediante correzione ottica (lenti), se non per un solo angolo di vista. Il risultato è rappresentato dalla curva C di *Fig. 4*. In queste condizioni il miglioramento è più marcato e risulta apprezzabile già attorno a 1000 cd/m^2; per di più l'AV raggiunge un massimo, più alto, di circa 18/10 a 1 cd/m^2.

Il terzo e ultimo passo comporta un intervento non sull'ottica dell'occhio ma sull'elaborazione del segnale visivo svolta dalle varie strutture neuronali; si tratta di escludere ogni tipo di elaborazione parallela e in tempo reale dell'immagine retinica e di riferirsi semplicemente ai dati grezzi acquisiti dai fotorecettori. Rimuovendo dal modello questa attività neuronale, si ottiene la curva D di *Fig. 4*. In tal

caso l'aumento di prestazione visiva è strabiliante: il massimo di AV sfiora i 40/10 in condizioni mesopiche (2 cd/m^2), e anche a luminanze elevate rimane sopra i 20/10, con un vantaggio teorico tra 2 e 7 linee di AV. Va subito detto che una tale prestazione visiva sarebbe solo virtuale: infatti la densità di coni nella parte centrale della retina limita necessariamente la AV a non superare i 24/10 (v. curva tratteggiata di *Fig. 4*). Ogni punto al di sopra di tale limite incorre nel cosiddetto fenomeno di "aliasing", un artefatto per cui qualche cosa di falso viene percepito in conseguenza del fatto che il segnale risulta discretizzato con meno risoluzione di quanto imposto dal teorema del campionamento (l'esempio equivalente più comune, nel dominio temporale, è l'effetto "ruote del carro", che, in una visualizzazione TV o cinematografica, possono essere viste ruotare in verso opposto al normale senso di avanzamento). Per supportare un'effettiva AV di 40/10 sarebbe necessaria una densità di coni tripla.

4. Discussione

Il confronto tra le curve A e D di *Fig. 4*, vale a dire tra prestazione visiva reale e potenziale, sembra indicare un difetto piuttosto grossolano del sistema visivo umano così come prodotto dall'evoluzione naturale. Infatti il sacrificio di svariate linee di AV sembra rappresentare un errore di progettazione, per la presenza non solo di aberrazioni non corrette (almeno non completamente), ma anche di scelte funzionali opinabili, quale il processamento parallelo e in tempo reale dell'informazione visiva.

Ma… è proprio qui che risiede lo snodo della questione.

La visione è un processo straordinariamente complesso, al di là di quanto ci si possa rendere conto. Abituati come si è ad una valutazione funzionale della propria prestazione visiva fondata in buona misura sulla misura dell'AV e poco più (campo visivo, test cromatico, sensibilità al contrasto), si tende ad enfatizzare l'importanza dell'AV, da vicino e da lontano, come indicatore principe della "bontà" dei propri occhi. Dal punto di vista operativo è certamente così: l'AV deve servire da parametro di riferimento assoluto per la correzione con lenti dei difetti di refrazione e la conseguente valutazione del visus ottenibile. E' abbastanza chiaro che un deficit significativo dal livello "normale" di 10/10 presuppone la presenza di qualche anoma-

lia oculare. Diverso è il caso quando si discute, come qui, di valutazione teorica del sistema visivo.

In questo contesto più ampio, va detto che l'AV è semplicemente uno dei tanti aspetti della visione, non l'unico e forse nemmeno il più importante di tutti. Fondamentalmente, il sistema visivo umano fornisce al cervello immagini del mondo circostante ad un ritmo di diversi "quadri" al secondo (in analogia con l'immagine TV o cinematografica), un ritmo che si accorda con i tempi di risposta tipici dell'apparato muscolo-scheletrico dell'uomo. Per un'interazione efficace con l'ambiente, tale informazione visiva deve essere analizzata in modo approfondito e immediato: per prendere decisioni tempestive, come fuggire da un pericolo, non c'è possibilità di post-elaborazione.

A questo scopo il sistema visivo scompone l'immagine proiettata sulla retina in un gran numero di frammenti di informazione a basso livello, che sono inviati ad aree diverse della corteccia visiva, ciascuna specializzata ad estrarre specifici aspetti elementari dall'immagine osservata. Tra questi: orientazione, dimensione, contorno, movimento, velocità, distanza, profondità, trama superficiale, colore, contrasto, ecc.; per ciascuna di queste caratteristiche il sistema visivo è poi particolarmente efficace nel rilevare variazioni temporali piuttosto che condizioni stazionarie, e quindi l'attenzione è maggiormente attirata dai cambiamenti di orientazione, dimensione, velocità, ecc. Il meccanismo con cui l'immagine retinica è frazionata e convogliata in una miriade di canali paralleli è la somma/sottrazione di informazioni provenienti da diverse porzioni dell'immagine e il successivo confronto degli output. Elementi base di questa scomposizione sono i neuroni del sistema visivo, in cui il segnale di uscita dipende dalla somma algebrica dei segnali in ingresso: quelli eccitatori col segno positivo, quelli inibitori col segno negativo, con coefficienti di peso assegnati ai diversi ingressi. Una forma tipica della distribuzione dei segnali afferenti a un neurone contempla una zona centrale eccitatoria e una periferia inibitoria, ma è presente anche la versione duale; la simmetria può essere circolare o elongata lineare; la dimensione spaziale del dominio degli ingressi (campo ricettivo) è estremamente variabile da neurone a neurone (8). Questa architettura di suddivisione e ricombinazione del segnale è ripetuta in tutti gli strati neuronali, lungo l'intero percorso visivo dalla retina fino alla corteccia, con diverse forme, dimensioni e polarità dei campi ricettivi coinvolti.

Il processo sottrattivo descritto, denominato inibizione laterale,

produce una quantità di effetti; il più semplice forse da comprendere è l'esaltazione dei contorni spaziali che esso comporta, quale risultato della maggiore amplificazione del segnale in corrispondenza a discontinuità di luminanza rispetto a punti di luminanza costante (equivalente ad un derivatore spaziale, o ad un filtro passa-alto). Le conseguenze di questa architettura funzionale sono varie: la distorsione dell'immagine percepita rispetto all'immagine proiettata sulla retina; il filtraggio delle frequenze spaziali contenute nell'immagine con una riduzione della risoluzione spaziale (minore AV); l'apporto di rumore elettrico per il trasporto del segnale lungo molteplici canali in parallelo, a causa di fluttuazioni casuali in ciascun canale.

L'esistenza stessa di aree di corteccia visiva specializzate nell'estrazione di specifiche informazioni dall'immagine retinica dimostra che il sistema visivo umano si è evoluto per esaminare, analizzare e predire le visualizzazioni più rilevanti e ricorrenti nella vita di ogni giorno, facilitando compiti decisivi per la sopravvivenza come riconoscere gli amici dai nemici, scoprire i frutti maturi, riconoscere i predatori e le prede, valutare distanza e velocità dei bersagli, prevedere la traiettoria di oggetti e così via. L'analisi estremamente complessa svolta dalla rete neuronale visiva si traduce in abilità straordinarie e spesso sottovalutate, una per tutte la capacità di riconoscere i volti molto rapidamente e da solo pochi dettagli, nonché di decodificare le espressioni e perfino gli umori da qualche impercettibile traccia su un volto. Così è dimostrato che esistono aree neuronali specifiche dedicate alla codifica dei volti, delle loro identità ed espressioni (9); al punto che lesioni in tali aree possono portare all'incapacità di riconoscere volti familiari e/o le loro espressioni (prosopoagnosia). Queste medesime capacità sono anche alla base delle illusioni ottiche, che si verificano ogniqualvolta il sistema visivo è stimolato da scene innaturali e da contesti ingannevoli.

Non è possibile quantificare il guadagno in prestazione visiva derivante dallo sviluppo di tutte queste abilità, sì da contrapporlo alla corrispondente perdita di AV testimoniata dalla *Fig. 4*. Si può soltanto paragonare la procedura neuronale di tipo parallelo con una procedura seriale che preservi la massima risoluzione dell'immagine acquisita, ad esempio per il riconoscimento di un volto. In questo caso, in analogia con quanto avviene nell'elaborazione informatica, la sequenza di passi sarebbe: 1: immagine proiettata. 2: immagine acquisita ad alta risoluzione. 3: estrazione dei parametri identificativi significativi. 4: confronto

dei parametri individuati con il data base dei volti noti. 5: riconoscimento del volto osservato. Nel caso del sistema visivo, i passi 2-3-4 sono svolti simultaneamente lavorando su un'immagine acquisita a risoluzione inferiore, con evidente risparmio di tempo.

E' possibile invece quantificare, sia pure grossolanamente, il vantaggio derivante dall'adozione di una visione tricromatica, pur con penalizzazione in AV, rispetto a un'opzione puramente monocromatica. Con riferimento di nuovo alla *Fig. 4*, si è detto che la curva C rappresenta la prestazione in AV di un occhio corretto per aberrazione cromatica longitudinale (oltre che per aberrazione sferica). Di fatto, la stessa curva può essere vista come descrittiva della prestazione di un occhio umano virtuale avente un solo fotopigmento al posto dei tre spettralmente distinti che contraddistinguono l'occhio umano reale. Cioè un occhio monocromatico, in cui la rappresentazione del mondo esterno sarebbe solo in gradazioni di grigio. Un sistema visivo molto simile a quello di molti animali, infatti la curva C di *Fig. 4*, con il picco di AV in condizioni di forte penombra, sembra tipico di predatori notturni quali felini e rapaci. Ora stanti le abitudini prettamente diurne dell'uomo cacciatore-raccoglitore – e di tutti i primati prima di lui – la scelta evolutiva è stata di privilegiare le prestazioni fotopiche del sistema visivo a scapito di una perdita di una-due linee di AV in condizioni mesopiche. Il vantaggio di una visione a colori è dato dalla capacità di discriminare qualche milione di colori differenti a fronte di qualche centinaio di livelli di grigio per una visione monocromatica. Questo guadagno (naturalmente al costo anche di una rete neuronale più grande per gestire l'informazione cromatica) indica che la *Fig. 4* è sostanzialmente ingannevole: descrive infatti solo una prestazione di luminanza, dato che i test optometrici, caratteri o barre sinusoidali, sono monocromatici (bianco/nero/grigio). In realtà una metrica opportuna della prestazione visiva a colori richiede altri due parametri, tinta e saturazione, oltre alla luminanza; di conseguenza, la *Fig. 4* rappresenta solo la proiezione sul piano della luminanza di un grafico intrinsicamente quadridimensionale (AV vs. luminanza, tinta, saturazione). E il numero di dimensioni aumenta vertiginosamente quando si considerino tutti i parametri (dimensione, velocità, ecc.) a cui il sistema visivo applica la propria elaborazione.

Ritornando alla curva A di *Fig. 4* (comportamento di un occhio reale), la presunta "modesta" prestazione va riconsiderata alla luce delle opzioni evolutive di visione cromatica ed elaborazione parallela

dell'informazione visiva. In questa prospettiva emerge con chiarezza che l'occhio risulta ben corretto dall'aberrazione sferica per tutte le condizioni di illuminazione diurna, dall'alba al tramonto (pupilla ≤ 4 mm), garantendo una prestazione quasi perfetta (*diffraction limited*). In questo intervallo di luminanza, l'aberrazione cromatica, indubbiamente legata ad una difficoltà progettuale relativa ai materiali delle ottiche rifrattive, rimane contenuta entro livelli modesti. Il progressivo deterioramento di prestazione al diminuire della luminosità è funzionale all'esigenza di disporre di un'elevata AV esclusivamente nel corso del dì, lasciando per i momenti di penombra una visione più modesta e per il buio un semplice sistema visivo di allerta e non di riconoscimento vero e proprio.

In conclusione, l'occhio appare come il punto di arrivo di un sofisticatissimo processo evolutivo volto a ottimizzare le prestazioni finalizzate a precise attività in condizioni ben definite. In questo senso non è sostenibile la tesi di Navarro per cui l'evoluzione avrebbe perso l'opportunità di fornire all'uomo una qualità visiva molto migliore. No, l'evoluzione ha prodotto il sistema visivo più *utile* all'uomo nel contesto in cui egli e i suoi antenati si sono evoluti in milioni di anni. Basti pensare allo sforzo non banale operato per correggere l'aberrazione sferica con superfici asferiche e un cristallino a gradiente d'indice: davvero un'autentica meraviglia della natura, anche se l'effetto è limitato all'ambito della visione fotopica. I difetti della visione umana risultano riscontrabili soprattutto in condizioni di ridotta illuminazione: evidentemente l'evoluzione non si è ancora accorta che da qualche millennio l'uomo dispone di illuminazione artificiale per interni! (Per contro noi abbiamo accelerato l'evoluzione con l'adozione di abitudini dannose quale l'iperstimolazione dello sforzo accomodativo fin dalla tenera età, che ha portato alla proliferazione della miopia nella popolazione scolarizzata, sviluppando una specie di "homo miopicus"). La visione umana dunque non è stata progettata per la discriminazione di stelle doppie o per la lettura in penombra di pagine stampate, ma per agevolare l'esecuzione di tutte le attività più necessarie alla sopravvivenza quotidiana: caccia, raccolta, riconoscimento di amici e nemici, interpretazione di espressioni, individuazione di pericoli, ecc. A tal fine il sistema visivo non è un semplice registratore di immagini della realtà circostante (come la videocamera di una Google car), ma uno strumento di interpretazione e predizione dell'ambiente secondo canoni predefiniti; lo dimostra la pervicace con-

vinzione di vedere triangoli nel disegno di *Fig. 5*, laddove non ne è presente nemmeno uno. Forse anche questo da annoverare tra i "difetti" dell'occhio?

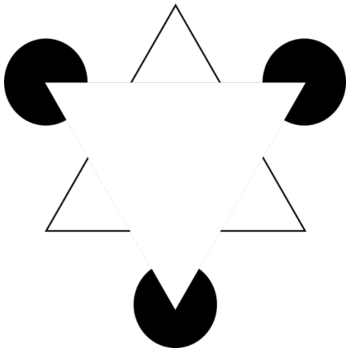


Fig. 5 – Illusione ottica: quanti sono i triangoli, 1, 2, 8,…?

BIBLIOGRAFIA

1. Navarro, R. The Optical Design of the Human Eye: a Critical Review. *J Optom*, 2009: 2: 3-18.
2. Navarro, R. Aberrations of the Eye – Crude Flaws or Ecological Design? Reply to P.B. Kruger, *J Optom*, 2009: 2: 163-164.
3. Gobbi, PG. *Modeling the Optical and Visual Performance of the Human Eye*. SPIE Press, Bellingham, 2013.
4. Gullstrand, A. *The optical system of the eye*. In: *Helmholtz's Treatise on Physiological Optics*, Vol. I, Appendix 11.3. Southall, JPC, ed., The Optical Society of America, 1924.
5. Campbell, FW, Gubisch, RW. Optical Quality of the Human Eye. *J Physiol*, 1966: 186: 558-578.
6. Barten, PGJ. *Contrast Sensitivity of the Human Eye and Its Effects on Image Quality*. SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, 1999.
7. Elliott, DB, Yang, KCH, Whitaker, D. Visual Acuity Changes Throughout Adulthood in Normal, Healthy Eyes: Seeing Beyond 6/6. *Optom Vis Sci*, 1995: 72: 186-191.
8. Hubel, DH, Wiesel, TN. Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex. *J Physiol*, 1962: 160: 106-154.
9. Snowden, R, Thompson, P, Troscianko, T. *Basic Vision: An introduction to visual perception*. Oxford University Press, Oxford, 2006.

Istituto Lombardo (Rend. Scienze) 149, 125-130 (2015)

LE PIANTE SONO DESTRE O MANCINE?

Nota del s.c. CARLO SOAVE (*)

(Adunanza del 25 giugno 2015)

SUNTO. – Tutte le piante presentano movimenti oscillatori degli organi in crescita denominati "circumnutazione". Sono movimenti che, associati all'allungamento, descrivono nello spazio spirali circolari. In *Arabidopsis thaliana* il senso di rotazione della circumnutazione è destrorso ed è geneticamente determinato da un singolo gene con due alleli: l'allele "destrorso" dominante sull'allele "sinistrorso". Lo stesso avviene in *Zea mays* dove ancora un singolo gene controlla la spiralizzazione destrorsa o sinistrorsa dei semi sulla spiga. Inoltre è stato possibile determinare che la specificazione dell'asimmetria destra/sinistra dipende in *Zea mays* dalla determinazione dell'asse antero-posteriore della spiga.

***

ABSTRACT. – Circumnutation is an oscillating movement of a growing plant organ that results from an endogenous rhythmic process intrinsic to growth. Circumnutating organs, as they extend, describe a helical trace. In *Arabidopsis thaliana* circumnutation is particularly evident in primary roots and occurs, as in most plants, in a right-handed direction. In *A. thaliana* the direction of circumnutation depends on the presence of a single gene with the right-handed allele dominant over the left -handed, as in *Zea mays* where again a single gene controls the left or right spiralization of the kernels on the ear. Furthermore we demonstrate that the specification of the left/right asymmetry is dependent on the establishement of the antero-posterior axis on the ear.

