ISTITUTO LOMBARDO
ACCADEMIA di SCIENZE e LETTERE



Rendiconti

CLASSE DI SCIENZE MATEMATICHE E NATURALI

Vol. 157
(2023-2024)

Istituto Lombardo
Accademia 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. 157
(2023-2024)

Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere

MILANO

ISTITUTO LOMBARDO ACCADEMIA DI SCIENZE E LETTERE

RENDICONTI

CLASSE DI SCIENZE MATEMATICHE E NATURALI

Comitato di Presidenza e di Redazione
Stefano Maiorana
Cinzia Bearzot
Carlo Enrico Bottani (Responsabile scientifico)
Paolo Mazzarello

Direttore Responsabile
Rita Pezzola

Pubblicato con il contributo di:
Università degli Studi di Milano
Politecnico di Milano
Università degli Studi di Pavia
Università degli Studi di Milano-Bicocca
Università degli Studi dell'Insubria di Varese
Università Commerciale L. Bocconi di Milano
Università Cattolica del Sacro Cuore di Milano
Università degli Studi di Brescia
Università di Bergamo

Associato all'Unione Stampa Periodica Italiana

pISSN 1974-6989
eISSN 2384-986X
Copyright 2024

PAGEPress Publications
via A. Cavagna Sangiuliani, 5
27100 Pavia, Italy
T. +39.0382.1549020

THE SAGA OF THE PEPTIDE Aβ1-6A2V(D)

MARIO SALMONA (*)

Nota presentata dal m.e. Stefano Maiorana
(Adunanza del 2 febbraio 2023)

Il peptide Aβ1-6A2V(D) rappresenta un nuovo approccio "bio-ispirato" per il trattamento di disturbi neurodegenerativi come il morbo di Alzheimer (AD) e le lesioni cerebrali traumatiche (TBI). Questo peptide sintetico deriva da una rara variante genetica della proteina amiloide-β (Aβ) osservata in un paziente, specificamente la mutazione A673V nel gene della proteina precursore dell'amiloide (APP). È interessante notare che gli individui eterozigoti per questa mutazione sono protetti contro l'AD. Il peptide Aβ1-6A2V(D) corrisponde ai primi sei aminoacidi di questa variante della proteina Aβ, ma è composto interamente da D-aminoacidi, il che ne aumenta la stabilità e la resistenza alla degradazione proteolitica. Questa sequenza aminoacidica permette al peptide di interferire con l'aggregazione delle proteine Aβ e tau, due attori principali nello sviluppo della patologia dell'AD e di altre condizioni neurodegenerative.

Riportiamo di seguito i principali risultati ottenuti sulle potenziali applicazioni terapeutiche di questo promettente peptide.

I nostri studi hanno mostrato che l'Aβ1-6A2V(D) ha un meccanismo d'azione multiforme. Interferisce con l'aggregazione sia delle proteine Aβ che tau, che sono attori principali nella patologia dell'AD. Il

(*) Department of Molecular Biochemistry and Pharmacology, Istituto di Ricerche Farmacologiche Mario Negri IRCCS, Milano, Italy.
E-mail: mario.salmona@marionegri.it

peptide inibisce la formazione di oligomeri e fibrille di Aβ, aumentando al contempo la suscettibilità della tau alle proteasi. Questa doppia azione sia su Aβ che su tau lo distingue da molte altre potenziali terapie per l'AD che mirano solo a una di queste proteine.

In studi su topi transgenici APPSwe/PS1dE9, un modello consolidato di AD, la somministrazione intranasale di Aβ1-6A2V(D) ha permesso di osservare notevoli effetti benefici. Il trattamento ha ridotto i livelli di aggregati di Aβ nel cervello, ha diminuito la formazione di placche amiloidi e ha preservato l'integrità sinaptica. Questi risultati sono stati anche evidenziati dai livelli più elevati delle proteine sinaptiche nei topi trattati rispetto ai controlli [1].

Il peptide è risultato attivo anche in un modello murino di lesioni cerebrali traumatiche. Il trattamento con Aβ1-6A2V(D) ha permesso di osservare migliori risultati neurologici, ridotti marcatori ematici di danno assonale e diminuiti livelli di tau fosforilata nel cervello. Questi risultati suggeriscono che il peptide potrebbe potenzialmente essere utilizzato per mitigare le conseguenze neurodegenerative a lungo termine di traumi cerebrali [2].

Uno dei principali vantaggi dell'Aβ1-6A2V(D) è il suo efficiente passaggio della barriera ematoenfalica e della sua distribuzione nel cervello. La somministrazione intranasale ha permesso di rilevare il peptide in tutto il cervello, comprese in aree cruciali come la corteccia cerebrale, l'ippocampo e il cervelletto. Il peptide è stato rilevato fino a 48 ore dalla somministrazione, a conferma di un profilo farmacocinetico favorevole.

È importante notare che gli studi non hanno evidenziato effetti collaterali nei topi trattati. Il peptide non ha indotto una risposta anticorpale rilevabile contro se stesso o contro Aβ1-42, a testimonianza di una bassa immunogenicità. Questo è un fattore cruciale per qualsiasi potenziale trattamento a lungo termine.

L'approccio Aβ1-6A2V(D) offre diversi vantaggi rispetto ad altre potenziali terapie per l'AD. La sua base in una variante genetica protettiva naturalmente presente fornisce una forte motivazione per la sua potenziale efficacia. Come peptide composto interamente da isomeri D, è resistente alla degradazione proteolitica, potenzialmente aumentando la sua stabilità e biodisponibilità. La via intranasale permette una somministrazione non invasiva e una efficiente penetrazione cerebrale. Forse ancora più importante, l'approccio mira a molteplici aspetti della patologia dell'AD e del trauma cerebrale, che potrebbero rivelarsi più efficaci delle terapie a singolo bersaglio.

Le potenziali applicazioni dell'Aβ1-6A2V(D) sono ampie. Potrebbe potenzialmente essere utilizzato per la prevenzione dell'AD in individui ad alto rischio, il trattamento dell'AD in fase iniziale e come agente neuroprotettivo dopo un trauma cerebrale per ridurre il rischio di neurodegenerazione a lungo termine.

Il potenziale dell'Aβ1-6A2V(D) come terapia preventiva per l'AD è particolarmente intrigante e merita ulteriori esplorazioni.

Tuttavia, come per tutta la ricerca preclinica, ci sono limitazioni e aree per studi futuri. L'efficacia dimostrata nei modelli murini deve essere replicata in studi umani. È necessario stabilire dosaggi e schemi di trattamento ottimali, e sono necessari dati sulla sicurezza e l'efficacia a lungo termine.

In conclusione, questi studi forniscono convincenti evidenze del potenziale dell'Aβ1-6A2V(D) come nuovo approccio terapeutico per l'AD e il trauma cerebrale. I suoi effetti multi-target, la base in una variante genetica protettiva naturalmente presente e il profilo di somministrazione favorevole lo rendono un candidato promettente per ulteriori sviluppi. Con il progredire della ricerca, l'Aβ1-6A2V(D) potrebbe offrire nuove speranze nel difficile campo del trattamento delle malattie neurodegenerative.

BIBLIOGRAFIA

1. Diomede, L., Zanier, E. R., Moro, F., Vegliante, G., Colombo, L., Russo, L., Salmona, M. (2023). Il peptide Aβ1-6A2V(D), efficace sull'aggregazione di Aβ, inibisce il misfolding del tau e protegge il cervello dopo lesioni cerebrali traumatiche. Molecular Psychiatry, 28(7), 2433-2444.
2. Catania, M., Colombo, L., Sorrentino, S., Cagnotto, A., Lucchetti, J., Barbagallo, M. C., & Di Fede, G. Salmona M. (2022). Una nuova strategia bio-ispirata per prevenire l'amiloidogenesi e il danno sinaptico nel morbo di Alzheimer. Molecular Psychiatry, 27(11), 5227-5234.

The Aβ1-6A2V(D) peptide represents a novel, bio-inspired approach to treating neurodegenerative disorders such as Alzheimer's disease (AD) and traumatic brain injury (TBI). This synthetic peptide is derived from a naturally occurring genetic variant of the amyloid-β (Aβ) protein, specifically the A673V mutation in the amyloid precursor protein (APP) gene. Intriguingly, individuals who are heterozygous for this mutation appear to be protected against AD. The Aβ1-6A2V(D) peptide mimics the first six amino acids of this variant Aβ protein but is composed entirely of D-amino acids, which enhances its stability and resistance to proteolytic degradation. This unique design allows the peptide to interfere with the aggregation of both Aβ and tau proteins, two key players in the pathology of AD and other neurodegenerative conditions. The following summary explores recent research into the potential therapeutic applications of this promising peptide.

The research reveals that Aβ1-6A2V(D) has a multifaceted mechanism of action. It interferes with the aggregation of both Aβ and tau proteins, which are key players in AD pathology. The peptide inhibits the formation of Aβ oligomers and fibrils, while also increasing the susceptibility of tau to degradation by proteases. This dual action on both Aβ and tau sets it apart from many other potential AD therapies that target only one of these proteins.

In studies using APPSwe/PS1dE9 transgenic mice, an established model of AD, intranasal administration of Aβ1-6A2V(D) showed remarkable effects. The treatment reduced levels of aggregated Aβ in the brain, decreased amyloid plaque formation, and preserved synaptic integrity. These effects were evidenced by higher levels of synaptic proteins in treated mice compared to controls [1].

The peptide also showed promise in a mouse model of TBI. Treatment with Aβ1-6A2V(D) led to improved neurological outcomes, reduced blood markers of axonal damage, and decreased levels of phosphorylated tau in the brain. These findings suggest that the peptide could potentially be used to mitigate the long-term neurodegenerative consequences of TBI [2].

One of the key advantages of Aβ1-6A2V(D) is its efficient delivery and distribution in the brain. Intranasal administration resulted in the peptide being detectable throughout the brain, including in crucial areas such as the cerebral cortex, hippocampus, and cerebellum. The peptide remained detectable for up to 48 hours after administration, suggesting a favorable pharmacokinetic profile.

Importantly, the studies found no apparent side effects in the treated mice. The peptide did not induce a detectable antibody response against itself or Aβ1-42, indicating low immunogenicity. This is a crucial factor for any potential long-term treatment.

The Aβ1-6A2V(D) approach offers several advantages over other potential AD therapies. Its basis in a naturally occurring protective genetic variant provides a strong rationale for its potential efficacy. As an all-D-isomer peptide, it is resistant to protease degradation, potentially increasing its stability and bioavailability. The intranasal delivery route allows for non-invasive administration and efficient brain penetration. Perhaps most importantly, the approach targets multiple aspects of AD and TBI pathology, which may prove more effective than single-target therapies.

The potential applications of Aβ1-6A2V(D) are broad. It could potentially be used for the prevention of AD in high-risk individuals, treatment of early-stage AD, and as a neuroprotective agent after TBI to reduce the risk of long-term neurodegeneration.

The potential of Aβ1-6A2V(D) as a preventive therapy for AD is particularly intriguing and warrants further exploration.

However, as with all preclinical research, there are limitations and areas for future study. The efficacy demonstrated in mouse models needs to be replicated in human trials. Optimal dosing and treatment schedules need to be established, and long-term safety and efficacy data are needed.

In conclusion, these studies provide compelling evidence for the potential of Aβ1-6A2V(D) as a novel therapeutic approach for AD and TBI. Its multi-target effects, basis in a naturally occurring protective genetic variant, and favorable delivery profile make it a promising candidate for further development. As research progresses, Aβ1-6A2V(D) may offer new hope in the challenging field of neurodegenerative disease treatment.

REFERENCES

1. Diomede, L., Zanier, E. R., Moro, F., Vegliante, G., Colombo, L., Russo, L., ... & Salmona, M. (2023). Aβ1-6A2V(D) peptide, effective on Aβ aggregation, inhibits tau misfolding and protects the brain after traumatic brain injury. Molecular Psychiatry, 28(7), 2433-2444.
2. Catania, M., Colombo, L., Sorrentino, S., Cagnotto, A., Lucchetti, J., Barbagallo, M. C.,& Di Fede, G. Salmona M. (2022). A novel bio-inspired strategy to prevent amyloidogenesis and synaptic damage in Alzheimer's disease. Molecular Psychiatry, 27(11), 5227-5234.

Istituto Lombardo (Rend. Scienze) 157, 9-18 (2023-2024)

BIG DATA E INNOVAZIONE: PROSPETTIVE PER LA SALUTE E I DATI PERSONALI

FRANCESCO LESCAI (*)

Nota presentata dal m.e. Giuliano Gasperi
(Adunanza del 23 marzo 2023)

SUNTO. – Negli ultimi anni, il concetto di big data ha guadagnato rilevanza in vari settori, con un impatto significativo in medicina. In questo articolo esploriamo come i big data stiano trasformando la pratica medica e la protezione dei dati personali. La gestione di grandi volumi di dati genomici, ad esempio, offre nuove prospettive sulla diversità genetica e sulle malattie. Tuttavia, la vera rivoluzione non risiede nella quantità di dati, ma nella capacità di estrarre informazioni significative per comprendere fenomeni complessi. Vengono discussi esempi come il database GnomAD e studi sulle varianti genetiche legate alla schizofrenia, evidenziando l'importanza della diversità genetica e dell'analisi dettagliata. Le infrastrutture per il calcolo ad alte prestazioni e l'Intelligenza Artificiale (IA) giocano un ruolo cruciale nell'elaborazione di questi dati, con l'IA che permette di catturare relazioni non lineari tra componenti biologici. Inoltre, vengono affrontate le sfide relative alla privacy dei dati e all'impatto ambientale delle infrastrutture di calcolo. In sintesi, sottolineiamo l'importanza della qualità e della comprensione delle relazioni fra i dati, supportata da solide infrastrutture bioinformatiche e avanzate capacità analitiche dell'IA, per migliorare la comprensione dei sistemi biologici.

***

ABSTRACT. – In recent years, the concept of big data has become increasingly relevant across various sectors, with significant impact in medicine. In this article we explore how big data is transforming medical practice and personal data protection. Managing large volumes of genomic data, for instance, offers new perspectives on genetic diversity and diseases. However, the true revolution lies not in the quantity of data but in the ability to extract meaningful information to understand complex phenomena. Examples such

(*) Dipartimento di Biologia e Biotecnologie "L. Spallanzani", Università degli Studi di Pavia, Italy. E-mail: francesco.lescai@unipv.it

as the GnomAD database and studies on genetic variants linked to schizophrenia are discussed, highlighting the importance of genetic diversity and detailed analysis. High-performance computing infrastructures and Artificial Intelligence (AI) play a crucial role in processing these data, with AI enabling the capture of non-linear relationships among biological components. Additionally, the article addresses challenges related to data privacy and the environmental impact of computing infrastructures. In summary, we emphasise the importance of data quality and correlation, supported by robust bioinformatics infrastructures and advanced AI analytical capabilities, to enhance the understanding of biological systems.

Introduzione

Negli ultimi anni, il concetto di big data è diventato sempre più rilevante in tutti i campi della nostra vita quotidiana, dalla medicina all'innovazione tecnologica, alla raccolta di dati in tutti i settori. Un campo particolare in cui i big data avranno un impatto significativo però è proprio la medicina, poiché hanno implicazioni importanti non solo per la trasformazione della pratica medica, ma anche per l'impatto che la raccolta e la gestione di questi dati possono avere sulla protezione dei dati personali [1].

Prima di affrontare questo argomento, è essenziale chiarire cosa intendiamo per big data, poiché questa definizione pone grande enfasi sulla dimensionalità. Quando parliamo di big data, dobbiamo fare un confronto con la scala di esperienze che abbiamo nella vita quotidiana. Ad esempio, un'ora di film ad alta definizione occupa circa 3 gigabyte (GB) di spazio di archiviazione. La scala successiva del gigabyte è il terabyte, che corrisponde a 1.024 gigabyte. Ciò significa che un terabyte equivale a circa 341 ore di film in alta definizione. La scala successiva al terabyte è il petabyte (PB), che corrisponde a 1.024 terabyte (TB). Questa dimensione è equivalente a circa mille dischi rigidi del tipo che possono essere installati oggi su un moderno computer portatile.

Abbiamo parlato di film e se vogliamo fare un confronto tra un servizio di streaming più conosciuto al giorno d'oggi, la sua libreria di film ha una dimensione di circa 60 petabyte. Adesso, se volessimo fare un confronto più nell'ambito della genomica e quindi spostarci da un quotidiano e dall'intrattenimento verso un'ambito più medico-biologico, un genoma umano occupa su disco circa 120 GB una volta sequenziato in modo appropriato. Ciò significa che nella libreria di uno dei più

famosi servizi di streaming potremmo tranquillamente ospitare circa 520.000 genomi umani.

Continuando sulla strada della dimensionalità in ambito biomedico, possiamo volgere lo sguardo al database internazionale più comunemente utilizzato in questi anni per depositare le sequenze genomiche di coronavirus SARS-CoV-2. Al marzo 2023, questo database ospitava circa 15 milioni di sequenze. 633.200 circa di queste sequenze sono state depositate da parte della Danimarca, 3 milioni circa sono state depositate dalla Gran Bretagna, 178.130 sono state depositate dall'Italia. Se facciamo un confronto con la popolazione, quella danese è di 5 milioni e 800 mila unità, il che significa che la Danimarca, al marzo 2023, aveva sequenziato il 10.8% della propria popolazione da un punto di vista degli individui in cui era stata riscontrata l'infezione da coronavirus.

La Gran Bretagna ha una popolazione di 67 milioni e 326 mila individui, per cui le sequenze di coronavirus depositate dalla Gran Bretagna corrispondono a circa il 4,5% degli individui della propria popolazione. Se facciamo lo stesso confronto con l'Italia, che ha una popolazione di 59 milioni 109 mila 668 persone, le sequenze di coronavirus depositate nella database internazionale corrispondono allo 0.3% degli individui della nostra popolazione [2].

Continuando sulla grandezza dei database di ambito biomedico, ad esempio, un database genomico internazionalmente conosciuto è il Sequence Read Archive (SRA) negli Stati Uniti: un database che nell'ultima decade è cresciuto fino ad ospitare 25.6 petabyte di sequenze. Come abbiamo raggiunto in questi ultimi anni, queste grandi quantità di dati depositate in database accessibili a livello internazionale? Attraverso strumenti che consentono sempre più facilmente, nel caso della genomica, di ottenere sequenze dei genomi di organismi di interesse. Ad esempio, oggi ci sono almeno tre aziende che commercializzano grandi sequenziatori e queste macchine consentono in un intervallo che va dalle 24 alle 72 ore di sequenziare un equivalente di sequenze che va da 6 terabyte a 16 terabyte. Ciò corrisponde a circa 27.344 genomi umani diploidi.

Abbiamo finora discusso di dimensionalità.

In questo mio contributo, cercherò tuttavia di dimostrare che l'importanza dei big data non sta nella dimensione, nella grandezza dei dati, ma nella disponibilità di un'informazione che noi possiamo utilizzare per raccogliere nuove conclusioni, e costruire nuove prospettive su fenomeni complessi.

Informazione e big data

Un esempio significativo è rappresentato dal database internazionale di sequenze genomiche "GnomAD". Nella sua versione 3.1, questo database contiene 76.156 genomi di individui senza rapporti di parentela. La versione precedente includeva 15.788 sequenze genomiche e 125.748 sequenze di esoma, ovvero la porzione del genoma che codifica per le proteine. Sebbene questi numeri possano sembrare piccoli rispetto ai milioni di sequenze discusse in precedenza, essi sono di fondamentale importanza. Le sequenze di questi individui, infatti, hanno permesso di confrontare la diversità genomica umana a livello globale, offrendo un quadro estremamente accurato e una vasta disponibilità di dati per rappresentare la diversità ancestrale della popolazione umana [3,4].

Questo è particolarmente rilevante poiché, negli ultimi anni, si è sviluppata una conversazione significativa nella comunità scientifica internazionale riguardo al fatto che la maggior parte dei database di sequenze genomiche rappresentavano principalmente individui di origine europea appartenenti a popolazioni caucasiche, non riflettendo adeguatamente la diversità delle popolazioni umane. Grazie agli sforzi fatti per costruire una maggiore diversità ancestrale, questo database colma parzialmente questa lacuna.

Inoltre, il database ha permesso di studiare in dettaglio le variazioni di sequenza all'interno del genoma umano, incluse quelle più rare. Con l'inclusione di un numero così elevato di genomi, è stato possibile descrivere e confrontare le frequenze di tutte le variazioni genetiche scoperte. Questo ha portato a una migliore comprensione dei geni nel genoma umano maggiormente sottoposti a pressione selettiva, facendo emergere che alcune varianti tendono a scomparire attraverso le generazioni in un processo noto come "purifying selection". Ad esempio, è stato possibile determinare che i geni soggetti a mutazioni che causano una perdita di funzione mostrano solo il 48% delle variazioni attese, indicando che la maggior parte dei geni nel nostro genoma sono sottoposti a una selezione negativa che evita la trasmissione di mutazioni deleterie alle generazioni successive. Questo ha permesso di identificare geni intolleranti alle mutazioni cosiddette "loss of function" [4].

Nonostante l'importanza dei dati in termini di quantità, è la qualità dell'analisi a rivelare il vero valore di queste informazioni. La gestione di tali enormi quantità di dati pone significative sfide computazionali. Ad

esempio, conservare i dati di GnomAD occuperebbe circa 900 terabyte, ma grazie a formati di file innovativi sviluppati per la versione 3.1, l'archiviazione richiede solo 20 terabyte, riducendo drasticamente lo spazio necessario. Inoltre, gli algoritmi di calcolo innovativi hanno ridotto significativamente i costi di aggiunta incrementale di informazioni, da 13.000 dollari a circa 400 dollari per l'inclusione di 4.598 nuovi genomi.

Un altro esempio rilevante è uno studio sulle varianti rare associate al rischio di sviluppare schizofrenia, a cui abbiamo contribuito. Questo studio, inizialmente avviato dal consorzio danese chiamato iPSYCH, è stato successivamente ampliato a livello internazionale, coinvolgendo numerosi gruppi di ricerca. Lo studio ha analizzato 24.248 casi di schizofrenia e 97.322 controlli [5]. Le varianti rare coinvolte nel rischio di schizofrenia, spesso difficili da individuare, sono state identificate grazie all'elevato numero di campioni. Sono stati identificati 10 geni associati a un rischio significativo di sviluppare schizofrenia. In particolare, varianti rare che troncano la proteina conferiscono un rischio relativo tra 1.2 e 1.3 nei geni intolleranti alle mutazioni che causano perdita di funzione.

Questi risultati riflettono fenomeni osservati nelle mutazioni cosiddette *de-novo*, che compaiono spontaneamente in un individuo senza essere ereditate dai genitori. I geni identificati appartengono a tre categorie principali, corrispondenti alle ipotesi di sviluppo della malattia: geni coinvolti nella migrazione neuronale, come TRIO; geni coinvolti nel trasporto ionico, come GRIN2A, CACNA1G, e GRIA3; e geni coinvolti in altre funzioni chiave dello sviluppo cerebrale. Senza una così ampia numerosità di dati, sarebbe stato impossibile individuare questi geni e comprendere meglio i meccanismi molecolari alla base della schizofrenia [5].

Infrastrutture per i big data

Nei paragrafi precedenti è emerso chiaramente che la grandezza del dato non dovrebbe essere l'elemento più importante dei big data, ma che centrale è la capacità di estrarre informazioni da essi e i metodi utilizzati per farlo. Tuttavia, come già accennato, per processare questi tipi di dati sono necessarie infrastrutture capaci di svolgere calcoli adeguati e di conservare tali dati. Ad esempio, un petabyte di dischi occupa solitamente una parete di una stanza di medie dimensioni, oppure

richiede grandi aggregati di computer, detti cluster, di cui esistono diversi esempi.

Il cluster che abbiamo utilizzato in Danimarca per lo studio sulla schizofrenia nei campioni Danesi, ad esempio, occupava due pareti di una stanza di medie dimensioni, aveva un totale di 6.776 processori distribuiti su 213 nodi, con una capacità di archiviazione totale di 16 petabyte. Questo tipo di infrastruttura consente di processare 200 esomi in meno di 15 ore. Tuttavia, stiamo assistendo a un'evoluzione di queste infrastrutture, con una sempre maggiore centralizzazione delle risorse computazionali, come nel caso del cloud computing, dove grandi centri di calcolo concentrano le infrastrutture necessarie, permettendo a numerosi clienti di accedervi da remoto. Ciò consente di creare rapidamente l'infrastruttura necessaria come sottoinsieme di una infrastruttura fisica esistente che occupa spesso grandi capannoni industriali.

In Italia, ad esempio, grazie ai fondi del PNRR, è stato avviato un consorzio nazionale chiamato ICSC, uno dei cinque centri nazionali istituiti dal PNRR, e dedicat a High Performance Computing, Big Data e Quantum Computing, con circa 320 milioni di euro e più di 50 partner pubblici e privati.

Intelligenza Artificiale e big data

Nei paragrafi precedenti ho sottolineato più volte che la vera rivoluzione dei big data non risiede tanto nella loro dimensione quanto nella capacità di connettere le informazioni fra loro. Questo è un tema a me molto caro, poiché l'obiettivo di quest'area, su cui anche noi stiamo lavorando, è essenzialmente quello di costruire un nuovo modello della complessità. Questo approccio è profondamente diverso da quello che la biologia ha adottato fino ad ora, basato su un metodo di lavoro di tipo riduzionista. Tale metodo scompone un sistema in componenti più piccole, più facili da comprendere e su cui si possono eseguire esperimenti mirati, tentando poi di comprendere il sistema nel suo complesso ricostruendo i pezzi a partire dalle informazioni raccolte in questi frammenti dell'organismo [6].

Oggi, grazie alle grandi infrastrutture di calcolo e ai metodi disponibili, come l'intelligenza artificiale, possiamo adottare invece un approccio completamente diverso: quello di integrare la grande quantità di dati a disposizione e costruire un modello che rappresenti la

complessità biologica nel suo insieme, senza scomporre le sue parti. Un'area di grande interesse per il nostro laboratorio è, ad esempio, il deep learning, sviluppato utilizzando reti neurali artificiali. Questo approccio è estremamente importante perché il deep learning consente di catturare relazioni non lineari tra i componenti biologici [7].

Questo è cruciale poiché, fino ad oggi, la maggior parte dei modelli lineari in biologia è riuscita a catturare molte informazioni importanti, consentendo significativi progressi nella conoscenza dei sistemi biologici. Tuttavia, stiamo raggiungendo un limite oltre il quale restano ancora aspetti cruciali che l'approssimazione lineare delle relazioni all'interno dei sistemi biologici non riesce a individuare. Intendiamo utilizzare il deep learning per catturare questi pattern nascosti, applicando questi metodi non solo alla predizione del comportamento dei sistemi biologici, ma anche alla comprensione dei loro meccanismi di funzionamento.

Questa è un'area in grande sviluppo chiamata *explainability*, che consente di utilizzare i meccanismi di predizione delle reti neurali per risalire al modo in cui queste costruiscono le predizioni, studiando gli input e le relazioni scoperte dalle reti neurali. In questo modo, è possibile individuare la rilevanza dei dati analizzati dalla rete, consentendo anche di effettuare nuove scoperte. Questo aggiunge strumenti di indagine innovativi, oltre alla capacità intrinseca delle reti neurali di classificare o predire il comportamento dei sistemi biologici [8,9].

Big data, privacy e ambiente

Se inseriamo questo nel contesto biomedico, in cui la quantità di dati raccolti sui singoli individui sta aumentando giorno dopo giorno, emergono naturalmente numerosi problemi e aspetti da considerare relativi alla privacy e all'utilizzo di questi dati. Da un lato, vi è una crescente necessità di protezione dei dati personali. Dall'altro, vi è anche la necessità di sviluppare meglio il concetto di consenso dinamico, ovvero la capacità di un individuo non solo di revocare, ma anche di modificare il consenso dato per l'utilizzo dei propri dati personali.

Questa rappresenta una grande frontiera e una sfida significativa, poiché comporta numerosi problemi tecnici. Devono esistere infrastrutture e metodi di accesso per consentire la modifica del consenso sui dati personali nel tempo, e questo non è affatto semplice da realizzare.

Inoltre, esiste un importante aspetto ambientale quando si parla di

big data. La necessità di disporre di grandi infrastrutture di calcolo implica che queste strutture saranno anche grandi fonti di consumo energetico, con un impatto ambientale non trascurabile. Questo include anche l'uso delle materie prime necessarie per costruire tali infrastrutture [10].

In sintesi, mentre la gestione e l'analisi dei big data offrono enormi potenzialità per la biomedicina, è fondamentale affrontare le sfide relative alla privacy dei dati e all'impatto ambientale associato alle infrastrutture di calcolo necessarie.

Conclusioni

In questo articolo ho evidenziato diversi aspetti rilevanti quando si parla di big data. Innanzitutto, il termine "big data" tende a farci focalizzare sulla quantità dei dati, mentre l'attenzione dovrebbe essere posta sulla qualità dei dati e sulla capacità di mettere in relazione le informazioni tra loro. Ho sottolineato inoltre come le infrastrutture e la disciplina della bioinformatica siano fondamentali per dare un significato a queste grandi quantità di dati che stiamo raccogliendo.

È altresì importante sottolineare come l'intelligenza artificiale, insieme alla capacità di spiegare i risultati ottenuti attraverso di essa, possa offrire nuovi strumenti per rivoluzionare il modo in cui comprendiamo e modelliamo gli organismi biologici. In particolare, l'explainability dell'intelligenza artificiale è cruciale per interpretare e validare i modelli predittivi, contribuendo così a una comprensione più approfondita dei meccanismi biologici.

In sintesi, l'attenzione nei big data dovrebbe essere rivolta alla qualità e alla correlazione dei dati, supportata da robuste infrastrutture bioinformatiche e dalle avanzate capacità analitiche dell'intelligenza artificiale, per migliorare la nostra comprensione dei sistemi biologici.

Ringraziamenti

Programma di ricerca CN00000013 "National Centre for HPC, Big Data and Quantum Computing", finanziato dal Decreto Direttoriale di concessione del finanziamento n.1031 del 17.06.2022 a valere sulle risorse del PNRR MUR – M4C2 – Investimento 1.4 - Avviso "Centri Nazionali" - D.D. n. 3138 del 16 dicembre 2021.

BIBLIOGRAFIA

1. Goyal, I.; Singh, A.; Saini, J.K. Big Data in Healthcare: A Review. In Proceedings of the 2022 1st International Conference on Informatics (ICI); IEEE: Noida, India, April 14 2022; pp. 232-234.
2. Kontis, V.; Bennett, J.E.; Rashid, T.; Parks, R.M.; Pearson-Stuttard, J.; Guillot, M.; Asaria, P.; Zhou, B.; Battaglini, M.; Corsetti, G.; et al. Magnitude, Demographics and Dynamics of the Effect of the First Wave of the COVID-19 Pandemic on All-Cause Mortality in 21 Industrialized Countries. *Nature Medicine 2019* 2020, *26*, 1919-1928, doi:10.1038/s41591-020-1112-0.
3. Chen, S.; Francioli, L.C.; Goodrich, J.K.; Collins, R.L.; Kanai, M.; Wang, Q.; Alföldi, J.; Watts, N.A.; Vittal, C.; Gauthier, L.D.; et al. A Genomic Mutational Constraint Map Using Variation in 76,156 Human Genomes. *Nature* 2024, *625*, 92–100, doi:10.1038/s41586-023-06045-0.
4. Karczewski, K.J.; Francioli, L.C.; Tiao, G.; Cummings, B.B.; ldi, J.A. x000F6; Wang, Q.; Collins, R.L.; Laricchia, K.M.; Ganna, A.; Birnbaum, D.P.; et al. The Mutational Constraint Spectrum Quantified from Variation in 141,456 Humans. *Nature* 2021, 1–24, doi:10.1038/s41586-020-2308-7.
5. Singh, T.; Poterba, T.; Curtis, D.; Akil, H.; Al Eissa, M.; Barchas, J.D.; Bass, N.; Bigdeli, T.B.; Breen, G.; Bromet, E.J.; et al. Rare Coding Variants in Ten Genes Confer Substantial Risk for Schizophrenia. *Nature* 2022, *604*, 509–516, doi:10.1038/s41586-022-04556-w.
6. Jiang, Y.; Li, X.; Luo, H.; Yin, S.; Kaynak, O. Quo Vadis Artificial Intelligence? *Discov Artif Intell* 2022, *2*, 4, doi:10.1007/s44163-022-00022-8.
7. Watson, D. Interpretable Machine Learning for Genomics. 2021, doi:10.21203/rs.3.rs-448572/v1.
8. Confalonieri, R.; Coba, L.; Wagner, B.; Besold, T.R. A Historical Perspective of Explainable Artificial Intelligence. *WIREs Data Mining Knowl Discov* 2021, *11*, doi:10.1002/widm.1391.
9. Santorsola, M.; Lescai, F. The Promise of Explainable Deep Learning for Omics Data Analysis: Adding New Discovery Tools to AI. *New Biotechnology* 2023, *77*, 1–11, doi:10.1016/j.nbt.2023.06.002.
10. Lannelongue, L.; Grealey, J.; Inouye, M. Green Algorithms: Quantifying the Carbon Footprint of Computation. *Advanced Science* 2021, *8*, 2100707, doi:10.1002/advs.202100707.