Le piante, a differenza degli animali, non vanno in giro per il mondo, a meno che qualcuno le porti. Ma, proprio perchè sono abbar-

(*) Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere; Università degli Studi di Milano, Italy. E-mail: carlo.soave@unimi.it

bicate al terreno hanno sviluppato la capacità di operare numerosi movimenti che permettono di adattarsi alle varie condizioni ambientali. Sentono la direzione della forza di gravità per cui le radici crescono verso il basso e gli apici vegetativi verso l'alto, seguono il movimento del sole e fuggono dall'ombra. Ma c'è un altro movimento che Charles Darwin, nel volume "The power of movement in plants" scritto insieme al figlio Francis e pubblicato nel 1880 da John Murray (London), chiama *circumnutation* (circumnutazione) [1]. Ecco come Darwin descrive questo movimento: "Se noi guardiamo un apice vegetativo di una pianta quando emerge dal terreno, vedremo che all'inizio esso piega verso nord, poi gradualmente si volge a est e poi a sud, a ovest e infine ancora a nord. Se il movimento è stato regolare, l'apice avrà descritto un cerchio, ma siccome contemporaneamente cresce verso l'alto, più che un cerchio sarà una spirale circolare. Questo movimento è stato chiamato da Sachs "revolving nutation", ma noi troviamo più conveniente denominarlo "*circumnutation*".

Tutte le piante (e non solo le piante, ma anche i funghi, le alghe e alcuni batteri coloniali) durante la fase di crescita "circumnutano", sia a livello dell'apice vegetativo che a livello dell'apice radicale e questo movimento serve a esplorare l'ambiente in cui si trovano. Per esempio, nelle piante rampicanti la circumnutazione fà sì che i viticci trovino l'appoggio solido attorno al quale avvolgersi. Perchè ci sia circumnutazione deve esserci obbligatoriamente crescita in quanto il movimento oscillatorio è intrinsecamente dipendente dall'allungamento cellulare. Una cellula vegetale aumenta le sue dimensioni principalmente per distensione secondo l'asse longitudinale della cellula. Questo avviene perchè essa è ricoperta da una parete formata da fibre di cellulosa disposte in spire che avvolgono la cellula trasversalmente all'asse longitudinale. Ne consegue che la pressione idrostatica presente all'interno della cellula è contrastata in senso radiale dai legami covalenti, molto forti, tra i monomeri della cellulosa, mentre in senso longitudinale è contrastata dai legami idrogeno, più deboli, che tengono unite le spire una sopra l'altra: la conseguenza è che fino a che c'è sufficiente pressione idrostatica interna, la cellula si allunga. Se l'allungamento fosse identico su tutti i fianchi dell'organo in crescita, avremmo una crescita diritta, ma se l'allungamento fosse più elevato per esempio sul lato destro, allora l'organo piegherebbe a sinistra; viceversa per un allungamento più elevato sul lato sinistro. Nella circumnutazione la zona di allungamento più attiva si muove di continuo in modo circolare su un piano

trasversale attorno all'asse di crescita dell'organo e, di conseguenza, la combinazione dei due movimenti genera una spirale circolare. Guardando dal retro nella direzione dell'asse di crescita, la direzione del movimento circolare può essere destrorsa o sinistrorsa, ma nella maggioranza delle piante essa è destrorsa come la direzione di una vite che si avvita [2].

Arabidopsis thaliana è una piccolissima crucifera che da qualche anno è diventata la pianta modello per gli studi di genetica vegetale per il suo breve ciclo vitale (due mesi), l'abbondante produzione di semi, la facilità di coltivazione in laboratorio e il suo genoma, piccolo e completamente sequenziato. Essa però è una pianta completa e, come tutte le altre piante, circumnuta. Il senso di rotazione della radice primaria si può facilmente evidenziare facendo crescere *A. thaliana* in agar supplementato con sali minerali in piastre Petri. Quando la radice, crescendo verso il basso, tocca il fondo della piastra, l'allungamento gravitropico è impedito, il passo della spirale si accorcia e si formano cerchi concentrici. E' facile allora vedere che il senso di rotazione è destrorso. (*Fig. 1*).

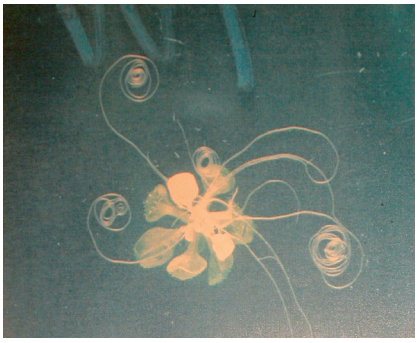


Fig. 1 – Circumnutazione nella radice di A. thaliana.

In natura esistono evidenze che il senso di rotazione destrorso o sinistrorso è geneticamente determinato. Nella chiocciola di acqua dolce *Limnea peregra* per esempio ci sono esemplari con avvolgimento destrorso o sinistrorso del guscio e il senso di avvolgimento è determinato da un singolo gene con due alleli la cui espressione è controllata per via materna. In *A. thaliana* non esistono evidenze al riguardo. Tuttavia in una popolazione di piantine sottoposte a un trattamento mutageno con etilmetansulfonato è emerso un individuo in cui la circumnutazione radicale appariva sinistrorsa invece che destrorsa (*Fig. 2*). Nella prima genera-

zione filiale dell'incrocio tra una pianta con circumnutazione destrorsa e una sinistrorsa, tutta la progenie appariva destrorsa e, nella progenie dopo autofecondazione della prima generazione filiale (seconda generazione) si trovavano piante con circumnutazione destrorsa e sinistrorsa in rapporti numerici significativamente non diversi da 3 a 1. Ulteriori esperimenti di reincrocio della prima generazione filiale con piante parentali o incroci reciproci (piante destrorse o sinistrorse utilizzate come donatore di polline) dimostravano che il carattere rotazione dell'apice radicale (e anche dell'apice vegetativo) si comportava in *A. thaliana* in modo perfettamente mendeliano, cioè un singolo gene con due stati possibili (alleli) controlla il senso di rotazione: l'allele destrorso, dominante, induce rotazione destrorsa, l'allele sinistrorso rotazione nel senso opposto.

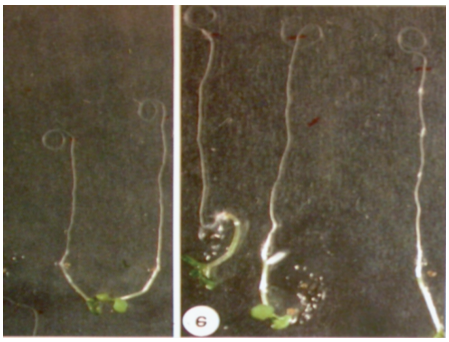


Fig. 2 – Circumnutazione sinistrorsa e destrorsa della radice di piante di A. thaliana *allevate sulla superficie di piastre di agar.*

Il problema biologico di fondo comunque è da dove la pianta trae l'informazione per individuare il lato destro rispetto al sinistro. Indicazioni al proposito vengono da studi sugli animali dotati di simmetria bilaterale. Questi animali hanno tre assi corporei: un asse anteroposteriore, un asse dorso-ventrale e un asse sinistro-destro. La questione centrale è quando e dove viene specificato e determinato l'asse sinistro-destro e sopratutto se la sua determinazione sia dipendente o indipendente dalla determinazione degli altri due assi. Nel primo caso se l'orientamento di un asse cambia, anche l'orientamento degli altri due assi dovrebbe modificarsi; nel caso di indipendenza invece l'orientamento di uno degli assi dovrebbe essere disaccoppiato dall'orientamento degli altri assi. Evidenze al proposito esistono nel riccio di mare *Litechinus variegatus*: durante lo sviluppo embrionale della larva di *L.*

variegatus è possibile infatti revertire sperimentalmente l'orientamento dell'asse dorso-ventrale e in conseguenza di questa reversione si osserva reversione anche dell'asse sinistro-destro [3]. Questo risultato dimostra che l'asimmetria dell'asse sinistro-destro è specificata rispetto all'asse dorso-ventrale.



Fig. 3 – Ranghi sinistrorsi e destrorsi in spighe di mais.

Questo esperimento non è replicabile in *A. thaliana* in quanto non si evidenzia nella radice (e neppure nella pianta intera) un asse dorso-ventrale: l'unico asse riconoscibile è quello apice radicale-apice vegetativo e, al momento, non ci è noto nessun approccio sperimentale che possa cambiarne l'orientamento. Un'alternativa è offerta dalla pianta di mais *Zea mays,* dove nella spiga esiste un asse antero-posteriore evidenziato dal fatto che l'embrione di tutti i semi posti sulla spiga è rivolto verso l'apice. Esiste inoltre una mutazione, denominata *reversed germ orientation* (*rgo*), in cui l'orientamento dell'embrione è opposto, è rivolto verso la base della spiga e non verso l'apice. Inoltre nella collezione di linee pure di mais conservate presso la sezione di maiscoltura (Stezzano, Bergamo) dell'Istituto Sperimentale per la Ceralicoltura, sono state trovate due spighe in cui i ranghi dei semi sono disposti in spirale rispettivamente destrorsa e sinistrorsa (*Fig. 3*). Anche in questo caso l'incrocio tra la linea con ranghi destrorsi e quella con ranghi sinistrorsi ha prodotto spighe della prima generazione tutte con spirale destrorsa e, nella generazione successiva, si è osservata una segregazione di spighe destrorse *vs* spighe sinistrorse in rapporto 3:1. Il risultato è quello atteso per un singolo gene che controlla la spiralizzazione con due stati allelici, destrorso dominante su sinistrorso, come in *A. thaliana.* A questo punto è possibile ripetere in mais l'esperimento di Mc

Cain e Mc Clay [3] su *L. variegatus* e cioè verificare se la specificazione dell'asse sinistro-destro nella spiga di mais è dipendente dalla determinazione dell'asse antero-posteriore della spiga. Infatti se, tramite successivi incroci, spighe a spirale destrorsa sono introgredite in un background genetico *reversed germ orientation* (e quindi ribaltando l'asse antero-posteriore), le nuove spighe *rgo* presentano spirale sinistrorsa. L'opposto si verifica se spighe sinistrorse sono introgredite in background genetico con normale orientamento dell'asse antero-posteriore.

Si è dimostrato così che anche in una specie vegetale la specificazione di uno degli assi del corpo non è indipendente dalla specificazione di almeno un altro degli assi corporei.

BIBLIOGRAFIA

1. Darwin CA, Darwin F, *The Power of Movement in Plants*, John Murray, London,1880.
2. Baillaud L, Les mouvements d'exploration et d'enroulement des plantes volubiles, in: *Encyclopedia of plant physiology, vol XVII; Physiology of movements, part 2*, Ruhland H, ed. Springer, pp 637-715 Berlin, 1962.
3. McCain ER, McClay DR, The establishment of bilateral asymmetry in sea urchin embryos, *Development* 1994:120: 395-404.

Istituto Lombardo (Rend. Scienze) 149, 131-141 (2015)

LA STRAGE EVITABILE DEL GERMANWINGS

Nota del s.c. VITTORINO ANDREOLI (*)

(Adunanza dell'8 ottobre 2015)

SUNTO. – Un co-pilota del volo Barcellona-Dusseldorf, rimasto solo in cabina perché il comandante si reca in toilette, si blocca dentro e attua il progetto premeditato di sbattere contro una parete dei Pirenei, portando a morte se stesso e 149 passeggeri. Il caso viene analizzato dallo psichiatra, leggendo la tragedia come espressione di un delirio di grandezza, che caratterizza la fase maniacale di un Disturbo Bipolare, Mostrando come pensare di avere in mano il destino di quelle persone, riporti alla condizione titanica di onnipotenza e allo stesso tempo ponendo la propria morte come condizione eroica per passare alla Storia. Un disturbo di cui soffriva da anni e che la Compagnia aerea ha ignorato.

***

ABSTRACT. – A co-pilot on the Barcellona-Dusseldorf fly, left alone in the cabin when the pilot went to the toilet, locked himself inside the pilots cabin and put into action a premeditatet plan of smashing into the side of the Pyrenees leading to rhe death of himself and 149 passengers. The case will be analyse by the psychiatrist, reading the tragedy as an expression of a delirium of greatness, which characterises the manic phase of a Bipolar Disorder. It shows how thinking that he had the destiny of those people in his hands brought about a titanic condition of omnipotence and at the same time the consideration that his own death would be heroic act that would go down in history. A disorder he had suffered for years and which the airline ignored.

(*) Psichiatra e scrittore, Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere, Milano, Italy, New York Academy of Sciences, USA.
E-mail: andreoli.vittorino@gmail.com

Preambolo

Mi occupo di matti, termine che uso con molto affetto. Generalmente i matti, i miei matti, quelli a cui sono molto legato, li conosco personalmente.

Il compito che mi è stato affidato è difficile, perché si tratta di un evento di una gravità enorme, compiuto da un uomo di cui ho potuto avere molte notizie, anche da colleghi tedeschi, ma manca la mia diretta conoscenza, e per uno psichiatra la relazione con la persona (il paziente) è essenziale per darne una valutazione precisa.

Ma prima di entrare nel caso, voglio aggiungere un'altra considerazione preliminare: il fatto è accaduto il 24 marzo di quest'anno (2015) ed eravamo tutti caduti in un vero stato di angoscia, perché si è trattato di una tragedia vera e propria.

Oggi non si rappresentano più le tragedie greche di Sofocle o di Euripide, ma questa lo è certamente se solo si ricorda che portò a morte 150 persone.

La considerazione riguarda la capacità che ha la nostra società di consumare le notizie: ho potuto constatare che ormai si tratta di un fatto così lontano che è come se non fosse accaduto. Colpisce la capacità che abbiamo di consumare le tragedie: un po' perché ogni giorno ne presenta una nuova, ma soprattutto per la capacità a trasformare rapidamente in banale anche dei fatti che sono molto importanti.

Questo atteggiamento non è certo quello dell'Istituto Lombardo che, pur passati alcuni mesi, ha deciso di ripensare, di riconsiderare un comportamento che ha a che fare con l'Uomo, che rimane il protagonista di questa tragedia (umana appunto).

Il fatto

Non è inutile dedicare qualche minuto per rievocarlo.

La scena si svolge il 24 marzo su un aereo della Germanwings, una società di volo che la Lufthansa acquista nel 2009 per entrare nel settore dei voli low cost, e dunque in una cultura che premia sempre più il volare con poco, il che equivale il volare per tutti. Molte Compagnie di gran nome e di grande importanza hanno acquisito società minori per essere presenti in questo promettente mercato.

Non voglio trattare il tema dei voli ordinari economicamente,

rispetto ai low cost, però devo fare un cenno sulle modalità con cui, per esempio, il personale opera in queste due diverse aree dell'economia del volo.

Le ore di volo giornaliere medie di un comandante dei low cost sono 11 e 12 minuti, mentre in una compagnia di linea, arrivano in genere a 9 ore e qualche minuto e giorni di lavoro sono alternati da giornate di riposo.

E' inoltre difficile prevedere il tempo di attività in una giornata, perché dipende dal traffico, dai turni, dalla disponibilità delle squadre di riserva.

Non c'è dubbio che l'economia dei low cost è possibile proprio per i ridotti costi del personale, ed è questa una cornice che va delineata, anche se noi parleremo in particolare del protagonista di questa tragedia, di un co-pilota, il "primo ufficiale", di un ruolo che prevede la responsabilità di gestire da solo l'aereo in assenza del comandante dalla cabina.

Il co-pilota in questo caso aveva accumulato solo 630 ore di volo: sono poche anche perché, come sappiamo, tutta la preparazione avviene a terra.

Anche in Italia, a Fiumicino c'è un grande ambiente per l'addestramento (a terra dunque) dei piloti, a cui ho avuto occasione di partecipare per un certo numero di volte, alcuni anni fa, quando erano in discussione le modalità di addestramento.

Il comandante dell'aereo invece di ore di volo ne aveva circa settemila, una dimensione notevolmente diversa.

Le compagnie low cost - anche questo è un dato generale - spesso prendono dei primi ufficiali, come si trattasse di rispettare una norma burocratica, e non sono molto attenti sulla loro preparazione, almeno non come lo sono le Compagnie nella scelta di ufficiali per voli di linea. E questo è un tema che va tenuto presente, sia pure in senso generale, perché altrimenti non capiremo bene l'accaduto.

Passiamo ora al 24 marzo e a quel volo della Germanwings, il 9525.

In cabina ci sono il comandante e il primo ufficiale, che quel giorno sono responsabili di un volo Düsseldorf-Barcellona.

Come avviene sovente, giunta a Barcellona la squadra ha un periodo di attesa, e poi opera sulla rotta inversa Barcellona-Düsseldorf.

Durante il volo da Düsseldorf, che parte alle 7.01 e arriva a Barcellona alle 8.57, all'andata dunque, il copilota ha avuto alcuni

momenti di responsabilità totale di guida di quell'aereo, e analizzando bene le registrazioni della scatola nera avrebbe fatto un tentativo di calo di quota rapido e ingiustificato.

Il fatto lo si attribuì alla sua non grande esperienza, essendo lui relativamente giovane, e quindi non gli si diede grande importanza.

L'aereo arriva alle 8.57 a Barcellona, quindi riparte per Düsseldorf un po' in ritardo. Decolla infatti alle 10.01. L'arrivo a Düsseldorf è previsto per le 11.55. Alle 10.27 l'aereo, un Airbus A320-200 denominato Mannheim (in volo dal 29 novembre 1990 e consegnato alla Lufthansa il 5 febbraio 1991), raggiunge la quota di crociera, 11400 metri, con una velocità di 870 km all'ora.

Sull'aereo ci sono 145 passeggeri, tra cui una classe di scolari in gita premio. L'equipaggio è formato da 5 persone.

Ore 10.30: arrivato in quella che comunemente è chiamata la condizione di crociera, il comandante si alza e passa la responsabilità del volo al copilota perché deve andare in toilette.

Certo non si possono discutere i bisogni fisiologici, però, appena 30 minuti dal decollo, il bisogno sembra più una voglia di muoversi.

Il comandante esce.

Subito, dalla cabina di pilotaggio viene bloccata la porta. Il copilota blinda, come si dice, la cabina, nel senso che non può essere aperta dall'esterno.

Questa possibilità è stata introdotta dopo l'11 settembre 2001, dopo la tragedia delle Torri gemelle di New York. In quel caso i terroristi erano appunto entrati in cabina e con un'arma avevano obbligato il comandante ad andare contro uno dei due grattacieli.

Alle 10 e 35, (5 minuti dopo), il comandante bussa alla porta, ma il copilota, chiuso all'interno, non risponde.

Alle 10 e 41 scatta il fly monitor system, il quale automaticamente emette lo stato di allarme: è il computer di bordo che definisce di allarme la situazione, per il semplice motivo che avviene un grande salto di altitudine, poiché si passa in pochi minuti da 38 mila a 8 mila piedi.

Il copilota, il personaggio di cui parleremo, aveva inserito il pilota automatico, ma aveva modificato alcune condizioni di volo - questo per dire anche che aveva un piano preciso - quelle che impediscono che ci sia una caduta di quel tipo. A questo punto tutti si rendono conto come vanno le cose: i passeggeri sono disperati, cominciano a capire che l'aereo è fuori controllo: urla e pianti disperati rimbombano nell'aereo.

Si sa tutto questo perché sono state recuperate le due scatole nere che riportano la registrazione degli avvenimenti.

Alle 10 e 47 l'aereo si trova davanti al massiccio noto come l'etoile. Tutti gli allarmi scattano, i sistemi automatici dei cosiddetti cervelli di bordo si mettono in azione, ma davanti ormai ci sono i Pirenei, le montagne.

E così dopo 40 minuti e 47 secondi dal decollo, con i passeggeri in stato di terrore, l'A320 sbatte contro la parete rocciosa. La velocità d'impatto è di 700 km all'ora, e questo permette anche di capire che non c'è nessuna possibilità di ritrovare il famoso sopravvissuto dei romanzi.

Alle 10 e 43 tutto è finito: tutti morti. E in questo dramma disumano, di ancor più funereo c'è che le persone non sono solo morte, ma sono state frammentate nell'impatto.

I gruppi di soccorso si affannano per arrivare presto nei pressi di Prads-Haute- Bleone preoccupati di salvare almeno la dignità di quei frammenti di corpi, perché in quella zona pirenaica vivono i lupi, e vogliono arrivare prima che quei frammenti di corpi diventino cibo.

Il protagonista

Il protagonista è Andreas Gunt Lubitz. Ha 27 anni, aiutante del comandante, Patrick Sonderheimer, considerato un uomo di grande esperienza.

Da una delle scatole nere si rileva che mentre aspettavano di decollare da Barcellona si è svolto un colloquio tra i due, assolutamente privo di segni particolari.

Il signor Andreas Gunt è stato assunto - e questo è un altro punto importante - dalla Lufthansa nel 2013, e quindi era sotto la direzione generale di una delle compagnie aeree che gode nel mondo, godeva forse, della massima fiducia.

L'assunzione ha il significato di un riconoscimento per Lubitz che l'addestramento e le condizioni per svolgere quel lavoro sono assolutamente nella norma.

Qui si apre il problema di come si possa dare il titolo di copilota a uno che nel 2013 quando viene assunto, possedeva almeno la metà delle 630 ore di volo raggiunte nel 2015. Ma viene comunque assunto.

Una evenienza ancora più grave è che non viene dato nessun peso

al fatto che nel 2008 questo giovane, ammesso ad un corso di addestramento, lo interrompe, e il motivo è "per disturbi psichici".

Dato questo bene documentato.

Si deve aggiungere che Lubitz aveva un deficit visivo che probabilmente mai gli avrebbe permesso di giungere al grado di comandante.

Si apre dunque il problema della valutazione, che esiste per tutte le professioni. Penso alle Forze dell'ordine, per citare un'organizzazione altrettanto importante, in cui la selezione significa consegnare un'arma di dotazione.

Si pone dunque un quesito chiave: se quella Compagnia (la Lufthansa) abbia potuto veramente valutare tutti i requisiti che si rendono necessari per una funzione così importante.

Io non so dare risposta in maniera definitiva, perché mi occupo soltanto di quella parte della storia che rientra nella mia professione, e parlerò cioè del protagonista.

Dall'analisi del suo computer è emerso che nei giorni precedenti la strage aveva svolto su internet una ricerca sul tema della blindatura delle cabine di pilotaggio. Pur essendo un pilota, ha voluto in qualche modo accertarsi, come fosse un dilettante, del funzionamento di questo sistema.

E anch'io, qualche giorno fa sono andato su internet a cercare dati sulla blindatura.

Ebbene, è facile scoprire i congegni meccanici o gli automatismi di tipo digitale che regolano questa possibilità.

Ma passiamo alla personalità di Andreas Gunt Lubitz.

Il primo elemento da tenere presente è l'aver interrotto l'addestramento con una diagnosi di depressione: questa era la valutazione certificata.

Il secondo elemento ci riporta alla sua ex fidanzata. Ha riferito testualmente: "un giorno, mi disse, farò un gesto che mi renderà noto a tutto il mondo".

Da una frase non possiamo dedurre molte cose, tuttavia è significativa.

Sappiamo che praticava sport atletici e che ha vinto alcune gare. Ogni giorno inoltre fa footing.

Questo impegno va sottolineato perché i depressi che fanno footing non sono molti, e se lo fanno quasi sempre sta a indicare che non sono (più) depressi. Emerge poi un dato che ha una certa forza: due

giorni prima dell'evento gli viene fatto un certificato medico perché possa assentarsi dal lavoro, lui però non lo consegna. E' stato ritrovato, e risulta compilato da un medico di medicina generale (non da uno psichiatra).

Non c'è dubbio che siamo davanti a una personalità che alcune volte assume espressioni del tipo: diventerò importantissimo e che mostra di essere molto attivo nello sport, s'impegna, ha volontà.

E' emerso che tutta la sua storia è legata agli aerei. Comincia da ragazzo a costruire alianti e successivamente a voler diventare pilota. Il suo ideale è volare. In Germania l'hanno chiamato anche Icaro, però non è caduto da solo, si è tirato dietro 149 persone.

Ma a questo punto prima di definire in maniera conclusiva la sua personalità devo fare una premessa.

Violenza e distruttività

Noi oggi facciamo una grande distinzione tra violenza e distruttività. La violenza è certamente un agire contro qualcuno, per uno scopo da raggiungere.

Una persona gelosa davanti all'evidenza che uno le ha rubato l'oggetto d'amore, avverte odio e un desiderio di colpirlo e può giungere all'estremo di ucciderlo. Una volta realizzato lo scopo, si è consumata la spinta violenta.

Lo stesso meccanismo si attua nella vendetta. Persino nella rapina, si può uccidere per realizzare uno scopo che in questo caso è l'appropriazione di un bene altrui.

Nel momento attuale, sempre meno vediamo casi di violenza finalizzata, mentre dominano quelli della distruttività: che porta a colpire "l'altro da sé", ma nello stesso tempo anche se stesso.

I casi di distruttività rappresentano delle piccole apocalissi: familiari quando uno uccide moglie e figli e poi si suicida. La distruttività segue il "muoia Sansone e tutti i Filistei": distruggiamo tutto.

Una violenza non finalizzata. La nostra è una società distruttiva, una società che fa male e si fa il male.

Una seconda precisazione riguarda il delirio. E' l'errata interpretazione di un evento, di una realtà: una madre che offra un bicchiere d'acqua al proprio figlio che soffre di delirio di persecuzione, si sente non solo rifiutare l'acqua, ma viene aggredita, perché egli pensa che sia

un gesto teso ad avvelenarlo. Interpreta che quel bicchiere non glielo dia perché lo vede sudato e assetato, ma per ucciderlo. E in questa interpretazione rifiuta la cortesia e reagisce aggressivamente, come per difendersi.

La diagnosi psichiatrica

Non c'è dubbio che in questo personaggio il delirio è presente, come idea guida, almeno nei giorni che precedono questa tragedia. E si prepara per compiere quell'azione in modo preciso: aspetta il momento opportuno, compie una prova nel volo di andata per essere sicuro di compiere in maniera efficace la manovra necessaria.

Un delirio di onnipotenza, e ne dà un'anticipazione all'ex fidanzata, per dimostrare che è forte, che vale. Un delirio eroico, per compiere ciò che nessuno farebbe.

E riporta all'eroe greco che deve morire; solo con la morte assume la caratteristica dell'eroe.

Un caso di sicura patologia, una mente fortemente malata, probabilmente egli soffre di un disturbo bipolare, ma certamente nel periodo in cui lo valutiamo è nella fase maniacale.

E nella maniacalità c'è il delirio, ne è il pilastro costituente.

Non è sostenibile l'ipotesi che egli in questa maniera realizzi la volontà di suicidio, e quindi che si trovi in una condizione depressiva, perché se uno vuole suicidarsi non ha bisogno di tutto questo apparato, basta aprire una finestra e buttarsi.

In Lubitz c'è la piena consapevolezza di un gesto che ha un significato del tutto particolare, e che pone il protagonista nella Storia.

Un malato bipolare, in fase di maniacalità guidato alla realizzazione precisa di un gesto che voleva compiere ed ha atteso da giorni il momento per farlo.

La maniacalità è lucida e riesce a portare a termine programmi in maniera ossessiva e puntuale.

Ciò accade all'interno di un problema psicopatologico che conduce il paziente dentro la distruttività.

E' l'eroe che vuole cancellare il mondo, che non avverte il dolore di chi diventa vittima, poiché egli stesso è vittima di sé e percepisce quella fine come esaltante.

La distruttività si riallaccia certamente ad una pulsione di morte,

di cui ha parlato Freud e che sarebbe costitutiva dell'esistenza umana posta tra *eros e tanatos*, tra creatività e distruzione.

Una distruttività che si vede, certo in misura più contenuta nel frequente comportamento umano che porta a colpire le persone care, quelle senza delle quali noi non sapremmo vivere. Colpendo l'altro si finisce per fare del male a sé.

I TRE FATTORI DEL COMPORTAMENTO UMANO

Viene da chiedersi: "è possibile valutare e prevedere questi rischi?"

Io non mi sento di affermare che è sempre possibile, posso soltanto dire che la disciplina psichiatrica ha dentro di sé, dentro i propri strumenti, la possibilità di farlo.

E' difficile perché per capire il comportamento di ciascuno di noi (normale o folle) occorre tenere conto di tre fattori.

Il primo è dato della biologia, di come il cervello di una persona è strutturato. Una dimensione importante, ma non la sola: si ritornerebbe alle vecchie concezioni positivistiche che non ci hanno aiutato molto.

Il secondo fattore è dato dalle esperienze vissute. E' sulla esperienza che si costruisce una personalità, e quindi serve condurre una analisi di personalità. E non bastano i test (nemmeno il MMPI, il Minnesota Multiphasic Personality Inventory, il più usato). Occorre stabilire una relazione tra paziente e psichiatra per scoprire comportamenti, idee e desideri. Ma anche questo fattore non basta.

Il terzo è dato dall'ambiente in cui quella persone vive e si esprime.

E' possibile conoscere una personalità, ma è complicato e richiede molto tempo per applicare gli strumenti necessari per farlo.

Ecco perché della psichiatria forse la definizione che io più amo è quella che dà G. Colombo: una scienza infelice.

Certo è una scienza, però ha delle complessità enormi quando la si porta sul piano dell'applicazione. Se poi la si mette dentro i tempi abitualmente dati all'analisi di un caso, il possibile diventa irrealizzabile: un paradosso drammatico.

Tengo molto al termine scienza, ci tengo perché credo molto in quella definizione che diede Jean Piaget, lo psicologo ginevrino che ha avuto molta importanza negli studi sullo sviluppo mentale del bambino.

Nel 1955, quando si discuteva se la psichiatria e la psicoanalisi fossero scienze, lui parlò di *Sciences de l'Homme,* che dovevano distinguersi da quelle del *particulare*, e questa volta la definizione è di Gianbattista Vico.

Le scienze dell'uomo hanno come scopo di tenere l'uomo tutto intero, e vuol dire corpo, psiche, e ambiente, inteso non solo geograficamente, ma come relazioni inter-umane, e quindi nel senso della fenomenologia di uomo-mondo.

Con queste precisazioni termino con un paradosso: il sogno di poter essere sicuri o più sicuri nell'evitare questi eventi, si fonda sulla possibilità di dare la responsabilità di guida a dei robot, che non avendo sentimenti, non avendo deliri di grandezza, riescano a muoversi in maniera meccanica e precisamente prevedibile.

Fino a quel momento l'uomo rimane un essere straordinario, ma un essere che sbaglia, e qui a sbagliare c'è un uomo malato e una Compagnia aerea che non sa scegliere il personale professionale per condurre un aereo. Un aereo, non una bicicletta.

DOMANDE

"Mi ha turbato il binomio tragedia-abominio, cioè la tragedia personale e l'abominio di trascinare con sé gli altri individui. Noi sappiamo dalla letteratura che il caso del giovane Werther (di Goethe) costituì un esempio che fu emulato, e che l'esibizione pubblica del suicidio può diventare un pericolo collettivo, e in questa forbice tra caso psichiatrico e coinvolgimento collettivo a questi livelli di drammaticità, a lei, come esperto della sua disciplina chiedo se ci sono altre possibilità di emulazione, visto che non di atti terroristici stiamo parlando, ma di malati?".

Per il suicidio è stato ampiamente dimostrato che c'è il rischio di emulazione, e che gli esempi finiscono per trascinare. Il libro *I dolori del giovane Werther* è stato bruciato in piazza Duomo a Milano, proprio per l'effetto che aveva sui giovani. Ma il tema è il suicidio: la condizione in cui una persona decide di uscire di scena. C'è il suicidio del depresso, ma anche quello di persone che sentono di non potere più avere il ruolo che avevano, e quindi è come se avessero perso di significato e vogliono uscire da questo mondo.

Nel caso che abbiamo trattato si tratta di un atto maniacale eroico. Il termine eroico potrebbe aprire una lunga discussione, ma semplificando occorre ammettere che noi abbiamo un'idea molto positiva dell'eroe, e

non ci piace tanto la sentenza di Bertolt Brecht: "beati quei popoli che non hanno bisogno di eroi", che vorrebbe dire che tutti in qualche modo allora vivono un piccolo protagonismo, e non hanno bisogno di chi ne compensi la mancanza con gesti eccessivi, con gesti estremi.

In questo caso domina la brutalità perché ci sono tanti morti, ma non è diverso dall'eroe di guerra, in cui la morte è esaltante.

Ricordo il generale Friedrich Wilheim von Paulus che comandava la 6° Armata a Stalingrado. Quando percepisce che la battaglia sta per essere perduta, fa un discorso ai propri soldati, che io ho analizzato perché è un capitolo di psichiatria. L'ordine di Hitler è che occorreva resistere e il generale dice a un certo punto: "Cani, volete voi vivere in eterno?", " Sì" risposero, "Allora morite tutti in battaglia". Un'affermazione maniacale.

C'è una maniacalità legata al concetto di eroe; ci sono atteggiamenti in cui gli altri sono solo espressione di un'idea: voi potete morire, anzi dovete, perché questo fa parte di un piano.

L'idea è al di sopra della vita, non solo di uno, ma in questo caso di 150 persone.

"Se questo co-pilota fosse per caso sopravvissuto, che cosa la psichiatria suggerirebbe: di impiccarlo, oppure di ricoverarlo in uno ospedale psichiatrico?"

Forse ti sorprenderò, ma io non avrei voglia di curare questo malato, ma se me lo portano, lo faccio, perché è sicuramente un malato.

Temo però che mai si pentirebbe di ciò che ha compiuto. L'eroe non si pente mai, e probabilmente penserebbe che per il fatto di essere vivo, qualcosa non ha funzionato.

Però questo è un malato, e i malati vanno curati.

Qualche volta le nostre cure sono limitate e imprecise, ma spero che la disciplina di cui faccio parte, che ho chiamato, come hai visto, infelice, aumenti il suo statuto scientifico, e so che abbiamo tanta strada da fare.

Oggi ci sono le neuroscienze che ci aiutano nel primo dei tre fattori che ho citato, nella biologia del cervello.

Considera che la follia generalmente è ciclica, non si dice più alla maniera dei positivisti (di Cesare Lombroso, di Scipio Sighele e di Leonardo Bianchi): "se è matto non può fare niente di normale". Sapessi quante persone importanti sono da me considerate matte!. E ciò complica ulteriormente il lavoro della psichiatria.