C'È UN PROBLEMA CON LA VANILLINA

STEFANO SERRA (*)

Nota presentata dal m.e. Stefano Maiorana
(Adunanza dell'11 maggio 2023)

SUNTO. – In questa nota viene illustrata la storia della vaniglia e della vanillina, nonché il ruolo fondamentale che questa sostanza naturale ha avuto nel campo della chimica degli aromi. In particolare verrà descritto come la normativa internazionale differenzi la vanillina naturale da quella sintetica e le ricadute che la legislazione stessa ha portato nell'ambito dello sviluppo di nuovi metodi di sintesi. La lunghissima storia di questo importantissimo aroma è stata caratterizzata da un irrisolto problema: l'insufficiente disponibilità di questo prodotto naturale per la sempre più crescente richiesta dello stesso.

***

ABSTRACT. – This report illustrates the history of vanilla and vanillin as well as the crucial role this natural substance has played in the field of flavor chemistry. In particular, I will describe how international legislation differentiates natural vanillin from synthetic vanillin and how this regulation has led to the development of new synthetic methods. The very long history of this important flavour has been characterized by an unsolved problem: the inadequate availability of the natural product to meet its increasing market demand.

1. INTRODUZIONE

La vanillina (4-idrossi-3-metossibenzaldeide, *Fig. 1*) è l'aldeide aromatica responsabile dell'aroma delle bacche di vaniglia ed è uno degli aromi più diffusi al mondo con un largo impiego non solo nell'industria alimentare e delle bevande, ma anche nell'industria farmaceutica, nelle fragranze e nei settori cosmetici [1]. Questo composto naturale di origine

(*) C.N.R., Istituto di Scienze e Tecnologie Chimiche (SCITEC), Milano, Italy. E-mail: stefano.serra@cnr.it ; stefano.serra@scitec.cnr.it

fenilpropanoide è presente, in tracce, in diverse piante e prodotti di origine vegetale ma soltanto in alcune specie di orchidea del genere *Vanilla* la sua concentrazione è sufficientemente alta da permetterne l'estrazione. In particolare solo le specie *V. planifolia*, *V. pompona* e *V. tahitensis* sono state utilizzate a scopi produttivi. Attualmente, la maggior parte delle coltivazioni di vaniglia sono della specie *planifolia*. La vanillina è presente nei frutti della pianta (erroneamente chiamati bacche o baccelli) come glucoside, cioè il composto in cui l'ossigeno fenolico della vanillina è legato ad una molecola di glucosio. Soltanto un lungo e complesso trattamento permette di liberare la molecola di vanillina, che nei frutti trattati di *V. planifolia*, è presente in percentuale variabile dal 1.5% al 4%.

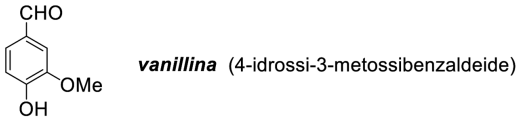


Fig. 1. La struttura chimica della vanillina.

La vanillina è stata un aroma particolarmente costoso e ricercato fino alla fine del diciannovesimo secolo, quando la produzione industriale per sintesi chimica l'ha resa facilmente reperibile a basso costo. In anni più recenti, l'accresciuta richiesta dei consumatori per i prodotti contenenti aromi di origine naturale, ha nuovamente stimolato lo studio di metodi di produzione di vanillina 'naturale', che potessero essere svincolati dalla ormai insufficiente coltivazione delle piante di vaniglia.

Complessivamente, la lunga storia di questa sostanza è stata caratterizzata dal continuo aumento della richiesta di mercato, mai completamente soddisfatta dalla produzione. Esiste quindi tutt'oggi un problema con la vanillina. Questa nota illustrerà le ragioni di questo problema, racconterà come si è evoluto nel corso della storia e come la legislazione legata agli aromi naturali ed i più recenti metodi di produzione hanno provato a risolverlo.

2. Storia della vanillina

La vaniglia (*Vanilla planifolia*) è originaria del Messico dove cresce spontanea nel sottobosco delle foreste tropicali umide, come liana rampicante (*Fig. 2*). I suoi frutti erano già usati dagli Aztechi per aro-

matizzare il 'cioccolato' e questa nuova spezia fu subito di interesse per i *conquistadores* spagnoli che successivamente la portarono in Europa nel XVI secolo. L'élite del vecchio continente si innamorò subito della vaniglia ed in particolare i francesi provarono ad introdurre la coltivazione di questa pianta in differenti colonie dal clima tropicale. Nonostante l'intervento di illustri studiosi di botanica, tutti i tentativi di far fruttificare questa orchidea al di fuori del proprio habitat naturale fallirono e la produzione della vaniglia rimase monopolio del Messico per più di due secoli (dal XVII alla metà del XIX secolo).

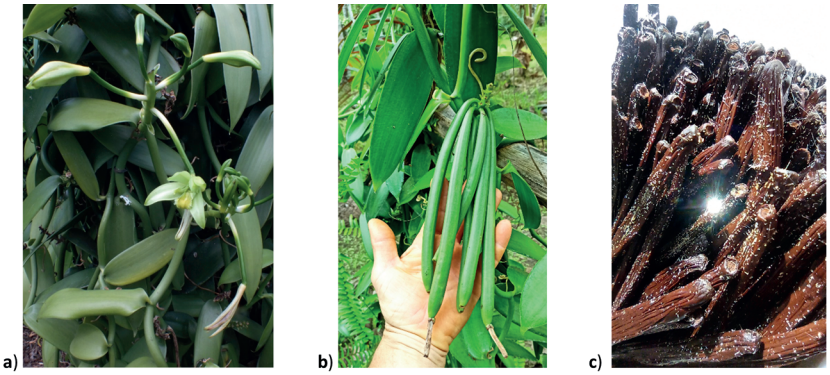


Fig. 2. a) Vanilla planifolia *in fiore; b) Frutti di vaniglia in maturazione; c) Baccelli di vaniglia di alta qualità pronti per la commercializzazione. La vanillina cristallizza sulla superficie dei baccelli. (Fotografie gentilmente concesse da Julien Pascal, produttore di vaniglia in Nuova Caledonia).*

Solo all'inizio del XIX secolo si scoprì che le api del genere *Melipona* (presenti in Messico) sono responsabili dell'impollinazione del fiore della vaniglia. Senza questo insetto, l'impollinazione naturale non avviene e quindi non vengono prodotti i frutti. La vera svolta nell'ambito della produzione delle bacche di vaniglia avvenne nel 1841, sull'isola di Bourbon (oggi Reunion) dove ben 22 anni prima i francesi avevano introdotto la coltivazione delle piante di vaniglia. Le piantagioni fino ad allora non avevano mai prodotto le preziose bacche. Fu Edmond Albius, un giovane schiavo dell'isola, che ideò e mise a punto un efficace metodo di impollinazione artificiale, tuttora in uso. Edmond osservò che lo stame ed il pistillo presenti nel fiore di vaniglia sono separati da un lembo (rostello) che ne impedisce il contatto. Mediante il sollevamento del rostello con un minuscolo bastoncino e la contem-

poranea pressione manuale dello stame contro il pistillo si ottiene l'impollinazione. Grazie a questa tecnica, in breve tempo, la coltivazione della vaniglia si estese a diverse zone tropicali del pianeta rendendo marginale l'ormai insufficiente produzione della vaniglia messicana.

Nonostante gli sforzi spesi per incrementare la produzione della vaniglia, questa spezia è stata (ed è tuttora) estremamente costosa. In primo luogo il prezzo è controllato dalla legge della domanda e dell'offerta. Sostanzialmente la richiesta dei frutti della vaniglia è molto più alta di quanto la produzione mondiale possa fornire.

L'orchidea necessita di un clima molto specifico per crescere ed un numero limitato di zone sono adeguate allo scopo. È inoltre necessaria l'impollinazione artificiale che viene effettuata manualmente, grazie all'impiego di personale qualificato. Ultimo ed importante aspetto riguarda il lungo tempo di preparazione. Sono richiesti diversi mesi per portare a maturazione i frutti che a loro volta devono subire una lunga serie di lavorazioni per sviluppare al meglio il loro aroma. Dalla raccolta del frutto alla commercializzazione della vaniglia usualmente occorrono 10 mesi. In particolare sono previste quattro fasi di trattamento del frutto chiamate: *dipping*, *sweating*, *drying* e *conditioning*. Queste lavorazioni permettono la liberazione della vanillina, il vero responsabile dell'aroma della vaniglia, che è presente all'interno del frutto come glucoside (*Fig. 3*). Alla fine dei quattro trattamenti l'aldeide aromatica viene prodotta in una percentuale variabile dipendente dalla qualità del prodotto, ma mai superiore al 4% del peso delle bacche stesse.

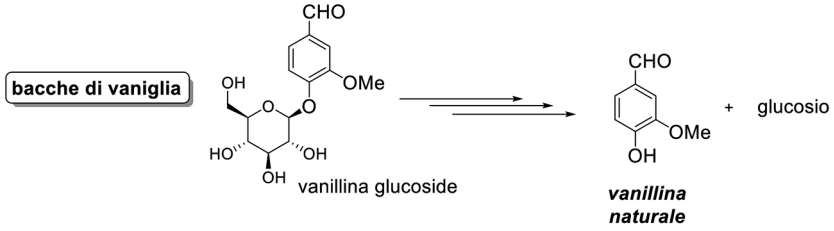


Fig. 3. Idrolisi del glucoside della vanillina.

La vanillina fu isolata per la prima volta solo nel 1858 e la prima sintesi chimica si deve ai chimici Tiemann e Haarmann (1874) seguita dalla sintesi di Reimer (1876). La maggior parte della vanillina sintetica è ancor oggi prodotta con un processo analogo a quello di Reimer (*Fig. 4*). L'utilizzo di composti di partenza a bassissimo costo quali il guaiacolo e

l'acido gliossilico, prodotti su larga scala dall'industria petrolchimica, ha finalmente reso la vanillina un prodotto estremamente economico e di larghissimo consumo.

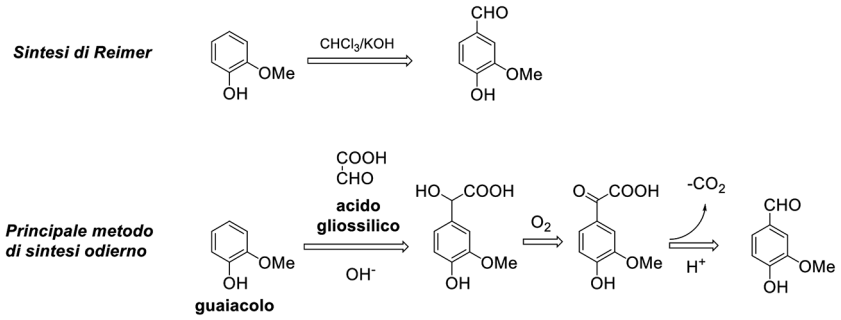


Fig. 4. Sintesi della vanillina dal guaiacolo.

Potrebbe quindi apparire che la chimica abbia definitivamente risolto il 'problema vanillina'. In realtà, nel corso degli ultimi quarant'anni, i consumatori hanno cominciato a richiedere con sempre maggiore frequenza, preparazioni alimentari che contengano aromi 'naturali'. Il termine naturale lascia intendere che la sostanza venga dal mondo vegetale, non sia prodotta industrialmente e non siano stati usati OGM o reagenti chimici per produrla. Nascono quindi molte certificazioni quali 'aroma naturale', 'OGM free', 'biologico' (*organic*), nonché certificazioni legate a specifiche regole religiose quali 'Kosher' o 'Halal'.

Anche per la vanillina la domanda del prodotto 'naturale' è cresciuta a tal punto che alcune multinazionali del settore alimentare (ad esempio Nestlè) hanno dichiarato di voler utilizzare il solo aroma naturale nei loro prodotti. Purtroppo, la vanillina estrattiva è largamente insufficiente [2] per soddisfare la domanda del mercato che ha nuovamente un problema di approvvigionamento.

3. Naturale e artificiale: cosa dice la normativa?

E' fondamentale chiarire subito il seguente concetto: da un punto di vista chimico non c'è nessuna differenza tra un dato composto ottenuto per sintesi e lo stesso composto estratto da una fonte naturale. Di conseguenza la vanillina estratta dalle bacche di vaniglia è chimicamente identica a quella industriale. Ciò nonostante, la richiesta dei consu-

matori ha contribuito a creare due mercati distinti, quello degli aromi naturali e quello più ampio degli aromi (naturali identici e artificiali). Gli aromi naturali hanno prezzi molto più alti dei corrispettivi composti venduti senza la certificazione 'naturale' e sono quindi soggetti a frodi ed adulterazioni. La vanillina è venduta con un'elevatissima differenza di prezzo tra il prodotto sintetico e quello certificato naturale. Si passa da un prezzo di circa 15-20 euro/Kg per il composto ottenuto dal guaiacolo ai 1000-2000 euro/Kg per la vanillina naturale biosintetica fino ai 20.000 euro/Kg della vanillina estratta dalle bacche di vaniglia.

Le autorità di controllo (nazionali e/o internazionali) hanno cercato di arginare queste frodi dando definizioni specifiche al termine 'naturale'.

La classificazione più usata in passato comprendeva tre classi di aromi:

- **Aromi naturali** (estratti da fonti naturali o preparati da precursori naturali con metodi naturali).
- **Aromi naturali identici** (aromi prodotti per sintesi ma chimicamente identici ad aromi naturali).
- **Aromi artificiali** (aromi prodotti per sintesi, non presenti in natura).

Questa classificazione è ancora valida in alcuni paesi quali ad esempio India e Brasile.

La classificazione CODEX in vigore identifica invece solo due tipi di aromi: aromi naturali e sostanze aromatiche sintetiche. Di seguito le definizioni (*Codex Guidelines for Flavoring CAC-GL 66/2008)*:

> **Natural flavouring substances** are flavouring substances obtained by physical processes that may result in unavoidable but unintentional changes in the chemical structure of the components of the flavouring (*e.g.* distillation and solvent extraction), or by enzymatic or microbiological processes, from material of plant or animal origin. Such material may be unprocessed, or processed for human consumption by traditional food-preparation processes (*e.g.* drying, torrefaction (roasting) and fermentation). This means substances that have been identified /detected in a natural material of animal or vegetable origin.
> **Synthetic flavouring substances** are flavouring substances formed by chemical synthesis.

Anche l'Unione Europea identifica solo due categorie di aromi: aromi naturali ed aromi. La normativa di riferimento è il **Regolamento N. 1334/2008 del 16/12/2008** [3] ed in particolare l'art. 3, comma c recita:

> 'per «sostanza aromatizzante naturale» s'intende una sostanza aromatizzante ottenuta mediante appropriati procedimenti fisici, enzimatici o microbiologici da un materiale di origine vegetale, animale o microbiologica, che si trova allo stato grezzo o che è stato trasformato per il consumo umano mediante uno o più procedimenti tradizionali di preparazione degli alimenti di cui all'allegato II. Le sostanze aromatizzanti naturali corrispondono a sostanze normalmente presenti e identificate in natura;'

Sebbene con differenti sfumature, le normative vigenti contribuiscono a creare due mercati differenti. In particolare le regole stringenti delineate dai legislatori per regolamentare la produzione di aromi naturali rendono questi composti assimilabili a prodotti ad alto valore aggiunto, in quanto sono necessari processi molto più complessi e/o costosi per la loro preparazione.

4. E' POSSIBILE RIMPIAZZARE LA VANILLINA CON ALTRI AROMI NATURALI?

Dal momento che la produzione di vanillina naturale non è sufficiente a soddisfare la domanda di mercato, sorge spontanea la seguente domanda: esistono altre sostanze aromatiche naturali, disponibili in maggiore quantità, che possano sostituirla? Sostanzialmente la risposta è no. Esistono due composti naturali simili alla vanillina, la veratraldeide ed il piperonale (*Fig. 5*).

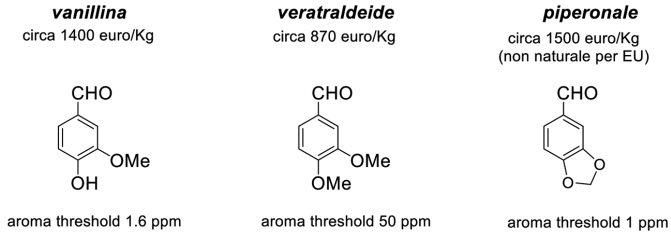


Fig. 5. Costo e soglia di percezione olfattiva (ppm in aria) della vanillina comparata con la veratraldeide ed il piperonale.

Il piperonale naturale è il composto che più assomiglia alla vanillina sia come potenza (soglia olfattiva 1 ppm in aria) sia come qualità dell'odore [4]. Purtroppo il profilo olfattivo di entrambe le aldeidi non è del tutto sovrapponibile a quello della vanillina ed inoltre il piperona-

le è meno disponibile e più costoso della vanillina stessa. In conclusione: la vanillina non è sostituibile.

5. Produrre la vanillina da precursori naturali con metodi naturali

Vista l'impossibilità di produrre una quantità sufficiente di vanillina dalle piantagioni di vaniglia, l'industria chimica si è focalizzata sulla sua produzione biotecnologica. In accordo con le normative vigenti questo aroma può essere commercializzato come naturale se ottenuto mediante procedimenti fisici, enzimatici o microbiologici da un materiale di origine naturale [5]. La strategia attuale consiste quindi nell'utilizzare come materiale di partenza composti presenti in natura, disponibili in grosse quantità ed a basso costo, da poter trasformare in vanillina attraverso metodi biotecnologici [6]. Sono state proposte moltissime procedure preparative ed alcune sono state oggetto di sviluppo industriale. Di seguito verranno illustrati i principali processi produttivi di vanillina naturale per via biotecnologica, raggruppati a seconda del precursore naturale e del processo biochimico impiegato. Saranno indicati i principali vantaggi e svantaggi intrinsechi ad ogni specifico metodo. Sommariamente sono rilevanti i processi basati su:

- trasformazione dell'eugenolo/isoeugenolo;
- degradazione dell'acido ferulico;
- degradazione dell'isorapontina;
- riduzione dell'acido vanillico;
- degradazione della lignina;
- uso di OGM.

5.1 Vanillina da eugenolo/isoeugenolo

Eugenolo ed isoeugenolo sono propenilbenzeni presenti in diversi oli essenziali. In particolare l'eugenolo è il componente principale dell'olio essenziale dei chiodi di garofano. Entrambi sono quindi sostanze naturali, facilmente disponibili ed economiche.

Differenti microorganismi sono in grado di ossidare il gruppo propenile (C3) legato all'anello aromatico (*Fig. 6*) attraverso un processo a più steps che coinvolge la formazione di un epossido seguita dalla sua idrolisi. La scissione ossidativa del diolo intermedio produce la

vanillina che deve essere rimossa dal brodo di fermentazione in quanto il microorganismo può trasformare ulteriormente il gruppo funzionale aldeidico ossidandolo ad acido o riducendolo ad alcole.

- Vantaggi: Eugenolo ed isoeugenolo sono precursori naturali economici, diversi microrganismi sono in grado di degradare efficacemente questi fenilpropanoidi.
- Svantaggi: La biotrasformazione non si arresta mai a vanillina ma continua fino ad acido vanillico (alcool vanillico); i microorganismi (wild type) più efficienti sono BSL 2 (potenzialmente patogeni) e quindi soggetti a restrizioni.

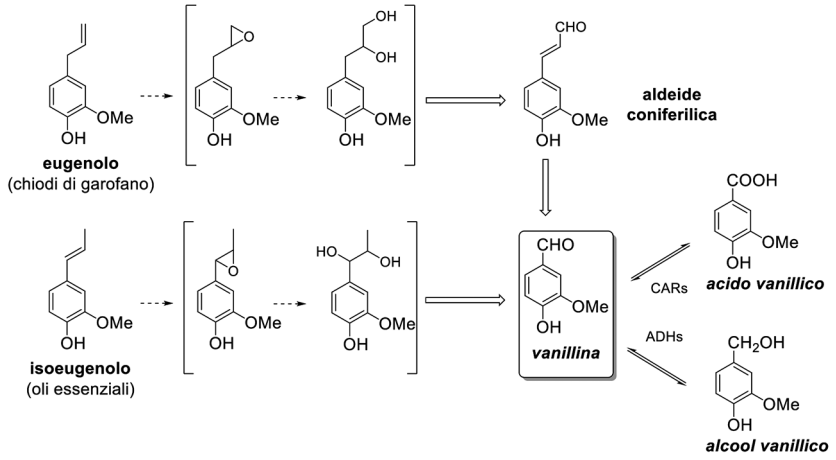


Fig. 6. Passaggi biochimici coinvolti nella trasformazione microbica dell'eugenolo e dell'isoeugenolo in vanillina.

5.2 Vanillina da acido ferulico e da isorapontina

L'acido ferulico è un composto fenolico pressoché ubiquitario nel regno vegetale e si trova legato ai polisaccaridi della parete cellulare. Può essere ottenuto da diverse fonti naturali ma usualmente viene estratto dalla pula del riso che è uno scarto agricolo abbondante e disponibile. L'isorapontina è invece uno stilbene fenolico e viene estratto dalle cortecce di differenti specie di abeti. Lo scheletro di entrambi i composti mostra il frammento aromatico sostituito proprio della vanillina (*Fig. 7*) legato alla rimanente parte della molecola con un doppio legame coniugato. La degradazione ossidativa microbica di questo lega-

me porta alla formazione della vanillina. L'acido ferulico viene efficacemente trasformato da specifici ceppi microbici (brevettati) dei generi *Serratia*, *Amycolatopsis* e *Pseudomonas* mentre il batterio *Pseudomonas paucimobilis* converte efficacemente l'isorapontina in vanillina.

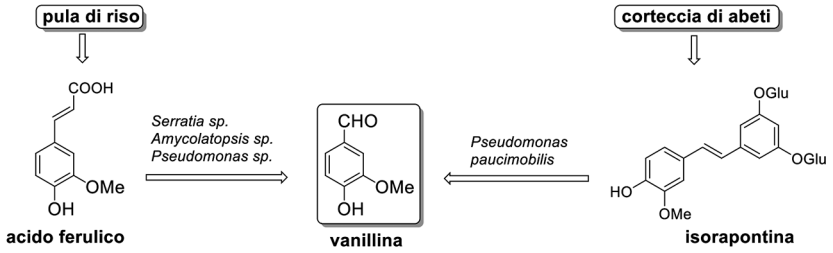


Fig. 7. Sintesi microbiologica della vanillina naturale da acido ferulico o da isorapontina.

- Vantaggi: I due processi sono efficienti e ben si adattano alla produzione su scala industriale; i composti di partenza sono ottenibili da biomasse di scarto.
- Svantaggi: Sia l'acido ferulico che l'isorapontina hanno un costo relativamente elevato; i ceppi dei generi *Serratia*, e *Pseudomonas* sono BSL 2 (potenzialmente patogeni) e quindi soggetti a restrizioni.

5.3 Vanillina per riduzione dell'acido vanillico

Come precedentemente accennato, la maggior parte dei microorganismi in grado di degradare i propenilbenzeni e l'acido ferulico, una volta prodotta l'aldeide benzoica corrispondente, continua ad ossidare e/o ridurre il prodotto stesso. Senza opportune precauzioni quali ad esempio tempi di contatto brevi, o la sottrazione del prodotto usando resine assorbenti, si arriva a convertire completamente il substrato in acido vanillico. La riduzione di questo acido a dare nuovamente la vanillina è possibile utilizzando altri microorganismi in grado di esprimere enzimi appartenenti alla classe delle carbossilato reduttasi (CARs). In particolar modo alcuni ceppi di basidiomiceti (funghi superiori) come ad esempio il *Pycnoporus cinnabarinus* riescono ad effettuare efficacemente questa biotrasformazione [7].

Risulta quindi interessante la possibilità di un processo a due steps, il primo basato sulla trasformazione dei precursori naturali in acido vanillico il secondo in cui l'acido viene ridotto a vanillina (*Fig. 8*). Questa strategia sintetica non si è ancora trasformata in un processo

industriale ma il recente sviluppo di metodi biotecnologici per la produzione di acido vanillico naturale da eugenolo hanno posto le basi per un futuro sviluppo di questo approccio.

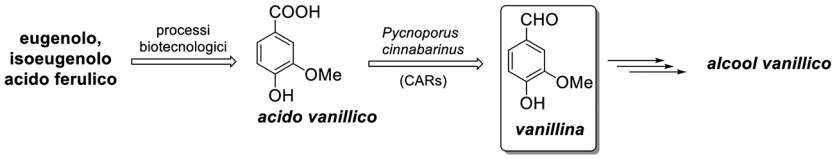


Fig. 8. Sintesi biotecnologica della vanillina naturale per riduzione dell'acido vanillico.

5.4 Vanillina da lignina

La lignina è uno dei polimeri naturali più abbondanti sulla terra. Al momento è ancora trattata come scarto derivante da processi industriali (ad esempio produzione della carta) e la sua valorizzazione è il soggetto di moltissimi studi in ambito chimico e biotecnologico. Osservando la struttura chimica della lignina (*Fig. 9*) si può notare che uno dei monomeri (l'alcool coniferilico) ha la parte aromatica della molecola con la stessa sostituzione della vanillina. Potenzialmente la depolimerizzazione ossidativa della lignina può portare alla formazione di vanillina [8]. Questo processo avviene anche naturalmente ma le aldeidi aromatiche vengono generate solamente in piccole quantità. Un classico esempio è dato dalla presenza in tracce di vanillina nei vini o nei distillati dopo invecchiamento in botti di legno.

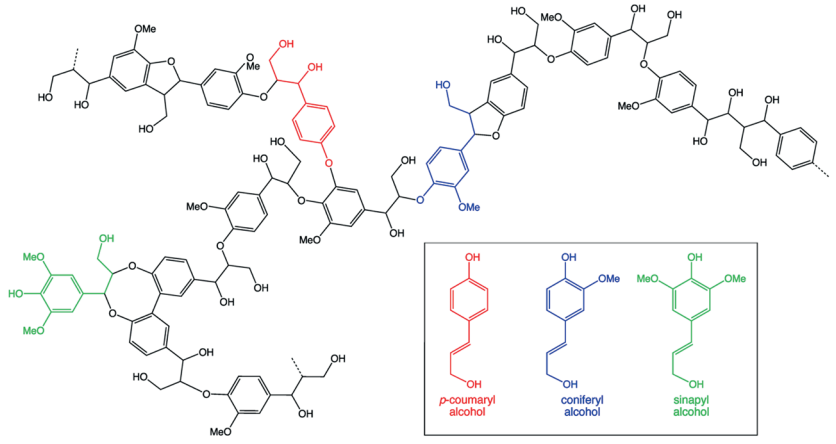


Fig. 9. Struttura chimica della lignina.

Ad oggi l'unico processo industriale di produzione della vanillina da lignina è quello basato sulla depolimerizzazione della lignina ad alte temperature ed in presenza di catalizzatori metallici (processo Borregaard). In questo caso la vanillina ottenuta viene commercializzata col nome di biovanillina (*Fig. 10*), perché ottenuta da materiali di partenza naturali e rinnovabili. In realtà il processo produttivo non è naturale e quindi per la normativa europea, il prodotto ottenuto viene classificato come aroma artificiale.

Sono stati proposti anche metodi di trasformazione microbiologica utilizzando basidiomiceti (*Phanerochaete chrysosporium*) o batteri (*Staphylococcus lentus*) in grado di degradare la lignina.

- Vantaggi: Il materiale di partenza (lignina) è un materiale di scarto la cui valorizzazione è un importante obiettivo industriale.
- Svantaggi: I processi non sono molto efficienti ed al momento non sono industrialmente sostenibili.

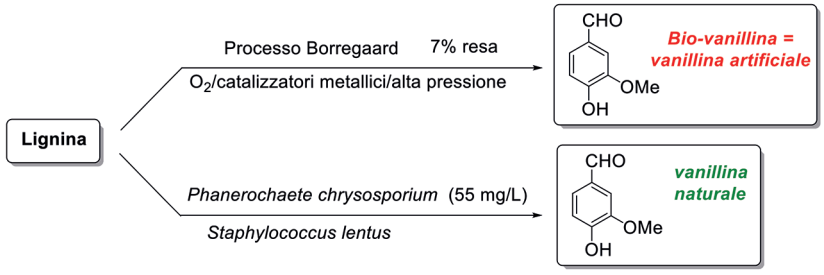


Fig. 10. Alcune sintesi della vanillina per degradazione della lignina.

5.5 Vanillina naturale mediante l'uso di OGM

Come accennato precedentemente il problema principale relativo alla sintesi microbiologica della vanillina è legato al fatto che l'aldeide, una volta generata, viene ulteriormente ridotta/ossidata dal microorganismo.

L'utilizzo di microorganismi ingegnerizzati in cui è stata effettuata una delezione dei geni responsabile della produzione delle aldeidi deidrogenasi/reduttasi (*Fig. 11*) permette un considerevole aumento delle rese. Ad esempio, l'uso di un ceppo di *Amycolatopsis* ricombinante in cui è stata introdotta la delezione del gene deputato alla produzione della vanillina deidrogenasi [9], ha permesso di quadruplicare le rese di vanillina rispetto allo stesso processo basato sul microorganismo non ingegnerizzato.

- Vantaggi: I processi basati su microrganismi ingegnerizzati sono efficienti e ben si adattano alla produzione su scala industriale.
- Svantaggi: La vanillina ottenuta è naturale ma non è più OGM free.

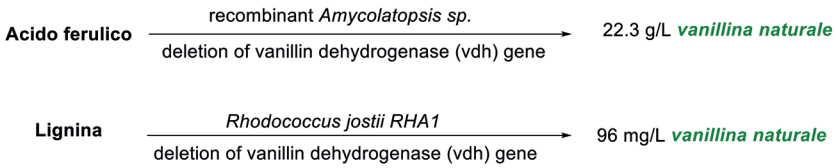


Fig. 11. Alcuni processi microbiologici di sintesi della vanillina che utilizzano OGM.

6. Conclusioni

La vanillina è una delle sostanze più importanti per industria degli aromi. Nonostante sia stato uno dei primi composti aromatici sintetizzati, al momento, il 'problema' legato all'insufficiente produzione di vanillina naturale non è stato ancora risolto.

La ricerca accademica e quella industriale hanno individuato alcune possibili soluzioni legate alle biotecnologie. In particolare la selezione di nuovi microorganismi wild type più efficienti e selettivi, l'uso combinato di differenti metodi biotecnologici nonché l'identificazione e produzione degli enzimi necessari alla conversione dei precursori naturali in vanillina sembrano essere gli approcci più promettenti.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] Ramachandra Rao, S.; Ravishankar, G.A. Vanilla flavour: Production by conventional and biotechnological routes. *Journal of the Science of Food and Agriculture* **2000**, *80*, 289-304. DOI: https://doi.org/10.1002/1097-0010(200002)80:3<289::AID-JSFA543>3.0.CO;2-2

[2] Bomgardner, M.M. The problem with vanilla. *Chem. Eng. News* **2016**, *94*, 38-42.

[3] Regolamento (CE) n. 1334/2008 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 16 dicembre 2008 , relativo agli aromi e ad alcuni ingredienti alimentari con proprietà aromatizzanti destinati a essere utilizzati negli e sugli alimenti e che modifica il regolamento (CEE) n. 1601/91 del Consiglio, i regolamenti (CE) n. 2232/96 e (CE) n. 110/2008 e la direttiva 2000/13/CE (Testo rilevante ai fini del SEE).