LA CHIMICA E I BENI CULTURALI, UN CONNUBIO VINCENTE: STUDIO TECNOLOGICO DI CERAMICHE E VETRI ATTRAVERSO I SECOLI

PAOLA FERMO (*)

Nota presentata dal m.e. Stefano Maiorana
(Adunanza dell'8 ottobre 2015)

SUNTO. – Nel campo delle ricerche inerenti la caratterizzazione, la conservazione ed il restauro dei beni culturali, nonché le tecniche di fabbricazione degli oggetti, è fondamentale l'impiego di metodi diagnostici che spesso vanno sotto il nome di tecniche archeometriche. L'archeometria (che misura ciò ch'è antico) si occupa dello studio scientifico con analisi di laboratorio dei materiali di cui i beni di interesse storico, archeologico, artistico e architettonico sono costituiti. Nell'ambito dello studio dei manufatti ceramici particolarmente interessante è il caso delle ceramiche rinascimentali italiane decorate con la tecnica del lustro, un film metallico iridescente di colore oro o rosso rubino ottenuto a partire da argento e da rame in forma nano-particellare mediante una tecnica molto sofisticata che testimonia le conoscenze estremamente avanzate di cui erano in possesso gli antichi vasai.

***

ABSTRACT. – In the field of the researches concerning the characterization, conservation and restoration of cultural heritage, as well as the objects manufacturing techniques, it is essential to use diagnostic methods that are referred to as archaeometric techniques. Archaeometry (which measures what is ancient) deals with the scientific study, carried out by laboratory analyses, of ancient materials and objects with the aim to deep the knowledge of historical, archaeological, artistic and technological aspects. In the field of the study of ceramic artefacts, the case of Italian Renaissance ceramics decorated with the luster technique is particularly interesting; luster is an iridescent metallic film of gold or ruby red color obtained from silver and copper in the form nanoparticles using a very sophisticated technique that testifies to the extremely advanced knowledge possessed by the ancient potters.

(*) Dipartimento di Chimica, Università degli Studi di Milano, Italy.
E-mail: paola.fermo@unimi.it

Introduzione

La chimica, ed in particolare la chimica analitica, è di grande supporto alla studio dei beni culturali in quanto permette di acquisire informazioni importantissime inerenti le tecniche impiegate per la realizzazione di manufatti lapidei, pittorici, ceramici, vitrei, metallici, ecc. Generalmente le indagini diagnostiche su un manufatto partono dalla individuazione delle materie prime impiegate nella sua realizzazione ovvero: quale tipo di marmo è stato impiegato nella costruzione di una monumento o per la realizzazione di una statua? Quali pigmenti sono stati utilizzati dall'artista in una certa opera pittorica? Quali argille sono state impiegate dagli antichi vasai per ottenere un certo impasto ceramico? La chimica è in grado di fornire una valida risposta a tutti questi quesiti e permette in molti casi di sciogliere quesiti che rimarrebbero irrisolti avvalendosi unicamente delle competenze storico-artistiche. Ad esempio il riconoscimento di uno specifico pigmento ha permesso in molti casi di datare un'opera d'arte e di attribuirla ad uno specifico artista laddove lo studio puramente stilistico non lo consentiva. Inoltre lo studio archeometrico dei materiali (ovvero l'impiego della chimica analitica applicata ai beni culturali) permette di acquisire conoscenze inerenti la tecnologia impiegata nella realizzazione del manufatto.

Materiali quali la ceramica o il vetro hanno una grande valenza storico-artistica poiché sono stati ottenuti per la prima volta agli albori della civiltà e sono poi stati utilizzati in modo continuo fino ai nostri tempi accompagnando la storia delle civiltà. Tra questi materiali vi sono sicuramente il vetro, che secondo quanto tramandato da Plinio il Vecchio fu ottenuto per la prima volta in modo del tutto casuale lungo le sponde del fiume Belus (Libano) circa nel 3000 a.C., e la ceramica i cui primi reperti sembrano risalire al 26000 a.C. Le ceramiche e i vetri hanno accompagnato il cammino delle diverse civiltà trovando dapprima impiego come utensili ed oggetti di uso quotidiano (contenitori per la conservazione di sostanze solide o liquide) per poi essere utilizzati per la realizzazione di manufatti pregiati di grande valore artistico come nel caso delle maioliche rinascimentali italiane, decorate ed istoriate in maniera sublime.

Particolarmente interessante è il caso delle ceramiche rinascimentali italiane decorate con la tecnica del lustro, un film metallico iridescente di colore oro o rosso rubino ottenuto a partire da argento e da rame in forma nano-particellare mediante una tecnica molto sofisticata che prevedeva una terza cottura dell'oggetto in atmosfera riducente ed in condizioni

estremamente controllate. Tale tecnologia testimonia le conoscenze estremamente avanzate di cui erano in possesso gli antichi vasai: la tecnica impiegata era così raffinata che ad oggi, nonostante i numerosi studi effettuati, il segreto dell'arte del lustro non è stato ancora completamente svelato e lo prova il fatto che i tentativi di imitazione di tali oggetti non eguagliano assolutamente le splendide maioliche del passato.

Il lustro dall'Islam al Rinascimento: la presenza del bismuto nella produzione italiana

Le ceramiche oggetto di questo studio sono maioliche lustrate caratterizzate dalla presenza di decorazioni a lustro, ovvero film dall'aspetto metallico iridescente applicati in terza cottura in atmosfera riducente ad oggetti precedentemente smaltati. Per quanto concerne la tecnologia con la quale venivano realizzate queste decorazioni si rimanda ad un contributo (Padeletti e Fermo, 2005) ad opera dei medesimi autori ed inserito nel presente volume.

I primi esemplari di maioliche lustrate vennero prodotte agli inizi del IX secolo d.C. in Mesopotamia, a Baghdad, centro del vasto impero arabo abbasside (A. Caiger-Smith, 1985). Successivamente, tra il X ed il XVI sec., in Persia, ed in particolare a Kashan, si sviluppò una fiorente industria per la produzione di ceramiche lustrate. In concomitanza quindi dell'espansione della cultura araba nel bacino del Mediterraneo, la tecnica del lustro venne sviluppata anche in Egitto, durante la dinastia fatimide. Alcuni studiosi sostengono che durante le insurrezioni che ebbero luogo in Mesopotamia (869-883), gli artigiani di Bosra, il secondo centro per importanza nella produzione ceramica in Iraq dopo Baghdad, in seguito ad una insurrezione che distrusse la città (871), migrarono verso l'allora nascente Egitto tulunide. Altri studiosi sostengono invece che le ceramiche ritrovate in Egitto e risalenti al IX sec. vennero direttamente importate dall'impero abbasside. In ogni caso tutti concordano sul fatto che i lustri prodotti a Samarra (Iraq) sono indistinguibili da quelli di epoca tulunide ritrovati in Egitto. Le più antiche ricette relative alla preparazione degli impasti per la produzione dei lustri islamici sono quelle tramandateci da Abu'l Qasim di Kashan (Iraq) (A. Caiger-Smith, 1985).

A partire dal XIII sec. i lustri cominciarono ad essere prodotti nella Spagna moresca che era stata conquistata dagli arabi cinquecento anni prima. La tecnica del lustro sopravvisse al crollo del mondo arabo avve-

nuta nel XV sec. e gli artigiani ispano-moreschi fusero motivi di ispirazione araba e motivi tipicamente cristiani per creare maioliche che venivano esportate in Europa.

Numerose maioliche lustrate vennero quindi esportate dalla Spagna in Italia, Francia e Paesi Bassi. Il termine maiolica, utilizzato in Italia per indicare oggetti ceramici lustrati, trae infatti origine dall'isola di Majorca in Spagna. A quell'epoca le maioliche impreziosite con effetti metallici iridescenti atti ad imitare l'oro, erano molto ricercate dai mercanti italiani a causa del costo molto elevato degli oggetti realizzati con questo preziosa metallo. L'importazione delle maioliche lustrate dalla Spagna ebbe inizio circa trecento anni prima della comparsa dei primi esempi di lustri italiani.

A proposito dell' introduzione della tecnica in Italia sono state avanzate dagli studiosi alcune ipotesi. Durante il XV sec. i primi tentativi di imitazione di lustri ispano-moreschi ad opera di maestri italiani furono piuttosto infruttuosi sino a quando Galgano di Belforte apprese a Valencia il segreto dell'arte del lustro, gelosamente custodito dai maestri moreschi (Franchet, 1906) Poiché gli artigiani che operavano all'epoca a Faenza e a Firenze, i due maggiori centri di produzione ceramici, erano particolarmente abili, ed inoltre a causa dell'esistenza di numerosi contatti commerciali tra la Spagna e l'Italia, è improbabile che essi non conoscessero la tecnica del lustro. È invece possibile che, essendo già esperti nella produzione di ceramiche decorate di elevatissimo pregio, preferirono non cimentarsi nella realizzazione delle decorazioni a lustro (A. Caiger-Smith, 1985). La sperimentazione di questa nuova tecnica avvenne invece in piccoli centri di produzione ceramica, quali Gubbio e Deruta in Umbria, dove i motivi decorativi erano molto semplici e dove gli oggetti realizzati dagli artigiani erano destinati unicamente al mercato locale. Secondo quanto riportato da Caiger-Smith (A. Caiger-Smith, 1985), la tecnica del lustro venne importata a Deruta ad opera del famoso pittore Pinturicchio (1454-1413). Le ricette più dettagliate per la preparazione degli impasti da lustro che sono giunte sino a noi sono quelle riportate ne *I tre libri dell'arte del vasaio* ad opera di Cipriano Piccolpasso (Piccolpasso, 1557). Tali ricette, una per la realizzazione dei lustri oro ed una per la realizzaizone dei lustri rossi, erano quelle utilizzate nella bottega di Mastro Giorgio Andreoli (circa 1470-1555). Gli impasti erano costituiti da miscele di sostanze, tra le quali la terra rossa ed il ferretto di Spagna (CuS) (A. Caiger-Smith, 1985), con aggiunta di una moneta d'argento e di cinabro (HgS) per l'ottenimento del lustro oro e l'aggiunta di bolo armeno per l'ottenimento del rosso. Tali miscele venivano poi disperse in aceto ad applicate ai manufatti. L'uso dell'aceto permetteva

sia di mantenere la miscela allo stato flocculato consentendo di evitare la formazione di crepe in fase di essiccatura, sia di favorire la formazione di acetati ovvero sali facilmente decomponibili. Il lustro era quindi fissato in terza cottura a circa 600 °C in atmosfera riducente.

In virtù della loro abilità gli artigiani italiani svilupparono un loro proprio stile, anche se inizialmente si ispirarono ai lustri ispano-moreschi. Mentre a Deruta i ceramisti si specializzarono nella produzione dei lustri oro, Gubbio divenne famosa, grazie a Mastro Giorgio Andreoli, per la produzione di lustri dal tono rosso-rubino. E' importante sottolineare come il colore finale dipendesse non solo dalla composizione chimica dell'impasto ma anche dalle condizioni di cottura (Padeletti e Fermo, 2005). Il giallo oro, può infatti contenere notevoli quantità di rame che da luogo alla formazione di un lustro rosso-rubino in atmosfera riducente mentre, nelle prime fasi del processo di cottura quando l'atmosfera non è ancora completamente riducente, il colore che si ottiene è giallo-ambra.

A causa della preziosità dei manufatti lustrati e della difficoltà con cui essi venivano realizzati, le ricette per la preparazione degli impasti erano mantenute segrete. La qualità dei manufatti che vennero prodotti durante il Rinascimento non venne infatti mai più raggiunta durante il periodo di revival di questa tecnica nel corso del XIX sec. Oggi giorno la produzione di lustri simili a quelli antichi rappresenta per i ceramisti umbri una grossa sfida. Essi utilizzano generalmente composti di rame (ossido, acetato, cloruro o carbonato) per i lustri di colore rosso, composti a base di ferro (ocra, argille ferruginose o bolo armeno) per i lustri dai toni bronzei, cloruro di cobalto per il blu e nitrato di bismuto per ottenere effetti perlacei (Emiliani, 2001).

I CAMPIONI ANALIZZATI: DALLA PRODUZIONE ISLAMICA A QUELLA RINASCIMENTALE

Oggetto di una prima fase del presente studio sono stati sia alcuni esempi di ceramiche rinascimentali lustrate di provenienza umbra, sia alcuni frammenti lustrati di tipo ispano-moresco rinvenuti in Umbria nel corso degli scavi. Tra i campioni italiani due frammenti sono stati identificati dagli esperti come imitazioni dello stile ispano-moresco. Una conferma dell'esistenza in Italia centrale di botteghe dove lo stile ispano-moresco veniva imitato e prodotto, è fornita dal ritrovamento in Umbria sia di frammenti originali ispano-moreschi che di imitazioni di tale stile, come

nel caso dei frammenti esaminati in questo studio. In una seconda fase del lavoro sono stati inclusi nel confronto anche alcuni lustri islamici.

I campioni presi in esame sono databili al XV e al XVI sec e sono stati tutti rinvenuti in Umbria ad eccezione dei lustri islamici provenienti dall'Egitto ed attribuiti, sulla base di considerazioni stilistiche, al periodo fatimide (*Fig. 1*).



Fig. 1 – Alcuni esempi di frammenti di maioliche lustrate: a) imitazioni dello stile ispano-moresco; b) lustri ispano-moreschi; c) tipici lustri italiani; d) lustri islamici.
Essi includono sia lustri di colore oro che lustri di colore rosso decorati con motivi geometrici o floreali. Due lustri di colore oro (Lan e S1, Fig. 1a) sia a causa della peculiarità delle decorazioni che a causa del tono del lustro, sono stati definiti dagli esperti imitazioni dello stile ispano-moresco. Due dei campioni ispano moreschi (Fig. 1b) sono decorati con lustri oro mentre il terzo mostra un lustro dai toni rosso-ramati.

L'analisi della composizione chimica del corpo ceramico dei frammenti è stata condotta prendendo in considerazione 8 elementi maggioritari (Ca, Al, Fe, Mg, K, Ti, Na e Mn) e 7 elementi minoritari (Cr, Cu, Ni, Zn, Zr, Sr e Rb). Le analisi sono state eseguite mediante ICP-OES (Inductively coupled plasma – optical emission spectrometry) sui campioni sottoposti a dissoluzione acida (in tabella 1 sono riportati i risultati relativi agli elementi maggioritari).

I risultati ottenuti sono stati quindi elaborati mediante metodi di calcolo chemiometrico [6]. Sulla base della composizione chimica è stato quindi possibile distinguere due gruppi di frammenti, uno costituito dai campioni italiani ed uno da quelli ispano.moreschi.

I metodi chemiometrici utilizzati sono stati la *principal components analysis* (PCA) e la *cluster analysis* (HCA). In *Fig. 2* viene mostrato un dendrogramma (diagramma ad albero) nel quale i tre campioni ispano-moreschi formano un cluster a se stante mentre le due imitazioni rientrano in un cluster formato da campioni italiani. Si può quindi affermare i due campioni considerati imitazioni sono stati sicuramente prodotti in Italia centrale poiché presentano un corpo ceramico del tutto analogo chimicamente a quello dei campioni italiani. L'assegnazione effettuata puramente su basi stilistiche trova quindi una conferma scientifica.

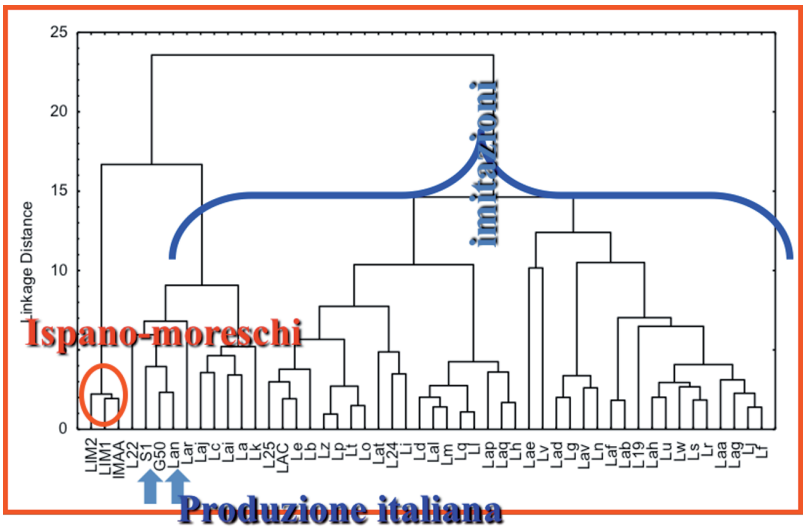


Fig. 2 – Dendrogramma ottenuto dalla cluster analysis eseguita sui dati di composizione chimica relativi a ceramiche lustrate italiane ed ispano.moresche.

La presenza di almeno tre grossi cluster all'interno della produzione italiana è legata a differenze minori nella composizione chimica dei materiali di partenza.

Una ulteriore prova a favore dell'attribuzione italiana dei due frammenti definiti imitazioni, è fornita dall'esame dello smalto (*Fig. 3*): infatti, analogamente ai campioni italiani, le due imitazioni mostrano uno smalto avente spessore maggiore di quello tipico delle ceramiche ispano-moresche.

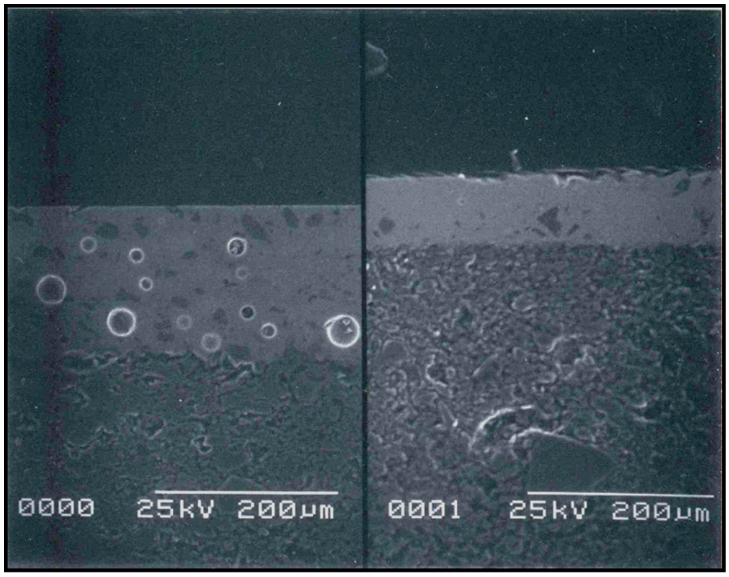


Fig. 3 – Immagini ottenute mediante SEM (scanning electron microscopy) ed acquisite rispettivamente su un campione definito imitazione dello stile ispano-moresco ed su un campione ispano moresco.

Di fondamentale importanza ai fini della caratterizzazione dei lustri si è rivelata essere l'analisi XRD grazie alla quale è emersa una importante differenza tra la produzione italiana e quella ispano-moresca. Infatti i diffrattogrammi acquisiti sui campioni di lustro italiani mostrano la presenza di un segnale dovuto alla cosalite, una fase cristallina corrispondente alla formula $Pb_2Bi_2S_5$ che non è presente nei campioni ispano-moreschi. Nel caso delle due imitazioni questa fase è presente ma il segnale è poco intenso. Come è noto la cosalite è una fase che si può formare quando il bismuto è presente unitamente a piombo e zolfo (Anthony, 1990). È importante sottolineare che la presenza di

bismuto all'interno dei lustri non era mai stata evidenziata sino ad ora.

Al fine di confermare la presenza di questo elemento, che non compare come ingrediente in nessuna delle ricette giunte sino a noi, sono state condotte analisi mediante la tecnica ETAAS (electrothermal atomization absorption spectroscopy), ovvero una tecnica di analisi elementare in grado però di raggiungere limiti di rilevabilità più bassi rispetto all'ICP-OES. Unitamente al bismuto sono stati quantificati anche il rame e l'argento. I rapporti Bi/Ag sono riportati in tabella 3 e variano all'interno del range 0.42-5.6 indicando che la quantità di bismuto addizionata all'impasto dai vasai era piuttosto variabile ed in molti casi superiore alla quantità di argento. Mentre il bismuto è stato rilevato in tutti i campioni italiani, esso è risultato essere assente nei campioni ispano-moreschi e nelle due imitazioni (in questo secondo caso la concentrazione presente era però al di sotto del limite di rilevabilità).

Anche i rapporti Cu/Ag sono piuttosto variabili e vanno da 90 a 0.1 per i lustri oro e da 33 a 4 nel caso dei lustri rossi. Inoltre alcuni lustri rossi, incluso il campione ispano-moresco, non contengo no argento mentre alcuni lustri oro italiani non contengono rame. Del resto è già stato dimostrato (Padeletti e Fermo, 2005) come il colore non dipenda unicamente dalla composizione chimica ma sia anche legato alle condizioni di cottura. Poiché il rame, a differenza dell'argento e del bismuto, può essere presente come elemento minoritario anche all'interno dello smalto, per poter quantificare il rame nel lustro ne è stata quantificata la concentrazione nello smalto ed è stata quindi effettuata una sottrazione (Padeletti e Fermo, 2003). A causa dell'esiguo spessore del lustro le scaglie sottoposte a dissoluzione sono infatti mediamente costituite per il 99% da smalto e per l'1% dal lustro.

Mentre rame ed argento sono stati evidenziati innanzitutto mediante analisi SEM-EDX (scanning electron microscopy – energy dispersion X ray spectroscopy) (Padeletti e Fermo, 2005) e successivamente quantificati tramite ETAAS, la presenza del bismuto non è evidenziabile mediante EDX a causa della sovrapposizione con il segnale del piombo, presente in concentrazione molto elevata nello smalto sottostante il lustro. Di conseguenza la diffrazione di raggi X si è rivelata fondamentale per l'individuazione del bismuto. Questo elemento, come già ricordato, non compariva tra gli ingredienti per la preparazione degli impasti da lustro. Tuttavia, Cipriano Piccolpasso (Piccolpasso, 1557) afferma che egli non assistette personalmente alla preparazione degli impasti ma semplicemente ne senti parlare poiché le ricette venivano gelosamente custo-

dite e mantenute segrete. Pertanto le ricette che egli trascrisse molto probabilmente differiscono da quelle realmente utilizzate.

Per poter spiegare la presenza di questo elemento nello strato di lustro è stata presa anche in considerazione la possibilità che il bismuto venisse introdotto come impurezza dell'argento, inserito nell'impasto sotto forma di moneta (carlino d'argento). Il bismuto potrebbe infatti essere presente come impurezza, pari al massimo allo 0.1% (Giardino, 1998), nel minerale grezzo contenente argento ed impiegato per la produzione delle monete. In questo caso la presenza del bismuto negli impasti non sarebbe quindi intenzionale. Al fine di verificare questa ipotesi, si è proceduto con l'analisi di alcune monete coniate in epoca rinascimentale e sono stati quantificati sia il bismuto che l'argento. All'interno delle monete la concentrazione massima di bismuto riscontrata è stata pari a 0.157%, ovvero piuttosto bassa. Se il bismuto fosse stato introdotto come impurezza della moneta non sarebbe quindi rilevabile a causa della concentrazione troppo bassa che risulterebbe inferiore al limite di rilevabilità della tecnica per questo elemento. La tecnica XRD interessa l'analisi del solo strato superficiale, a differenza dell'ETAAS che analizza l'intero spessore costituito dal lustro e dallo smalto e per tale ragione l'XRD può essere considerata più sensibile. Nel caso dei due lustri identificati come imitazioni la cosalite è stata infatti identificata mediante XRD; tuttavia questa fase è presente in concentrazione piuttosto bassa ed il bismuto non è stato identificato.

È pertanto possibile concludere che la bassa percentuale di bismuto presente nelle monete fa sì che tale elemento non risulterebbe rilevabile mediante ETAAS. Si può quindi escludere che nei lustri il bismuto sia presente come impurezza della moneta d'argento.

Un aspetto molto interessante da prendere in considerazione è rappresentato dalle notizie storiche riguardanti la conoscenza del bismuto come elemento durante il Rinascimento. Agli inizi del XVI sec. il bismuto era infatti già noto in Europa quale elemento distinto. Esso viene infatti menzionato a proposito dell'uso che se ne faceva in alcune pitture medievali dove lo strato preparatorio era costituito da bismuto (tecnica risalente al XV sec.) (Lippmann, 1930). Inoltre, come viene riportato da Agricola (1494-1555) (Bauer) (disponibili presso la Biblioteca Nazionale Braidense, Milano), il pioniere delle scienze mineralogiche in Europa, il bismuto era considerato un elemento differente da quelli noti all'epoca e cioè argento, rame, ferro, oro, piombo e sta-

gno. Infatti il bismuto era detto "piombo *ceneraccio*" mentre il piombo e lo stagno erano chiamati rispettivamente "piombo nero" e piombo bianco". Il bismuto era anche chiamato "*testum argenti*" poiché si supponeva si trattasse di argento da dalla natura imperfetta.

Il bismuto era presente nelle miniere della Boemia e della Sassonia e la sua presenza indicava che al di sotto dello strato superficiale costituito da questo elemento era possibile trovare l'argento. Quindi in quell'epoca il bismuto poteva essere confuso con l'argento da chi non era molto esperto. È interessante osservare come la maggior parte delle miniere dalle quali può essere estratto il bismuto sono concentrate in Europa, in Africa sono presenti solo in Rodesia mentre in nord Africa ed in Asia Minore sono completamente assenti (*Fig. 4*) (Mellor, 1929). Lo stesso Agricola afferma che mentre il bismuto era noto in Europa, esso era sconosciuto al mondo arabo (Partington, 1961).

A testimonianza di quanto fosse intrigante la storia del bismuto vi è un'opera del tedesco Von Lippmann che nel 1930 scrisse addirittura un trattato sulla storia del bismuto tra il 1400 ed il 1800 (Lippmann, 1930).

Il bismuto in Europa veniva anche utilizzato unitamente a piombo e stagno per produrre vasi, piatti, ciotole e boccali. Infatti Entzel (1520-1586) nel suo scritto dedicato ai metalli ed alle pietre (come viene riportato da Partington) sostiene che questo metallo venisse utilizzato per contraffare ed imitare i vasi d'argento. Anche Entzel afferma che il bismuto era sconosciuto al mondo arabo.

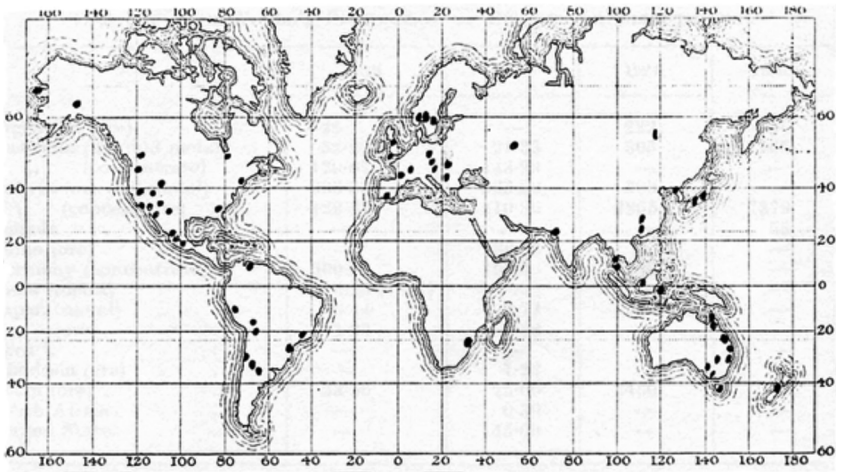


Fig. 4 – Distribuzione dei giacimenti di bismuto.

La conoscenza del bismuto da parte degli artigiani italiani è confermata da Franchet [3] che tentò di riprodurre i lustri rinascimentali agli inizi del XX sec.

Poiché il bismuto non era quindi noto nel mondo islamico e poiché le ricette ispano-moresche vennero direttamente importate dall'Islam, l'assenza di questo elemento nei lustri islamici è quindi giustificata.

Al contrario i ceramisti italiani, anche se appresero la ricetta dagli spagnoli, furono in grado di sviluppare ricette proprie ed originali stili decorativi introduc per tale ragione endo notevoli variazioni. Probabilmente all'epoca in Italia l'uso del bismuto al fine di imitare l'argento ero noto e non si può pertanto escludere che gli artigiani aggiungessero questo elemento all'impasto da lustro con lo scopo di contenerne il costo. Inoltre è anche probabile che essi sapessero che il bismuto non era noto agli arabi e questo potrebbe spiegare le piccole quantità di cosalite riscontrate nelle imitazioni dello stile ispano-moresco.

Un ulteriore motivo che giustificherebbe l'uso del bismuto potrebbe risiedere nel fatto che questo elemento, addizionato all'impasto, contribuisce ad abbassare considerevolmente le temperature di fusione sia del rame che dell'argento, come può essere osservato nei rispettivi diagrammi di fase. E' anche interessante osservare come alcuni composti del bismuto (ossido, carbonato e nitrato) vengano utilizzati per la preparazione di lustri moderni (A. Caiger-Smith, 1985). Questi composti agiscono come fondenti nei cosiddetti "pigmenti attivi": essi consentono cioè al pigmento di aderire allo smalto ad una temperature sufficientemente bassa da evitare che lo smalto scolori in seguito al processo di riduzione dell'ossido di piombo a piombo metallico. Inoltre l'ossido di bismuto può anche conferire una tonalità perlacea al lustro stesso (A. Caiger-Smith, 1985).

Tra la produzione italiana a lustro e quella ispano-moresca vi è una importante differenza dal punto di vista della composizione chimica dello strato di lustro. Questa differenza, messa in evidenza tramite diffrazione di raggi X ed analisi elementare, è legata alla presenza del bismuto unicamente nei lustri italiani. Tale elemento, presente come cosalite, $Pb_2Bi_2S_5$, un solfuro misto di piombo e bismuto che si forma durante il processo di cottura del lustro, può quindi essere considerato un marker distintivo della produzione italiana.

Poiché in epoca rinascimentale in Italia era probabilmente noto l'uso del bismuto per imitare l'argento, non si può escludere che i cera-

misti italiani aggiungessero intenzionalmente questo elemento per contenere il costo dell'impasto da lustro. Inoltre questo elemento non era noto nel mondo arabo e questo potrebbe spiegare per quale motivo esso sia assente nei lustri ispano-moreschi (preparati secondo ricette direttamente importate dall'Islam) e presente invece in piccole concentrazioni nelle imitazioni dello stile ispano-moresco rinvenute in Umbria.

Un ulteriore importante differenza tra le produzioni italiana e spagnola è stata riscontrata nella composizione del corpo ceramico. Tale differenza è stata evidenziata grazie all'analisi elementare dei corpi ceramici e alla successiva elaborazione dei dati mediante metodi di calcolo multivariato. Entrambe questi metodi hanno messo in evidenza la presenza di due gruppi distinti, uno formato dai campioni italiani e uno da quelli ispano-moreschi. Grazie a questo tipo di approccio è anche emerso come le imitazioni ispano-moresche siano state realizzate a partire da maioliche di produzione italiana decorate però mediante un impasto da lustro preparato secondo la ricetta spagnola. L'assenza di bismuto è stata riscontrata anche all'interno dei lustri islamici ed è una prerogativa sia dei lustri di produzione irachena che di quelli fatimidi a riprova del fatto che il bismuto non fosse noto nel mondo arabo.

BIBLIOGRAFIA

G. Padeletti, P. Fermo. Studio di frammenti di maioliche rinascimentali lustrate: principali risultati, Simposio internazionale Mastro Giorgio da Gubbio: Arte, Scienze e Tecnologia delle Maioliche a Lustro, 9-11 Novembre 2005, Gubbio (Italy).

A. Caiger-Smith. *Luster Pottery: Technique, Tradition and Innovation in Islam and the Western World* (Faber and Faber, London 1985), p. 197.

M.L. Franchet. Ann. Chem. Phys. Ser. **8**, IX, (1906).

C. Piccolpasso. *Li Tre Libri dell'Arte del Vasaio*, *1557* (Edizioni all'insegna del Giglio, Firenze 1976).

G.P. Emiliani, F. Corsara. *Tecnologia Ceramica,la Lavorazione*, Vol. II (gruppo editoriale Faenza editrice, Faenza, Italy 2001).

G. Pdeletti, P. Fermo. Applied Physics A 77 (2003) 125-133.

J.W. Anthony, R. Bideaux, K.W. Bladth, M.C. Nicols. *Handbook of Mineralogy*, Vol. I, *Element Sulphides and Sulfo-salts* (Mineralogical Data, Tucson, AZ 1990).

C. Giardino. *I metalli nel mondo antico. Introduzione all'archeometallurgia* (Laterza and Figli, Roma 1998).

J.R. Partington. *A History of Chemistry*, Vol. 2 (Macmillian, London 1961).

E.O. von Lippmann. *Die Geschichte des Wismuts zwischen* 1400 *und* 1800*: ein Beitrag zur Geschichte der Technologie und der Kultur* (Springer, Berlin 1930).

G. Bauer or G. Agricola. *De Natura Fossilium, Lib. X* (Froben, Basel 1546).
G. Bauer or G. Agricola. *Bermannus Sive De Re Metallica Dialogus* (Froben, Basel 1528).
G. Bauer or G. Agricola. *Bermannus Sive De Re Metallica Dialogus* (Froben, Basel 1546).
J.M. Mellor. *A Comprehensive Treatise on Inorganic and Theoretical Chemistry, Vol. IX* (Longman Green, London 1929) p. 587.

RELATIVISTIC GALAXY ROTATIONS *VERSUS* DARK MATTER

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

(Adunanza del 26 novembre 2015)

SUNTO. — Gli effetti gravitazionali attribuiti alla materia oscura possono essere spiegati per tutti i tipi di galassie con un modello di relatività generale delle rotazioni galattiche.

ABSTRACT. — The gravitational effects ascribed to the Dark Matter can be explained with a general-relativistic treatment of the galaxy rotations.

SUMMARY. — **1**. Aim of the paper. — **2**. Core of the question and results from 1937 to the present time. — **3**. A résumé of the general-relativistic approach developed in a previous paper, which holds for all kinds of galaxies. — **4**. Application to elliptical N3379 and comparison with the observational data. — **5**. On the lensing phenomena. — **6**. Conclusion. — *Appendix*.