[4] Joulain, D.; Laurent, R.; Masson, J.; Beolor, J.-C.; Brevard, H. Heliotropin, heliotrope odor and tahitian vanilla flavor: The end of a saga? *Natural Product Communications* **2007**, *2*, 305-308; DOI: 10.1177/1934578x0700200312

[5] Serra, S.; Fuganti, C.; Brenna, E. Biocatalytic Preparation of Natural Flavours and Fragrances. *Trends Biotechnol.* **2005**, *23* (4), 193–198. https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2005.02.003
[6] Jiang, W.; Chen, X.; Feng, Y.; Sun, J.; Jiang, Y.; Zhang, W.; Xin, F.; Jiang, M. Current status, challenges, and prospects for the biological production of vanillin. *Fermentation* **2023**, *9*, 389; DOI: 10.3390/fermentation9040389
[7] Serra, S.; Marzorati, S.; Szczepa ska, E.; Strzała, T.; Boratyński, F. Basidiomycota strains as whole-cell biocatalysts for the synthesis of high-value natural benzaldehydes. *Applied Microbiology and Biotechnology* **2024**, *108*, 1-12; DOI: 10.1007/s00253-023-12872-y
[8] D'Arrigo, P.; Rossato, L.A.M.; Strini, A.; Serra, S. From waste to value: Recent insights into producing vanillin from lignin. *Molecules* **2024**, *29*, 442; DOI: https://doi.org/10.3390/molecules29020442
[9] Banerjee, G.; Chattopadhyay, P. Vanillin biotechnology: The perspectives and future. *Journal of the Science of Food and Agriculture* **2019**, *99*, 499-506; DOI: https://doi.org/10.1002/jsfa.9303

Scienze matematiche e naturali - Scienze naturali
Scienze biologiche - Ecologia Istituto Lombardo (Rend. Scienze) 157, 33-44 (2023-2024)

ECOLOGIA E DINAMICA DELLE MALATTIE INFETTIVE LEGATE ALL'ACQUA

Nota del m.e. MARINO GATTO (*)

(Adunanza dell'11 maggio 2023)

SUNTO. – Le malattie idrotrasmesse comprendono un ampio spettro di patologie legate all'acqua sia perché l'acqua contaminata viene utilizzata per bere o preparare il cibo (causando, ad esempio, colera, tifo), sia perché i corpi idrici sono l'habitat di vettori che trasmettono la malattia (causando, ad esempio, malaria, dengue, schistosomiasi). L'impatto di queste malattie è elevato. Ad esempio, le fonti d'acqua non sicure sono responsabili di 1,4 milioni di morti ogni anno. Comprendere l'ecologia degli agenti patogeni e dei vettori è fondamentale per descrivere la dinamica delle malattie attraverso modelli appropriati, che tengano conto anche dell'idrologia dei corpi idrici. Vengono forniti esempi di modelli dinamici spaziali e temporali di alcune epidemie.

***

ABSTRACT. – Water-related diseases encompass a broad spectrum of pathologies that are linked to water either because contaminated water is used for drinking or preparing food (*e.g.* cholera, typhoid), or because water bodies are the habitat of vectors transmitting the disease (*e.g.* malaria, dengue, schistosomiasis). The related burden of disease is quite high. For instance, unsafe water sources are responsible for 1.4 million deaths each year. Understanding the ecology of pathogens and vectors is fundamental to describing the dynamics of the diseases via appropriate modelling, which also accounts for the hydrology of water bodies. Examples of spatial and temporal dynamical models of some epidemics are provided.

(*) Dipartimento di Elettronica, Informazione e Bioingegneria, Politecnico di Milano, Italy. E-mail: marino.gatto@polimi.it

1. Introduzione

Le malattie umane trasmesse dall'acqua (WB, Water-Borne) o comunque legate all'acqua (WR, Water-Related) sono infezioni in cui l'agente causale (o il suo vettore od ospite) trascorre almeno parte del suo ciclo vitale in acqua. Una vasta gamma di micro-(virus, batteri, protozoi) e macro-parassiti (soprattutto platelminti e ascaridi) è responsabile delle infezioni, che sono generalmente dovute all'esposizione (o all'ingestione di) acqua contaminata da organismi patogeni. Una classificazione più dettagliata con esempi di possibili malattie per ogni tipica modalità di trasmissione è riportata in *Tab. 1*.

Le malattie idrotrasmesse rappresentano ancora una grave minaccia per la salute umana, soprattutto nei paesi in via di sviluppo. La maggior parte di questo gravoso carico è attribuibile all'approvvigionamento idrico non sicuro, alla mancanza di servizi igienico-sanitari e alle cattive condizioni igieniche, che influenzano direttamente o indirettamente l'esposizione e i tassi di trasmissione. Per dare un'idea dell'impatto delle malattie che più genericamente vengono indicate con l'acronimo WASH (Water, Sanitation and Hygiene), riportiamo alcuni dati (Prüss-Ustün *et al.* 2019; World Health Organization 2019; Wolf *et al.* 2023):

- Nel 2022, globalmente, almeno 1,7 miliardi di persone hanno usato acqua potabile contaminata da feci (https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water).
- E' stato stimato che nel 2019 l'utilizzo di acqua non contaminata e di adeguati servizi igienico-sanitari (safe WASH) avrebbe prevenuto 1,4 milioni di morti e 74 milioni di disability-adjusted life-years (DALYs, anni di vita attesa persi a causa della malattia)
- Nel 2016 il 60% delle malattie diarroiche sono state legate a insufficiente WASH e l'impatto è stato stimato in 829.000 morti e 49,8 milioni di DALYs (disability-adjusted life years).
- La diarrea è una delle principali cause di mortalità nei bambini sotto i 5 anni di età. E' stato stimato che nel 2021 (https://data.unicef.org/topic/child-health/diarrhoeal-disease/) le morti per diarrea siano state approssimativamente il 9% di tutte le morti infantili, per un ammontare totale di 444.000 morti. Non tutte le morti però sono legate a WASH: per il 2016 le morti per diarrea legate a WASH sono state stimate in 297.000, circa il 5,3% di tutte le morti in questo gruppo d'età (Prüss-Ustün *et al.* 2019).

Tab. 1. Le varie categorie di malattie idrotrasmesse; per classificarle viene utilizzato il nome inglese più comune nella letteratura internazionale.

Categoria	**Modalità di trasmissione**	**Esempi di malattie**
Water-borne	Ingestione di acqua contaminata da feci o urine contenenti batteri, virus o parassiti patogeni	Gastroenterite, epatite enterica, dissenteria bacillare e amebica, colera, leptospirosi, tifo
Water-washed	Contatto di pelle, orecchio od occhio con acqua contaminata, scarsa igiene personale	Congiuntivite, tracoma, infezioni da elminti intestinali, lebbra, scabbia
Water-aerosol disease	Inalazione di aerosol acqueo contenente patogeni	Legionellosi, infezioni da *Phiesteria*
Water-based	Infezioni da vermi parassiti (contenuti da ospiti intermedi che vivono in acqua)	Schistosomiasi, dracunculiasi, infezioni da *Trichobilharzia*
Water-related arthropod vector	Infezioni da insetti vettori che si riproducono in acqua o che pungono vicino ad ambienti aquatici	Dengue, malaria, febbre gialla, tripanosomiasi, oncocercosi, filariosi linfatica

Non va dimenticato che le malattie idrotrasmesse possono colpire animali non umani (mammiferi, uccelli, pesci,…) e anche piante. Ad es. la qualità delle acque è legata a molte patologie delle specie ittiche (Svobodová *et al.* 1993). Tra le malattie virali segnaliamo la necrosi pancreatica, la sindrome del rene policistico e la setticemia emorragica nei salmonidi, la viremia primaverile nella carpa, tra quelle fungine la branchiomicosi che colpisce diverse specie di pesci tra cui la carpa e la tinca.

E' evidente come l'ecologia, in quanto disciplina che studia le interazioni tra gli organismi e l'ambiente circostante e tra le diverse specie, giochi un ruolo fondamentale nella comprensione della dinamica delle malattie. In particolare, nelle malattie legate all'acqua il legame tra qualità dell'ambiente e salute dell'uomo e delle altre specie è ancora più evidente.

In questo contributo descriveremo brevemente, con alcuni esempi, la dinamica di malattie legate agli ecosistemi fluviali. Le domande a cui cercheremo di rispondere sono:

- Qual è il ruolo della connettività spaziale delle reti idrologiche nella formazione della dinamica spazio-temporale delle malattie?
- Qual è il ruolo delle forzanti intra e interannuali, incluso il clima, nella risposta epidemiologica?
- Modelli eco-epidemiologici a rete sono utili per predire il corso delle epidemie e gestire e pianificare gli interventi?

Più precisamente, per dimostrare le potenzialità dell'approccio faremo riferimento a tre malattie: il colera, la schistosomiasi e la sindrome del rene policistico (PKD, proliferative kidney disease) nei salmonidi. La scelta è motivata dal fatto che esse differiscono in maniera sostanziale per il ciclo di vita del patogeno.

- Il colera (https://www.epicentro.iss.it/colera/) è un'infezione batterica causata dall'ingestione di acqua (o di cibo) contaminato da *Vibrio cholerae*, il patogeno scoperto da Filippo Pacini nel 1854 durante l'epidemia che colpì Firenze (Pacini 1854). Il tipico sintomo è diarrea acuta, che può rapidamente portare alla disidratazione. Misure WASH inadeguate possono far sì che feci infette contaminino le fonti di acqua potabile. In questa maniera gli individui suscettibili possono contrarre la malattia recandosi in zone non sicure e d'altra parte persone infette, ma asintomatiche (circa il 75%), possono contaminare serbatoi idrici anche lontani. I vibrioni possono quindi essere trasportati dall'acqua lungo la rete idrica oppure veicolati dalla mobilità umana.
- La schistosomiasi è una malattia parassitaria causata dal contatto con acqua infestata dalle larve (dette cercarie) di alcune specie di vermi platelminti del genere *Schistosoma*. Le cercarie penetrano attraverso la cute dando poi luogo a schistosomuli. Gli schistosomi adulti si sviluppano e si riproducono sessualmente all'interno dell'ospite umano, dove risiedono nei plessi venosi mesenterici o perivescicali. Le uova del parassita vengono sversate nell'acqua mediante le feci o le urine della persona infetta. Una volta raggiunto il corpo d'acqua, le uova si sviluppano dando luogo ad un altro stadio larvale, detto miracidio, che infetta alcune specie di chiocciole di acqua dolce (che sono quindi ospiti intermedi; esse appartengono ai generi *Biomphalaria*, *Bulinus*, *Oncomelania*). All'interno delle chiocciole si ha riproduzione asessuale dello schistosoma con successivo sversamento delle cercarie nell'acqua, chiudendo così il ciclo della trasmissione del parassita.
- La sindrome del rene policistico o malattia proliferativa renale (PKD) è una malattia dei salmonidi di acqua dolce (in particolare della trota comune e della iridea) caratterizzata da elevata mortalità. L'infezione è causata dal mixozoo endoparassitico *Tetracapsuloides bryosalmonae*, che utilizza briozoi di acqua dolce e pesci come ospiti. I briozoi sono un phylum di invertebrati acquatici che vivono tipi-

camente in colonie il cui aspetto ricorda quello del muschio (donde il nome dal greco brýon = muschio). La maggior parte dei briozoi è costituita da specie marine, ma alcuni albergano in ambienti di acqua dolce. In particolare, la specie dulciacquicola *Fredericella sultana* è l'ospite più comune di *T. bryosalmonae*, che può essere presente in forma manifesta o non manifesta. Le colonie con infezione manifesta rilasciano delle spore che possono infettare i pesci attraverso l'epidermide e le branchie. All'interno dei pesci ospiti, il parassita raggiunge principalmente il rene, dove avviene la riproduzione e il differenziamento. I pesci infetti rilasciano un altro tipo di spore che è in grado di infettare i briozoi suscettibili. L' infezione, tuttavia, può comunque autosostenersi nei soli briozoi in quanto è stata documentata trasmissione verticale che avviene attraverso statoblasti infetti (stadi dormienti costituiti da capsule contenenti cellule germinative).

2. Modelli su rete di malattie idrotrasmesse

Una struttura generale per descrivere le dinamiche delle malattie idrotrasmesse nello spazio e nel tempo è stata sviluppata da una quindicina d'anni congiuntamente da ricercatori del Politecnico di Milano, dell'École Polytechnique Fédérale de Lausanne e della Princeton University (Rinaldo, Gatto, Rodriguez-Iturbe 2020). Le reti fluviali conformano la distribuzione delle comunità locali lungo i fiumi e impongono vincoli anisotropici di connettività spaziale che risultano essenziali per una corretta caratterizzazione dei processi ecologici negli ecosistemi fluviali (Bertuzzo *et al.* 2007). Lo schema generale di riferimento è quello riportato in *Fig. 1*, dove vengono messe in evidenza due reti di connessione tra comunità che possono essere colpite dall'infezione: la rete del trasporto idrologico e la rete della mobilità degli uomini o di altri animali che sono suscettibili al patogeno. Questo approccio è basato su reti multi-strato (Mari *et al.* 2011), in cui i nodi corrispondono alle comunità umane composte da persone suscettibili, infette e guarite con accesso a una riserva d'acqua potenzialmente contaminata (Codeço 2001), mentre gli archi rappresentano strati di connettività spaziale fornita dal trasporto dei patogeni lungo reti fluviali (Bertuzzo *et al.* 2010) e dalla mobilità umana o di altro animale (Mari *et al.* 2012).

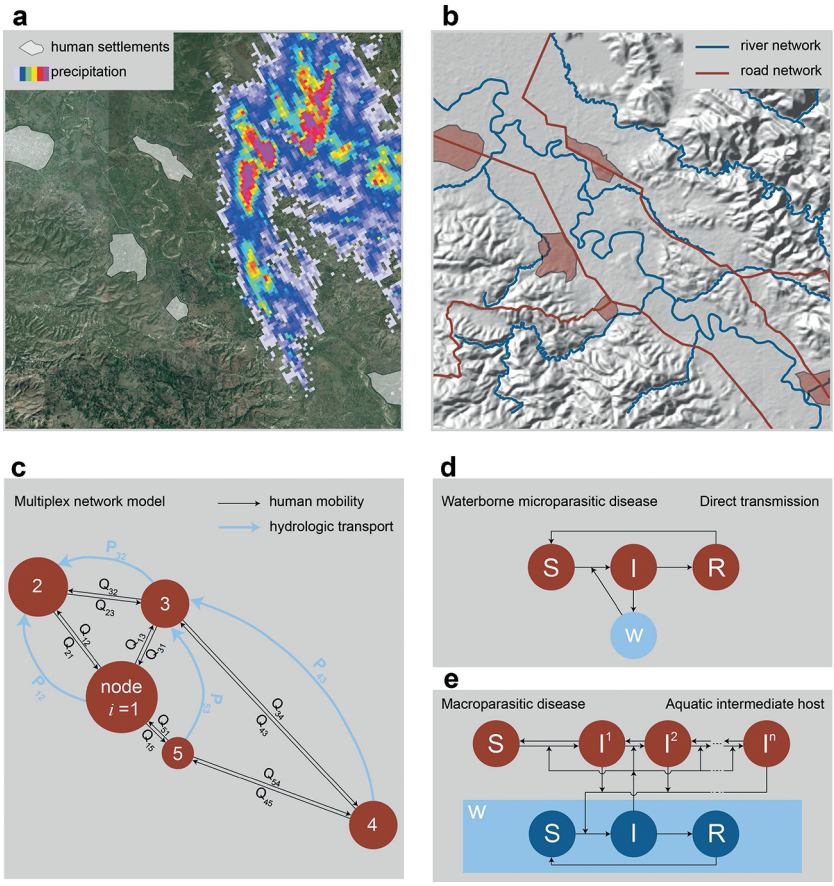


Fig. 1. Schema generale di costruzione di un modello spazio-temporale di malattie legate all'acqua (tratto da Rinaldo et al. *2017). (a) Esempio di informazione che può essere acquisita in remoto con riferimento alla precipitazione atmosferica e agli insediamenti umani. (b) Derivazione delle reti idrologica e stradale da modelli digitali del terreno. (c) Sintesi, a partire dalle informazioni di (a) e di (b) di un modello compartimentale di interazione multiplex: i nodi corrispondono agli insediamenti umani che vengono connessi mediante una rete idrologica (in azzurro) e una rete di mobilità (in nero). La matrice di connessione P descrive le probabilità che l'agente patogeno si propaghi per via acquatica, mentre la matrice Q descrive la probabilità che una persona, potenzialmente infetta, si muova da un insediamento ad un altro. (d) ed (e) schemi di modelli compartimentali eco-epidemiologici in ogni nodo-insediamento: S = suscettibili, I = infetti, R = ristabiliti, W = concentrazione di patogeni nell'acqua. (d) corrisponde ad un possibile modello per il colera con i vibrioni che si trasmettono per ingestione di acqua contaminata, mentre (e) corrisponde ad un possibile modello per la schistosomiasi (malattia macroparassitaria) in cui l'infezione necessita oltre che dell'ospite umano anche di un ospite intermedio (tipicamente chiocciole di acqua dolce), che può anch'esso avere i compartimenti dei suscettibili e degli infetti.*

3. Applicazioni ad alcune malattie

Il primo esempio di malattia a cui è stata applicata la metodologia appena descritta è quello del **colera**, soprattutto con riferimento alla disastrosa epidemia che colpì Haiti nel 2010 continuando a provocare gran numero di morti anche negli anni successivi (Piarroux e Faucher 2012, Piarroux 2019). I modelli spazio-temporali di diffusione del colera sviluppati dal nostro gruppo di ricerca sono completamente descritti in una pubblicazione del nostro Istituto a cui si rimanda (Gatto, Mari e Rinaldo 2012).

Il secondo esempio è quello della **schistosomiasi**. Più di 700 milioni di persone in più di 70 paesi vivono in aree in cui la schistosomiasi è endemica; annualmente i casi sono nell'ordine dei 200 milioni mentre le morti direttamente causate o dovute alle complicazioni conseguenti (mielite, encefalite, ipertensione portale, fibrosi cistica) sono stimate in circa 200.000. Il 90% delle infezioni avviene nell'Africa subsahariana, il rimanente dei casi è distribuito nel resto dell'Africa, del Sudamerica e del vicino (Arabia Saudita e paesi confinanti) ed estremo Oriente (Giappone, Cina, Vietnam, Filippine). I nostri studi si sono focalizzati principalmente su Burkina Faso (Perez-Saez *et al.* 2015, Perez-Saez *et al.* 2016) e Senegal (Ciddio *et al.* 2017, Mari *et al.* 2017).

In particolare, nel caso del Senegal è stata sfruttata la disponibilità (resa possibile dal D4D Challenge della compagnia telefonica Orange Sonatel) dei dati anonimizzati di 9 milioni di utenti di telefonia cellulare per un anno. Ciò ha reso possibile la stima della mobilità umana (vedi *Fig. 2*), fondamentale per capire la diffusione della malattia attraverso lo sversamento di urine e feci da parte di persone infette che si muovono da una località all'altra. Naturalmente sono stati anche considerati i dati relativi alla densità di popolazione che vive in ambiente rurale (dove l'infezione è più facile) e alla rete idrologica (che ospita le chiocciole, ospiti intermedi in cui si sviluppano le cercarie che infettano le persone che entrano in contatto con l'acqua contaminata). Si è quindi considerata una rete multiplex che integra al suo interno posizione dei villaggi, delle antenne della rete cellulare e dei punti di accesso all'acqua (*Fig. 3*). Il modello spaziale è stato tarato sui dati di prevalenza della malattia (percentuale di individui infetti) resi disponibili dal Ministero della Sanità del Senegal. Ciò ha poi permesso di stimare l'effetto (in termini casi evitati) di strategie WASH per il miglioramento dei servizi igienico-sanitari e di strategie IEC (Information, Education, Communication) miranti a diffondere l'informazione su come evitare il contatto con acque contaminate.

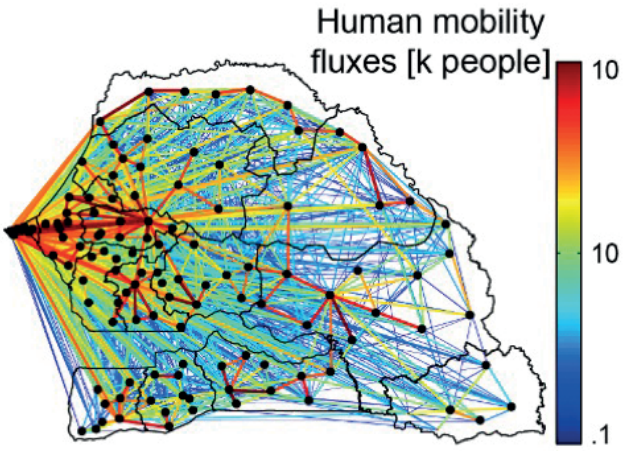


Fig. 2. Flussi di mobilità annuale in Senegal stimati mediante l'analisi dei dati di telefonia cellulare (tratto da Mari et al. *2017).*

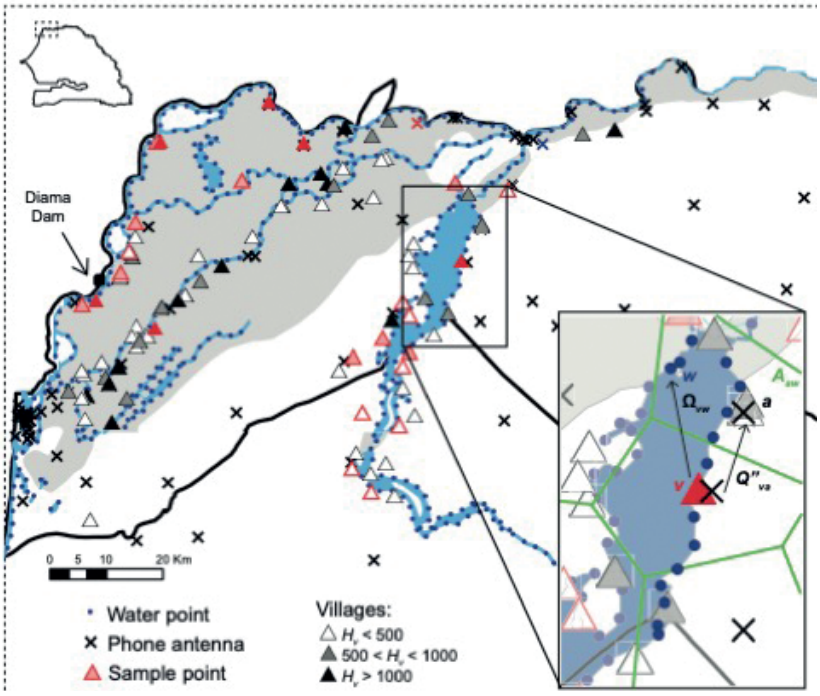


Fig. 3. Rete multiplex della zona di Saint Louis (Senegal) utilizzata per il modello spazio-temporale di schistosomiasi (tratto da Ciddio et al. *2017).*

Il terzo esempio è quello della **sindrome del rene policistico** o malattia proliferativa renale (PKD), patologia dei salmonidi il cui incremento nel passato trentennio risulta essere legato al cambiamento climatico. Infatti, il riscaldamento globale causa anche l'aumento della temperatura delle acque di fiumi e laghi che ospitano la fauna ittica. Se la temperatura supera i 15 °C, copie del patogeno *T. bryosalmonae* si sviluppano molto più rapidamente all'interno dei tessuti dei pesci ospiti provocando così una molto maggiore mortalità dovuta al PKD (Bruneaux *et al.* 2017). La conseguente diffusione della malattia a quote sempre più elevate ha provocato sensibili diminuzioni della cattura di trote in Svizzera, nel Nordamerica e nel Nordeuropa e ha colpito anche molti allevamenti dell'Italia del Nord. Per questa ragione la Swiss National Science Foundation finanziò il progetto Sinergia con l'intento di studiare il PKD mediante un approccio multidisciplinare che univa le competenze di ittiologi, genetisti, specialisti della qualità delle acque e modellisti. Inizialmente il nostro gruppo di modellisti sviluppò un modello epidemiologico generale (Carraro *et al.* 2016) che includeva la demografia di briozoi e pesci, la dipendenza dei parametri epidemiologici dalla temperatura e la dinamica intrastagionale e interstagionale del sistema. Contemporaneamente tutto il gruppo di ricerca sviluppava una campagna di studio (durata tre anni) su di uno specifico bacino, quello del fiume Wigger (vedi *Fig. 4*).

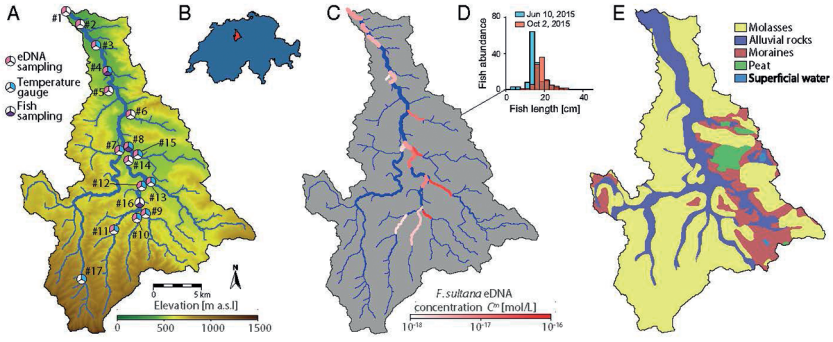


Fig. 4. Panoramica dell'area di studio (bacino del fiume Wigger, tratto da Carraro et al. *2017). (A) Modello digitale del terreno, rete fluviale e localizzazione dei siti di campionamento. (B) Posizione del bacino in Svizzera. (C) Concentrazione media di DNA ambientale di F. sultana. (D) Risultati della campagna di campionamento della distribuzione della dimensione delle trote. (E) Caratterizzazione geologica del bacino fluviale.*

Per questo fiume fu sviluppato un modello spaziale specifico (Carraro *et al.* 2017) che in primo luogo stimava, a partire dai dati di DNA ambientale rilevati nelle acque, la distribuzione spaziale dei briozoi, in secondo luogo costruiva un modello epidemiologico che teneva conto dell'età dei pesci (i giovani sono più colpiti dal PKD), della mobilità a valle e a monte delle trote e del trasporto passivo delle spore del patogeno. Il modello fu calibrato sui dati raccolti fornendo una buona stima della prevalenza della malattia in pesci giovani e adulti.

4. Conclusioni

Le malattie infettive legate all'acqua rappresentano ancora oggi un'importante porzione delle patologie che affliggono l'umanità. Esse rappresentano un importante esempio di collegamento tra salute dell'ambiente e salute dell'uomo, dimostrando così l'importanza di un ambiente sano per il benessere delle nostre società. I sistemi ecoepidemiologici che le descrivono sono caratterizzati da dinamiche spaziali e temporali che necessitano di un'adeguata modellizzazione che tenga conto sia delle connessioni della rete idrologica sia di quelle della mobilità dell'uomo o di altri ospiti dei relativi patogeni.

La disponibilità di grandi basi di dati spesso georeferenziati ad alta risoluzione spaziale ha reso possibile lo sviluppo di modelli realistici spazialmente espliciti. Essi forniscono previsioni, scenari futuri e linee guida per le strategie da adottare al fine di prevenire la diffusione di tali malattie. Di grande attualità, in un'era di riscaldamento globale, è la possibilità di incorporare in questi modelli la variabilità climatica rendendoli così strumenti molto utili per una migliore gestione del nostro ambiente futuro.

BIBLIOGRAFIA

E. Bertuzzo, A. Maritan, M. Gatto, I. Rodriguez-Iturbe, A. Rinaldo. *River networks and ecological corridors: reactive transport on fractals, migration fronts, hydrochory*, Water Resources Research 43 (2007), W04419.

E. Bertuzzo, R. Casagrandi, M. Gatto, I. Rodriguez-Iturbe, A. Rinaldo. *On spatially explicit models of cholera epidemics*, Journal of the Royal Society Interface 7 (2010), 321-333.

M. Bruneaux, M. Visse, R. Gross, L. Pukk, L. Saks, A. Vasemägi. *Parasite infection and decreased thermal tolerance: Impact of proliferative kidney disease on a wild salmonid fish in the context of climate change*, Functional Ecology 31 (2017), 216-226.

L. Carraro, L. Mari, H. Hartikainen, N. Strepparava, Th. Wahli, J. Jokela, M. Gatto, A. Rinaldo, E. Bertuzzo. *An epidemiological model for proliferative kidney disease in salmonid populations*, Parasites and vectors, 9 (2016), 487, doi: 10.1186/s13071-016-1759-z.

L. Carraro, E. Bertuzzo, L. Mari, I. Fontes, H. Hartikainen, N. Strepparava, H. Schmidt-Posthaus, Th. Wahli, J. Jokela, M. Gatto, A. Rinaldo. *An integrated field, laboratory and theoretical study of PKD spread in a Swiss prealpine river*, Proceedings of the National Academy of Sciences, 2017, 114 (2017), 11992-11997.

M. Ciddio , L. Mari, S.H. Sokolow, G.A. De Leo, R. Casagrandi, M. Gatto. *The spatial spread of schistosomiasis: a multidimensional network model applied to Saint-Louis region, Senegal*, Advances in Water Resources 108 (2017), 406-415.

C.T. Codeço. *Endemic and epidemic dynamics of cholera: the role of the aquatic reservoir*, BMC Infectious Diseases 1 (2001), 1.

L. Mari, E. Bertuzzo, R. Casagrandi, M. Gatto, S.A. Levin, I. Rodriguez-Iturbe, A. Rinaldo. *Hydrologic controls and anthropogenic drivers of the zebra mussel invasion of the Mississippi-Missouri river system*, Water Resources Research 47 (2011), W03523.

L. Mari, E. Bertuzzo, L. Righetto, R. Casagrandi, M. Gatto, I. Rodriguez-Iturbe, A. Rinaldo. *On the role of human mobility in the spread of cholera epidemics: towards an epidemiological movement ecology*, Ecohydrology 5 (2012), 531-540.

M. Gatto, L. Mari, A. Rinaldo. *Modelli spazio-temporali di diffusione, previsione e controllo delle epidemie di colera: dal Sudafrica ad Haiti*, Istituto Lombardo (Rend. Scienze) 145 (2012), 47-57.

L. Mari, M. Gatto, M. Ciddio, E.D. Dia, S.H. Sokolow, G. De Leo, R. Casagrandi. *Big-data-driven modeling unveils country-wide drivers of endemic schistosomiasis*, Scientific Reports, 7 (2017), 489, doi: 10.1038/s41598-017-00493-1.

F. Pacini. *Osservazioni microscopiche e deduzioni patologiche sul cholera asiatico*, Gazzetta medica italiana – Toscana, 6 (1854), 397-401, 405-412.

J. Perez-Saez, L. Mari, E. Bertuzzo, R. Casagrandi, S. Sokolow, G. De Leo, Th. Mande, N. Ceperley, J.M. Froehlich, M. Sou, H. Karambiri, H. Yacouba, A. Maiga, M. Gatto, A. Rinaldo. *A theoretical analysis of the geography of schistosomiasis in Burkina Faso highlights the roles of human mobility and water resources development in disease transmission,* PLOS Neglected Tropical Diseases, 9 (2015), e0004127.

J. Perez-Saez, Th. Mande, N. Ceperley, E. Bertuzzo, L. Mari, M. Gatto, A. Rinaldo.

Hydrology and density feedbacks control the ecology of intermediate hosts of schistosomiasis across habitats in seasonal climates, Proceedings of the National Academy of Sciences 113 (2016), 6427-6432.

R. Piarroux, B. Faucher. *Cholera epidemics in 2010: respective roles of environment, strain changes, and human-driven dissemination*. Clin. Microbiol. Infect. 18 (2012), 231-238.

R. Piarroux. *Choléra Haïti 2010-2018—Histoire d'un désastre*. Paris, France: CNRS Editions, 2019.

A. Prüss-Ustün, J. Wolf, J. Bartram, T. Clasen, O. Cumming, M.C. Freeman, B. Gordon, P.R. Hunter, K. Medlicott, R. Johnston. *Burden of disease from inadequate water, sanitation and hygiene for selected adverse health outcomes: An updated analysis with a focus on low- and middle-income countries*, International Journal of Hygiene and Environmental Health, 222 (2019), 765-777.

A. Rinaldo, E. Bertuzzo, M. Blokesch, L. Mari, M. Gatto. *Modeling key drivers of cholera transmission dynamics provides new perspectives on parasitology*, Trends in Parasitology, 33 (2017), 587-599.

A. Rinaldo, M. Gatto, I. Rodriguez-Iturbe. *River networks as ecological corridors: species, populations, pathogens*, Cambridge University Press, New York, NY, 2020.

Z. Svobodová, R. Lloyd, J. Máchová, B. Vykusová. *Water quality and fish health*. EIFAC Technical Paper. No. 54. Rome, FAO. 1993. 59 p.

J. Wolf, R.B. Johnston, A. Ambelu, B.F. Arnold, R. Bain, M. Brauer, J. Brown, B.A. Caruso, T. Clasen, J.M. Colford Jr, J. E. Mills, B. Evans, M.C. Freeman, B. Gordon, G. Kang, C.F. Lanata, K.O. Medlicott, A. Prüss-Ustün, C. Troeger, S. Boisson, O. Cumming. *Burden of disease attributable to unsafe drinking water, sanitation, and hygiene in domestic settings: a global analysis for selected adverse health outcomes,* Lancet, 401(2023), 2060-2071.

World Health Organization, *Safer water, better health*. 2019 update. Geneva, 2019.

Istituto Lombardo (Rend. Scienze) 157, 45-64 (2023-2024)

LA MOBILITÀ PER LO SVILUPPO SOSTENIBILE DELLE CITTÀ[1]

Nota del s.c. MAURIZIO TIRA (*)

(Adunanza del 25 maggio 2023)

SUNTO. – Oltre metà dell'umanità, vale a dire circa 4,5 miliardi di persone, vive in aree urbane, piccole o grandi che siano. Le città sono causa e vittime dei cambiamenti climatici: responsabili del 60-80% del consumo energetico e del 75% delle emissioni di CO_2, non solo per la concentrazione di abitanti, ma per la presenza di servizi e attività produttive, esse devono affrontare la pressione sulle risorse di acqua dolce, sulle reti fognarie ed elettriche, sulla gestione dei servizi e sulla domanda di mobilità. Quest'ultima è strettamente legata agli usi del suolo, in un contesto in cui i profili di organizzazione della vita privata e pubblica subiscono continue trasformazioni. Sviluppato come reazione alla città diffusa, il modello della città compatta, cui pareva indirizzata la comunità scientifica, è peraltro entrato in crisi durante la pandemia da COVID-19. Il testo cercherà di argomentare sulle possibili soluzioni per armonizzare pianificazione urbanistica e della mobilità in un'ottica di sviluppo sostenibile.

***

ABSTRACT. – More than half of humanity, about 4.5 billion people, live in urban areas, whether small or large. Cities are the cause and victims of climate change: responsible for 60-80% of energy consumption and 75% of CO_2 emissions, not only due to the concentration of inhabitants, but also to the presence of services and industrial plants, they have to face pressure on freshwater resources, sewage and electricity networks, service management and mobility demand. The latter is closely linked to land uses, in a context in which the profiles of the organization of private and public life are constantly undergoing transformations. Developed as a reaction to urban sprawl, the compact city

(*) Ordinario di Tecnica e Pianificazione Urbanistica nell'Università degli Studi di Brescia, Dipartimento di Ingegneria civile, architettura, territorio, ambiente e di matematica, Italy. E-mail: maurizio.tira@unibs.it

[1] Contributo nell'ambito delle Scienze Matematiche e Naturali: Ingegneria e Architettura, Settore Scientifico Disciplinare CEAR-12/A - Tecnica e pianificazione urbanistica.

model, to which the scientific community seemed to be addressed, also entered into crisis during the COVID-19 pandemic. The text will try to argue on possible solutions to harmonize urban and mobility planning in the light of sustainable development.

1. Introduzione

La città è l'ambiente per eccellenza della specie umana, almeno da quando avvenne la trasformazione delle società nomadiche in stanziali. Tuttavia la stanzialità non ha eliminato la mobilità, soprattutto quella di corto raggio. Al contrario: una delle caratteristiche che per prima colpisce di una città è il traffico! Inoltre, la specializzazione delle attività umane e i commerci (non dimentichiamo che molte città sono sorte su luoghi di mercato), hanno dato vita a nuove esigenze di spostamento di persone e di merci, che permangono ai nostri tempi. In sostanza, due sono le ragioni fondamentali per cui si spostano le persone e le cose:

- la *mobilità sistematica*, dovuta al lavoro e allo studio;
- e la *mobilità non sistematica*, ovvero tutto ciò che lavoro e studio non è (nei siti per l'acquisto online dei titoli di viaggio viene spesso definita *svago*, seppur lo spettro di motivazioni sia più ampio).

Questi due fenomeni hanno caratteristiche molto diverse, con conseguenze rilevantissime sulla gestione della domanda e l'offerta di servizi di trasporto. Nella Milano degli anni '60, i *tempi di vita* erano cadenzati dai tempi del lavoro e determinavano *ricorrenti* profili di mobilità [1]. Tale modello è stato vieppiù abbandonato e oggi la mobilità non sistematica è largamente prevalente e riguarda ben oltre la metà degli spostamenti. Essi avvengono senza una regolarità facilmente descrivibile e, peraltro, sono sempre più multi-scopo, ovvero con destinazioni multiple. Paradossalmente, la pratica sempre più diffusa del lavoro a distanza, la disponibilità di servizi telematici e l'uso capillare degli smart phone, anziché risultare in una diminuzione degli spostamenti e quindi del traffico, soprattutto nelle aree urbane, si trasforma in un ulteriore aumento della mobilità non sistematica. Evidentemente, a parità di tempo dedicato al lavoro o allo studio, il tempo liberato dalla mobilità coatta (per funzioni essenziali ed irrinunciabili), spesso si traduce in altra domanda di mobilità non sistematica [2].

Dunque sempre più spesso si verifica il superamento dell'offerta

di capacità di trasporto da parte della domanda, con gli esiti noti in termini di congestione, consumi energetici, emissioni in atmosfera, insicurezza, rumore, talvolta degrado.

La scienza e la tecnica hanno da sempre trovato nei trasporti un campo elettivo di avanzamento della conoscenza: dall'invenzione della ruota, fino all'applicazione della macchina a vapore e al veicolo a guida automatica. Molte delle frontiere dell'innovazione riguardano i mezzi per rispondere ad una domanda di mobilità che muta con grande rapidità, nei tempi e nello spazio.

Un'importante relazione di causa-effetto su cui ci si soffermerà nel presente breve scritto è quella che esiste tra insediamenti umani e spostamenti. Una precisazione: il termine città sarà usato nel seguito per definire qualsiasi insediamento urbanistico, senza riferimento alla sua dimensione, né spaziale, né demografica. Ebbene, se è vero che le città sono soggette a cicli di crescita e decrescita (la Roma imperiale era enormemente più popolosa della Roma alto-medievale), per contro la trasformazione dei suoli naturali in aree urbanizzate è pressoché irreversibile, a prescindere dall'utilizzo degli edifici. Per questo motivo, con rare eccezioni, le città mantengono la dimensione che hanno raggiunto nel momento della loro maggiore espansione, e anche se lo stato di conservazione dei manufatti è assolutamente degradato, i suoli difficilmente ridiventano naturali od agricoli.

La dimensione dell'insediamento ha poi un riflesso immediato sul numero e sulla lunghezza degli spostamenti e quindi sui mezzi utilizzati. A parità di popolazione, quanto più bassa è la densità, tanto più estese dovranno essere le reti di connessione tra le diverse parti urbane e lo spostamento a piedi, il mezzo sostenibile per eccellenza, non consentirà di coprire le distanze troppo elevate (come invece avveniva nelle città medioevali, in cui lo spazio intramurario era sostanzialmente uno spazio pedonale). Peraltro, poiché la velocità del pedone, come afferma Le Corbusier [3] è e resterà sempre di 4 km/h, i tempi per i lunghi spostamenti sarebbero comunque inaccettabili.

Per far fronte alla crescita urbana bisognava dunque fare ricorso ad altri mezzi, che per lungo tempo furono gli *animali*. Tuttavia, tale soluzione aveva delle enormi conseguenze *ambientali*, se – come ricordano Burrows e Wallace [4] -, a New York nel 1900, una popolazione di 100.000 cavalli produceva 1.134 tonnellate di escrementi al giorno, che dovevano essere spazzati e smaltiti. Naturalmente essi costituivano un serissimo problema di salute pubblica, ma non pareva esserci alternativa.

Il *problema escrementi* fu risolto dall'avvento e diffusione di massa delle autovetture private. La prima Ford Model T uscì dagli stabilimenti di Detroit nel 1908. Un salto tecnologico enorme, e non una scelta urbanistica, che mutò radicalmente il paesaggio urbano e i profili di mobilità.

Tuttavia bisognerà attendere il secondo dopoguerra per comprendere appieno lo stretto legame tra usi del suolo e mobilità, in quanto esiste anche la relazione inversa: la disponibilità di mezzi di trasporto induce a *colonizzare* il territorio, estendendo la dimensione orizzontale degli insediamenti. Tra il 1947 e il 1951 William J. Levitt costruì la prima Lewittown, offrendo soprattutto ai veterani bianchi e alle loro famiglie alternative agli appartamenti del centro città, spesso obsoleti, pubblicizzando allo stesso tempo il prodotto autoveicolo e la casa, anch'essa sostanzialmente prodotta in serie, a due piani e con un piccolo giardino privato (*Fig. 1*). Nascevano così le grandi estensioni urbane, emulando il modello delle *città giardino* di inizio secolo scorso, ma replicandolo su amplissima scala, solo grazie alla diffusione dell'uso dell'auto privata. Il caso di Los Angeles è ancora oggi emblematico di cosa significhi la dipendenza dall'automobile in una città a bassa densità [5] e la letteratura mostra chiaramente la relazione tra consumi energetici e densità urbana [6] (*Fig. 2*).



Fig. 1. Veduta aerea di Levittown, N.Y., nel 1949. Levittown è nota per essere il primo suburbia post-bellico negli USA (Fonte: Levittown public library).

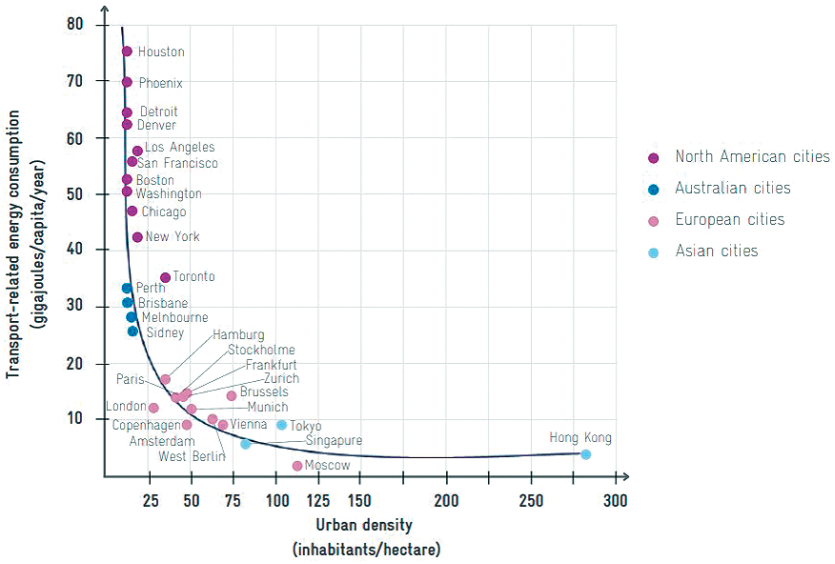


Fig. 2. Relazione tra densità urbana (ab/ha) e consumi energetici per i trasporti (gigajoules/persona/anno) (Fonte: [6]).

Dunque, il diritto alla mobilità sembra essersi trasformato in un neo-nomadismo, con una parte rilevante degli spostamenti coperti con un uso improprio dell'autovettura privata. Il 50% dei tragitti tra i 2 e i 10 chilometri [7], con più della metà dei viaggi in ambito urbano, è coperta con mezzi motorizzati privati [7]. La media nazionale di tempo perso negli spostamenti ogni anno è di oltre 10 giornate lavorative (con una punta di 21,5 giornate a Roma) [8].

2. Le sfide

2.1 La sostenibilità ambientale

La sostenibilità ambientale è probabilmente la più urgente e complessa delle sfide per le città. In Europa si stima che il 96% di chi vi abita sia esposto a uno o più agenti inquinanti ($PM_{2,5}$, PM_{10}, NO_2, O_3) e che tale esposizione causi 400.000 morti premature ogni anno [9]. Il settore dei trasporti condivide con quello industriale il primo posto nel consumo mondiale di energia, con l'aggravante che più del 90% dell'energia con-

sumata per i trasporti proviene dal petrolio, i due terzi del consumo mondiale [10]. Tali effetti si producono in parte rilevante in organismi urbani che hanno un cuore storico che sovente amplifica l'effetto di concentrazione degli inquinanti in atmosfera e del rumore.

Va rammentato che il 30% degli insediamenti europei è di origine romana, percentuale che sale al 34% per l'Italia (2.684 comuni italiani sono di origine romana o pre-romana). Inoltre, 4.164 comuni italiani (53%) hanno un centro fondato tra VIII e XIV secolo, mentre solo 1.215 comuni italiani hanno un centro successivo al XV secolo. Se si considera anche che il 34% della popolazione italiana vive in 55.000 centri minori appartenenti a comuni con meno di 5.000 ab (i quali sono oltre il 70% del totale dei comuni italiani), si comprende anche come nella maggior parte degli insediamenti urbani l'uso del veicolo privato su medie distanze sia sostanzialmente senza alternative, in quanto i sistemi di trasporto pubblico locale (TPL) non trovano nessuna possibile sostenibilità economica in comuni troppo piccoli. In altri termini, una pressione antropica che agisce su organismi resi *fragili* dalla vetustà, ovviamente nella loro parte storica, più intima e spesso pregiata, e di dimensione inferiore alla soglia di sostenibilità per sistemi alternativi di trasporto di massa.

2.2 La sicurezza

Alla fine del XIX secolo, in Francia, alcuni consideravano lo sviluppo dell'automobile una minaccia per la sicurezza pubblica. Quindi l'ordinanza del Questore di Parigi, Lépine del 14 agosto 1893 introdusse il limite di velocità di 12 km/h nei centri abitati e di 20 nel territorio extraurbano [11]. In Gran Bretagna nel 1865 si limitò la velocità in ambito urbano a 3,2 km/h (!) e ogni veicolo doveva essere preceduto a 50 m da un pedone che sventolava una bandiera rossa (una lanterna rossa di notte).

Se si pensa alla diffusione dei veicoli nelle aree urbane, malgrado i notevoli passi avanti degli ultimi decenni (in sostanza in cinquant'anni si sono dimezzate le vittime di incidente stradale) e l'accresciuta accettazione di restrizioni sempre più estese dell'uso del veicolo privato, il problema sicurezza rimane uno dei più rilevanti. Si è quindi coniato il termine *utenti vulnerabili* [12] per identificare coloro i quali soccombono più spesso in una collisione tra due mezzi. Ebbene, nelle aree urbane, non solo si manifesta la maggior parte degli incidenti a pedoni e ciclisti, ma tali eventi sono più difficili da contrastare rispetto ai pro-

gressi che riguardano soprattutto le strade extraurbane e le autostrade. Le ultime statistiche lo sottolineano: nelle aree urbane, pedoni, ciclisti, utenti di mobilità elettrica leggera, dispositivi di micromobilità e veicoli a motore a due ruote rappresentano poco meno del 70% del totale delle vittime della strada.

Per questo motivo, negli ultimi anni il dibattito sulla riduzione di velocità in ambito urbano, quale azione necessaria a raggiungere il target della Strategia europea per la sicurezza stradale, ovvero il dimezzamento delle vittime di incidenti stradali in Europa entro il 2030, è particolarmente acceso. Esiste una raccomandazione generale per la riduzione a 30 km/h nelle aree urbane, basata sull'evidenza scientifica delle conseguenze delle collisioni tra veicoli ed utenti deboli della strada, tipicamente pedone e ciclisti [13], ma le applicazioni e soprattutto l'enforcement sono ancora molto ridotti.

I fattori che incidono sulla sicurezza stradale sono molti, per cui si parla sempre più spesso di *safe system approach*. Il miglioramento della sicurezza stradale in Europa e l'ambizione di raggiungere l'obiettivo di zero morti e feriti gravi sulla strada [14] richiedono, tra l'altro, politiche forti che sostengano, promuovano e proteggano tutti coloro che scelgono di camminare e andare in bicicletta. In altre parole, la necessità di proteggere gli utenti vulnerabili della strada sottolinea ancor più l'importanza dell'azione sull'ambiente urbano, con il suo carico di complessità e di dinamicità [13].

2.3 La sostenibilità economica e sociale

Nelle dinamiche della mobilità si esprimono molte fenomenologie economiche e sociali. Si pensi all'influenza del costo generalizzato di trasporto sulle scelte modali, agli incentivi all'industria automobilistica, al contributo pubblico ai sistemi di trasporto collettivo. Nella pianura padana (ma anche, per esempio, a Parigi), vi era una estesa rete di linee tramviarie che ha smesso di funzionare alla metà degli anni '50, quando il possesso e l'uso dell'automobile si stavano espandendo, accompagnati dalla realizzazione di una rete stradale sempre più fitta e capillare. È evidente che la trasformazione dell'offerta è stata condizionata anche dai business plan delle aziende gestori di servizi: evidentemente i bilanci delle aziende di trasporto erano fallimentari per la mancanza di utenza. Un servizio giocoforza cadenzato, per quanto frequente, non poteva competere con la flessibilità dell'autovettura privata.

Eppure oggi sappiamo che la congestione, quale fattore caratterizzante la mobilità in ambito urbano, ha ingenti conseguenze sulla vita delle persone e sulla perdita di PIL, che l'Unione Europea stima in circa 100 miliardi di euro all'anno [15].

L'economia e la struttura della società modificano comunque i comportamenti individuali e le scelte modali: basti pensare alla flessibilità del mercato del lavoro, alla delocalizzazione delle industrie, alle mutazioni dei profili di organizzazione della vita, alla composizione delle famiglie. Molti di questi fattori hanno accompagnato la diffusione della mobilità privata motorizzata. Oggi si aggiungono, in maniera molto rilevante, nuove esigenze, legate soprattutto ad una popolazione sempre più anziana, spesso autosufficiente (e quindi mobile) fino ad età sempre più elevate, ma anche in misura considerevole condizionata negli spostamenti dal grado di accessibilità ai mezzi e agli spazi.

Dal punto di vista urbanistico, la pandemia ha messo in crisi anche il modello della città compatta, che trionfava nelle teorie urbanistiche recenti, segnatamente quale rimedio allo *sprawl*, rendendo ancora più sfidante la relazione tra sistemi di trasporto pubblico e assetto urbanistico.

3. Le opportunità

3.1 La disponibilità dei dati

La disponibilità di dati è crescente in maniera esponenziale. Si pensi che le previsioni per il 2025 sono di 160.000 miliardi di miliardi di byte prodotti nel mondo [16]! Grazie all'incremento dell'uso di sistemi GPS nei veicoli, i dati di mobilità sono georeferenziati, consentendo l'interfaccia con la cartografia digitale. A differenza di pochi anni fa, la disponibilità odierna di dati trasmessi dai sistemi di navigazione satellitare dei veicoli consente accurate previsioni di traffico, che hanno di fatto consentito di eliminare una parte dei tragitti passivi. Parimenti cresce la possibilità di consultazione di tali dati mediante gli smart phone e i tablet.

Da qui la nuova frontiera del Mobility as a service (MaaS), concetto globale di mobilità che prevede l'integrazione di molteplici servizi di trasporto pubblico e privato accessibili grazie ad un unico canale digitale. Attraverso piattaforme digitali di intermediazione, che combinano varie funzionalità e garantiscono diverse alternative di viaggio – dal trasporto

pubblico al car sharing, dal bike sharing ai taxi – gli utenti possono pianificare, prenotare e pagare più servizi in base alle proprie esigenze facendo però un'unica esperienza di viaggio intermodale [17]. Le linee di azione sono tre:

- sperimentare il MaaS nei territori: attraverso l'introduzione di piattaforme digitali, nuovi modelli di business, la condivisione di dati e l'interazione tra i differenti soggetti che offrono servizi di mobilità, valutando l'impatto sull'ambiente e sul contesto socio-economico;
- creare una piattaforma aperta per i dati di mobilità: ossia un'infrastruttura tecnologica in grado di garantire un'efficace interazione tra i vari operatori di settore, e realizzare un unico punto di accesso nazionale all'insieme dei dati di offerta di trasporto e mobilità disponibili per il MaaS;
- potenziare la dimensione digitale del trasporto pubblico per la diffusione del MaaS nei territori selezionati, abilitando servizi di pagamento digitale, sistemi di informazione agli utenti e servizi per la prenotazione dei viaggi.

Se l'attenzione dell'utente si sposta sull'organizzazione del viaggio, è evidente che la disponibilità di mezzi di trasporto rimane indispensabile, a fronte di crescenti necessità di investimenti per i sistemi di trasporto collettivi nelle aree urbane che si espandono, in dimensione e popolazione.

3.2 Le energie alternative

Poiché i mezzi con cui ci spostiamo e trasportiamo le merci necessitano di energia, e poiché – come si è detto - l'uso del petrolio per i sistemi di trasporto è difficile da abbattere, urgono soluzioni tecnologiche che non riguardano solo i combustibili, ma anche la gestione della domanda. Si inserisce in questo quadro l'azione del mobility manager, figura introdotta con Decreto-legge 19 maggio 2020, n. 34, (il Decreto Rilancio convertito, con modificazioni, dalla legge 17 luglio 2020, n. 77), che non prevede la realizzazione di nuove infrastrutture, ma si basa su iniziative di informazione, volte a creare la coscienza del problema e a modificare le attitudini di vita quotidiana, e disincentivazione, attraverso misure consolidate, quali le politiche di park and road pricing, le zone a traffico limitato e incluse tutte le iniziative di mobility sharing.

Dal punto di vista energetico, le soluzioni alternative ai combustibili fossili, perlomeno per i veicoli leggeri privati, sono soprattutto l'elet-

trico e i biofuels. Si aggiunga l'idrogeno soprattutto per i sistemi di trasporto merci, i treni e le navi.

Per quanto riguarda la trazione con motori elettrici, il problema non è essenzialmente tecnologico (ricordiamo tutti i tram elettrici), ma allora come ancora oggi il problema è costituito dall'alimentazione. La produzione di batterie si basa sull'uso di metalli preziosi, litio, nichel e cobalto, i quali sono concentrati in paesi economicamente poco sviluppati, con evidenti problemi di prezzi determinati da un mercato competitivo e dalla geopolitica aggressiva verso l'Africa da parte soprattutto della Cina (la maggior parte del cobalto si estrae nella Repubblica democratica del Congo).

Si aggiunge oggi anche il problema della domanda di energia, in quanto se tutto il parco veicoli circolante dovesse essere convertito in elettrico, alcuni autori ne sostengono la fattibilità, ovviamente con produzione da fonti di energia rinnovabili [15], mentre il comparto produttivo tradizionale dell'automotive è fortemente scettico.

3.3 *L'Agenda ONU 2030*

L'analisi dell'Agenda ONU 2030 per lo sviluppo sostenibile mostra chiaramente la forte integrazione fra i vari obiettivi che essa propone, soprattutto quelli legati alla sostenibilità ambientale dei contesti urbani (l'Obiettivo specifico è il n. 11: Sustainable cities and communities).

L'uso del suolo e la sua gestione e governo sono fondamentali e meriterebbero maggiore attenzione, perché molti dei processi da cui scaturiscono gli obiettivi di sostenibilità evocati dall'Agenda ONU sono in primis originati dagli assetti territoriali.

Uno dei sub-obiettivi più sfidanti è certamente l'11.2:

> Entro il 2030, garantire a tutti l'accesso a un sistema di trasporti sicuro, conveniente, accessibile e sostenibile, migliorando la sicurezza delle strade, in particolar modo potenziando i trasporti pubblici, con particolare attenzione ai bisogni di coloro che sono più vulnerabili, donne, bambini, persone con invalidità e anziani.

Il tema della mobilità sostenibile sta diventando negli ultimi anni uno degli argomenti ricorrenti nel dibattito sulle politiche ambientali nazionali e locali, che possiamo identificare con l'insieme di azioni volte a ridurre l'impatto ambientale derivante dalla mobilità delle persone e delle merci. La mobilità sostenibile è dunque un sistema organizzativo dei trasporti che offre i mezzi e le opportunità per soddisfare i bisogni

economici, ambientali e sociali in modo efficiente ed equo, minimizzando gli impatti negativi.

L'obiettivo principale è quello di ridurre il numero di auto circolanti a favore di mezzi di trasporto alternativi e alla mobilità attiva, migliorando così l'accessibilità ai centri urbani, diminuendo il grado di concentrazione di sostanze inquinanti ed in generale implementando azioni e politiche che permettano ai cittadini di avere una vita sempre meno dipendente dall'automobile.

3.4 L'integrazione tra mobilità e urbanistica

> *Una buona politica urbanistica fa precedere e non seguire lo sviluppo dei trasporti a quello della fabbricazione* [18].

In realtà, la crescita urbana dal secondo dopoguerra è stata trainata soprattutto dalle politiche abitative e dagli insediamenti industriali, realizzati spesso in assenza o carenza di infrastrutture di trasporto, talvolta mal serviti anche dalla rete stradale.

È anche noto, che tanta parte dell'immagine e del destino urbano si risolva nello spazio pubblico, che è soprattutto spazio delle relazioni, e quindi di mobilità. Urge quindi un deciso superamento della divaricazione tra pianificazione urbanistica e della mobilità, ancora oggi due ambiti disciplinari separati e indipendenti.

Se l'urbanistica ha risposto alle domande di crescita, di tipo socioeconomico, preoccupandosi di attivare meccanismi per la cattura della rendita urbana (il contributo di costruzione), il settore trasporti è orientato ad interventi rilevanti, da parte di soggetti quasi sempre pubblici. In altri termini: mentre la città si costruisce con molte e spesso micro soluzioni private, frammentate sul territorio, di valore unitario relativamente basso, condotte da soggetti molto diversi e quindi non in grado di generare contributi significativi al farsi dello spazio pubblico, i sistemi viabilistico e di trasporto procedono per iniziativa pubblica e si basano su risorse ingenti, ai diversi livelli di governo.

Il diverso approccio realizzativo è di per sé un ostacolo all'integrazione, cui dovrebbe sopperire una pianificazione integrata, che anticipi gli effetti degli interventi spaziali (dalle trasformazioni urbanistiche di porzioni di città, fino alle singole operazioni immobiliari) sul sistema della mobilità, pianificando infrastrutture, reti, sistemi di trasporto pubblico, di sosta, nodi d'interconnessione, ecc..

4. Una suggestione

Come spesso accade nelle vicende umane, proposte e soluzioni a problemi appena manifestatisi vengono accantonate o dimenticate, in favore di altre soluzioni meno efficaci. È anche il caso della pianificazione.

Nel 1929 Clarence Perry mise a punto un diagramma *Neighbourhood Unit*, noto agli studiosi e agli storici e sociologi dell'urbanistica, ma quasi sconosciuto ai più (*Fig. 3*). Egli schematizzò una parte di città, in relazione a:

- dimensione,
- gerarchia stradale,
- collocazione dei servizi,
- accessibilità.

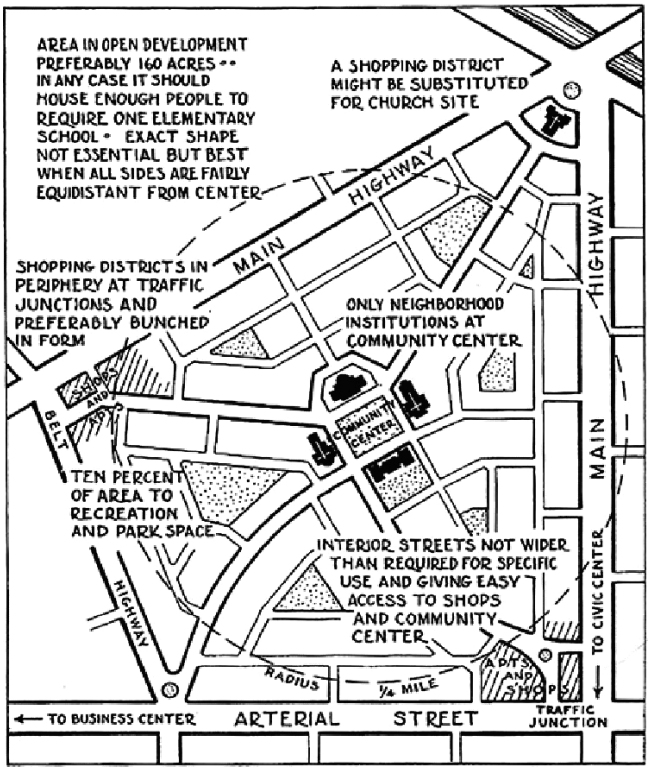


Fig. 3. Il diagramma di Clarence Perry «Neighbourhood Unit» del 1929 [19].

La circonferenza che definisce il quartiere si basa sui tempi di percorrenza delle famiglie con bambini e presenta un diametro di circa 800 m. Le istituzioni d'area sono poste al centro, in modo da separarle dagli edifici ad uso commerciale, posti invece ai margini. Le strade all'interno dell'unità sono discontinue in quanto destinate in gran parte al traffico esclusivamente locale, impermeabili al traffico di transito, che resta concentrato nelle arterie relativamente veloci (poste sui bordi dell'unità). Nel medesimo anno della pubblicazione del compendio di Perry, Stein e Wright presentavano il proprio progetto di quartiere, il modello Radburn all'interno della contea di Bergen, New Jersey, Stati Uniti. Si tratta di una struttura schematica di natura gerarchica, in cui elementi minori vengono opportunamente assemblati in realtà via via più complesse, su una scala di quattro livelli: enclave; block; superblock; neighborhood (*Fig. 4*).

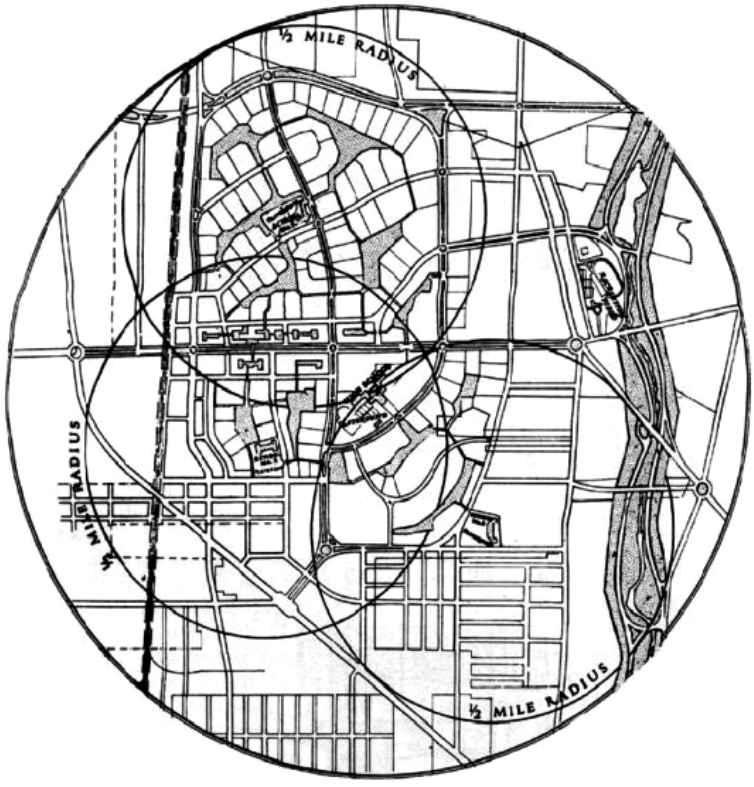


Fig. 4. I sobborghi di Radburn (New Jersey) nel progetto di Stein e Wright [20].