PPACS:04.20 — General relativity; 9850 and 9860 — Galaxies.

1. — We have proved in a previous paper ("A relativistic model of the galactic rotation") [1] the statement of the present abstract for spiral galaxies, considering in particular the instance of the Milky Way.

We shall now demonstrate that our approach holds for all types of galaxies, *e.g.* for the ellipticals.

2. — The pioneering memoir by Zwicky (1937) [2] and the recent observational studies of the galaxies [3] emphasize that their fundamental properties are essentially very similar. In the ensemble of stars, which are near to the supermassive centre of a galaxy, the stellar circular velocities increase linearly with the distance from the centre, as in the rotations of

(*) Dipartimento di Fisica, Università di Milano, Via Celoria, 16 - 20133 Milano (Italy). Email angelo.loinger@mi.infn.it

(**) Liceo Classico "G. Berchet", Via della Commenda, 26 - 20122 Milano (Italy). Email: martiz64@libero.it

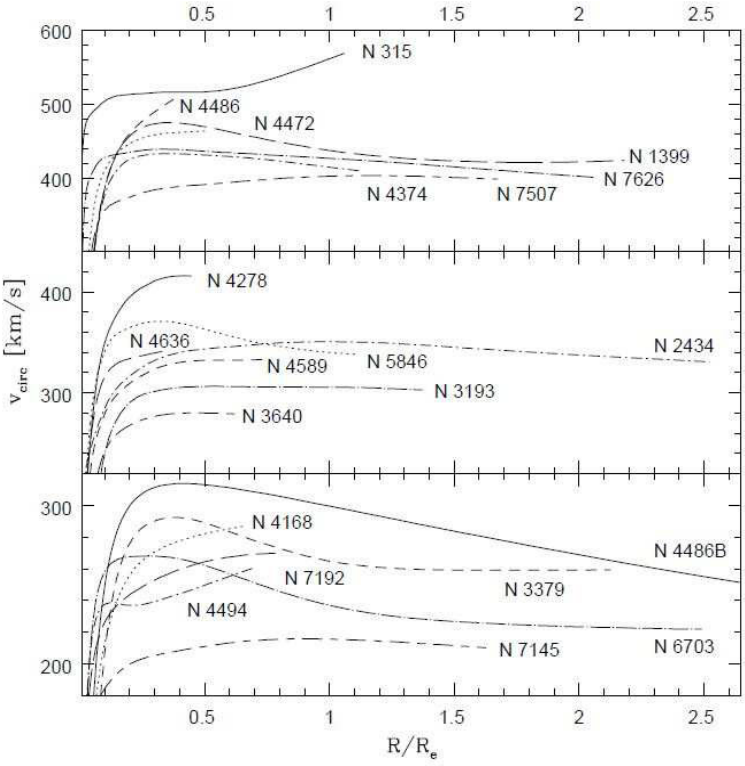


Fig. **1.** [*Fig.* **1** *of Gerhard [3]*]. *The "best model" circular velocity curves of all galaxies from the* $K + 2000$ *sample plotted as a function of radius scaled by the effective radius* R_e. *The panels are roughly ordered by luminosity.*

a rigid body. In the ensemble of the far stars, the velocities decrease very slightly and tend to become constant.

According to Zwicky (1937) [2], the behaviour of the stars of the first ensemble has its origin in a sort of (gravitational !) "viscosity" among them. The present researchers [3] think that it is originated by a "conspiracy" between the luminous matter and a fraction of dark matter. The stellar motions in the second ensemble are dominated by the gravitational action of a dark matter halo – according to a widespread interpretation.

See in *Fig.* **1** the observational diagrams of the circular-velocity curves (CVCs) of stars in some elliptical galaxies [4]. (To describe the star

orbits with circular trajectories represents a reasonable *model*).

3. – Let us summarize our mathematical treatment of sect. **2** in paper [1].

We start from the well-known formula – in spherical polar coordinates r, ϑ, φ – of Schwarzschild's manifold created by a concentrated mass M at rest. We assume a general representation $\mathcal{R}(r)$ for the radial coordinate, with $\mathcal{R}$ a regular function of r. We put $m \equiv GM/c^2$ and $\alpha \equiv 2m$. We are interested in the *circular* geodesics ($\mathrm{d}\mathcal{R} = 0$) of the test-particles (which represent the stars in our model) and of the light-rays, moving in a plane, *e.g.* in the plane $\vartheta = \pi/2$.

Let $\Omega > 0$ be the angular velocity of rotation of the supermassive centre of a given galaxy, which we represent by the Schwarzschildian mass M. The geodesics will be modified by this rotation.

The substitution $\varphi \to \varphi - \Omega t$ in Schwarschild's formula gives the changed metric for the stars of the first ensemble. It is not difficult to see (*vide* [1]) that their circular velocity v_1 is:

$$v_1 = (\mathcal{R}\dot{\varphi})_1 = \mathcal{R}\,\Omega + c\sqrt{\frac{\alpha}{2\mathcal{R}}} \quad , \tag{1}$$

where $\dot{\varphi} \equiv \mathrm{d}\varphi/\mathrm{d}t$. Eq. ((1)) holds from $\mathcal{R} = (3/2)\alpha$ to a certain value, say $\tilde{\mathcal{R}}$, observationally determined, of $\mathcal{R}$. (We leave out for brevity the treatment of the light-rays).

The function $v_1(\mathcal{R})$ has a minimum at the following value $\mathcal{R}_\mathrm{m}$ of $\mathcal{R}$:

$$\mathcal{R}_\mathrm{m} = \frac{1}{2}\left(\frac{\alpha\, c^2}{\Omega^2}\right)^{1/3} \quad ; \quad \Rightarrow \tag{2}$$

$$\dot{\varphi}_1(\mathcal{R}_\mathrm{m}) = 3\Omega \quad .- \tag{3}$$

For the stars of the second ensemble – from $\mathcal{R} = \tilde{\mathcal{R}}$ to a given observational value $\mathcal{R} = \mathcal{R}_\mathrm{f}$, we put, where u is a positive constant:

$$\varphi \to \varphi - \frac{u}{R}\,t \quad ; \quad \Rightarrow \tag{4}$$

$$\dot{\varphi} \to \dot{\varphi} - \frac{u}{R} \quad . \tag{4'}$$

The agreement of the relativistic metrics of the two ensembles at $\mathcal{R} = \tilde{\mathcal{R}}$ gives

$$u = \tilde{\mathcal{R}}\,\Omega \quad , \tag{5}$$

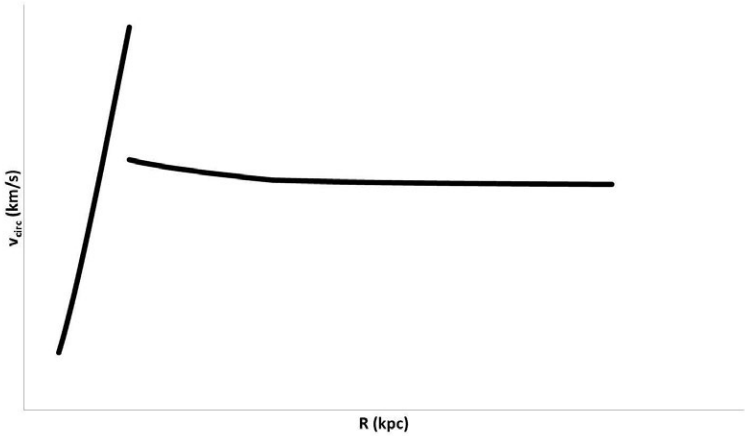


Fig. **2.** *Our theoretical CVC form, which holds for all the galaxy types (spirals, ellipticals, lenticulars, etc.). Of course, for numerical parameters in the observational range.*

and the velocity v_2 of the stars of this ensemble is:

$$v_2 \equiv (\mathcal{R}\dot{\varphi})_2 = \frac{\tilde{\mathcal{R}}\Omega}{2} + \sqrt{\frac{\tilde{\mathcal{R}}^2\Omega^2}{4} + \frac{\alpha c^2}{2\mathcal{R}}} \quad . \tag{6}$$

A qualitative diagram of the form of the functions v_1 (eq.((1))) and v_2 (eq.((6))) is given in *Fig.* **2**. It says that for *all* galaxy types of Hubble's classification the Einstein field equations describe perfectly the gravitational effects ascribed to the Dark Matter.

N.B. – As in [1] we assume that $\mathcal{R}(r)$ represents also the distance from the centre of the considered galaxy (see [5]). –

The theoretical diagram of *Fig.* **3** regards the circular-velocity curve of galaxy N3379. In *Fig.* **1** we see its CVC as given by an observational model.

The pertinent numerical parameters are given in the following sect.**4**.

4. – The abscissae of the CVCs in *Fig.* **1** are R/R_e, where R is the radius of a circular orbit and R_e gives the effective radius of the considered galaxy. For galaxy N3379 (see the bottom of *Fig.* **1**) we have $R_e = 2.236$ kpc $= 2.236 \times 3.087 \times 10^{16}$ km. (We recall that R_e is the radius of a circumference

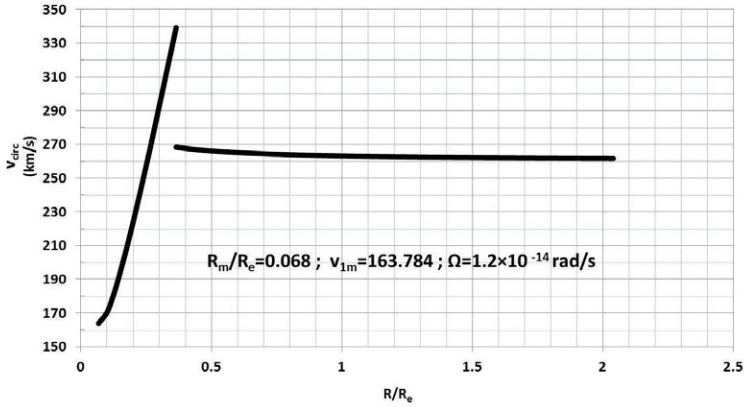


Fig. **3.** *Our theoretical diagram of the CVC of N3379.*

that encloses a region which emits a luminous power equal to the half of the power emitted by the galaxy).

The mass M of the supermassive centre of N3379 is 4.16×10^8 solar masses; therefore

$$\alpha = 1.248 \times 10^9 \,\mathrm{km} \quad . \tag{7}$$

$\tilde{\mathcal{R}}$ is the abscissa of the maximal circular velocity (see *Fig.* **1**); we have:

$$\tilde{\mathcal{R}} = 0.365 \times \mathcal{R}_e \quad . \tag{8}$$

The angular velocity Ω of the supermassive centre is such that $\tilde{\mathcal{R}}\Omega$ is equal, with a good approximation (cf. eq.((6))), to the circular velocity of the last star. We obtain:

$$\Omega = 1.2 \times 10^{-14}\,\mathrm{rad/s} \quad . \tag{9}$$

With these parameters we compute $v_1 = (\mathcal{R}\dot{\varphi})_1$ and $v_2 = (\mathcal{R}\dot{\varphi})_2$ – and the minimum $v_1(\mathcal{R}_\mathrm{m})$ of $v_1(\mathcal{R})$:

$$v_1(\mathcal{R}_\mathrm{m}) = v_1\left[\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha c^2}{\Omega^2}\right)^{1/3}\right] = \frac{1}{2}\left(\alpha\, c^2\, \Omega\right) + c\sqrt{\alpha}\left(\frac{\alpha\, c^2}{\Omega^2}\right)^{-1/6} . \tag{10}$$

The results are graphically represented in *Fig.* **3**.

5. – Since our theoretical model yields the same gravitational effects of

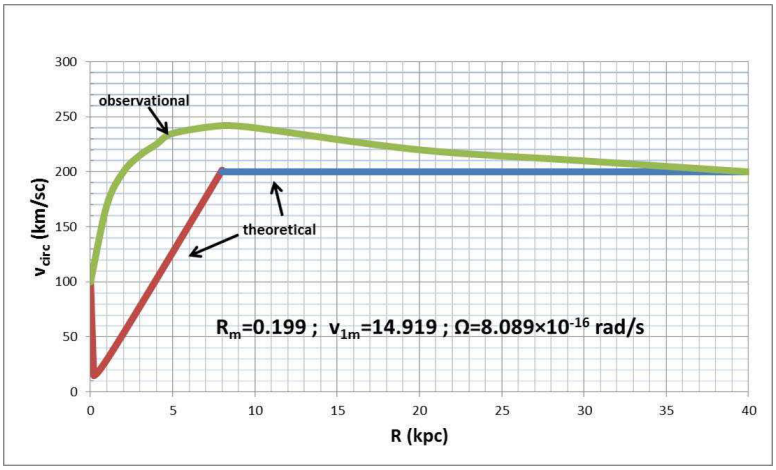


Fig. **4.** *The theoretical CVC of the Milky Way for* $\Omega = 8.089 \times 10^{-16}$ *rad/s. It differs very little from that of the paper [1].*

the Dark matter, it is obvious that it describes rightly all *lensing* observational data.

6. – We emphasize finally that our model rests on the Einsteinian field equations of general relativity without the Λ-term [6] and *without any modification*.

It is a remarkable fact that Zwicky (see pp. 220÷ 223 of [2]), starting from a non-relativistic and intuitive viewpoint, wrote some formulae that resemble our relativistic results.

Acknowledgment. – We are very grateful to Prof. R.P. Saglia, who has sent us several observational data.

APPENDIX

If we determine the Ω of the Milky Way with the criterion adopted in sect.**4** for N3379, we get $\Omega = 8.0 \times 10^{-16}$ rad/s. Consequently, we have a new CVC, see *Fig.* **4**.

[The theoretical diagram of *Fig.* **2** in paper [1], for which $\Omega = 8.855 \times 10^{-16}$ rad/s, does not show that $v_1(\tilde{\mathcal{R}}) > v_2(\tilde{\mathcal{R}})$; however, the dif-

ference $v_1(\tilde{\mathcal{R}}) - v_2(\tilde{\mathcal{R}})$ is small. *Idem* for the CVC of *Fig.* **4** of the present paper.]

A last remark. The Ω of the previous paper [1] and the Ω of the *Fig.* **4** differ very little (8.855×10^{-16} and 8.089×10^{-16} rad/s). This fact is interesting. The first Ω is the angular velocity of the revolution orbit of the Sun (a peripheral star), as it follows from the *Newtonian* attraction between the Sun and the total mass of the Milky Way ($\approx 10^{11}$ solar masses.)

The second Ω is the angular velocity of the supermassive centre of our galaxy (4.5×10^6 solar masses), as it follows from the *Einsteinian* rotation and the observational circular velocity of the galactic last star.

REFERENCES

[1] A. Loinger and T. Marsico, *Academia.edu* and *Researchgate*, 1 February 2015.

[2] F. Zwicky, *Ap. J.*, **86** (1937) 217-246. In this paper, "nebula" means, *more antiquo*, "galaxy".

[3] M. Cappellari *et al.*, *Ap. J. Letters*, 2015 March 31. — O. Gerhard *et al.*, *A. J.* 121: 1936-1951, 2001 April. — A. Kronawilter *et al.*, 2000, *A.* and *S.A.S.*, 144, 53 (K+2000). — See also: E.W. Peng *et al.*, *Ap. J.* 602: 685-704, 2004, February 20. — M.G. Walker *et al.*, *Ap. J. 667*: L53-L56, 2007, September 20.

[4] See *Fig.* **1** in Gerhard [3].

[5] Cf. App. B in A. Loinger and T. Marsico, *arXiv:1011.2600* [physics.gen-ph] 11 November 2010.

[6] We have employed GR without the Λ-term also in our paper "The Dark Energy explained by a Schwarzschildian cosmology — *et cetera*", *Academia.edu* and *Researchgate*, 2014 March.

A RELATIVISTIC MODEL OF THE GALACTIC ROTATION

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

(Adunanza del 26 novembre 2015)

SUNTO. — Si dimostra con un modello di relatività generale che la materia oscura può essere sostituita da una forza gravitazionale-rotazionale. Si è considerato particolareggiatamente il caso della nostra galassia, la Via Lattea.

ABSTRACT. — We prove with a general-relativistic model that the Dark Matter can be substituted by a gravitational-rotational force. To be determinate, we have considered the instance of the Milky Way.

SUMMARY. — Introduction. — **1**. An observational diagram of the circular velocity curves of the Milky Way stars, and our theoretical counterpart. — **2**. Mathematical development of our GR-model. — **3**, Observational and theoretical data of the model. — **4**. Conclusion.

PPACS:04.20 — General relativity; 9850 and 9860 — Galaxies; 98.50L — Milky Way.

INTRODUCTION. — Let us consider the ensemble of the stellar revolutions in a galaxy around its supermassive centre. As it is well known, the star trajectories are rather peculiar. In particular, the stars that are very far from the centre seem to obey Newton's law of gravitation only if one hypothesizes the existence of an invisible, *ad hoc*, Dark Matter Halo.

To be determinate,in the present Note we study the instance of a given spiral galaxy, our MILKY WAY. We prove, with a convenient relativistic approach, that the joined action of the galactic rotation and of gravity yields a behaviour of the far-star orbits which is in a good agreement with the observational data.

(*) Dipartimento di Fisica, Università di Milano, Via Celoria, 16 - 20133 Milano (Italy). Email angelo.loinger@mi.infn.it

(**) Liceo Classico "G. Berchet", Via della Commenda, 26 - 20122 Milano (Italy). Email: martiz64@libero.it

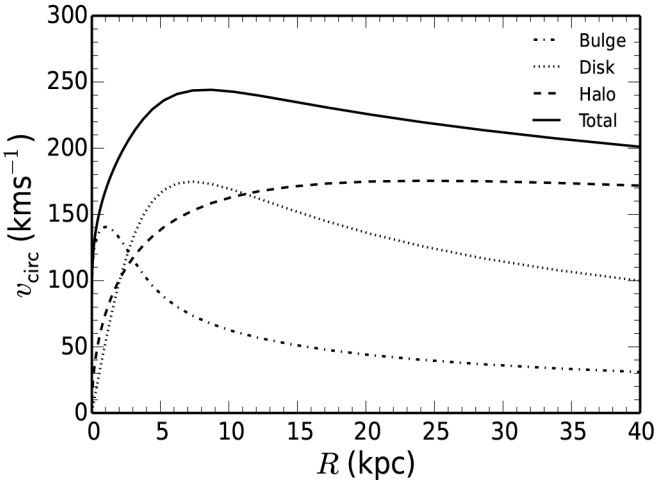


Fig. 1. The circular velocity curve of the Milky Way (Fig. 8 of paper [1]). The circular velocity curve of the Galaxy: the dotted, dashed-dotted and dashed lines are the circular velocity curves along the meridional plane, z=0, for the oblate bulge, Miyamoto-Nagai disk and NFW halo respectively. The radius R is the distance in the Galactic plane. The individual curves are constructed from the best fit estimates of the model parameters. The solid line shows the resultant circular velocity curves due to all the three components of the Galaxy.

1. – In our *Fig.* 1, we have reproduced (with its legend) the *Fig.* 8 of paper [1]. We are interested in the solid-line diagram, which represents the *circular* velocity curves of all the Milky Way stars. We distinguish in it two parts. In the ensemble of the stars that are nearer to the galactic centre, from SgrA* to the distance $R = 8$ kpc , the star velocities increase linearly with the distance from the centre (as in the rotation of a solid body). In the ensemble of the very far stars, from $R = 8$ to $R = 40$ kpc, the velocities decrease slightly, and tend to become constant.

The following relativistic model explains these behaviours. However, the part of the theoretical diagram of *Fig.* 2 which regards the stars of the first ensemble is different from the analogous part of the observational diagram of *Fig.* 1, being similar in form to the first part of a diagram reproduced in the treatise by Unsöld and Baschek [2].

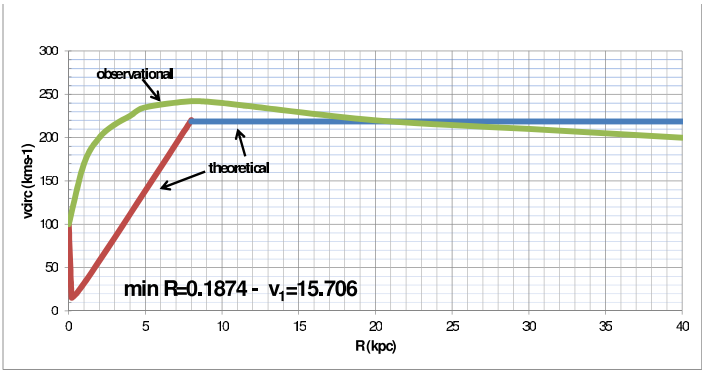


Fig. 2. The theoretical red line represents $v_1(\mathcal{R})$ of formula (6).The theoretical blue line represents $v_2(\mathcal{R})$ of formula ((14)).

2. – We start from the spacetime interval $\mathrm{d}s$ of the Schwarzschild manifold created by a concentrated mass M:

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

where $\mathcal{R} = \mathcal{R}(r)$ is any regular function of the radial coordinate r, $(0 \leq r < \infty)$, which gives a Minkowskian manifold if $r \to \infty$; $\alpha \equiv 2m$; $m \equiv GM/c^2$. We are interested in the *circular* $(\mathrm{d}\mathcal{R} = 0)$ *geodesics* of the test-particles (which represent the stars in our model) and of the light-rays, moving in the plane $\vartheta = \pi/2$.

If $\Omega\ (> 0)$ is the partial common angular velocity of the stars of the first ensemble (from SgrA^* to the distance of 8 kpc), we put $\varphi \to \varphi - \Omega t$. Thus eq. (1) becomes:

$$(2)\quad \left(\mathrm{d}s^2\right)_1 = \left(\frac{\mathcal{R}-\alpha}{\mathcal{R}} - \mathcal{R}^2\frac{\Omega^2}{c^2}\right) c^2\mathrm{d}t^2 - \mathcal{R}^2\,\mathrm{d}\varphi^2 + 2\,\mathcal{R}^2\Omega\,\mathrm{d}\varphi\,\mathrm{d}t\,;$$

obviously,

$$(2')\qquad \frac{\mathcal{R}-\alpha}{\mathcal{R}^3} > \frac{\Omega^2}{c^2}\,.$$

Let us consider the following Lagrangian $\mathcal{L}_1$:

$$(3)\quad \mathcal{L}_1 = \frac{\left(\mathrm{d}s^2\right)_1}{c^2\mathrm{d}t^2} = \frac{\mathcal{R}-\alpha}{\mathcal{R}} - \mathcal{R}^2\frac{\Omega^2}{c^2} - \frac{\mathcal{R}^2}{c^2}\dot{\varphi}^2 + 2\,\mathcal{R}^2\frac{\Omega}{c^2}\dot{\varphi} = A_1 \geq 0\,,$$

where $\dot{\varphi} \equiv \mathrm{d}\varphi/\mathrm{d}t$.

We have:

$$\frac{\partial \mathcal{L}_1}{\partial \mathcal{R}} = 0 = \frac{\alpha}{\mathcal{R}^2} - 2\,\mathcal{R}\frac{\Omega^2}{c^2} - 2\,\frac{\mathcal{R}}{c^2}\,\dot{\varphi}^2 + 4\frac{\mathcal{R}\Omega}{c^2}\dot{\varphi}\,; \quad \Rightarrow \tag{4}$$

$$\dot{\varphi}^2 - 2\Omega\,\dot{\varphi} + \Omega^2 - \frac{\alpha c^2}{2\mathcal{R}^3} = 0\,; \quad \Rightarrow \tag{4'}$$

$$\dot{\varphi} = \Omega \pm \frac{c}{\mathcal{R}}\sqrt{\frac{\alpha}{2\mathcal{R}}}\,; \tag{5}$$

for evident reasons, we choose the positive sign; thus:

$$v_1 = (\mathcal{R}\dot{\varphi})_1 = \mathcal{R}\,\Omega + c\sqrt{\frac{\alpha}{2\mathcal{R}}}\,. \tag{6}$$

If we substitute $\mathcal{R}\dot{\varphi}$ of eq. (6) in $\mathcal{L}_1$, we obtain a new positive inequality for the test-particles ($A_1 > 0$); it follows (*Hilbertian gravitational repulsion* [3]):

$$\mathcal{R} > \frac{3}{2}\,\alpha\,, \tag{7}$$

as in the instance $\Omega = 0$ ([3]) – and further:

$$(\mathcal{R}\dot{\varphi})_1 - \mathcal{R}\,\Omega < \frac{c}{\sqrt{3}}\,. \tag{8}$$

For the light-rays:

$$\mathcal{R} = \frac{3}{2}\,\alpha\,; \quad (\mathcal{R}\dot{\varphi})_1 - \mathcal{R}\,\Omega = \frac{c}{\sqrt{3}}\,.- \tag{9}$$

For the stars of the second ensemble (from $\mathcal{R} = 8$ to $\mathcal{R} = 40$), we put (u is a positive constant):

$$\varphi \to \varphi - \frac{u}{R}\,t\,; \quad \Rightarrow \dot{\varphi} \to \dot{\varphi} - \frac{u}{R}\,, \tag{10}$$

because $\mathrm{d}\mathcal{R} = 0$.

We have the following Lagrangian $\mathcal{L}_2$:

$$\mathcal{L}_2 = \frac{(\mathrm{d}s^2)_2}{c^2\mathrm{d}t^2} = \frac{\mathcal{R}-\alpha}{\mathcal{R}} - \frac{\mathcal{R}^2}{c^2}\left(\dot{\varphi}^2 + \frac{u^2}{\mathcal{R}^2} - 2\,\frac{u\dot{\varphi}}{\mathcal{R}}\right) = A_2 \geq 0\,. \tag{11}$$

The agreement at $\mathcal{R} = \tilde{\mathcal{R}}$ ($= 8$ kpc) between $(\mathrm{d}s^2)_1$ and $(\mathrm{d}s^2)_2$ gives:

$$u = \tilde{\mathcal{R}}\,\Omega\,. \tag{12}$$

Then

$$\frac{\partial \mathcal{L}_2}{\partial \mathcal{R}} = 0 = \frac{\alpha}{\mathcal{R}^2} - 2\,\frac{\mathcal{R}}{c^2}\,\dot{\varphi}^2 + 2\,\frac{\tilde{\mathcal{R}}\Omega}{c^2}\,\dot{\varphi}\,; \quad \Rightarrow \tag{13}$$

$$v_2 \equiv (\mathcal{R}\dot{\varphi})_2 = \frac{\tilde{\mathcal{R}}\Omega}{2} + \sqrt{\frac{\tilde{\mathcal{R}}^2\Omega^2}{4} + \frac{\alpha c^2}{2\mathcal{R}}}\,, \tag{14}$$

where we have chosen the positive sign before the root. –

The theoretical diagram of *Fig.* 2 represents formulae (6) (near stars) and (14) (far stars). It has been drawn by employing *the radial coordinate* $\mathcal{R}$ as a reasonable substitute (in this problem) of *the distance* R – see Hilbert [3] and Appendix B in [4].

3. – We have employed the following numerical parameters:

$$M \equiv M_{\mathrm{SgrA}^*} = 4.5 \times 10^6 M_\odot\,; \quad \Rightarrow \tag{15}$$

$$\alpha = 3\,\mathrm{km} \times 4.5 \times 10^6 = 1.35 \times \times 10^7 \mathrm{km}\,. \tag{15'}$$

Angular velocity Ω of the galaxy rotation:

$$\Omega = 2\,\pi/T_\odot\,, \tag{16}$$

where $T_\odot$ is the period of the solar revolutions around SgrA^*; Sun's velocity: 220 kms^{-1}. This period has been conventionally computed with the Newtonian law of attraction between M_{SgrA^*} and $M_\odot$. We have: $T_\odot = 225 \times 10^6$ yr; thus:

$$\Omega = 8.855 \times 10^{-16}\,\mathrm{rads}^{-1}\,. \tag{16'}$$

We assume that this Ω gives a good approximation of the real angular velocity of the milky Way.

We remember finally that

$$1\,\mathrm{kpc} \mathrel{\hat{=}} 3.087 \times 10^{16}\mathrm{km}\,.- \tag{17}$$

The function $v_1(\mathcal{R})$ of formula (6) has a minimum at the following value $\mathcal{R}_{\min}$ of $\mathcal{R}$:

$$\mathcal{R}_{\min} = \frac{1}{2}\,\left(\frac{\alpha\,c^2}{\Omega^2}\right)^{1/3}\,; \quad \Rightarrow \tag{18}$$

$$v_1(\mathcal{R}_{\min}) = \frac{1}{2}\,\left(\alpha\,c^2\Omega\right)^{1/3} + c\,\sqrt{\alpha}\,\left(\frac{\alpha\,c^2}{\Omega^2}\right)^{-1/6}\,; \quad \Rightarrow \tag{19}$$

$$\dot{\varphi}_1(\mathcal{R}_{\min}) = 3\Omega\,. \tag{19'}$$

$$v_1(\mathcal{R} \approx 1\,\mathrm{pc}) = 100\,\mathrm{kms}^{-1}\ : \tag{20}$$

the common initial point of the two diagrams of *Fig.* 2.

4. – We think that our result shows the possibility that Einstein equations of general relativity contain solutions which can substitute the Dark Matter of the galaxies with an inertial-gravitational force. –

"Par l'espace, l'univers
me comprend et m'engloutit
comme un point,
par la pensée, je le comprends."
B. Pascal

REFERENCES

[1] P.R. Kafle *et al.*, *arXiv:1408.1787* [Astro-ph.GA] 8 August 2014.
[2] A. Unsöld and B. Baschek, *The New Cosmos* (Springer-Verlag, Berlin, *etc.*) 2002, p.412.
[3] D. Hilbert, *Mathem. Annalen*, **92** (1924) 1; also in *Gesammelte Abhandlungen*, Dritter Band (J. Springer, Berlin) 1935, p.258.
[4] A. Loinger and T. Marsico, *arXiv:1011.2600* [physics.gen-ph] 11 Nov 2010.

INTEGRAZIONE DI DIGESTATO CHIARIFICATO COME FONTE DI AZOTO PER LA COLTIVAZIONE DI MICROALGHE

ALESSANDRO ALGERI (*)

Nota presentata dal m.e. Stefano Maiorana
(Adunanza del 26 novembre 2015)

SUNTO. – Una possibile alternativa ai fertilizzanti classici per l'alimentazione di microalghe di acqua salata risulta essere la frazione liquida del digestato proveniente da impianti di digestione anaerobica. L'inclusione di questo nutriente tal quale determina tuttavia problematiche di crescita nella coltivazione dovute all'elevata torbidità. È stato quindi necessario progettare e sperimentare un processo di chiarificazione sostenibile per eliminare gran parte dei solidi sospesi presenti. Tramite l'impiego del mezzo di coltivazione proveniente dalla fase di filtrazione dell'alga è possibile flocculare termicamente i solidi di diversa dimensione presenti nel digestato, rendendolo meno torbido. L'impiego di questa soluzione in coltivazioni di Nannochloropsis di diversa scala, mostra buoni ratei di crescita e nessuna inibizione percettibile dovuta all'inclusione di digestato.

***

ABSTRACT. – A possible alternative to the common fertilizer for feeding microalgae is the liquid fraction of digestate coming from the plants of the anaerobic digestion plants. However, the inclusion of this nutrient as such leads to problems in the growth in culture due to the high turbidity. Therefore, it has been necessary to plan and test a process of sustainable clarification in order to remove most of the suspended solids that are present. By using the culture medium coming from the filtration phase of the alga, it is possible to thermally flocculate the solids of different size present in the digestate, thus making it less turbid. Testing the use of this solution in cultures at Nannochloropsis of different scale, it was observed that they have good growth rates and no perceptible inhibition due to the inclusion of the digestate.

(*) Università di Modena e Reggio Emilia, Italy.
E-mail: alessandro.algeri@gmail.com

1. Introduzione

Il volume d'impiego di estratti microalgali per la produzione di principi attivi ad alto valore commerciale è fortemente influenzato dal costo di produzione della biomassa di partenza. Questo viene determinato dai nutrienti utilizzati che in particolare risultano essere anidride carbonica e fertilizzanti di diverso genere.

Per abbattere questa voce di costi è possibile impiegare sostanze nutritive di recupero che costituiscano fonti alternative di azoto, fosforo, carbonio e micronutrienti.

Un sottoprodotto presente in elevata quantità, di difficile smaltimento e la cui efficacia come nutriente per microalghe è già stata studiata [1][2], risulta essere la fase liquida del digestato proveniente da impianti di produzione di biogas.

Questa materia risulta includere tenori di azoto totale piuttosto elevati, tracce di fosforo sotto forma di fosfato solubile e micronutrienti utili per l'alga. La composizione e le concentrazioni di questi nutrienti risultano tuttavia variabili in funzione dell'alimentazione dell'impianto di digestione anaerobica.

La principale criticità del sottoprodotto preso in esame risulta essere la presenza di particolato in sospensione con granulometria variabile da 0,2 mm a 3 μm. Questo determina un'alta torbidità del liquido, anche se diluito, ed una conseguente schermatura della luce nella coltivazione.

Per rendere utilizzabile il digestato è quindi indispensabile procedere con una chiarificazione che può avvenire con metodi fisici oppure chimici.

Analisi del refluo liquido proveniente dall'impianto di digestione con determinazione dei livelli di fosforo, azoto, solidi sospesi e metalli pesanti

Per la sperimentazione svolta è stato utilizzato digestato liquido proveniente dall'impianto di digestione anaerobica di proprietà di Mantovagricoltura snc sito in Via Malpensa 5/a, Rodigo MN. L'impianto è alimentato tramite scarti provenienti da raccolta differenziata urbana, industriale e fonti amidacee vegetali.

Il digestato ottenuto viene preventivamente separato dalla fase solida grossolana mediante un filtro.

Tab. 1 e *Tab. 2* mostrano le analisi svolte sulla matrice liquida per la determinazione dei macronutrienti e dei principali metalli pesanti presenti.

Tab. 1 – Analisi macro-componenti digestato liquido.