Ebbene, tali schemi urbani propongono un importantissimo legame tra forma, dimensione, servizi e infrastrutture stradali. Le distanze in gioco si basano sulla mobilità pedonale, che – come già evidenziato – consente di coprire agilmente una distanza pari a circa un km, in 15 minuti di cammino. In epoche in cui i problemi ambientali legati alle autovetture erano risibili rispetto ad oggi, ci si poneva già il problema di consentire un accesso con mobilità attiva ai servizi di utilità frequente. I cerchi sono la rappresentazione schematica di queste dipendenze funzionali, che evidentemente non si riflettono sulla realtà del disegno urbano, ma ne schematizzano il funzionamento.

In tempi molto più recenti, autori come Moreno [21] hanno ripreso questo concetto, denominandolo città dei 15 minuti (che tale in effetti era il tempo di base del progetto di Perry, Stein e Wright). Indubbiamente positivo lo sforzo di recupero della prossimità, quale priorità della pianificazione urbanistica (*Fig. 5*).



Fig. 5. La proposta di ville du quart d'heure da parte del Sindaco di Parigi, Anne Hidalgo (Fonte: annehidalgo2020.com).

Al di là della necessità di riconoscere le fortune avverse di questo schema, la sfida odierna ha due facce:

- nelle città di piccole e medie dimensioni, il centro consolidatosi fino alla metà dell'ottocento è sostanzialmente circoscrivibile dal cerchio dei 15 minuti; in questi contesti le politiche per la mobilità dovrebbero drasticamente ridurre l'accesso ai veicoli motorizzati privati, consentendo solo il delivery (ultimo miglio) elettrico e l'accessibilità per le persone fragili;
- nelle città di grandi dimensioni, tale schema va replicato molte volte e i vari ambiti di 15 minuti vanno collegati tra loro con schemi cosiddetti *a rosario*, ovvero basati sull'accessibilità a servizi di trasporto collettivo.

In sostanza, si tratta di insediamenti caratterizzati da una densità medio-alta e posizionati entro un raggio di accesso da una fermata o da una stazione di trasporto pubblico locale (TPL) che sia facilmente percorribile a piedi o in bicicletta. In questo modo le aree urbane acquisiscono un elevato livello di accessibilità e – a prescindere dalla distanza che ovviamente cresce tra un centro e l'altro – la possibilità di muoversi con mezzi collettivi riduce gli impatti negativi della mobilità. Uno sviluppo urbano legato alla presenza delle linee di trasporto.

Il Transit Oriented Development (TOD) è un approccio molto stimolante in quanto si basa su occasioni per rifocalizzare i nodi urbani, che possono anche fungere da catalizzatori multifunzionali. Negli schemi TOD, il luogo catalizzatore è la fermata del trasporto pubblico locale, dove debbono trovare utilmente spazio i servizi pubblici e dove la residenza deve essere densificata. In sostanza si organizza lo spazio urbano per sub-aree (o unità elementari) che gravitino sulle fermate del TPL. Un esempio di grande interesse è costituito dalla città di Friburgo. L'abbandono di alcune aree militari ben dopo il termine della seconda guerra mondiale ha dato lo spunto per la realizzazione di una pianificazione integrata tra mobilità e urbanistica. In particolare, nel quartiere Rieselfeld si è realizzata una spinta centrale costituita dalla linea tramviaria, attorno alla quale sono sorte le abitazioni, le quali possono accedere alle fermate del servizio con una distanza di poche centinaia di metri (*Fig. 6*).



Fig. 6. La spina centrale del tram a Friburgo, quartiere Rieselfeld (Fonte: google maps e foto dell'autore).

Si realizza in questo modo uno schema altamente sostenibile che fa sì, tra l'altro, che il tasso di motorizzazione di Rieselfeld sia pari a 0,34 autovetture/abitante (a fronte di un tasso medio per Friburgo pari a 0,43 e ad una media tedesca di 0,57).

> Lo sviluppo orientato al transito è dunque una strategia di pianificazione e progettazione che consiste nel promuovere uno sviluppo urbano compatto, a uso misto, a misura di pedoni e biciclette e strettamente integrato con il trasporto di massa, raggruppando posti di lavoro, alloggi, servizi e comfort intorno alle stazioni di trasporto pubblico.
> Sulla base della premessa che la crescita economica, il trasporto urbano e l'uso del suolo possono essere gestiti in modo più efficiente se pianificati insieme, il TOD è stato applicato con successo su scala urbana in città di tutto il mondo, tra cui Stoccolma, Copenaghen, Hong Kong, Tokyo e Singapore [22].

5. Considerazioni conclusive

Le città sono luogo emblematico di applicazione della sostenibilità. Non soltanto per il contributo determinante ai consumi energetici e alla produzione di rifiuti, ma anche perché luogo elettivo di confronto tra economia ed ecologia. Le città crescono grazie al valore aggiunto delle terre edificabili e al conseguente trasferimento agli enti pubblici di parte di questo plus valore. Quindi crescono con una dinamica intrinsecamente legata alla proprietà privata del bene suolo. È una dinamica economica ineludibile, che sottende lo sviluppo urbano. Nondimeno, si tratta di una sfida per la sostenibilità in Europa e nel mondo, che richiama in maniera lampante la necessità di un governo pubblico.

Comprendere le tendenze chiave dell'urbanizzazione che potrebbero svilupparsi nei prossimi anni è cruciale per l'attuazione dell'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile, in particolare definendo approcci di urbanizzazione sostenibile.

Governare questo cambiamento epocale significa trovare l'equilibrio tra mercato (la rendita urbana), conservazione delle risorse (la progettazione sostenibile) e la perequazione tra interesse privato e bene comune (la prospettiva etica).

In questo quadro la gestione della mobilità è uno strumento efficace per ridurre le emissioni di gas ad effetto serra e l'uso delle energie non rinnovabili nel settore dei trasporti.

Si tratta di un obiettivo da perseguire alle diverse scale territoriali, dalle aree urbane alle regioni e ai governi nazionali. Tra tali entità sono fondamentali le collaborazioni e le integrazioni, in un approccio olistico che includa anche il contributo delle aziende private.

La gestione della mobilità, peraltro, deve partire da una nuova identificazione delle ragioni di generazione della domanda di trasporto, al fine di implementare le misure che ne consentano il soddisfacimento in prospettiva di sostenibilità.

In altri termini, esiste una gestione attiva della domanda, ovvero nella identificazione dei nuovi profili di mobilità, ed una gestione passiva, ovvero nella identificazione dei mezzi più idonei a servire detta domanda, in una logica di risparmio energetico e di promozione dei mezzi di mobilità attiva e di trasporto pubblico collettivo.

Tra i mezzi si possono evocare quelli fisici, per disincentivare l'uso dei veicoli motorizzati privati; quelli digitali, tra cui il controllo automatico della velocità nelle varie aree urbane; quelli economici, quali il road pricing e l'enforcement o – di altra natura – la leva del prezzo del combustibile. Tra le misure si annoverano anche le politiche attive, come quelle mirate ad aumentare la sicurezza stradale, piuttosto che a proteggere le aree urbane più pregiate (le scuole, per esempio), o ancora a ridurre congestione, rumore ed emissioni.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Columbo, Vincenzo 1966, *La ricerca urbanistica. Organica Urbanistica*, Milano, Giuffré.
2. AA.VV. 1994, *Carta di Megaride*, Edizioni Di.Pi.S.T. – Università degli Studi di Napoli "Federico II".
3. Le Corbusier 1941, *Sur les quatre routes*, Paris, Éditions Gallimard, N.R.F.
4. Burrows, Edwin .G. - Wallace, Mike 1998, *Gotham: A History of New York City to 1898*, New York, Oxford University Press.
5. Dupuy, Gabriel 1999, *La dépendance automobile: symptômes, analyses, diagnostic, traitements*, Anthropos.
6. Newmann, Peter - Kenworthy, Jeffrey 1999, *Costs of Automobile Dependence: Global Survey of Cities*, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1670, Issue: 1.
7. ISFORT 2022, *19° rapporto sulla mobilità degli italiani,* < https://www.isfort.it/wp-content/uploads/2022/12/19-Rapporto_mobilita_italiani_Sintesi.pdf >
8. Osservatorio E-Mobility 2021, La mobilità sostenibile tra pubblico e privato e i riflessi del Covid sul settore automotive, Nomisma.

9. EEA 2019, Outdoor air quality in urban areas, < www.eea.europa.eu/airs/ >
10. IEA, Global energy-related CO_2 emissions by sector, Data and statistics, < https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-energy-related-co2-emissions-by-sector >
11. Baudoin, L 1993, Le centenaire du permis de conduire, *La Vie du Rail* n. 2384.
12. Directive (EU) 2019/1936 of the European Parliament and of the Council of 23 October 2019 amending Directive 2008/96/EC on road infrastructure safety management, < https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019L1936 >
13. < https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/urban-transport/expert-group-urban-mobility_en >
14. EU Road Safety Policy Framework 2021-2030 – Recommendations on next steps towards «Vision Zero», < https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2021-0407_EN.html >
15. Mazzoncini, Renato 2021, *Inversione a E. Comportamenti individuali e sviluppo tecnologico per la mobilità sostenibile*, Milano, Egea.
16. IDC's data Age 2025 Study 2017, sponsored by Seagate
17. MIT 2024, Mobility as a Service for Italy, < https://innovazione.gov.it/progetti/mobility-as-a-service-for-italy/ >
18. Chiodi, Cesare 1935, *La città moderna. Tecnica urbanistica*, Milano, Hoepli.
19. Perry, Clarence A. 1929, *The Neighbourhood Unit*, *Regional Survey of New York and its Environs* (Vol. VII), New York, NY, Regional Plan of New York.
20. Stein, Clarence 1957, *Toward new towns for America*, New York, Reinhold Publishing Corporation.
21. Moreno, Carlos 2024, *La città dei 15 minuti. Per una cultura urbana democratica*, Add Edizioni.
22. Salat, Serge - Ollivier, Gerald 2017, *Transforming the Urban Space Through Transit-Oriented Development: The 3V Approach*, Washington D.C., The world bank.

Istituto Lombardo (Rend. Scienze) 157, 65-96 (2023-2024)

INTERPRETAZIONE DELLA TEORIA QUANTISTICA, COSMOLOGIA E GRAVITAZIONE

Nota del m.e. GIOVANNI M. PROSPERI (*)

(Adunanza del 25 maggio 2023)

SUNTO. – Sulla linea di un recente lavoro, il problema dell'interpretazione della Teoria Quantistica (TQ) è riconsiderato in una prospettiva dell'intero universo e ponendosi dal punto di vista di Bohr, secondo cui il linguaggio classico è il linguaggio della nostra esperienza e la TQ acquista senso solo con riferimento ad esso. Viene distinto un livello classico o macroscopico e un sottostante livello quantistico o microscopico che è percepito solo attraverso le modificazioni che induce nel primo. Si suppone lo stato macroscopico specificato da un tensore di energia momento classico e da un insieme di correnti conservate che si ammette abbiano un ben determinato valore in ogni punto dello spazio e ad ogni tempo. La dinamica microscopica si suppone espressa dal medesimo formalismo dell'ordinaria TQ. Concetto fondamentale: l'usuale postulato di probabilità della TQ, basato sulla corrispondenza tra operatori autoaggiunti e osservabili, è sostituito con quello di una distribuzione di probabilità direttamente per le variabili macroscopiche, espressa in funzione dei corrispondenti operatori quantistici e di un appropriato operatore di densità. Come modello cosmologico è assunta una varietà del modello standard con $\Omega=1$, tempo iniziale a $t=-\infty$, un certo numero di campi quantistici fondamentali, tra cui un campo scalare inflatonico con potenziale alla Goldston, stato di vuoto per $t \to -\infty$. Le fluttuazioni scalari nella radiazione do fondo a microonde sono molto bene riprodotte come sempre attribuendo opportuni valori ai due parametri che caratterizzano il potenziale, le fluttuazioni tensoriali corrispondentemente previste tuttavia non sono osservate. Quest'ultima circostanza sembrerebbe suggerire che il campo gravitazionale sia un oggetto puramente classico, ipotesi perfettamente compatibile con il formalismo proposto ma che non lo è con quello ordinario.

***

(*) Professore emerito dell'Università di Milano, già collaboratore dell'INFN, sezione di Milano, Italy. E-mail: Giovanni.Prosperi@mi.infn.it

ABSTRACT. – On the line of a recent paper, the problem of interpretation of Quantum Theory (QT) is reconsidered in a cosmological perspective and of Bohr's idea that the classical language is the language of our experience and QT acquires a meaning only with a reference to it. A classical or macroscopic level is distinguished and a quantum or microscopic one that is perceived only through the modifications that it induces in the first. The macroscopic state is specified by a classical energy-momentum tensor and conserved currents, which are supposed to have always well-defined values. The microscopic dynamics are expressed by the usual QT formalism. Fundamental idea: the usual probability rule of QT, based on an observables self-ajoint operators correspondence, is replaced with a distribution of probability directly for the macroscopic variables, defined in terms of the corresponding quantum operators and a quantum density operator. For the universe, a variance of the standard model with $\Omega=1$ is assumed, one inflaton, a Goldstone type potential, initial time at $t=-\infty$, expectation values of all fundamental fields vanishing for $t \to -\infty$. The scalar fluctuations in the cosmic microwave background can be correctly explained giving appropriate values to the potential parameters, but the absence of the tensor fluctuations remains not understood. This seems to suggest that gravity is a pure classical phenomenon, what could be consistently accommodated in our framework but it is inconsistent with the usual formalism.

Voglio riconsiderare in questo scritto un fondamentale problema di coerenza nella formulazione della Teoria Quantistica (TQ) che, nonostante i fiumi di inchiostro che vi sono stati riversati, mi sembra manchi tutt'ora di una soluzione soddisfacente. Lo farò sulla linea di un recente articolo da me pubblicato in collaborazione con un mio vecchio allievo [1]. Dato l'interesse interdisciplinare dell'argomento, cercherò di mantenere la prima sezione dedicata ad una presentazione del problema per quanto possibile ad un livello puramente illustrativo e riserverò gli aspetti formali alle sezioni successive.

1. IL PROBLEMA E UNA PROSPETTIVA DI SOLUZIONE

La Fisica Classica, la fisica che si è sviluppata sino agli inizi del '900, procede per modelli idealizzati, ma legati in modo molto diretto alla nostra esperienza ordinaria. Suppone che le proprietà di un oggetto possano essere specificate da un insieme di variabili con un riferimento empirico immediato, alle quali si possa attribuire in ogni momento un valore ben definito che cambia con continuità nel tempo.

Suppone in generale che tali variabili obbediscano a un sistema di equazioni differenziali, quelle della Meccanica, della Termodinamica di non equilibrio, dell'Elettromagnetismo, che controllano la loro evoluzione nel tempo e permettono di prevedere i loro valori in un momento successivo, se essi sono conosciuti ad un qualche tempo iniziale.

E' una *Teoria deterministica,* in cui ogni affermazione è supposta avere un significato immediato e nessun riferimento esplicito a un'effettiva procedura di osservazione è per sé necessario.

La Teoria Quantistica, al contrario, consiste, come la intendiamo oggi, in un insieme di regole matematiche astratte, che non hanno in sé stesse alcun significato intuitivo, ma permettono, date certe informazioni iniziali sul sistema, di calcolare la probabilità che un esperimento successivo dia un certo risultato.

Un riferimento esplicito a procedimenti di osservazione e ai tempi in cui essi sono effettuati è essenziale e nessun significato può essere attribuito a qualsiasi affermazione su un qualche oggetto a prescindere da un tale riferimento. Ogni tentativo di adottare dei modelli intuitivi con proprietà esattamente specificate, come nel caso della Teoria Classica, porta insuperabili contraddizioni, se usato al di fuori di certe circostanze e di condizioni limite precise.

Se ci riferiamo all'esempio più semplice, quello di una singola particella (un fotone, un elettrone, un protone, …), troviamo che tutte le volte che vogliamo osservarla essa si presenta come perfettamente localizzata, idealizzabile come un oggetto puntiforme. Nell'intervallo tra due osservazioni essa è tuttavia descritta da una funzione d'onda complessa $\psi(x,t)$, quindi da un oggetto esteso, che obbedisce ad un'equazione in sé deterministica ma il cui modulo al quadrato $|\psi(x,t)|^2$ è interpretato come la densità di probabilità di trovare al tempo t la particella, se la si osserva, in un intorno del punto x senza che apparentemente esista una causa, perlomeno di carattere fisico, che spieghi perché essa venga poi di fatto osservata in quel luogo piuttosto che in un altro tra quelli possibili. Solo se si dispone di un fascio di particelle sufficientemente intenso, tutte preparate nello stesso modo, si trova che queste, pur essendo rivelate singolarmente in posizioni determinate, si distribuiscono statisticamente secondo la legge di probabilità indicata.

Particolarmente significativa diviene allora nel contesto la considerazione del fenomeno di interferenza attraverso un diaframma munito di due fenditure che fu oggetto di grandissime discussioni tra Einstein e Bohr [2].

Nella prima metà dell'ottocento Young mostrò che facendo passare un fascio di luce attraverso un diaframma su cui erano praticate due fenditure, sufficientemente vicine e sottili, si ottenevano su uno schermo fasce alternativamente luminose e oscure, corrispondenti al sovrapporsi in fase o in opposizione di fase di onde provenienti dall'una o dall'altra. (v. *Fig. 1*). Fu questo risultato a far prevalere la teoria ondulatoria della

luce proposta da Huygens su quella teoria corpuscolare di Newton. Già con la prima teoria quantistica di Planck e di Einstein si attribuiva però di nuovo alla luce anche un carattere corpuscolare e si poneva il problema della coesistenza dei due aspetti, risolto appunto con l'idea della distribuzione statistica dei quanti di luce, i fotoni, sullo schermo.

Quando poi, con la formulazione della nuova Meccanica Quantistica, fu attribuito anche alle particelle un carattere ondulatorio, ci si doveva aspettare che anche con un fascio di particelle si dovesse poter ottenere un fenomeno simile. Ai tempi delle discussioni tra Einstein e Bohr, a cavallo tra gli anni '20 e '30 la natura ondulatoria delle particelle era stata confermata attraverso esperimenti di diffrazione su cristalli. Un esperimento del tipo di Young non era realizzabile neppure con le particelle note più leggere, come gli elettroni, per la piccolezza della lunghezza d'onda ad essi associata anche per energie abbastanza basse; dell'ordine di 10^{-8} cm per un'energia di 100 eV secondo la relazione di de Broglie tra lunghezza d'onda e quantità di moto, $\lambda = \frac{h}{p}$. Data la sua significanza esso rimase però alla base di accanite discussioni come esperimento ideale.

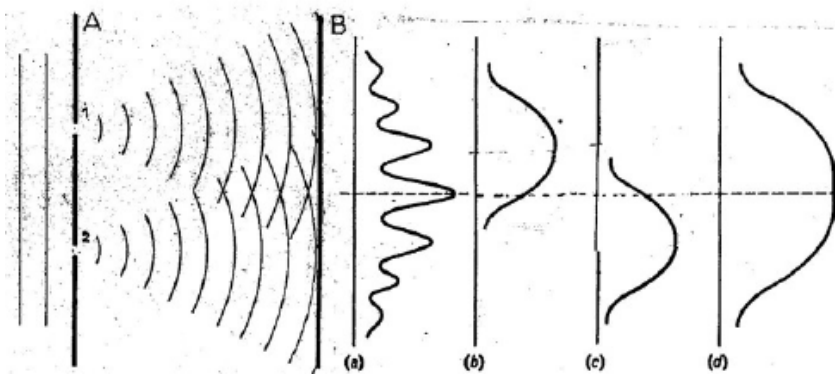


Fig 1. Interterferenza da due fenditure: a) $|\psi|^2 = |\psi_1 + \psi_2|^2 = |\psi_1|^2 + |\psi_2|^2 + 2Re\,\psi_1^*\psi_2 \neq |\psi_1|^2 + |\psi_2|^2$ *; b)* $|\psi_1|^2$ *; c)* $|\psi_2|^2$ *; d)* $|\psi_1|^2 + |\psi_2|^2$.

Oggi le difficoltà tecniche sono state superate ed esperimenti sostanzialmente riconducibili a quello delle due fenditure sono stai eseguiti con diversi tipi di particelle, con anche la possibilità di mettere in evidenza la singola particella. Particolarmente notevole tra altri è

l'esperimento di un gruppo giapponese (Tonamura e collaboratori, 1984 [3]). Un fascio di elettroni veniva fatto incidere su un filo carico positivamente che si comportava come un biprisma ottico ed equivale perciò al diaframma con due fenditure. La figura è raccolta su uno schermo fluorescente, cioè su uno strato di piccoli cristalli che colpiti da elettroni emettono dei fotoni. Essa era poi osservata per mezzo di un dispositivo elettronico costituito da un reticolo di piccoli fotomoltiplicatori che consentiva, variando il tempo di registrazione, di ottenere la distribuzione sullo schermo di un numero variabile di elettroni; da una decina a settantamila nelle foto riportate in *Fig. 2*. Come si vede nel caso di dieci elettroni si osserva un corrispondente numero di punti luminosi sullo schermo apparentemente distribuiti a caso. Come aumenta il numero delle particelle tuttavia, i punti tendono a infittirsi su certe fasce fino a delineare progressivamente la figura di interferenza.

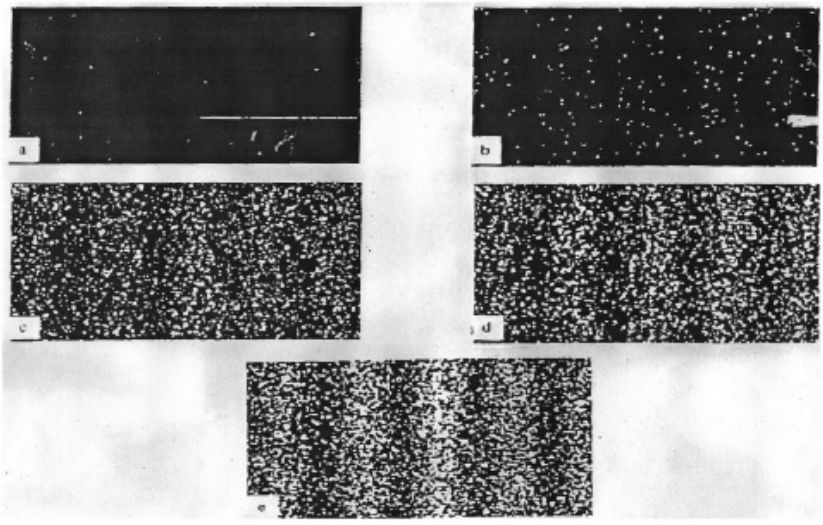


Fig. 2. La figura di Interferenza come risultato della distribuzione statistica degli elettroni sullo schermo (Tonomura e collaboratori, 1984).

Ritorniamo però sul significato teorico e le conseguenze concettuali dei precedenti risultati. Osserviamo che la funzione d'onda della singola particella che giunge sullo schermo è evidentemente della forma $\boldsymbol{\psi = \psi_1 + \psi_2}$, risulta cioè dalla somma dell'onda che è passata

attraverso la fessura 1 e di quella che è passata attraverso la fessura 2 (v. *Fig. 1*). La distribuzione attesa di particelle sarà perciò data da $|\psi|^2 = |\psi_1 + \psi_2|^2 = |\psi_1|^2 + |\psi_2|^2 + 2\mathrm{Re}\,\psi_1^{*}\psi_2$, dove l'effetto dell'interferenza è racchiuso nell'ultimo termine e legato alla coesistenza sullo schermo delle due onde (diagramma *a* nella *Fig. 1*). Se però cerchiamo di separare le particelle che giungono da ciascuna fenditura, per esempio chiudendo alternativamente la 2 e la 1, troviamo che le distribuzioni dovranno essere date rispettivamente da $|\psi_1|^2$ e $|\psi_2|^2$ (diagrammi *b* e c) e la distribuzione complessiva da $|\psi_1|^2 + |\psi_2|^2$ (diagramma *d*) che è diversa da $|\psi_1 + \psi_2|^2$ e non corrisponde ad alcuna interferenza.

La situazione non muta se si immagina di disporre di un dispositivo effettivo, per esempio due contatori posti di fronte alle fenditure, che segnali il passaggio della particella dall'una o dall'altra fenditura. Se è ad esempio il contatore posto di fronte alla fenditura 1 a dare segnale (ricordiamo che uno solo è supposto dare segnale) la funzione d'onda va ridefinita per tener conto del risultato e posta uguale a ψ_1 a meno di un fattore di normalizzazione (collasso della funzione d'onda), come richiesto dalla necessità di coerenza di misure successive. La figura di interferenza viene così distrutta. In concreto per verificare l'ultima circostanza sono stati eseguiti esperimenti del tipo descritto in presenza di un gas invece che nel vuoto. Il passaggio di una particella carica attraverso l'una o l'altra fenditura è segnalata dalla scia di ioni da essa creata e quindi realizza la situazione dei due rivelatori. Si è constatato che la figura d'interferenza spariva quando si raggiungeva una certa pressione nel gas.

Si deve concludere che non è possibile attribuire alla singola particella la posizione 1 o 2 nell'attraversamento del diaframma (a destra o a sinistra del filo nel dispositivo effettivo descritto) se non con riferimento ad un effettivo esperimento e questo modifica l'intero sviluppo successivo. Il modello della particella come corpo puntiforme che descrive una traiettoria continua è del tutto inapplicabile.

Il problema non è specifico dell'esempio considerato, ma è del tutto generale se si adotta per un sistema generico il consueto postulato di probabilità fondato sulla corrispondenza tra osservabili e operatori autoaggiunti. In approssimazione non relativistica, l'insieme delle funzioni d'onda $\psi(\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{x}_2, \ldots \boldsymbol{x}_n, t)$per un determinato sistema di particelle si può strutturare come uno spazio vettoriale a infinite dimensioni (spazio di Hilbert) con un concetto di ortogonalità e di norma (l'analogo della lunghezza) e la possibilità di costruire sistemi di assi unitari, ortogonali e in funzione dei quali può essere espresso un qualsiasi altro

vettore come nell'ordinario spazio tridimensionale. In modo analogo, nella formulazione relativistica, in cui le particelle di una determinata specie compaiono come quanti di uno specifico campo, gli stati di questo vengono rappresentati tramite vettori (vettori di stato) di un analogo spazio più astratto.

Secondo il postulato di cui sopra ad ogni grandezza osservabile A, relativa ad un determinato sistema fisico C, corrisponde nello spazio di Hilbert ad esso relativo un sistema di assi $\psi_1,\ \psi_2, \ldots \psi_r, \ldots$, denominati autostati e un insieme di valori ad essi associati $\alpha_1, \alpha_2,\ \ldots\ \alpha_r,\ \ldots$ che rappresentano i valori assunti da A quando il sistema si trova nel corrispondente autostato (equivalentemente all'osservabile A si può far corrispondere l'operatore autoaggiunto $\hat{A}$ che ha per autovalori i valori numerici sopra riportati e i corrispondenti assi come autovettori). Se invece il sistema C si trova in un generico stato ψ che, sviluppato secondo gli assi precedenti, risulti effettivamente della forma $\psi = \sum_s c_s \psi_s$ (stato di sovrapposizione), la grandezza A si ritiene indeterminata. Se però si suppone di eseguire in quell'istante una misura di A la probabilità di ottenere il risultato $A = \alpha_s$ è data da $|c_s|^2$ e se il suddetto risultato è effettivamente ottenuto lo stato va ridefinito come $\psi = \psi_s$.

Se allora si considera un secondo osservabile B con autostati $\varphi_1,\ \varphi_2,\ \ldots\ \varphi_r,\ \ldots$ questi risulteranno in generale espressi come sovrapposizione dei precedenti $\varphi_r = \sum_s S_{rs} \psi_s$. Non esisterà perciò in generale uno stato che corrisponda a valori determinati per entrambi le grandezze e l'osservazione di una di queste modificherà profondamente tutto ciò che riguarda la seconda. E' questo nella sostanza il contenuto del famoso principio di indeterminazione di Heisenberg e la dimostrazione che, come detto, in maniera del tutto generale non si può attribuire ad una grandezza un valore indipendentemente da un effettivo esperimento rivolto a determinarla.

E' chiaro, tuttavia, che perché si possa parlare di un esperimento, di una misura, è necessario che i risultati si possano esprimere in maniera univoca. Per questa ragione secondo Bohr: *il dispositivo sperimentale e il risultato di un esperimento vanno comunque descritti in termini classici, il linguaggio classico essendo il linguaggio della nostra esperienza* [2].

Al punto di vista di Bohr si presenta però un'ovvia obiezione. Al livello fondamentale anche l'apparato sperimentale dovrebbe essere descritto secondo la Teoria Quantistica, perciò, anche le modificazioni in esso indotte dall'interazione con l'oggetto osservato dovrebbero fare riferimento ad un ulteriore dispositivo

che osservi il primo. Si genera così secondo John von Neumann (considerato tra i maggiori matematici della prima metà del '900) una catena di apparati ciascuno dei quali osserva il precedente che a monte deve però necessariamente includere lo stesso sistema nervoso dell'osservatore cosciente [4]. Per von Neumann è proprio l'atto di presa di coscienza di quest'ultimo che dovrebbe dare senso a tutto il processo. Indipendentemente da ogni posizione filosofica, questo tipo di soluzione del problema porta però, tra altre cose, a paradossi poco accettabili, quando si voglia considerare un osservatore cosciente che osserva un altro osservatore cosciente; uno particolarmente famoso è detto del *gatto di Schroedinger.*

Ad un livello più formale, indichiamo con $\underline{I}$ l'oggetto e supponiamo di voler osservare la grandezza A ad esso relativa come sopra caratterizzata. Perché un secondo sistema $\underline{II}$ possa agire come apparecchio di misura di A è necessario che questo, per effetto di una breve interazione con $\underline{I}$, subisca una modificazione differente a seconda del particolare autostato di A in cui $\underline{I}$ si trova. Volendo trattare anche $\underline{II}$ dal punto di vista quantistico, von Neumann suppone che esista una qualche grandezza M_{II} relativa a quest'ultimo con autostati $\Psi_0, \Psi_1, \ldots \Psi_r, \ldots$ e autovalori $\mu_0, \mu_1, \ldots \mu_r \ldots$ tale che, supposto il sistema inizialmente nello stato Ψ_0 , per effetto dell'interazione si abbia

$$\psi_s \Psi_0 \rightarrow \psi_s \Psi_s \, . \tag{1.1}$$

Se si suppone l'oggetto in uno stato più generale $\psi = \sum_s c_s \psi_s$ dovrà allora aversi

$$\psi \Psi_0 \rightarrow \sum_s c_s \psi_s \Psi_s . \tag{1.2}$$

La probabilità $|c_s|^2$ quindi di osservare $A = \alpha_s$ quando la TQ è applicata a I è identica a quella di osservare $M_{\mathrm{II}} = \mu_s$, quando la TQ è applicata anche a II. Ma se applichiamo la TQ anche a $\underline{II}$, dobbiamo poi riferirci ad un terzo sistema $\underline{III}$, descritto classicamente, che agisca come apparato per l'osservazione di M_{II} su $\underline{II}$. Ciò che è importante per von Neumann è l'equivalenza delle situazioni

I	*II + III*
considerato come oggetto descritto secondo la TQ	considerato come apparato descritto classicamente

e

I + II	*III*
considerato come oggetto descritto secondo la TQ	considerato come apparato descritto classicamente

Nella catena di apparati che si viene a creare, quindi, la linea di demarcazione tra ciò che è considerato oggetto e ciò che è considerato apparato può essere spostata arbitrariamente. Come già detto però, in ultima analisi ciò che decide su quanto è accaduto è l'*atto di presa di coscienza dello sperimentatore*, salvo che si trovi un criterio per spezzare ad un certo punto la catena, cioè che ad un certo stadio vi sia sistema previlegiato per il quale non abbia senso considerare la sovrapposizione di un qualche fondamentale sistema di autostati. Implicitamente in tutte le applicazioni della TQ, sia a processi che coinvolgono singole particelle, sia allo studio delle proprietà della materia macroscopica in condizioni anche molto diverse da quelle della nostra osservazione ordinaria, la catena di von Neumann viene interrotta, coerentemente con le idee di Bohr, al raggiungimento del livello della nostra esperienza immediata. E' proprio queta circostanza che andrebbe però giustificata.

In un libretto di tipo divulgativo P. Jordan [5] congetturava che in un sistema macroscopico, formato da un gran numero di particelle, per la maggior parte degli stati i termini di interferenza tra gli autostati di grandezze macroscopiche si cancellassero largamente l'uno con l'altro, per la complessità stessa del sistema. In un lavoro pubblicato nel 1962, che suscitò al momento una notevole attenzione, e in alcuni sviluppi successivi, un nostro gruppo tra Milano e Pavia tentò di dare una base formale a questa congettura con argomenti di Meccanica Statistica e attraverso una più completa caratterizzazione dell'apparecchio di misura [6]. Accolto con entusiasmo da L. Rosenfeld, uno dei più fedeli assistenti di Bohr, il punto di vista fu invece criticato da Wigner, perché osservava che l'argomento, facendo perno su approssimazioni, mostrava in realtà solo la difficoltà di osservare stati di sovrapposizione del tipo suddetto, non la loro impossibilità sul piano concettuale [7].

Nel tentativo di risolvere il problema da vati punti di vista è stata prodotta una ricchissima letteratura. A nostro parere nessuna soluzione soddisfacente è stata tuttavia trovata. Qui mi limito a citare il rif. [8], un grosso volume curato da J. A. Wheeler e Zureck dove sono raccolti

numerosi tra i lavori più significativi nel campo anteriori al 1982 [9] e per il periodo successivo i proceeding di una serie di congressi biennali sull'argomento organizzati da un gruppo di ricercatori giapponesi e dedicati, oltre che agli aspetti puramente teorici, a tutta una serie di esperimenti cruciali che i progressi tecnologici hanno finalmente permesso di rendere possibile [10].

Nel rif. [11] il nostro gruppo aveva tentato di superare le obiezioni di Wigner trattando formalmente le quantità macroscopiche come permanentemente osservate. Il formalismo sviluppato tuttavia violava la conservazione dell'energia e appariva molto problematica una sua estensione relativistica. Nel rif. [1] abbiamo voluto riconsiderare il problema da un punto di vista più drastico e in primo luogo nella prospettiva dell'intero universo, come ci sembra appropriato.

Come modello cosmologico abbiamo adottato una variante dall'usuale modello ΛCDM, con $\Omega = 1$ (quindi spazio tempo globalmente piatto) e Big Bang (BB), inteso come momento di inizio della dilatazione dell'universo, a $t = -\infty$, come richiesto dall'insieme delle ipotesi assunte.

Ispirandoci a Bohr, abbiamo distinto nella descrizione del mondo fisco un doppio livello, un livello classico o macroscopico, direttamente legato alla nostra esperienza ordinaria, e un sottostante livello quantistico o microscopico, percepito solo attraverso le modificazioni che induce sul primo. A livello macroscopico abbiamo supposto l'esistenza di un insieme esplicito di grandezze di tipo termodinamico (densità di energia, pressione, velocità di spostamento della materia, densità di carica elettrica, …) specificate in ogni punto dello spazio e in ogni istante da un valore sempre determinato. A livello microscopico abbiamo supposto valido l'usuale formalismo quantistico con un insieme di campi quantizzati (coerentemente con quanto abbiamo detto a proposito dell'estensione relativistica della teoria) in funzione di cui sono espresse tutte le altre grandezze. Tra questi campi, come in tutte le teorie inflazionarie, abbiamo supposto l'esistenza di un campo scalare (campo inflatonico) che guida la dilatazione dell'universo, con una dilatazione molto rapida di brevissima durata, la cui eco può essere oggi osservata in fluttuazioni di temperatura e polarizzazione in seno alla radiazione elettromagnetica a microonde di fondo (CMB) che pervade tutto l'universo. L'universo è supposto inizialmente in uno stato quantistico di vuoto. Successivamente questo può essere ridefinito sulla base di informazioni che noi abbiamo prima di un certo tempo di riferimento, informazioni che ovviamente non potranno riguardare mai l'intero universo,

ma solo quella parte di esso e quindi quei sistemi fisici che siamo in grado di prendere in considerazione.

Ciò premesso, noi lasciamo cadere l'usuale postulato di probabilità, sopra richiamato, basato sulla corrispondenza operatori autoaggiunti (o sistemi di assi nello spazio di Hilbert) e osservabili, centrato sull'oggetto, e lo sostituiamo col postulato di una distribuzione di probabilità sulle variabili macroscopiche, espressa attraverso il formalismo quantistico e in funzione dello stato quantistico, come precisato sopra. Questo postulato, in quanto ciò che è accaduto prima di un certo tempo condiziona ciò che accadrà nel tempo successivo, esprime in certo senso la dinamica delle variabili macroscopiche relative alla porzione di universo a cui ci riferiamo. Nel caso di un corpo costituito da molti componenti identici, in condizioni di equilibrio locale, per cui si abbia una varianza molto piccola delle variabili macroscopiche come previsto dalla Meccanica statistica, esso porta praticamente a equazioni deterministiche del tipo della usuale Meccanica o Termodinamica classica di non equilibrio. Viceversa, in presenza di particelle per così dire fuori dal coro e di osservabili per cui l'ipotesi di von Neumann (1.1) sia effettivamente realizzata con autostati $\Psi_0, \Psi_1, \ldots \Psi_r, \ldots$ corrispondenti a valori praticamente determinati delle variabili macroscopiche, porta alle usuali regole di probabilità quantistica.

Ritornando poi alle fluttuazioni indotte sulla CMB, possiamo ricordare che esse sono di due tipi: *fluttuazioni scalari* che riflettono le fluttuazioni quantistiche del campo inflatonico e *fluttuazioni tensoriali* che dipendono da quelle di un eventuale campo gravitazionale quantistico. Il fatto che le prime siano spiegabili e riproducibili con grande precisone assegnando opportuni valori ai parametri che compaiono nell'espressione del potenziale di auto-interazione del campo inflatonico, mentre quelle tensoriali non sono osservate, potrebbe suggerire che il campo gravitazionale sia un fenomeno puramente classico. Questa circostanza che, se confermata, risolverebbe molti altri problemi è del tutto compatibile con la nostra formulazione, mentre non lo è con quella ordinaria.

2. Livello classico e livello quantistico

Premettiamo che nel seguito useremo sempre unità naturali ($c = \hbar = 1$) con l'energia di 1 Gev assunta come unità fondamentale. Ricordiamo

$$1\text{GeV}^{-1} = 0.197 \times 10^{-13}\ \text{cm} \ = \ 6.58 \times 10^{-25}\ \text{sec} \quad . \tag{2.1}$$

A livello macroscopico, in coerenza con la termodinamica di non equilibrio (l'ambito più generale della Fisca Classica), postuliamo uno stato dell'universo espresso da un tensore di energia-momento classico $t_{\mu\nu}(t,\boldsymbol{x})$ e un certo numero di correnti conservate $j_{1\mu}(t,\boldsymbol{x})$, $j_{2\mu}(t,\boldsymbol{x})$, … $j_{r\mu}(t,\boldsymbol{x})$ in dipendenza dal modello di fisica delle particelle adottato (corrente elettromagnetica, corrente barionica, corrente leptonica, nell'ordinario modello standard). Ammetteremo che queste grandezze abbiano sempre un valore ben determinato in ogni punto $\boldsymbol{x}$ dello spazio e ad ogni tempo t. Più precisamente, tenuto conto delle proprietà delle corrispondenti grandezze quantistiche e di una celebre analisi di Rosenfeld e Bohr, ammetteremo che esse siano rappresentate in un tutto il loro sviluppo da distribuzioni nel senso di Schwarz.

Al tensore classico $t_{\mu\nu}(x)$ inoltre associamo una metrica classica $g_{\mu\nu}(x)$ definita dall'equazione di Einstein

$$R_{\mu\nu}\big(g_{\rho\sigma}\big) - \tfrac{1}{2} g_{\mu\nu}(x)\, R(g_{\rho\sigma}) \;=\; -8\pi G t_{\mu\nu}(x) \quad , \tag{2.2}$$

dove ovviamente indichiamo con $R_{\mu\nu}\big(g_{\rho\sigma}\big)$ il tensore di curvatura di Ricci relativo alla metrica $g_{\mu\nu}(x)$, con $R = R_{\mu\nu}\, g^{\mu\nu}$ la corrispondente curvatura scalare e con $G = 6.71 \times 19^{-39}\ \mathrm{GeV}^{-2}$ la costante gravitazionale. Similmente, imponendo le equazioni di Maxwell, possiamo introdurre un campo elettromagnetico classico associato alla relativa corrente.

Dalla (2.2) segue automaticamente, per l'identità di Bianchi, la legge di conservazione

$$D_\mu t^{\mu\nu} \;=\; \partial_\mu t^{\mu\nu} + \Gamma^{\mu}_{\mu\rho} t^{\rho\nu} + \Gamma^{\nu}_{\mu\rho} t^{\rho\nu} = 0 \quad . \tag{2.3a}$$

In aggiunta, per ciascuna corrente postuleremo l'analoga legge

$$D_\mu j^{\mu}_k \;=\; \partial_\mu j^{\mu}_k + \Gamma^{\mu}_{\mu\rho} j^{\rho}_k \;= 0 \qquad (k = 1, 2, \ldots r) \tag{2.3b}$$

Per rendere univoca la definizione di $g_{\mu\nu}(x)$ postuleremo inoltre che in un appropriato riferimento essa si riduca per $t \to -\infty$ ad una metrica di RobertsonWalker

$$\bar{g}_{00}(x) = -1, \;\; \bar{g}_{0j}(x) = 0\,, \;\; \bar{g}_{ij}(x) = a^2(t)\, \delta_{ij} \quad \text{con} \quad a(t) \to 0. \tag{2.4}$$

Facciamo quindi con ciò l'ipotesi di un universo iniziale perfettamente omogeneo e isotropo.

Al livello microscopico supporremo, come detto, valido l'usuale formalismo della teoria quantistica. Ci metteremo nella descrizione di Heisenberg e coerentemente con tutti i modelli di fisica delle particelle, ma senza volerci riferire specificamente a nessuno determinato, supporremo l'esistenza di un certo numero di campi fondamentali $\phi_1(x)$, $\phi_2(x), \cdots$ in funzione dei quali siano espresse tutte le altre grandezze. Tra questi supporremo la presenza di un *campo inflatonico* scalare, che indicheremo specificamente con $\varphi(x)$ e, almeno per il momento, una metrica quantistica $\gamma_{\mu\nu}$. Volendo mettere queste ipotesi in evidenza, scriveremo l'azione totale dell'universo come

$$S_{\mathrm{T}} = S_\gamma[\gamma_{\mu\nu}] + S_\varphi[\gamma_{\mu\nu}, \varphi] + S_\phi[\gamma_{\mu\nu}, \varphi, \phi_1, \phi_2, \cdots] , \qquad (2.5)$$

dove

$$S_\gamma[\gamma_{\mu\nu}] = \int d^4x \sqrt{-\gamma}\, R(\gamma_{\mu\nu}) , \qquad (2.6)$$

$\gamma = \det \gamma_{\mu\nu}$, e

$$S_\varphi[\gamma_{\mu\nu}, \varphi] = -\int d^4x \sqrt{-\gamma}\, \left(\tfrac{1}{2}\gamma^{\rho\sigma}\partial_\rho\varphi\, \partial_\sigma\varphi + V(\varphi)\right) \qquad (2.7)$$

con un potenziale rinormalizzabile $V(\varphi)$ alla Goldstone

$$V(\varphi) = \frac{\kappa^4}{4\lambda} - \frac{1}{2}\kappa^2\varphi^2 + \frac{1}{4}\lambda\varphi^4 , \qquad (2.8)$$

che è massimo per $\varphi = 0$, con $V(0) = \frac{\kappa^4}{4\lambda}$, e minimo per $\varphi = v \equiv \frac{\kappa}{\sqrt{\lambda}}$, con $V(v) = 0$. L'interazione tra φ e gli altri campi è intesa inclusa nel terzo termine della (2.5).

Postuleremo inoltre che per $t \to -\infty$ l'universo si trovi in uno stato di vuoto, definito come quello di minima energia, che, adottando il formalismo dell'operatore densità, denoteremo come $\widehat{W}_{\mathrm{in}} = |0><0|$. Supporremo tale stato invariante per trasformazioni spaziali, ma a causa della dilatazione dell'universo non anche per traslazione temporale. Per

un campo spinoriale o vettoriale $\phi_s(x)$ allora il valore di aspettazione quantistico deve automaticamente annullarsi asintoticamente

$$\langle \phi_s(x) \rangle_{\mathrm{Q}} \equiv \mathrm{Tr}\left[\hat{\phi}_s(x)\, \widehat{W}_{\mathrm{in}}\right] = \left\langle 0 \middle| \hat{\phi}_s(x) \middle| 0 \right\rangle \to 0 \,, \tag{2.9}$$

La situazione è più complicata per un campo scalare e quindi per il campo inflatonico. In tal caso $\bar{\varphi} = \langle 0|\hat{\varphi}(x)|0\rangle$ può dipendere solo da t , ma può essere diverso da zero. Perciò scriveremo

$$\hat{\varphi}(x) = \bar{\varphi}(t) + \hat{\chi}(x) \,, \quad \text{con} \quad \langle \chi(x) \rangle_{\mathrm{Q}} \to 0 \tag{2.10}$$

e corrispondentemente

$$\hat{\gamma}_{\mu\nu}(x) = \bar{g}_{\mu\nu}(t) + \hat{h}_{\mu\nu}(x) \quad \text{con} \quad \langle h_{\ \mu\nu}(x) \rangle_{\mathrm{Q}} \to 0 \,, \tag{2.11}$$

identificando $\bar{g}_{\mu\nu}(t)$ con il tensore definito dall'equazione (2.4).

Supporremo che $\bar{\varphi}(t)$ e $\bar{g}_{\mu\nu}(t)$ siano soluzioni delle equazioni di Eulero relative all'azione (2.5-8) quando tutti gli altri campi sono posti uguali a 0. Otteniamo

$$\ddot{\bar{\varphi}}(t) + 3\, \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}\, \dot{\bar{\varphi}}\,(t) + V'\big(\bar{\varphi}(t)\big) = 0 \tag{2.12}$$

e l'equazione di Friedman

$$\frac{\dot{a}(t)}{a(t)} = \sqrt{\frac{8\pi G}{3}\left(\frac{1}{2}\, \dot{\bar{\varphi}}(t)^2 + V(\varphi(t)\right)} \quad . \tag{2.13}$$

Per ottenere che la (2.9) sia soddisfatta per ogni campo supporremo inoltre

$$\bar{\varphi}(t) \to 0 \quad \text{e naturalmente} \quad a(t) \to 0 \,. \tag{2.14}$$

Assumiamo ovviamente $\hat{h}_{\mu\nu}(x)$ come definizione del campo gravitazionale quantistico.

3. Postulato base

Vogliamo ora introdurre il nostro postulato fondamentale.
Poiché abbiamo supposto che le variabili classiche come gli operatori di campo quantistici siano delle distribuzioni, ciò che di fatto è dotato di senso sono espressioni del tipo

$$\vartheta_f = \int d^4x\, f^{\mu\nu}(x)\, t_{\mu\nu}(x) \quad \text{e}$$
$$\sigma_{kh} = \int d^4x\, h^{\mu}(x)\, j_{k\mu}(x) \quad (k = 1, 2, \dots r), \tag{3.1}$$

dove $f^{\mu\nu}(x) = f^{\nu\mu}(x)$ e $h^{\mu}(x)$ sono funzioni sufficientemente regolari (funzioni peso) che si trasformano come densità tensoriali o vettoriali di ordine appropriato.
Una scelta particolarmente significativa è la seguente

$$f^{\mu\nu}(x) = e^{\mu\nu} w(x) \quad \text{or} \qquad h^{\mu}(x) = e^{\mu}\, w(x) \quad , \tag{3.2}$$

dove $e^{\mu\nu}$ e e^{μ} sono proiettori relativi a specifiche componenti e $w(x)$ è una funzione positiva, diversa da 0 solo in un piccolo intorno di un punto nello spazio-tempo $x_w \equiv (t_w, \boldsymbol{x}_w)$, con $\int d^4x\, w(x) = 1$. Con essa le (3.1) vengono a esprimere delle medie su piccole regioni spaziali e temporali delle grandezze implicate in un intorno del punto indicato. Tipici esempi di $w(x)$ possono essere la gaussiana

$$w(x) = \frac{\Lambda_t {\Lambda_s}^3}{\pi^2} \exp\left[-\left\{{\Lambda_t}^2 (t - t_w)^2 + {\Lambda_s}^2 (\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}_w)^2\right\}\right] \ , \tag{3.3a}$$

con Λ_t e Λ_{st} sufficientemente grandi, o espressioni del tipo

$$w(x) = \frac{1}{\omega}\, Y_{\omega}(x - x_w) \ , \tag{3.3b}$$

dove $Y_{\omega}(x)$ rappresenta la funzione caratteristica di una piccola regione di volume ω attorno all'origine (funzione con valore 1 su di ω, 0 al di fuori). Quest'ultima permette la considerazione di un reticolo che copra completamente una data regione estesa.

Vogliamo postulare una densità di probabilità del tipo

$$p\left(\vartheta_{f_1}, \vartheta_{f_2}, \dots ; \ \sigma_{1h_{11}}, \ \sigma_{1h_{12}}, \dots ; \ \sigma_{2h_{21}}, \sigma_{2h_{22}}, \dots ; \dots ; \ t_b, t_a ; \ \widehat{W}_a\right) , \tag{3.4}$$

per un numero finito di funzioni peso, che possono appunto ricoprire completamente una regione limitata dello spazio-tempo ma anche essere scelte in maniera arbitraria, purché all'interno dell'intervallo di tempo indicato. Tale grandezza sarà espressa in funzione degli operatori quantistici $\hat{T}_{\mu\nu}(x)$, $\hat{J}_{k\mu}(x)$, $\hat{\gamma}_{\rho\sigma}(x)$ e di un operatore densità $\widehat{W}_a$ che verrà definito di seguito ed esprime le conoscenze che noi abbiamo sull'universo prima del tempo t_a . Per $t_a = -\infty$ ovviamente dovremo porre $\widehat{W}_a = \widehat{W}_{\text{in}} = |0><0|$.

Per semplicità di scrittura e per render più trasparenti le formule, terremo tuttavia da questo momento traccia solo del più problematico tensore energia-momento, l'inclusione esplicita delle correnti essendo successivamente immediata.

Troviamo conveniente definire la (3.4) attraverso un funzionale generatore. Introduciamo perciò l'espressione

$$L\left[\xi\,;\,t_b,\,t_a\,;\,\widehat{W}_a\right] \;=\; \mathrm{Tr}\left\{\mathcal{G}\left[\xi;\,t_b,\,t_a\right]\;\;\widehat{W}_a\;\right\}\;, \tag{3.5}$$

dove,

$$\mathcal{G}[\xi;t_b,\;\;t_a\,] = \;\mathrm{T}\exp\,\textstyle\int_{t_a}^{t_b} d^4x\;\;\mathcal{K}\left(x\,;\,\xi(x)\right) \tag{3.6}$$

con

$$\mathcal{K}(x\,;\,\xi(x)\;)\widehat{W} = \frac{1}{2}\Big\{-\,i\xi^{\mu\nu}(x)\,\hat{T}_{\mu\nu}(x) - \frac{\mu^4}{2}\,[-\hat{\gamma}(x)]^{-\frac{1}{2}\cdot}\,\hat{\gamma}_{\mu\rho}(x)\hat{\gamma}_{\nu\sigma}\,(x)\,\xi^{\mu\nu}(x)\,\xi^{\rho\sigma}(x)\;\;,\;\;\widehat{W}\;\Big\}\;. \tag{3.7}$$

In quest'ultima abbiamo indicato con $\{\hat{A},\,\widehat{B}\}$, come di consueto, l'anticommutatore $\hat{A}\hat{B} + \hat{B}\hat{A}$, con T la prescrizione di ordinamento temporale e con μ una costante con le dimensioni di una massa.

Postuliamo allora

$$p\left(\vartheta_{f_1},\,\vartheta_{f_2},\ldots\;;\,t_b\,,\;t_a\;;\;\widehat{W}_{\mathrm{a}}\right) \;=\; \frac{1}{(2\pi)^n}\int dk_1\cdots dk_n\;\;\exp\left(i\textstyle\sum_s k_s\vartheta_{f_s}\right)\cdot \\ L\Big[\textstyle\sum_s k_s\;\;f_s\;\;;\;\;t_b\,,t_a\;;\widehat{W}_{\mathrm{a}}\Big]\;. \tag{3.8}$$

Ovviamente perché questa equazione abbia un senso è necessario che gli integrali sulle k_s siano convergenti. Questo comporta delle restrizioni sulla scelta delle funzioni peso. Così all'ordine 0 nel campo gravitazionale $\hat{h}_{\mu\nu}(x)$, la matrice

$$M_{ij}(\bar{g}_{\mu\nu}) = \frac{\mu^4}{2} \int d^4x \ [-\bar{g}(x)]^{-1/2} \ \bar{g}_{\mu\rho}(x) \ \bar{g}_{\nu\sigma}(x) \ f_i^{\mu\nu}(x) \ f_j^{\rho\sigma}(x) \quad (3.9)$$

e conseguentemente I suoi termini diagonali devono essere positivi (la matrice stessa può essere sempre supposta diagonale). E' chiaro allora che la (3.8) non potrà dare alcuna informazione sulle componenti t_{0j} del tensore di energia-momento e similmente, includendo le correnti, su quelle temporali J_{k0} . Queste grandezze possono essere comunque sempre determinate in funzione delle altre componenti dalle equazioni di conservazione (2.3).

Il postulato (3.8) è suggerito dal formalismo del rif. [11], ma può essere giustificato in modo diretto dalle proprietà dell'espressione introdotta.

Dalla relazione generale

$$\langle \vartheta_{f_1} \ \vartheta_{f_2} \cdots \rangle \ = \ \int d\vartheta_{f_1} \, d\vartheta_{f_2 \cdots} \ p\big(\vartheta_{f_1}, \vartheta_{f_2}, \cdots ; t_b \, , t_a \ ; \widehat{W}_{\mathrm{a}}\big) \ \vartheta_{f_1} \ \vartheta_{f_2}, \cdots \ = \\ \frac{1}{i}\frac{\partial}{\partial k_1} \ \frac{1}{i}\frac{\partial}{\partial k_2} \cdots L\big[\textstyle\sum_s k_s f_s \, , \cdots ; t_b \, , t_a \ ; \widehat{W}_{\mathrm{a}}\big]_{k_1 = k_2 = \ \cdots \, = 0}, \quad (3.10)$$

si trae in particolare per i valori di aspettazione

$$\langle \vartheta_f \rangle = \ \langle \hat{T}_f \rangle_{\mathrm{Q}} \quad , \quad (3.11)$$

con

$$\hat{T}_f = \ \int d^4x \, f^{\mu\nu}(x) \, \hat{T}_{\mu\nu}(x) \quad (3.12)$$

di nuovo con $\langle \hat{A} \rangle_{\mathrm{Q}} = \mathrm{Tr}\ (\hat{A}\widehat{W}_{\mathrm{a}})$, e per le varianze

$$\langle \big(\vartheta_f - \langle \vartheta_f \rangle\big)^2 \rangle = \ \langle \big(\hat{T}_f - \ \langle \hat{T}_f \rangle_{\mathrm{Q}}\big)^2 \rangle_{\mathrm{Q}} + \\ \frac{\mu^4}{4} \int d^4x \ \langle (-\hat{\gamma})^{-\frac{1}{2}} \hat{\gamma}_{\mu\rho} \ \hat{\gamma}_{\nu\sigma} \rangle_{\mathrm{Q}} \ f^{\mu\nu}(x) \, f^{\rho\sigma}(x), \quad (3.13)$$

Le equazioni (3.11-13) mostrano la relazione tra le quantità classiche e i corrispondenti operatori quantistici. Il secondo termine nelle (3.13)

deriva dal termine quadratico nella (3.7) che è stato introdotto per rendere la matematica ben definita. La quantità μ può essere posta uguale a 0 nel risultato finale; va comunque supposta molto piccola.

Osserviamo ancora che se integriamo l'espressione (3.8) rispetto a una parte degli argomenti otteniamo la corrispondente espressione negli argomenti restanti

$$\int d\vartheta_{f_1} \dots d\,\vartheta_{f_m}\ \ p\big(\vartheta_{f_1}, \dots \vartheta_{f_m}, \dots\ ;\ t_{b,}\, t_a\,;\, \widehat{W}_a\big)\ =$$
$$\frac{1}{(2\pi)^n}\int dk_1 \cdots dk_n\ \ (2\pi)^m \prod_{s=1}^{m}\delta(k_s)\ \exp$$
$$\Big(i\sum_{s=m+1}^{n} k_s\vartheta_{f_s}\Big)\ L\Big[\sum_{s=m+1}^{n} k_s\vartheta_{f_s}\,;\ t_b\,, t_a\ ;\widehat{W}_{\mathrm{a}}\Big] =$$
$$p\big(\vartheta_{f_{m+1}},\ \vartheta_{f_{m+2}}, \dots\ ;\ t_{b,}\, t_a\,;\ \widehat{W}_a\big)\,. \tag{3.14}$$

In particolare, poiché

$$\mathrm{L}(\,0\,;\ t_b\,, t_{\,a};\ \widehat{W}_a) = 1\ \ , \tag{3.15}$$

si ha, come deve essere,

$$\int d\vartheta_{f_1}\, d\vartheta_{f_2},\ \cdots\ d\vartheta_{f_p}\ p\big(\vartheta_{f_1},\ \vartheta_{f_2}, \cdots\ \vartheta_{f_n};\ t_b\,,\ t_a;\ \widehat{W}_{\mathrm{a}}\big) = 1\ \ . \tag{3.16}$$

Supponiamo ora invece $t_a = -\infty$, che $f_1,\ f_2,\ \cdots f_m$ corrispondano a posizioni spazio-temporali nella regione $t < t_c$ con $t_c < t_b$ e $f_{m+1},\ f_{m+2},\ \cdots$ a posizioni nell'intervallo $t_c < t <\ t_b$. Supponiamo anche che $\vartheta_{f_1},\ \cdots \vartheta_{f_m},$ abbiano effettivamente assunto valori attorno a $\bar{\vartheta}_{f_1},\ \cdots\ \bar{\vartheta}_{f_m}$. Tenuto conto dell'identità

$$\mathcal{G}[t_b, -\,\infty\,;\,\xi] = \mathcal{G}[t_b,\ \ t_c\ ;\ \xi\ ]\,\mathcal{G}[t_c, -\,\infty\,;\,\xi]\ \ , \tag{3.17}$$

abbiamo allora per la probabilità condizionale

$$\boldsymbol{p\big(\bar{\vartheta}_{f_1}, \dots\ \bar{\vartheta}_{f_m}\ \big|\ \vartheta_{f_{m+1}},\ \vartheta_{f_{m+2}}, \dots \dots\big)} =$$
$$\frac{p(\bar{\vartheta}_{f_1},\ \dots\ \bar{\vartheta}_{f_m},\ \vartheta_{f_{m+1}},\ \vartheta_{f_{m+2}},\ \dots\ ; t_b\,,\ -\infty\,;\ \widehat{W}_{\mathrm{in}})}{p(\,\bar{\vartheta}_{f_1},\ \dots\ \bar{\vartheta}_{f_m}\,;\ t_c\ ,\ -\infty;\ \widehat{W}_{\mathrm{in}})} =$$
$$p\big(\vartheta_{f_{m+1}},\ \vartheta_{f_{m+2}}, \dots\ ;\ t_{b,}\, t_c\,;\ \widehat{W}_c\big)\,, \tag{3.18}$$

avendo posto

$$\widehat{W}_c = \frac{\frac{1}{(2\pi)^m}\int dk_1 dk_2 \cdots dk_m \ \exp\left(i\sum_{s=1}^{m} k_s \overline{\vartheta}_{f_s}\right) \mathcal{G}[t_c, -\infty; \sum_{s=1}^{m} k_s f_s]\, \widehat{W}_{\text{in}}}{\frac{1}{(2\pi)^n}\int dk_1 dk_2 \cdots dk_n \ \exp\left(i\sum_{s=1}^{m} k_s \overline{\vartheta}_{f_s}\right) \ \text{Tr}\{\mathcal{G}[t_c, -\infty; \sum_{s=1}^{m} k_s f_s]\, \widehat{W}_{\text{in}}\}}. \quad (3.19)$$

E' questa la forma che nel contesto prende la riduzione dello stato e ci mostra quale deve essere l'operatore densità che compare nelle (3.4) e nelle relazioni seguenti.

Osserviamo che la (3.19) mostra in particolare, come preannunciato, che l'operatore densità $\widehat{W}_{\text{a}}$ riflette tutto ciò che sappiamo, espresso dai valori $\overline{\boldsymbol{\vartheta}}_{\boldsymbol{f_1}}, \ldots \overline{\boldsymbol{\vartheta}}_{\boldsymbol{f_m}}$ delle quantità $\vartheta_{f_1}, \ldots \vartheta_{f_m}$, sulla effettiva storia del mondo che ci circonda prima del tempo t_a , incluse ovviamente le grandi strutture che in esso si siano formate, gli oggetti, le stesse apparecchiature sperimentali di cui disponiamo. Essa mostra anche il carattere positivo della stessa espressione sempre se $\widehat{W}_{\text{a}}$, come stiamo supponendo, è del tipo definito dalla (3.19) poiché tale è $p\left(\ \vartheta_{f_1},\ \vartheta_{f_2}\ ,\ \ldots\ ;\ t_b\ ,\ -\infty;\ \widehat{W}_{\text{in}}\right)$, come risulta immediatamente, ad esempio, dalla sua riscrittura nel formalismo funzionale.

Ritorniamo ora sulla (3.13). Se poniamo a zero o comunque trascuriamo il secondo termine di quest'ultima i valori di aspettazione e varianze per le variabili macroscopiche relative alla distribuzione di probabilità definita dalla (3.8), si identificano con le corrispondenti espressioni quantistiche. Se per un sistema che occupa una certa regione le varianze sono piccole sulla scala considerata, come accade per i sistemi di molti componenti identici in equilibrio locale considerati in Meccanica Statistica, tali grandezze hanno valori praticamente determinati e coincidenti con i valori di aspettazione quantistici. Come abbiamo detto in questo caso siamo nell'ambito di validità della Fisica Classica. Se poi i valori di aspettazione quantistici si possono spezzare in più componenti corrispondenti a diverse fasi o composizione chimica in interazione tra loro, lo stesso può essere fatto per le grandezze macroscopiche e ritroviamo l'usuale termodinamica di non equilibrio.

In circostanze in cui invece le varianze (3.13) sono confrontabili con i quadrati dei valori di aspettazione, siamo in presenza dell'effettivo emergere del sottostante livello quantistico. Ciò accade tipicamente in presenza di qualche particella come abbiamo detto "fuori dal coro" di quelle che costituiscono le strutture macroscopiche presenti. Come è intuitivo, in tal caso, se è effettivamente possibile realizzare una

situazione come quella configurata da von Neumann, si ritrovano le usuali regole della Teoria Quantistica ordinaria.