Prova	Risultato	Unità di misura	Metodo
Azoto totale	0,66	%	UNI EN 1550-2009
Calcio (Ca)	0,19	%	Calcolo
Fosforo (P)	549,1	mg/Kg	Calcolo
Potassio (K)	530,0	mg/Kg	Calcolo
Magnesio (Mg)	402,4	mg/Kg	Calcolo
Boro (B)	1,08	mg/Kg	Calcolo
Zinco (Zn)	5,66	mg/Kg	Calcolo
Cloruri (Cl)	2410,8	mg/Kg	UNI ISO 9297

Tab. 2 – Metalli pesanti digestato liquido.

Prova	Risultato	Unità di misura	Metodo
Cromo VI	<0,1	mg/Kg s.s.	EPA 3050B 1996
Cadmio (Cd)	<0,1	mg/Kg s.s.	CNR IRSA 16 Q 64 Vol. 3 1986
Piombo (Pb)	6,8	mg/Kg s.s.	EPA 3050B 1996
Rame (Cu)	56,1	mg/Kg s.s.	EPA 3050B 1996
Zinco (Zn)	277,9	mg/Kg s.s.	EPA 3050B 1996
Mercurio (Hg)	<0,2	mg/Kg s.s.	MI-A016 Rev. 00/2013
Nichel (Ni)	13,4	mg/Kg s.s.	EPA 3050B 1996

1.1 Prove di diversi tipi di pretrattamenti per eliminare i solidi dal digestato

Tutti gli esperimenti sono stati compiuti in laboratorio eseguendo le prove in doppio o in triplo nel caso di risultati discordanti.

I solidi sospesi presenti nella fase liquida del digestato sono principalmente cellule batteriche morte, biomassa non digerita o digerita parzialmente tra cui lignina e cellulosa, metalli e sali organici e inorganici che spesso creano dispersioni.

La separazione per sedimentazione risulta fondamentale per eliminare il particolato non sospeso ma poco efficiente per le particelle di più piccole dimensioni.

1.2 Trattamento a caldo con soluzione ad alta forza ionica

Il primo metodo di flocculazione per eliminare il particolato presente in soluzione consiste nell'aumentare la forza ionica della soluzione tramite NaCl, portare quest'ultima a pH acido (2-3) tramite un acido inorganico e successivamente riscaldare fino a 60°C. Una volta fatto precipitare il solido centrifugare per dividere le due fasi ed ottenere un surnatante limpido.

Il metodo è stato implementato durante la sperimentazione tramite le seguenti prove:

Partendo da campioni di 10 ml di digestato essi sono stati trattati con 5g di NaCl in eccesso e successivamente portati a pH differenti (da 1 a 10). I campioni basificati non mostravano coagulazione di particelle e centrifugandoli a 3000 rpm per 2 minuti si sono ottenuti risultati assimilabili al digestato tal quale. Nei campioni a pH acido si è notato invece un progressivo precipitare di agglomerati di solido e centrifugando nelle stesse condizioni si è ottenuta una soluzione limpida. In particolare sono stati presi in considerazione i campioni a pH 1-3 per i successivi esperimenti.

Per determinare la quantità ottimale di NaCl necessario per ottenere la precipitazione del solido sono stati testati campioni da 100 ml di digestato a cui sono stati aggiunti 1,2,3 e 5 grammi di cloruro di sodio e successivamente acidificati a pH 1 tramite un acido inorganico.

Già dal campione contenente 2 g di NaCl il digestato risulta ben flocculato, si è quindi proceduto mantenendo questa concentrazione.

Le prove per determinare la temperatura a cui far avvenire la flocculazione hanno previsto campioni da 100 ml contenenti 2 g di NaCl e acidificati a pH 1. Le flocculazioni sono state condotte a temperatura ambiente, a 40°C, a 60°C , a 80°C, e a 110°C. Le flocculazioni dalle quali si sono ottenuti risultati migliori sia come tempo di flocculazione che come efficienza sono le due a 110 e 80°C. Tuttavia un pretrattamento del genere implica un riscaldamento elevato e un conseguente consumo termico, si è optato quindi per un trattamento a 60°C come buon compromesso tra efficienza ed economicità.

1.3 Trattamento a caldo con soluzione a media forza ionica

Terminate le prove sull'ottimizzazione del trattamento con NaCl si è deciso di esplorare una variante per le colture algali di acqua salata.

Per questo tipo di alghe è inutile aggiungere NaCl solido poiché il mezzo di coltivazione ne contiene già 25 g per litro.

Si è proceduto allora a sperimentare la flocculazione con diverse proporzioni tra acqua di mare artificiale e digestato, acidificando e scaldando come sopra descritto.

Rese accettabili sono state ottenute con due parti di digestato e una parte di acqua di mare. Per questo tipo di pretrattamento, dove i solidi disciolti vengono diluiti, è necessario operare ad una temperatura di almeno 80°C. Riuscire a flocculare senza NaCl solido permette di integrare meglio la fase nel ciclo produttivo delle alghe. In particolare sfruttando l'acqua priva di alghe in uscita dal raccoglitore che, prima di essere recuperata, viene utilizzata per il pretrattamento del digestato.

1.4 Neutralizzazione

I reattori utilizzati per la coltivazione di microalghe solitamente operano a pH compresi tra 6 e 10, è quindi necessario basificare la soluzione surnatante da cui sono stati eliminati la maggior parte dei solidi sospesi.

Portando il pH da acido a neutro si è assistito tuttavia alla formazione di altro precipitato di colore nerastro, superato il valore indicativo di 5.5 gradi di pH. Eliminando il solido la soluzione risulta molto più limpida rispetto alla precedente a pH acido.

1.5 Trattamento tramite un flocculante inorganico

Un metodo classico per la "chiarificazione" del digestato dai solidi sospesi consiste nell'impiego di un flocculante inorganico convenzionale: il cloruro ferrico. [3]

Questa sostanza permette sia di sfruttare l'effetto coagulante dei cloruri che quello dello ione ferro per ottenere una buona flocculazione a concentrazioni meno elevate.

Partendo da campioni di digestato da 100 ml si sono aggiunti rispettivamente soluzioni di $FeCl_3$ a 0,5% 1% 2% a campioni differenti e si è attesa per alcuni minuti la flocculazione agitando.

Tutti i campioni sono stati successivamente centrifugati ed i surnatanti ottenuti sono stati confrontati.

Tutte le concentrazioni di $FeCl_3$ testate hanno prodotto un surnatante limpido. Le soluzioni derivanti da questo pretrattamento necessitano di essere neutralizzate ma non riseparate.

I prodotti ottenuti dopo la flocculazione con la soluzione salina proveniente dalla raccolta dell'alga e con $FeCl_3$ risultano essere comparabili sia per la torbidità che per concentrazione di azoto. Si è quindi optato per sfruttare il primo metodo per le prove svolte sulle coltivazioni.

1.6 Analisi nutrienti e cloruri dopo la flocculazione

Tab. 3 – Analisi macro-composizione digestato flocculato con acqua marina artificiale.

Prova	**Risultato**	**Unità di misura**	**Metodo**
Azoto totale	0,37	%	UNI EN 1550-2009
Azoto ammoniacale	3023	mg/Kg	MP 002 NH5+ 01/02
Fosforo (P)	21,4	mg/Kg	Calcolo
Cloruri	13323	mg/Kg	UNI ISO 9297

Il notevole aumento dei cloruri era previsto date le aggiunte di acqua salata nel pretrattamento. La presenza pressoché quantitativa dei cloruri in soluzione permette di utilizzare il flocculato solido in agricoltura.

Come previsto il livello di fosforo cala drasticamente dopo il pretrattamento, è quindi necessario procedere ristabilendo il rapporto azoto fosforo a livelli ottimali (*Tab. 3*).

2. Integrazione del genere Nannochloropsis con i tipi di reflui pretrattati a diverse concentrazioni

Un'analisi iniziale delle caratteristiche di diversi generi di microalghe, accomunati da un possibile impiego per la produzione di principi attivi di interesse commerciale, è stata effettuata per determinare la miglior alternativa con la quale condurre la sperimentazione.

Si è tratto che Nannochloropsis fosse la migliore alternativa, vista la resistenza ad alti tenori di azoto e la buona integrazione con il digestato. [4][5][6] Il ceppo scelto di Nannochloropsis sp è stato coltivato in autotrofa con diverse concentrazioni di digestato trattato.

Le coltivazioni sotto riportate sono state sperimentate in doppio utilizzando, quando non precisato, lampade Philips DayLight 58W come fonte di illuminazione. Tutte le coltivazioni sono state condotte a temperatura ambiente durante il periodo estivo in laboratorio con temperature che variavano dai 27 ai 36°C.

Le coltivazioni sono state preparate aggiungendo rispettivamente

5, 10, 20, 30 ml di digestato in diverse beute da 300ml e portandole tutte a 100ml tramite il mezzo di coltivazione f/2 [7]. Tutte le beute sono state poste in autoclave a due atmosfere per 20 minuti per eliminare eventuali tracce batteriche.

Ad ogni beuta è stato poi aggiunto un inoculo di Nannochloropsis per raggiungere una concentrazione finale di circa 0,1 g/L.

Il periodo di coltivazione previsto è stato di 30 giorni in modo da comprendere eventuali acclimatazioni e lag da parte dell'alga.

Le coltivazioni contenenti 30 ml di digestato non hanno mostrato crescita e dopo 30 giorni non si è riscontrata la presenza di alga ancora viva in soluzione.

Le coltivazioni contenenti 20 ml di digestato hanno presentato un rateo di crescita molto basso ed un lag iniziale di due settimane.

Le coltivazioni contenenti 10 ml di digestato hanno presentato una lag di 5 giorni seguita da una crescita fino ad una concentrazione massima di 0,9 g/L.

Prove successive hanno dimostrato che procedendo gradualmente con l'aumento della concentrazione di digestato, partendo da una base al 10%, può portare la coltivazione a mantenere un buon rateo di crescita fino ad una concentrazione di digestato al 20% v/v.

La terza fase di prove riguardante il ceppo di Nannochloropsis, contenente una concentrazione di digestato al 10%, ha previsto il confronto della crescita tra coltivazioni contenenti il digestato chiarificato e il mezzo oppure soltanto il mezzo. A concentrazioni comprese tra il 10 e il 20% di digestato si è potuto notare un aumento della crescita rispetto alle coltivazioni contenenti soltanto il mezzo.

2.1 Scalaggio della coltivazione in reattore

Per determinare la variazione della crescita dell'alga in condizioni di volumetrie maggiori si sono progettati e costruiti due fotobioreattori dalla capacità di 30 e 300 L. Il primo ha permesso l'inoculo del ceppo nel secondo e il mantenimento di uno starter attivo.

Entrambi i fotobioreattori sono alimentati a luce LED fornita da diodi commerciali SMD 50:50 emittenti frequenze corrispondenti a luce bianca fredda e calda. [8][9]

La coltivazione in entrambi i fotobioreattori è stata condotta utilizzando mezzo di coltivazione f/2 [7] privo di azoto sia in forma nitrica che ammoniacale e contenente il 10% di digestato chiarificato.

Le condizioni operative hanno previsto un periodo di luce e buio di 16 e 8 ore rispettivamente per entrambi i reattori.

I test sono stati svolti nella stagione estiva e hanno visto oscillazioni di temperature della coltivazione tra i 25 e i 31°C.

I dati di crescita presi in esame sono stati ottenuti dopo 20 giorni dall'inoculo dell'alga nel reattore da 300L ad una concentrazione iniziale di circa 0,1 g/L.

La concentrazione finale dell'alga è risultata essere di 1,1 g/L nel reattore da 300L e di 1,2 g/L nel reattore da 30L, il che dimostra un buon rateo di crescita di Nannochloropsis sfruttando digestato chiarificato come fonte di azoto inorganico.

Conclusioni

La chiarificazione della fase liquida del digestato tramite acqua marina proveniente dalla raccolta dell'alga risulta essere efficace e poco costosa, tenendo in considerazione la disponibilità di calore emesso dal cogeneratore e utilizzabile per il riscaldamento della miscela acqua/digestato. Il processo di separazione del flocculato può avvenire anche per semplice sedimentazione, non apportando ulteriori costi al processo.

Il digestato trattato in questo modo è risultato essere un'alternativa valida alle fonti classiche di azoto inorganico nella coltivazione di Nannochloropsis.

BIBLIOGRAFIA

Uggetti E., Sialve B., Latrille E., Steyer J.P., "Anaerobic digestate as substrate for microalgae culture: the role of ammonium concentration on the microalgae productivity.", *Bioresource technology* 152, (2014): 437-443.

Sepúlveda C., Acién F. G., Gómez C., Jiménez-Ruíz N., Riquelme C., Molina-Grima E. "Utilization of centrate for the production of the marine microalgae Nannochloropsis gaditana.", *Algal Research* 9, (2015): 107-116.

Waeger F., Delhaye T., Fuchs W., "The use of ceramic microfiltration and ultrafiltration membranes for particle removal from anaerobic digester effluents." *Separation and Purification Technology* 73.2, (2010): 271-278.

Sheets J.P., Ge X., Park S.Y., Li Y., "Effect of outdoor conditions on Nannochloropsis salina cultivation in artificial seawater using nutrients from anaerobic digestion effluent." *Bioresource technology* 152, (2014): 154-161.

Cai T., Park S.Y., Racharak R., Li Y., "Cultivation of Nannochloropsis salina using anaerobic digestion effluent as a nutrient source for biofuel production." *Applied energy* 108 (2013): 486-492.

Dong B., Ho N., Ogden K.L., Arnold R.G., "Cultivation of Nannochloropsis salina in municipal wastewater or digester centrate." *Ecotoxicology and environmental safety* 103, (2014): 45-53.

Guillard, Robert RL, and John H. Ryther, "Studies of marine planktonic diatoms: I. Cyclotella Nana Hustedt, and Detonula Confervacea (CLEVE) Gran." *Canadian journal of microbiology* 8.2, (1962): 229-239.

Kandilian R., Lee E., Pilon L., "Radiation and optical properties of Nannochloropsis oculata grown under different irradiances and spectra." *Bioresource technology* 137, (2013): 63-73.

Vadiveloo A., Moheimani N.R., Cosgrove J.J., Bahri P.A., Parlevliet D., "Effect of different light spectra on the growth and productivity of acclimated Nannochloropsis sp.(Eustigmatophyceae)." *Algal Research* 8, (2015): 121-127.

INDICE DEL VOLUME

MORONI A., Optogenetica: controllare i neuroni con la luce 3

LOINGER A., MARSICO T., All relativistic trajectories of bodies are geodesic – *et cetera* 11

REGAZZINI E., CIFARELLI D., Per il centesimo anniversario della teoria delle relazioni statistiche di Corrado Gini 21

SACCHI LANDRIANI G., ANTONELLO E., Al tramonto del geocentrismo - Astronomia nelle cinquecentine dell'Istituto Lombardo 43

GAETANI M., Permo-Triassic evolution of the Adria margin in northern Albania 69

CANI V., Gli studi di Aldo Perroncito sulla rigenerazione del nervo periferico 79

CATTANEO E., Huntington, storia di un gene antico 87

PARRINELLO S., Un progetto per il rilievo archeologico del sito di Masada in Israele 91

GOBBI P.G., Occhio e visione: meraviglia della natura o progetto difettoso? 105

SOAVE C., Le piante sono destre o mancine? 125

ANDREOLI V., La strage evitabile del Germanwings 131

FERMO P., La chimica e i beni culturali, un connubio vincente: studio tecnologico di ceramiche e vetri attraverso i secoli 143

LOINGER A., MARSICO T., Relativistic galaxy rotations *versus* dark matter 157

LOINGER A., MARSICO T., A relativistic model of the galactic rotation 165

INDICE PER MATERIA

CHIMICA

ALGERI A., Integrazione di digestato chiarificato come fonte di azoto per la coltivazione di microalghe 171

FERMO P., La chimica e i beni culturali, un connubio vincente: studio tecnologico di ceramiche e vetri attraverso i secoli 143

FISICA

GOBBI P.G., Occhio e visione: meraviglia della natura o progetto difettoso? 105

LOINGER A., MARSICO T., Relativistic galaxy rotations *versus* dark matter 157

LOINGER A., MARSICO T., A relativistic model of the galactic rotation 165

LOINGER A., MARSICO T., All relativistic trajectories of bodies are geodesic – *et cetera* 11

SACCHI LANDRIANI G., ANTONELLO E., Al tramonto del geocentrismo Astronomia nelle cinquecentine dell'Istituto Lombardo 43

INGEGNERIA

PARRINELLO S., Un progetto per il rilievo archeologico del sito di Masada in Israele 91

MEDICINA

ANDREOLI V., La strage evitabile del Germanwings 131

CANI V., Gli studi di Aldo Perroncito sulla rigenerazione del nervo periferico 79

CATTANEO E., Huntington, storia di un gene antico 87

SCIENZE MATEMATICHE

REGAZZINI E., CIFARELLI D., Per il centesimo anniversario della teoria delle relazioni statistiche di Corrado Gini 21

Scienze naturali

GAETANI M., Permo-Triassic evolution of the Adria margin in northern Albania 69

MORONI A., Optogenetica: controllare i neuroni con la luce 3

SOAVE C., Le piante sono destre o mancine? 125

Finito di stampare nel mese di febbraio 2019

Decreto Pres. Tribunale 10 gennaio 1961, n. 5504 registro cancelleria
Direttore responsabile: Adele Robbiati Bianchi