4. RICUPERO DELLA ORDINARIA TEORIA QUANTISTICA

Sia $\vartheta_1, \vartheta_2, \cdots$ un insieme di variabili macroscopiche relative a differenti posizioni (piccole regioni) nello spazio ma al medesimo tempo (piccolo intervallo di tempo). Siano esse per esempio le cariche elettriche di un sistema di contatori distribuiti su un intero angolo solido in un esperimento di scattering. Siano soddisfatte le equazioni di von Neumann (1.1) con autostati Ψ_s corrispondenti a differenti praticamente ben definiti valori delle suddette costanti. Questo significa che per $\widehat{W} = |\Psi_{s'} >< \Psi_{s'}|$ che si suppone la densità di probabilità

$$p\left(\vartheta_1, \vartheta_2, \cdots; \widehat{W}\right) \tag{4.1}$$

fortemente piccata in corrispondenza di un certo insieme di valori $\vartheta'_1, \vartheta'_2, \cdots$ (tutti i contatori carichi tranne il contatore s' scarico) e per $\widehat{W} = |\Psi_{s''} >< \Psi_{s''}|$, con $s'' \neq s'$, piccata attorno a differenti valori $\vartheta^{"}_1, \vartheta^{"}_2, \cdots$ (tutti i contatori carichi meno s'', mentre per $s = 0$ tutti i contatori sono supposti carichi.). Per la linearità dell'espressione (4.1) in $\widehat{W}$ (v. (3.8)) abbiamo

$$\begin{aligned} &p\left(\vartheta_1, \vartheta_2, \cdots; \textstyle\sum_{s\,s'} c_s\, c^*_{s'} |\psi_s \Psi_s >< \psi_{s'} \Psi_{s'}|\right) = \\ &\textstyle\sum_s |c_s|^2 p\,(\vartheta_1, \vartheta_2, \cdots; |\psi_s\, \Psi_s >< \psi_s \Psi_s|) + \\ &\textstyle\sum_{s \neq s'} c_s\, c^*_{s'}\, p\,(\vartheta_1, \vartheta_2, \cdots; |\psi_s\, \Psi_s >< \psi_{s'} \Psi_{s'}|). \end{aligned} \tag{4.2}$$

Secondo la congettura generale di Jordan e le argomentazioni del riferimento [7], l'ultimo termine può essere supposto trascurabile. La (4.2) corrisponde allora ad una alternativa tra i sistemi di valori di picco nelle $\vartheta_1, \vartheta_2, \cdots$ corrispondenti ai vari specifici s (il contatore che si è scaricato mentre gli altri sono rimasti carichi) con probabilità $|c_s|^2$ per l'alternativa s. E' chiaro tuttavia che nel contesto una sola delle alternative deve in concreto effettivamente realizzarsi indipendentemente da ogni ulteriore osservazione perché le $\vartheta_1, \vartheta_2, \cdots$ devono essere sempre supposte avere un ben determinato valore (uno solo dei contatori deve

scattare, la particella è sempre osservata ad un angolo determinato) e quindi senza incontrare le difficoltà di von Neumann.

5. Inflazione e fluttuazioni nella CMB

Consideriamo ora il problema dell'inflazione e delle conseguenti fluttuazioni nella CMB, come si presenta nel nostro contesto. Ciò che è specifico al modello cosmologico da noi adottato è la scelta del potenziale, il big bang a $t = -\infty$ e le condizioni iniziali (2. 9,14). Ciò ha effetti solo sulle grandezze $\bar{\varphi}$(t) e $a(t)$. Quando queste sono calcolate, allo studio delle fluttuazioni che dovrebbero verificarsi, come conseguenza dalla natura quantistica dei campi $\hat{\chi}\,(x)$ e $\hat{h}_{\mu\nu}(x)$, si possono applicare metodi standard, come quelli riportati nei rif. [12,13], con risultati simili a quelli ottenuti con modelli più usuali.

Trascurando asintoticamente per $t = -\infty$ il contributo degli altri campi, consideriamo le equazioni di Eulero per l'azione

$$S_\gamma[\gamma_{\mu\nu}] + S_\varphi[\gamma_{\mu\nu},\ \varphi] \quad . \tag{5.1}$$

Abbiamo

$$\partial_\rho(\sqrt{-\gamma}\,\gamma^{\rho\sigma}\partial_\sigma\varphi) - \sqrt{-\gamma}\,V'(\varphi) = 0\ , \tag{5.2}$$

$$R_{\mu\nu}(\gamma_{\rho\sigma}) - \tfrac{1}{2}\gamma_{\mu\nu}\,R(\gamma_{\rho\sigma}) = -8\pi G\ T_{\varphi\,\mu\nu}(\gamma_{\rho\sigma};\ \varphi)), \tag{5.3}$$

che dobbiamo reinterpretare come equazioni operatoriali, ponendo $\hat{\varphi}(x) = \bar{\varphi}(t) + \hat{\chi}(x)$ e $\hat{\gamma}_{\mu\nu}(x) = \bar{g}_{\mu\nu}(t) + \hat{h}_{\mu\nu}(x)$ (eq. (2.10,11)).

All'ordine zero in $\hat{\chi}$ e $\hat{h}_{\mu\nu}$, per $\varphi(x) = \bar{\varphi}$(t) e $\gamma_{\rho\sigma}(x) = \bar{g}_{\rho\sigma}(t)$ queste si riducono alle equazioni puramente classiche (c-numeriche)

$$\ddot{\bar{\varphi}}(t) + 3H(t)\,\dot{\bar{\varphi}}\,(t) + V'\big(\bar{\varphi}(t)\big) = 0\ , \tag{5.4}$$

$$H(t) = \sqrt{\tfrac{8\pi G}{3}\Big(\tfrac{1}{2}\,\dot{\bar{\varphi}}^2(t) + V(\bar{\varphi}(t))\Big)}\ , \tag{5.5}$$

dove $H(t) = \frac{\dot{a}}{a}$ è la "costante" di Hubble-Lemaitre al tempo t . Queste ovviamente coincidono con le (2.12,13) e descrivono l'aspetto dominante dell'inflazione.

Le soluzioni asintotiche di queste che si annullano per $t \to -\infty$ sono

$$\bar{\varphi} = c\, e^{\alpha t}, \qquad a = \bar{a}\, e^{\bar{H} t} , \tag{5.6}$$

dove

$$\bar{H} = \sqrt{\frac{8\pi G}{3}\frac{\kappa^4}{4\lambda}} \quad , \quad \alpha = \frac{1}{2}\left(-3\bar{H} + \sqrt{9\,\bar{H}^2 + 4\,\kappa^2}\right), \tag{5.7}$$

essendo $\bar{H}$ il limite della $H(t)$ per $t \to -\infty$, limite finito con la nostra scelta del potenziale $V(\varphi)$. Le costanti $\bar{a}$ e c non sono significative dal punto di vista fisico e possono essere fissate in modo arbitrario. La prima può essere sempre riassorbita in una ridefinizione delle coordinate spaziali e la supporremo scelta in modo che risulti secondo una generale convenzione $a(t_0) = 1$, con t_0 che rappresenta il tempo presente. La seconda semplicemente fissa l'origine dei tempi; può infatti essere sempre ridefinita ponendo $c = c' e^{-\alpha t_1}$. Sceglieremo $c = v = \frac{\kappa}{\sqrt{\lambda}}$.

Nelle *Figg. 3* e *4* sono riportati i grafici di $\bar{\varphi}(t)$ e $H(t)$ per la soluzione numerica del sistema (5.4,5) soddisfacenti le (5.6) per i valori adottati dei parametri del potenziale (vedi dopo). La grandezza $\bar{\varphi}(t)$ cresce da 0 fino al valore $v = 25{,}7 \times 10^{19}$ GeV verso cui poi si porta con oscillazioni smorzate. Corrispondentemente $H(t)$ va da $\bar{H}$ a 0 e quindi $a(t)$ da 0 a una costante a_{I}. Il tempo $t_{\mathrm{I}} \sim 3 \times 10^{-12}\ \mathrm{GeV}^{-1} \sim 2 \times 10^{-36}$ sec a cui queste circostanze si verificano si può considerare quello della fine dell'inflazione e in particolare si può scrivere

$$a(t) = a_{\mathrm{I}} \exp \int_{t_I}^{t} dt' H(t') \, . \tag{5.8}$$

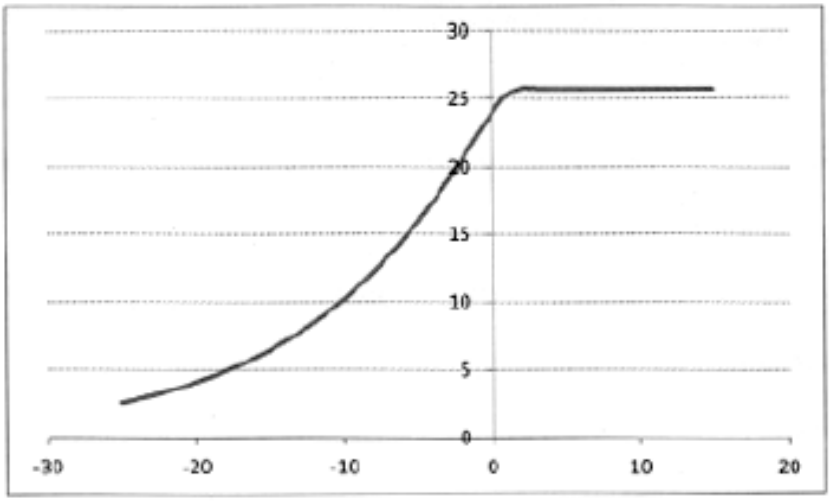


Fig. 3. Grafico della $\bar{\varphi}(t)/10^{19}\,\mathrm{GeV}$ *in funzione di* $t/10^{-12}\,\mathrm{GeV}^{-1}$, *per* $\kappa = 8.38 \times 10^{12}\,\mathrm{GeV}$ *e* $\lambda = 1.05 \times 10^{-15}$ (v. (1.17)). *Valore limite:* $\bar{\varphi} = v = 25{,}7 \times 10^{19}\,\mathrm{GeV}$.

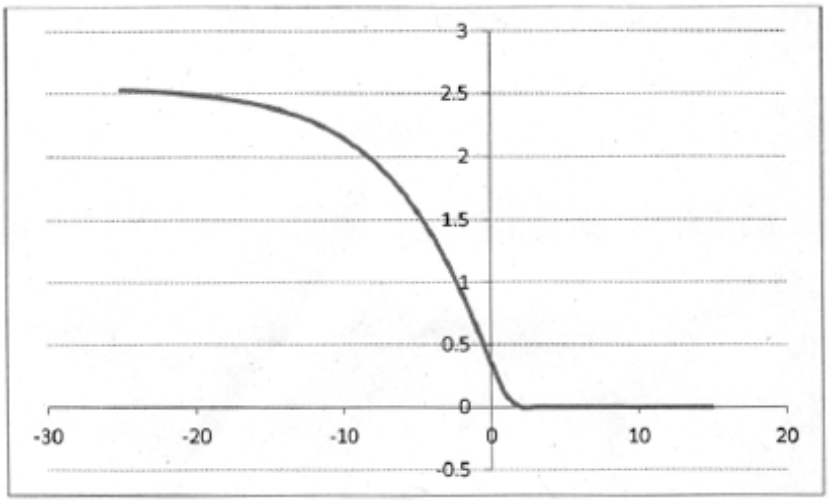


Fig. 4. Grafico della $H(t)/10^{14}\mathrm{GeV}$ *in funzione di* $t/10^{-12}\,\mathrm{GeV}^{-1}$, *per I medesimi valori di* κ *e di* λ. *Notare* $\bar{H} = 2.53 \times 10^{14}\,\mathrm{GeV}$ e $t_I \sim 3 \times 10^{-12}\,\mathrm{GeV}^{-1}$

Similmente l'inizio dell'inflazione si può porre attorno a $t \sim -20 \times 10^{-12}\ \mathrm{GeV}^{-1} \sim 10^{-35}$ sec e quindi la durata della stessa risulta dell'ordine dell'ultima cifra.

Per studiare le successive le correzioni al primo ordine del processo sopra descritto conviene porsi in un gauge particolare. Nel cosiddetto gauge di Newton (rif. [12, cap. 5]) possiamo scrivere

$$h_{00} = -2\Phi\,, \qquad h_{0j} = a\,G_j\,, \quad h_{ij} = a^2\,(-2\,\Psi\delta_{ij} + D_{ij})\ , \tag{5.9}$$

dove Φ e Ψ sono scalari in 3-dimensioni, G_j è un vettore e D_{ij} un tensore del secondo ordine che soddisfano le condizioni

$$\partial_j\,G_j = 0\,, \quad \partial_i D_{ij} = 0\,, \quad D_{ij} = D_{ji}\,, \quad D_{jj} = 0\quad . \tag{5.10}$$

Dall'eq. (5.2) allora abbiamo

$$\ddot{\hat{\chi}} + 3\,\frac{\dot{a}}{a}\,\dot{\hat{\chi}} + V''(\bar{\varphi})\,\hat{\chi} - \frac{\nabla^2}{a^2}\,\hat{\chi} = -2\,\hat{\Phi}\,V'(\bar{\varphi}) + \left(\dot{\hat{\Phi}} + 3\dot{\hat{\Psi}}\right)\dot{\bar{\varphi}}\,. \tag{5.11}$$

Dalle (5.3) può essere invece ottenuto un insieme di equazioni che possono essere riorganizzate nel modo seguente (rif. [12, cap. 5 e 10]):

1) modo scalare

$$\partial_i\,\partial_j\left(\hat{\Phi} - \hat{\Psi}\right) = 0 \tag{5.12}$$

$$\dot{a}\,\partial_i\hat{\Phi} + a\,\partial_i\dot{\hat{\Psi}} = 4\pi\,G\,a\,\dot{\bar{\varphi}}\,\partial_i\hat{\chi} \tag{5.13}$$

$$\left(\dot{H} - \frac{\nabla^2}{a^2}\right)\hat{\Psi} = 4\pi\,G\,(\,\ddot{\bar{\varphi}}\hat{\chi} - \dot{\bar{\varphi}}\,\dot{\chi}\,)\quad , \tag{5.14}$$

2) modo vettoriale

$$\partial_i\left(a\,\dot{\hat{G}}_j + 2\,\dot{a}\,\hat{G}_j\right) = 0\quad , \tag{5.15}$$

3) modo tensoriale

$$\ddot{\hat{D}}_{ij} + 3\,\frac{\dot{a}}{a}\,\dot{\hat{D}}_{ij} - \frac{\nabla^2}{a^2}\,\hat{D}_{ij} = 0\quad . \tag{5.16}$$

L'eq. (5.15) ha soluzioni che si annullano rapidamente al crescere del tempo e sono di regola trascurate (rif. [12, Chap. 5]).

Dall'eq. (5.12) segue $\widehat{\Phi} = \widehat{\Psi}$ e, poiché i coefficienti delle relative equazioni dipendono solo dal tempo, $\hat{\chi}(t, \boldsymbol{x})$ e $\widehat{\Psi}(t, \boldsymbol{x})$ possono essere sviluppati in integrali di Fourier nelle coordinate spaziali e le soluzioni generali del sistema (5.11-14) possono essere scritte nella forma

$$\hat{\chi}\,(x) = \int d^3\boldsymbol{q}\,\left(\hat{\alpha}(\boldsymbol{q})\chi_q(t)\,e^{i\boldsymbol{q}\cdot\boldsymbol{x}} + \hat{\alpha}^+(\boldsymbol{q})\chi_{\boldsymbol{q}}^*(t)\,e^{-i\boldsymbol{q}\cdot\boldsymbol{x}}\right) \tag{5.17}$$

$$\widehat{\Psi}\,(x) = \int d^3\boldsymbol{q}\,\left(\hat{\alpha}(\boldsymbol{q})\Psi_q(t)\,e^{i\boldsymbol{q}\cdot\boldsymbol{x}} + \hat{\alpha}^+(\boldsymbol{q})\Psi_{\boldsymbol{q}}^*(t)\,e^{-i\boldsymbol{q}\cdot\boldsymbol{x}}\right)\,, \tag{5.18}$$

dove le "costanti" $\hat{\alpha}(\boldsymbol{q})$ e $\hat{\alpha}^+(\boldsymbol{q})$ vanno interpretate come operatori mentre $\chi_q(t)$ **e** $\Psi_q(t)$ sono soluzioni c-numeriche di equazioni formalmente identiche alle (5.11-14) ma con la sostituzione $\partial_j \rightarrow iq_j$. Se queste ultime sono normalizzate in maniera appropriata, dalle relazioni di commutazione canonica per $\hat{\chi}(x)$ e $\dot{\hat{\chi}}(x)$ si ha

$$[\hat{\alpha}(\boldsymbol{q}), \hat{\alpha}(\boldsymbol{q}')\,] = [\hat{\alpha}^+(\boldsymbol{q}), \hat{\alpha}^+(\boldsymbol{q}')\,] = 0\,, [\hat{\alpha}(\boldsymbol{q}), \hat{\alpha}^+(\boldsymbol{q}')\,] = \delta^3\,(\boldsymbol{q} - \boldsymbol{q}') \tag{5.19}$$

e $\hat{\alpha}^+(\boldsymbol{q})$ e $\hat{\alpha}(\boldsymbol{q})$ acquistano il significato di operatori di creazione e distruzione di *inflatoni*, i quanti del campo $\hat{\chi}(x)$.

Similmente la soluzione generale della (5.16) può essere scritta

$$\widehat{D}_{ij}(x) = \sum_{s=1}^{2} \int d^3\boldsymbol{q}\,\left(\widehat{\beta}_s(\boldsymbol{q})D_{ijqs}(t)\,e^{i\boldsymbol{q}\cdot\boldsymbol{x}} + \widehat{\beta}_S^+\,(\boldsymbol{q})D_{\boldsymbol{ijqs}}^*(t)\,e^{-i\boldsymbol{q}\cdot\boldsymbol{x}}\right)\,, \tag{5.20}$$

dove

$$D_{ij\,qs}\,(t) = \;e_{sij}\,(\boldsymbol{q})\,D_q(t)\;\,, \tag{5.21}$$

essendo $e_{1ij}(q)$ e $e_{2ij}\,(\boldsymbol{q})$ tensori di polarizzazione che soddisfano le condizioni

$e_{ij} = e_{ji}\,, \qquad e_{ii} = 0\,, \qquad q_i e_{ij} = 0\,, \qquad e_{sij}e_{s'}^{ij} = \delta_{ss'}\,.$

Di nuovo, se $D_q(t)$ è normalizzato in maniera appropriata, dalle regole di commutazione canonica per $\widehat{D}_{ij}(x)$ e $\dot{\widehat{D}}_{ij}(x)$ otteniamo

$$\left[\hat{\beta}_s(\boldsymbol{q}), \hat{\beta}_{s'}(\boldsymbol{q}')\right] = \left[\hat{\beta}_s{}^{+}(\boldsymbol{q}), \hat{\beta}_{s'}{}^{+}(\boldsymbol{q}')\right] = 0\,,$$
$$\left[\hat{\beta}_s(\boldsymbol{q}), \hat{\beta}_{s'}{}^{+}(\boldsymbol{q}')\right] = \delta_{ss'}\delta^3(\boldsymbol{q}-\boldsymbol{q}') \qquad (5.22)$$

e $\hat{\beta}_s{}^{+}(\boldsymbol{q})$ e $\hat{\beta}_s(\boldsymbol{q})$ divengono operatori di creazione e distruzione di *gravitoni* nello stato di polarizzazione s.

Importanti cambiamenti si ritiene in generale che si siano verificati nell''universo per $t > t_{\mathrm{I}}$. Nel nostro contesto in particolare la crescita di $\bar{\varphi}(t)$ da 0 a v e quella conseguente di $a(t)$ da 0 a a_I portano a una ridefinizione dello stato di vuoto, alla creazione di inflatoni [16, chap. 2] ed eventualmente di gravitoni, se questi esistono. Successivamente gli inflatoni dovranno decadere in particelle più leggere. Si ammette comunque che alla fine dell'inflazione sia presente una miscela di materia oscura non relativistica, fotoni, neutrini, gravitoni e plasma barionico (una miscela di materia ordinaria, ioni, barioni, elettroni). Al periodo dominato dal campo inflatonico dovrebbe quindi seguirne un altro dominato da materia e radiazione e conseguentemente $a(t)$ in realtà non fermarsi ad un valore costante ma continuare a crescere come $t^{2/3}$o $t^{1/2}$ e $H(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$ non andare immediatamente a 0, ma da un certo momento in poi continuare a decrescere come $1/t$.

In conseguenza di tali processi per ogni q compaiono due radici t_{1q} e t_{2q} dell'equazione $\frac{q}{a(t)} = H(t)$ che rivestono grande importanza. La prima radice si presenta per $t < t_{\mathrm{I}}$, perché lontano nel passato la quantità $\frac{q}{a(t)}$ diviene infinitamente grande mentre $H(t)$ va ad una costante, ma poi al crescere di t, decresce più rapidamente di $H(t)$ (v. fig . 3). La seconda si presenta per $t > t_{\mathrm{I}}$, quando per la dominanza della radiazione e della materia la situazione si rovescia.

Venendo alle fluttuazioni indotte sulla CMB, per le fluttuazioni scalari è particolarmente significativa la grandezza

$$R_q(t) = -\ \Psi_q(t) + \frac{H(t)}{\dot{\bar{\varphi}}(t)}\,\chi_q(t)\ . \qquad (5.23)$$

Per $t_{1q} < t < t_{2q}$ questa diviene indipendente da t , e il suo limite R_q^O interviene nelle condizioni iniziali per l'evoluzione delle fluttuazioni scalari dopo t_{2q}. Similmente nello stesso intervallo di tempo diviene

indipendente dal tempo la grandezza $D_q(t)$ e il suo limite D_q^0 determina la successiva evoluzione delle fluttuazioni tensoriali.

Risolvendo le equazioni per $\chi_q(t)$ **e** $D_q(t)$ nella cosiddetta approssimazione dello "slow roll" (rotolamento lento), si trova [12, cap. 7, 10]

$$\left\lfloor R_q^O \right\rfloor^2 = \frac{G\,H^2(t_{1q})}{4\pi^2\epsilon(t_{1q})}\, q^{-3} \;\cong\; \lfloor N_S \rfloor^2 \; q_R^{-3} \; \left(\frac{q}{q_R}\right)^{-4+n_S}, \qquad (5.24\text{ a})$$

$$\left\lfloor D_q^O \right\rfloor^2 = \frac{G\,H^2(t_{1q})}{\pi^2}\; q^{-3} \;\cong\; \lfloor N_T \rfloor^2 \; q_R^{-3} \; \left(\frac{q}{q_R}\right)^{-3+n_T}, \qquad (5.24\text{ b})$$

con

$$\lfloor N_S \rfloor^2 = \frac{G\,H^2(t_{1q_R})}{4\pi^2\epsilon(t_{1q_R})}, \qquad \lfloor N_T \rfloor^2 = \frac{G\,H^2(t_{1q_R})}{\pi^2} \quad , \qquad (5.25)$$

$$n_S = 1 - 4\epsilon(t_{1q_R}) - 2\delta\,,(t_{1q_R}) \qquad n_T = -2\varepsilon(t_{1q_R}) \quad , \qquad (5.26)$$

e

$$\epsilon(t) = \frac{1}{16\pi G}\left(\frac{V'(\bar{\varphi}(t))}{V(\bar{\varphi}(t))}\right)^2, \;\; \delta(t) = \frac{1}{16\pi G}\left(\frac{V'^2(\bar{\varphi}(t))}{V^2(\bar{\varphi}(t))} - 2\frac{V''(\bar{\varphi}(t))}{V(\bar{\varphi}(t))}\right) . \qquad (5.27)$$

e si può scegliere ad esempio

$$q_R = 0.05\ \mathrm{Mpc}^{-1} = \ 3.193\ \times 10^{-40}\ \mathrm{GeV} \quad . \qquad (5.28)$$

Particolarmente significative dal punto di vista sperimentale sono le correlazioni angolari delle fluttuazioni nella CMB temperatura–temperatura, temperatura-polarizzazione e polarizzazione-polarizzazione. Queste possono essere espresse dai coefficienti dei loro sviluppi in armoniche sferiche o loro generalizzazioni, $C_{\mathrm{TT}\,l}$, $C_{\mathrm{TE}\,l}$, $C_{\mathrm{EE}\,l}$, $C_{\mathrm{BB}\,l}$, dove gli indici E e B si riferiscono a due diverse polarizzazioni, rispettivamente pari o dispari rispetto alle riflessioni spaziali. Per ragioni di simmetria $\left\lfloor R_q^O \right\rfloor^2$ da contributo solo ai primi tre coefficienti, mentre l'ultimo dipende solo da $\left\lfloor D_q^O \right\rfloor^2$

Per risolvere le complicate equazioni che, sotto le ipotesi sopra riportate, permettono di studiare l'evoluzione dopo t_{2q_R} delle varie componenti presenti nell'universo e conseguentemente calcolare i suddetti

coefficienti dati $\left\lfloor R_q^O \right\rfloor^2$ e $\left\lfloor D_q^O \right\rfloor^2$, esistono programmi numerici standard. E' notevole che, se ignorando completamente $\left\lfloor D_q^O \right\rfloor^2$, assumiamo per $\left\lfloor R_q^O \right\rfloor^2$ una semplice dipendenza a potenza del tipo della (5.24 a) e diamo a n_s e $\lfloor N_S \rfloor^2$ appropriati valori, riusciamo a riprodurre i dati sperimentali per i primi tre coefficienti in un ampio intervallo di valori dell'indice l come $30 \leq l \leq 2500$ con grande precisione. Non sono invece osservate fluttuazioni nella polarizzazione di tipo B .

Sulla base dei riferimenti [12] e [14] possiamo assumere

$$n_s = 0.966 \pm 0.003 \ , \quad \lfloor N_S \rfloor^2 = 1.93 \ \pm 0.12 \cdot 10^{-10} \ . \tag{5.29}$$

Questi valori possono essere riottenuti dalle equazioni (5.25-27) e dalla risoluzione numerica del sistema (5.4,5), attribuendo ai parametri del potenziale i valori

$$\kappa = 8.38 \times \ 10^{12} \ \text{GeV} \ , \qquad \lambda = 1.05 \times 10^{-15} \tag{5.30}$$

e approssimando a_I con il valore di $a(t)$ al tempo t_L dell'ultimo scattering, quando la radiazione si disaccoppia dalla materia. Sotto la convenzione $a(t_0) = 1$, a sua volta $a(t_L)$ si esprime semplicemente in funzione del *redshift* della superficie della CMB $a(t_L) = \frac{1}{z_L+1} \cong \frac{1}{1090}$.

In particolare, assunte le (5.20), abbiamo (v. *Fig. 5*)

$$t_{1q_R} = \ -1{,}48 \ \times 10^{-12} \ \text{GeV}^{-1} \ , \tag{5.31}$$

$$\bar{\varphi}\left(t_{1q_R}\right) = 21.46 \times 10^{19} \ \text{GeV} \ , \quad H\left(t_{1q_R}\right) = 7{,}75 \times 10^{13} \ \text{GeV} \tag{5.32}$$

e quindi

$$\varepsilon\left(t_{1q_R}\right) = 0.0054 \, , \qquad \delta\left(t_{1q_R}\right) = 0.0012. \tag{5.33}$$

Per il rapporto tra l'intensità delle fluttuazioni tensoriali e quelle scalari dovremmo allora avere

$$r(q_R) \equiv \frac{4\left\lfloor D_{q_R}^0 \right\rfloor^2}{\left\lfloor R_{q_R}^0 \right\rfloor^2} = \ 16 \, \varepsilon\left(t_{1q_R}\right) = \ 0.086 \, . \tag{5.34}$$

Tuttavia una combinazione dei risultati della collaborazione Planck con quelli di altri esperimenti ha permesso di stabilire il limite sperimentale $r < 0.032$ [15] al 95% di confidenza, in completo disaccordo con la previsione.

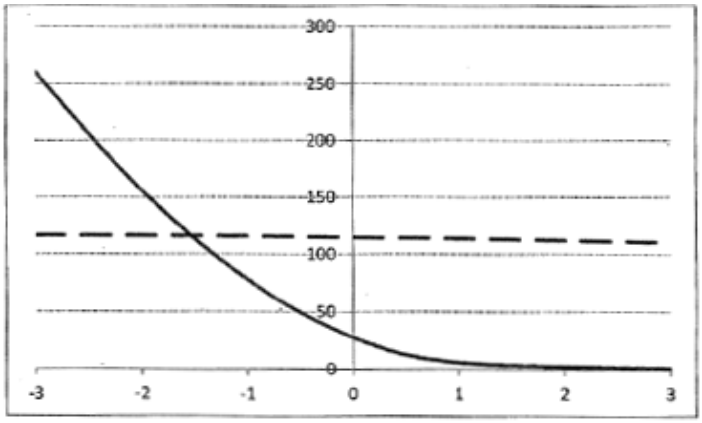


Fig. 5. Intersezione dei grafici: a) (linea tratteggiata) $\ln \frac{H(t)\, a_I}{q_R} \equiv 116 + \ln \frac{H(t)}{10^{14\,\mathrm{GeV}}}$; *b) (linea solida)* $\int_t^{t_{I_I}} dt'\, H(t')$; *in funzione di* $\frac{t}{10}^{-12}$ GeV^{-1}. *Per interpolazione tra* $t = -2 \times 10^{-12}\ \mathrm{GeV}^{-1}$ *e* $t = -1 \times 10^{-12}\ \mathrm{GeV}^{-1}$: $t_{1q_R} = -1{,}48 \times 10^{-12}\ \mathrm{GeV}^{-1}$, $\bar{\varphi}(t_{1q_R}) = 21.46 \times 10^{19}\ \mathrm{GeV}$, $H(t_{1q_R}) = 7{,}75 \times 10^{13}\ \mathrm{GeV}$

6. La gravità, fenomeno puramente classico?

La difficoltà precedente non è tipica del modello adottato ma è comune praticamente a tutti i modelli inflazionari indipendentemente da ogni ragionevole scelta del potenziale $V(\varphi)$. Poiché le fluttuazioni tensoriali dovrebbero dipendere dalle fluttuazioni di vuoto, e dunque dalla natura quantistica del campo $D_{ij}(x)$, questa circostanza potrebbe, come detto, suggerire che la gravitazione sia un fenomeno puramente classico. Nella formulazione ordinaria questo è in linea di principio impossibile perché, se nell'equazione di Einstein il secondo membro è un operatore, deve esserlo il primo. Nel nostro contesto questo però può essere coerentemente ottenuto semplicemente sopprimendo il termine S_γ nella (2.5) e sostituendo ovunque nei termini che seguono $\hat{\gamma}_{\rho\sigma}$ con la metrica classica $g_{\rho\sigma}(x)$ definita dall'equazione (2.2).

Notiamo che in questo caso delle equazioni (5.11-16) sopravvive solo la prima con il secondo membro che però è ora una quantità c-numerica. Questa circostanza non modifica l'espressione per R_q^O che già era ottenuta trascurando tale termine (di ordine 0 in $\frac{q}{a}$) fino al tempo t_{1q}. Così le fluttuazioni scalari restano le stesse mentre quelle tensoriali spariscono.

Naturalmente possiamo porre anche per la metrica classica $g_{\rho\sigma}(x) = \bar{g}_{\rho\sigma}(x) + h_{\rho\sigma}(x)$, dove però ora $h_{\rho\sigma}(x)$ sarà un campo c-numerico puramente classico determinato dall'equazione (2.2). Al primo ordine in $h_{\rho\sigma}$ abbiamo ancora equazioni formalmente analoghe alle (5.12-16) ma in cui ora le sorgenti sono espresse tramite componenti di $t_{\rho\sigma}(x)$ [12 chap. 5]. In ogni caso, se non abbiamo informazioni su $t_{\rho\sigma}$ dopo il tempo t_a possiamo ugualmente ottenere una stima della densità di probabilità $p(\vartheta_{f_1}, \vartheta_{f_2}, \dots ; t_{b,} t_a ; \widehat{W}_a)$ rimpiazzando $t_{\mu\nu}(x)$ con $\langle \hat{T}_{\mu\nu}(\bar{g}_{\rho\sigma}, x)\rangle_{\mathrm{Q}} = \mathrm{Tr}\left[\hat{T}_{\mu\nu}(\bar{g}_{\rho\sigma}, x)\,\widehat{W}_a\right]$, dove $\widehat{W}_a$ rappresenta, come abbiamo visto, le informazioni che noi abbiamo prima del tempo t_a.

Due situazioni limite opposte sono tuttavia di particolare importanza. La prima nel caso della presenza di un piccolo numero di particelle, quindi nei problemi di fisica di queste ultime, quando $h_{\rho\sigma}(x)$ è trascurabile, dato il valore molto piccolo della G, in confronto alla grandezza delle altre interazioni. In questo caso è appropriata l'approssimazione di ordine zero $g_{\rho\sigma}(x) \cong \bar{g}_{\rho\sigma}(x)$. La seconda è il limite di alta densità di particelle, come in presenza di grandi strutture quando è trascurabile la varianza del tensore di energia-momento e una trattazione puramente classica di $t_{\rho\sigma}$ e $g_{\rho\sigma}$, come normalmente fatto nei problemi di carattere astrofisico, è pienamente giustificata.

BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE

1. G. M. Prosperi and M. Baldicchi, *Eur. Phys. Jour.*, DOI: 10,1140/epjp13360-D24-05351-4 .
2. N. Bohr, in *Albert Einstein Philosopher-Scientist,* P. A. Schlip ed., p. 200, The library of Living Philosophers, Evaston (1949), reprinted in ref. [10].
3. A, Tonomara, *The Quantum World unveiled by electron waves,* World Scientific, Singapore (1998).
4. J. von Neumann, *Mathematische Grundlagen der Quantumechanik,* cap. V and VI , Springer, Berlin (1932); English translation: *Mathematical Foundation of quantum Mechanics*, Princeton University Press, Princeton N.J. (1955), reprinted in ref. [10].
5. P. Jordan, *Das Bild der Modern Physik*, Stromverlag, Hamburg (1943).
6. A. Daneri, A. Loin ger and G. M. Prosperi , Nuclear Physics , **44**, 297 (1962), (reprinted in rif. [9]); G. M. Prosperi, in rif [8] , p. 97.
7. E. P. Wigner, in rif. [8], p. 1, p. 122.
8. B. D'Espagnat ed. , *Foundation of Quantum Mechanics,* , Academic Press, New York and London (1971).
9. J. A. Wheeler and W. H. Zurek, *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, Princeton N. J. (1981).
10. S. Kamefuchi *et al.* eds., *Proceedings of the international symposia* "*Foundation of Quantum Mechanics in the light of new technology*" (ISQM) 1-9, Tokio (1984-2009).
11. A. Barchielli, L. Lanz and G. M. Prosperi, Nuovo Cimento B **72** (1982)**,** 79; Found. Phys. **13** (1983), 779; G. M. Prosperi, Int. Jour. Theor. Phys. **33** (1994) , 115.
12. S. Weinberg, *Cosmology*, Oxford University Press, Oxford (2008).
13. V. Muchanov, *Physical Foundation of Cosmology*, Cambridge University Press, Cambridge (2005).
14. Planck Collaboration, Astronomy & Astrophisics, 641 A (2020).
15. M. Tristram et al, *Phys. Rev.* **D 105,** 083524 (2022).
16. L. E. Parker and D. J. Toms, *Quantum Field Theory in Curved Spacetime*, Cambridge University Press, Cambridge (2009).

I "FARMACI" PER LE PERSONE SANE: MISTIFICAZIONI E REALTÀ

Nota del s.c. VINCENZO SUMMA (*)

(Adunanza dell'8 giugno 2023)

SUNTO. – Analizzando l'andamento della salute mondiale è chiaro che si sta assistendo a un continuo aumento dell'insorgenza di patologie metaboliche e della vecchiaia sempre più associata ad un cattivo stile di vita, di alimentazione e inquinamento ambientale. La medicina classica con i farmaci affronta la patologia conclamata, per questo può essere considerata "medicina di attesa", si attende lo sviluppo malattia e si prescrive la terapia farmacologica. In questo scenario, sta emergendo sempre più prepotentemente l'uso di prodotti nutraceutici. Termine che deriva dalla fusione di Nutrizione e Farmaceutico. Tale termine, concettualmente unisce la giusta alimentazione ad un effetto benefico sulla salute. Il nutraceutico viene impiegato in quella che possiamo definire "medicina di iniziativa" in cui in assenza di patologia conclamata si interviene precocemente per rallentare la lenta progressione che porta verso di essa. I nutraceutici entrano quindi nella prevenzione delle malattie e per questo possiamo definirli "farmaci" per le persone sane. La presente dissertazione metterà in luce gli aspetti positivi e negativi dello sviluppo, commercializzazione dei nutraceutici con esempi specifici rilevanti.

***

ABSTRACT. – The worldwide health, clearly due to the tendency of the increase elderly of the population, shows big drift toward the metabolic and aging diseases with a fast growth. The classical healthcare approach uses the drugs only when the pathology is clear and the disease is manifested, for this reason can be considered "medicine of awaiting". In this scenario, Nutraceuticals are emerging as the most promising tools for prevention, they have to be taken before the development of the disease, for this reason they can be associate with the definition of "medicine of intervention" because they are substance able prevent or slow down the drifting towards the pathological state of the diseases. The nutraceutical for these reasons can be considered drugs for

(*) Dipartimento di Farmacia, Scuola di Medicina e Chirurgia, Università degli Studi di Napoli Federico II, Italy. E-mail: vincenzo.summa@unina.it

healthy people because they will be taken before the appearance of the disease. The dissertation will sked light on the positive and negative aspects of the development, commercialization trough specific relevant examples.

INTRODUZIONE

I farmaci sono elementi essenziali per il mantenimento di un buon stato di salute, ci accompagnano in tutte le fasce di età, trattando e curando le diverse patologie o necessità salutistiche che dobbiamo affrontare nel percorso della nostra vita. La troppa familiarità con i farmaci porta alcune volte ad un uso non giustificato e in alcuni casi a un abuso di queste sostanze. I farmaci in senso ampio possono essere associati a quella che viene definita "medicina di attesa", intendendo questa come rimedio per invertire possibilmente o eliminare totalmente una situazione patologica conclamata quando essa si presenta. Generalmente, si attende o si identifica la malattia e poi si somministra il farmaco per ristabilire uno stato di salute ottimale. Nell'evoluzione umana dal 1700 ad oggi l'aspettativa di vita si è allungata di circa cinquantacinque anni, e nell'ultimo secolo di ben trentacinque. Questa impressionante aumentata capacità di sopravvivenza è principalmente dovuta alla scoperta di vaccini e farmaci efficienti che hanno ridotto drasticamente molte cause di morte associate principalmente ad infezioni sia virali che batteriche. L'aumentata età media, lo stile di vita e l'alimentazione hanno cambiato il profilo della morbilità e mortalità delle malattie soprattutto nei paesi "evoluti". In particolare tutte le patologie correlate al dis-metabolismo quali obesità, ipercolesterolemia, iperglicemia, ipertensione e sarcopenia hanno avuto un incremento davvero drammatico in percentuale di incidenza tra le varie patologie che affliggono l'umanità. Molto spesso, molte di queste patologie sono associate tra di loro perché tutte legate al metabolismo che viene alterato e con eventi a cascata che portano all'insorgenza di altre patologie correlate. Analizzando l'andamento della salute mondiale è chiaro che esiste una deriva molto importante e crescente verso l'insorgenza di patologie metaboliche correlate anche a un cattivo stile di vita, di alimentazione e inquinamento ambientale. Diventa quindi mandatario attuare strategie di prevenzione nelle fasi premalattia per ritardare o rendere irraggiungibile lo stato patologico conclamato. In questo scenario, l'importanza dello sport e della corretta alimentazione vengono promosse continuamente attraverso campagne di informazione sul loro effetto positivo per

il buon mantenimento dello stato di salute ottimale. Oltre a queste raccomandazioni generali sullo stile di vita sano, stanno emergendo sempre più prepotentemente l'uso di prodotti nutraceutici per raggiungere esattamente lo stesso scopo. Nutraceutico è un termine che deriva dalla fusione di Nutrizione e Farmaceutico. Oltre lessicalmente, tale termine unisce anche concettualmente la giusta alimentazione ad un effetto benefico sulla salute. Questo termine è stato coniato da Stephen De Felice, un nutrizionista americano, nel 1989 indicando come nutraceutico "Un alimento, o parte di esso, che dà effetti benefici alla salute inclusa la prevenzione e/o il trattamento di una malattia". Concetto già espresso da Ippocrate nel 460 a.C. che affermava "Fa che il cibo sia la tua medicina e che la medicina sia il tuo cibo".

Queste affermazioni erano dettate da osservazione empiriche sulle correlazioni tra cibo, salute e proprietà farmacologiche di molte sostanze estratte e contenuti nelle matrici alimentari. Basti ricordare la medicina tradizionale cinese che unisce osservazione generali sulle sostanze naturali e proprietà farmacologiche curative. E' interessante osservare che con l'evoluzione delle conoscenze scientifiche e della tecnologie associate, si è riusciti a confermare o confutare osservazioni popolari, proverbi e credenze popolari che associano le proprietà del cibo con effetti salutistici.

Da un punto di vista regolatorio-normativo, i nutraceutici sono considerati a tutti gli effetti alimenti perché derivano da matrici alimentari di uso comune. Tutti i processi a cui viene sottoposta la matrice per arricchirla solo dei componenti desiderati non porta a variazione chimiche delle sostanze. La regolamentazione quindi non prevede studi di tossicologia simile a quelli per l'approvazione dei farmaci, e non richiede un processo produttivo strettamente regolamentato come quello dei farmaci. Infine, non richiedono una prova di efficacia con studi clinici randomizzati come quelli dei farmaci perché considerati alimenti. Nel caso in cui la matrice alimentare fonte primaria del nutraceutico non fa parte delle abitudini alimentari comuni, ad esempio proviene da altri paesi remoti e non è un alimento diffuso e si vuole usare come nutraceutico questo ricade nella definizione di "*novel food*". La definizione indica esattamente che questo alimento non essendo di utilizzo comune nella nostra popolazione rappresenta un nuovo alimento le cui proprietà non sono note e quindi sia gli eventuali effetti salutistici o di intolleranza o tossicità non sono noti. In maniera analoga se l'alimento primario subisce delle procedure fisiche che ne alterano la composizione o utilizzano processi

che chimicamente non rientrano nella procedure standard utilizzate per gli alimenti e quindi alterano la composizione in maniera sostanziale da renderle non direttamente correlabili con la matrice di origine anche questi vengono classificati "*novel food*" (*Fig. 1*). Dal punto di vista regolatorio ricadono un caso diverso dai nutraceutici proprio per la non conoscenza degli effetti di questo "nuovo alimento" e per questo motivo necessita di una serie più ampia di test per avere l'approvazione per la messa in commercio, quali studi clinici e caratterizzazione di composizione molto più stringenti.

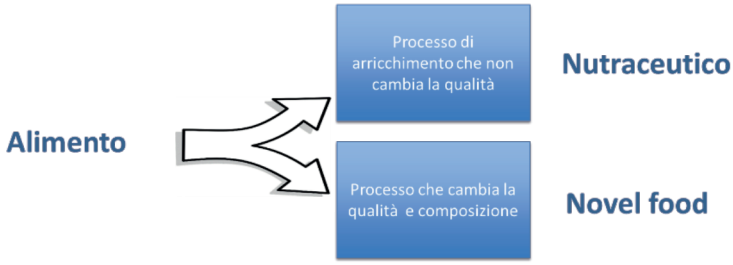


Fig. 1. Distinzione tra nutraceutico e novel food.

La dieta mediterranea viene definita la piramide della salute (*Fig. 2*), proprio per la varietà e diversa percentuale di presenza dei vari alimenti con le loro composizioni chimiche diverse. Alla base della piramide ci sono tutti prodotti vegetali che devono essere consumati con maggiore frequenza e in maggiore quantità rispetto a tutti gli altri. La loro importanza è legata al contenuti di sali, acqua, zuccheri, fibre e una classe di molecole molto importanti definite fitocomplessi. Questi ultimi non hanno nessun potere nutrizionale, hanno però una attività benefica sulla salute. Ne sono stati individuati e caratterizzati strutturalmente più di 30.000, appartenenti a classi chimiche diverse a seconda della struttura chimica di base.

I fitocomplessi sono la parte attiva dei nutraceutici, molto spesso la loro attività biologica-farmacologica non può ascriversi a un singolo componente, infatti isolando i singoli componenti e valutandoli individualmente non si ritrova l'attività biologica-farmacologica del fitocomplesso nel suo insieme. Il concetto di sinergia per i fitocomplessi è molto importante proprio perché i diversi componenti possono svolgere attività diverse su diverse vie biochimiche e il loro insieme da il risultato finale macroscopico che si osserva.

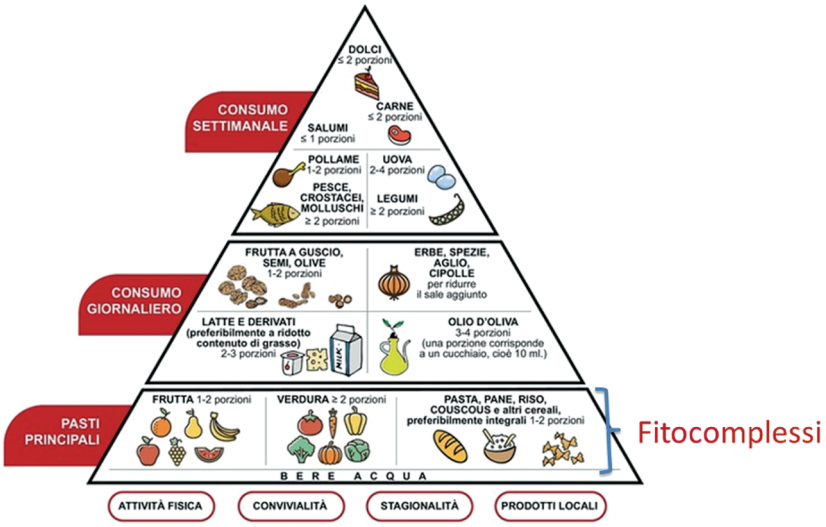


Fig. 2. La dieta mediterranea "piramide della salute".

Per sviluppare un nutraceutico che abbia realmente proprietà farmacologiche definite, il suo sviluppo deve contemplare una serie di investigazioni che danno rigore scientifico alle proprietà salutistiche del nutraceutico stesso. Il percorso che si deve fare in maniera schematica è rappresentato in *Fig. 3*, si sceglie la matrice alimentare, da essa si individua il supplemento nutrizionale di interesse e su cui si deve dimostrare tramite evidenze scientifiche il profilo di sicurezza ed efficacia per poter arrivare al nutraceutico commercializzato.

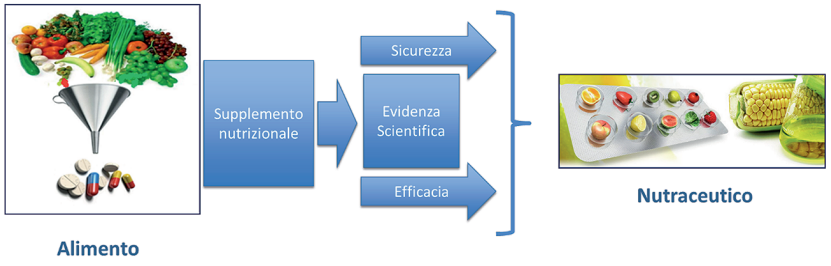


Fig. 3. Processo semplificato dello sviluppo di un nutraceutico.

Le evidenze scientifiche che devono supportare lo sviluppo del nutraceutico sono molteplici, e si dovrebbe seguire un percorso molto

simile a quello di un farmaco anche se notevolmente semplificato. Tuttavia solo pochi prodotti attualmente in commercio seguono questo iter perché non richiesto dal legislatore.

Lo schema completo delle attività associate allo sviluppo di un nutraceutico sicuro, efficace e validato è riportato in *Fig. 4*. Si parte dalla scelta dell'alimento/matrice, seguito dal processo di frazionamento per ottenere l'arricchimento del fitocomplesso di interesse. Le frazioni devono essere caratterizzate per la loro composizione chimica, e successivamente testate in sistemi biologici rilevanti associati all'effetto che si vuole investigare per determinarne l'efficacia *in vitro* (enzimi e cellule). Si passa poi a studi che determinano la stabilità metabolica e l'assorbimento. Si usano quindi a modelli di digestione, metabolismo *in vitro*, e se possibile e necessario a modelli animali. Tutti questi dati servono per definire il dosaggio in uno studio clinico per validare il profilo di tossicità e attività del fitocomplesso. I risultati dello studio clinico sono quelli che in maniera inequivocabile determinano la bontà del nutraceutico per l'uso che si dichiara. Rimane importante sottolineare che i comitati etici devono essere coinvolti sia per la sperimentazione animale sia per quello clinico, per entrambi il materiale oggetto dello studio ricordiamo è assimilato a un alimento quindi ha un iter molto semplificato rispetto a quello del farmaco. Una volta che si sono compiute tutte queste fasi e si è dimostrata l'efficacia e la sicurezza si è compiuto un iter completo e rigoroso per lo sviluppo di un nutraceutico efficace.

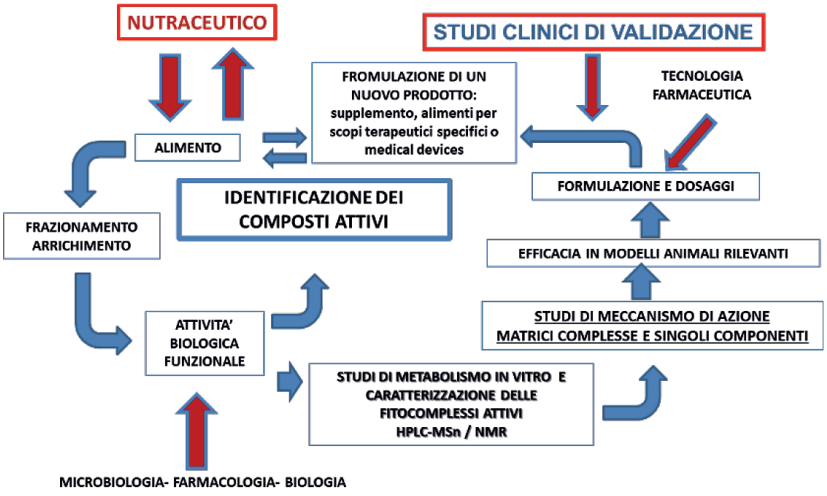


Fig. 4. Schema di sviluppo di un nutraceutico efficace e sicuro.

La provenienza regionale della matrice del nutraceutico, il periodo di raccolta, la variabilità climatica da un anno all'altro, sono tutti parametri che influenzano la composizione e la quantità dei singoli componenti tanto da farne variare considerevolmente gli effetti biologici e farmacologici. Per questo motivo è molto importante fare una caratterizzazione il più possibile completa della matrice per poterne associare composizione con l'efficacia e dosaggio del fitocomplesso. Questo è particolarmente rilevante per matrici apparentemente simili ma in realtà molto diverse, un esempio descritto è il contenuto in procianidine in estratti di mela. Tali componenti in termini quantitativi sono molto diversi a seconda delle varie cultivar (Annurca, RD: Red Delicious; GS: Granny Smith; F: Fuji; GD: Golden Delicious). In particolare la varietà annurca ha dimostrato contenere una concentrazione decisamente superiore a tutte le altre. Inoltre il contenuto polifenilco è molto complesso e ricco rispetto a tutte le altre, definendo il profilo dei suoi fitocomplessi unico. La differenza sostanziale è il modo in cui i frutti arrivano a maturazione, tutte le mele maturano sull'albero, l'annurca a causa della mancanza del peduncolo che distanzia il frutto dal ramo fa sì che il frutto cada prima della maturazione. Per tradizione quindi viene raccolto prima della caduta, messo su campi di paglia e trucioli per farlo maturare a terra, in campi al sole e all'aria aperta *Fig. 5*.



Fig. 5. Campi di maturazione sulla paglia a terra della mela annurca campana.

Questo processo di maturazione separato dalla pianta fa sì che la mela produca una serie di sostanze che l'aiutano nella difesa da muffe e batteri che la farebbero marcire, questi composti rendono unica la composizione chimica della mela annurca.

Tale peculiarità ha portato a studiarne in maniera completa la sua composizione e i potenziali nutraceutici.

La composizione è studiata tramite analisi HPLC e HPLC massa, in *Fig. 6* è riportata l'analisi HPLC-DAD-MS con la composizione rilevata.

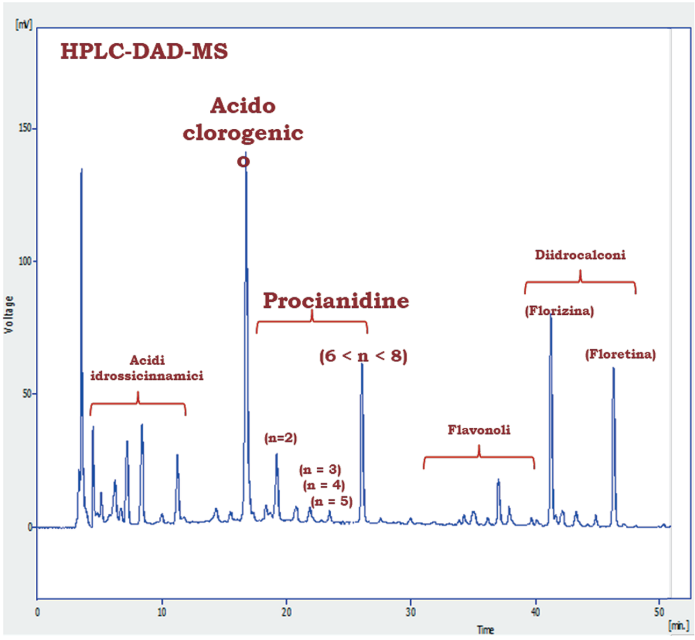


Fig. 6. Analisi HPC-DAD-MS di un campione di mela annurca.

La mela annurca è stata una delle matrici di sviluppo di nutraceutico per la prevenzione della ipercolesterolomia, il processo industriale per l'ottenimento della forma farmaceutica è descritto in maniera sintetica nella *Fig. 7*.

Questo preparato nutraceutico è stato testato in uno studio clinico doppio cieco, randomizzato monocentrico con 250 soggetti partecipanti della durata di 60 giorni con un tempo intermedio di trenta di valutazione clinica. In tale studio il colesterolo totale è diminuito del 25%, LDL del 37%, mentre HDL è aumentata del 45%.



Fig. 7. Processo industriale per la produzione di capsule gastro resistenti di estratti di mela annurca.

Esiste un altro preparato a base di riso rosso fermentato che è stato largamente utilizzato per il controllo della ipercolesterolomia, la sua azione terapeutica è nota dal suo uso nella medicina tradizionale cinese. Questo nutraceutico ha avuto un grandissimo successo ed è stato utilizzato anche come terapia alternativa a quella farmacologica convenzionale a base di statine. L'efficacia e l'insorgenza di effetti collaterali molto simili a quelle delle statine di prima generazione ha portato le autorità a controllare il prodotto derivato dal riso rosso. Il principio attivo più abbondante è stato rilevalo la monocolina K che è un metabolita secondario della fermentazione del riso rosso.

Le monocoline sono strutturalmente identiche alle statine semisintetiche. In particolare la K è identica alla lovastatina, un farmaco prescritto dai medici largamente utilizzato per le ipercolesterolemie.

È importante sottolineare che il riso rosso fermentato non ha bisogno di alcuna prescrizione medica per essere acquistato e utilizzato. Gli studi effettuati hanno dimostrato che:

- la monocolina K essendo un farmaco presente nel fitocomplesso ha di base le stesse proprietà farmacologiche;
- il suo complesso è più disponibile oralmente aumentandone in maniera sostanziale l'assorbimento;
- una dose del fitocomplesso è 4 volte più efficace del farmaco singolo;
- la tossicità si evidenzia a dosi 4 volte inferiori rispetto al farmaco.

Tutte queste informazioni riguardo il riso rosso fermentato ha portato L'EFSA European Food Safety Authority ad intervenire per limitare la quantità di «riso rosso fermentato» presente nei nutraceutici, la massima dose ammessa ora è 2.5 mg/giorno.

Questo ultimo esempio dimostra che uno studio rigoroso delle proprietà dei nutraceutici è altamente auspicabile per evitare di intercorrere in casi simili a quelli del riso rosso fermentato dove l'effetto è

dovuto a una sostanza identica a quelle di un farmaco, ma non regolamentato.

A dimostrazione dell'enorme interesse nei nutraceutici, il mercato dei nutraceutici e integratori in senso più ampio ha un fatturato pari a un quarto di quello dei farmaci convenzionali ed è in continua crescita. Purtroppo la loro regolamentazione per la messa in commercio è ancora molto arretrata e lacunosa per il controllo della reale efficacia e profilo di tossicità. E' auspicabile che le autorità regolatorie possano intervenire a regolamentare un mercato di così grande impatto economico e importante per la salute umana.

PERSPECTIVES ON ENERGY TRANSITION AND ENERGY STORAGE

STEFANO CONSONNI (*)

Nota presentata dal m.e. Marino Gatto
(Adunanza del 5 ottobre 2023)

SUNTO. – Oltre l'80% del consumo mondiale di energia primaria è coperto oggi dai combustibili fossili, il cui consumo, a dispetto delle previsioni più volte formulate in passato, continua a crescere. Stante le enormi riserve disponibili, l'attuale dipendenza da fonti fossili potrebbe continuare ancora per molto tempo, ma ciò potrebbe comportare gravi conseguenze in termini di cambiamento climatico. Tra le alternative all'uso dei fossili, le fonti rinnovabili intermittenti (solare ed eolico) sono destinate a giocare un ruolo particolarmente rilevante, e ciò comporterà l'inderogabile necessità di imponenti capacità di stoccaggio di energia. In aggiunta ai sistemi idraulici di pompaggio e turbinaggio che oggi coprono la stragrande maggioranza della capacità di stoccaggio mondiale, le tecnologie proposte per sostenere la produzione elettrica su grande scala sono riconducibili a quattro tipologie: stoccaggio chimico (idrogeno ed e-fuels); stoccaggio elettrochimico (batterie); stoccaggio termico (accumulatori di calore) e stoccaggio termodinamico (cicli a CO_2, ad aria compressa, ad aria liquida).

EXTENDED ABSTRACT

In 2022, CO_2 emissions from fuel combustion have reached a record of 34 gigatonnes [1]. By mid-2023 fossil fuel demand indicators are back to pre-pandemic levels, with natural gas and oil rebounding and coal hitting new records [2]. At the same time, the energy sector

(*) Ordinario di Sistemi per l'Energia e l'Ambiente, Politecnico di Milano, Italy. E-mail: stefano.consonni@polimi.it

has faced a significant upheaval due to the Covid-19 pandemic and the energy crisis following Russia's invasion of Ukraine, leading to volatile fuel and electricity prices [3].

Contrary to many of the predictions put forward in past decades, the consumption of fossil fuels is still rising, and the expected peak that will mark the start of the descent has yet to come. More than 80% of global energy demand is still covered by fossil, non renewable sources, and given (i) the very large reserves still available and (ii) the mature, efficient, reliable technologies available for their exploitation; such dependence may well continue for centuries. Given this context, the rationale for reducing the dependence from fossil sources is not their limited availability, but rather: (a) the environmental implications of carbon-based energy sources, which generate massive emissions of greenhouse gases and thus impact on climate; (b) security of energy supply, which follows from the concentration of fossil sources in unstable / unfriendly countries.

Rationale (a) provides the motivation for the "energy transition" advocated to mitigate climate change. The four basic industrial options that can be pursued to reduce the carbon intensity of the world economy are: (1) reduce CO_2 emissions per unit product or service (*e.g.* increase efficiency); (2) expand the use of renewable sources; (3) expand nuclear energy; (4) carbon capture and storage (CCS).

Given the enormous size of the issue at stake (we must get rid of tens of billions of tons of CO_2 emissions) pursuing all these options at the same time is vital. No matter what the break-down will be, renewable sources will play a major role, with solar and wind providing most of the new capacity. In turn, heavy reliance on intermittent, unevenly distributed sources as solar and wind will require large energy storage capacity as a means to bridge the gap between the time and the location of energy production vs energy consumption.

In 2022, Italian energy storage capacity reached 56 GWh [4, 5]. Most of such capacity was provided by Pumped Hydro Energy Storage (PHES), which delivered 53 GWh out of the 315 TWh demanded [6]) According to SNAM and Terna, achieving EU decarbonization targets will require 95 GWh of storage capacity in addition to PHES by 2030 [7]. Expanding storage capacity to meet national energy demands is crucial for managing expected over-generation and fluctuations of renewable energy production. The most relevant storage technologies currently considered to support large-scale, multi-energy production systems are:

(i) chemical storage (hydrogen and e-fuels); (ii) electrochemical storage (batteries); (iii) thermal storage, and (iv) thermodynamic storage (*Fig. 1*).

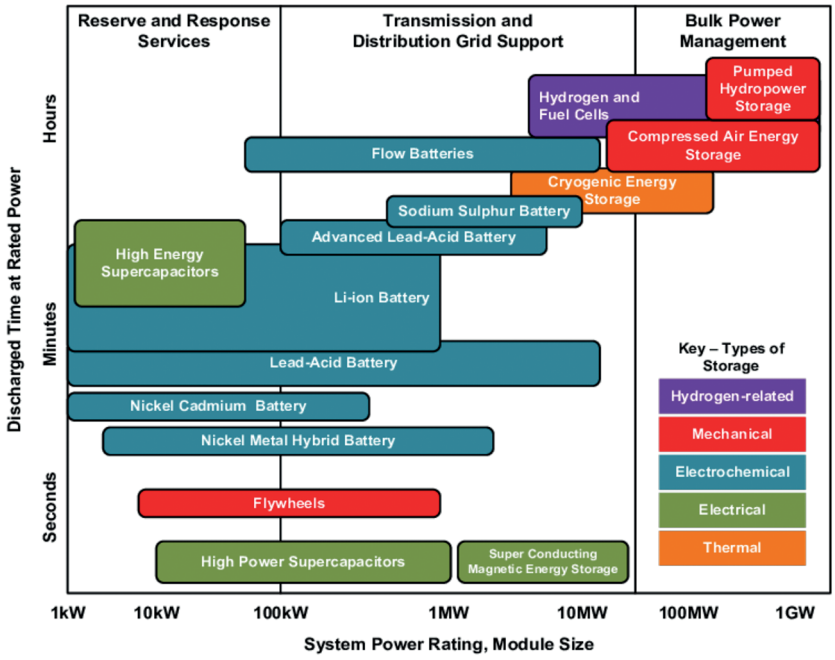


Fig.1. Different energy storage technologies, with applicable power ranges and discharge power duration [8].

Chemical storage by means of power-to-hydrogen and e-fuels offers long storage durations with high capacities, which are particularly interesting for heavy-duty transportation and high-temperature industrial processes [9, 10]. Hydrogen production via electrolyzers is a key technology, but further testing is needed for the dynamic conditions characterizing the direct integration with Renewable Energy systems [11]. Effective management of heat generated during methanation and catalyst performance are essential for the commercial viability of methane production systems [12, 13].

As for **electrochemical storage**, the expected surge in battery electric vehicles and stationary applications offers significant opportunities for synergies, such as the «second life» of car batteries which can still be used for stationary storage [14]. Italy and Europe are exposed to the

risk of material shortages and technology supply, because major battery manufacturers are located in East Asia [15]. Enhancing energy density without sacrificing power density and maintaining the integrity of the electrode-electrolyte interface appears critical [16], as well as cost reduction, minimization of the environmental impact and the development of a robust Italian / European supply chain.

Thermal energy storage (TES) systems utilize various technologies. Sensible heat storage enables fully reversible heat exchange but requires large storage volumes, long loading / unloading times and often needs energy to maintain storage conditions [17]. Systems using phase change materials typically offer higher energy densities and temperature control, but feature shorter storage durations and are limited by low thermal conductivity. Thermochemical storage technology has the highest energy density, but is less mature and more complex [17, 18].

Thermodynamic energy storage (CO_2 cycles; CAES = Compressed Air Energy Storage; LAES = Liquid Air Energy Storage) offers long-duration storage at large-scale, although penalized by relatively low energy density [19, 20, 21, 22].

Within this context, Politecnico di Milano and Laboratorio Energia e Ambiente Piacenza (LEAP) have designed an innovation facility to be deployed in Piacenza (DES-Park: Digital Energy Storage Park) to support the Italian industry in developing, testing and certifying energy storage systems, fostering energy transition and meeting EU decarbonization targets.

REFERENCES

1. IEA, “World - How much CO2 does the global energy system emit?” https://www.iea.org/world/emissions (accessed Oct. 15, 2024).
2. IEA, “World - Energy mix.” https://www.iea.org/world/energy-mix (accessed Oct. 15, 2024).
3. IEA, “Net Zero Roadmap - A Global Pathway to Keep the 1.5°C Goal in Reach,” 2023.
4. Anie Rinnovabili, “Osservatorio Sistemi di accumulo. Elaborazione Anie Rinnovabili,” 2022.
5. Edison, “Il ruolo strategico dei pompaggi idroelettrici nella transizione energetica,” 2023.
6. TERNA, “Dati Storici,” 2023.

7. SNAM e TERNA, "Documento di descrizione degli scenari 2022," 2022.
8. D. Sprake, Y. Vagapov, S. Lupin, and A. Anuchin, "Housing estate energy storage feasibility for a 2050 scenario," in *2017 Internet Technologies and Applications (ITA)*, Sep. 2017, pp. 137–142. doi: 10.1109/ITECHA.2017.8101925.
9. Ministero dello Sviluppo Economico, "Strategia Nazionale Idrogeno. Linee Guida Preliminari," 2020.
10. IRENA, "Green hydrogen for industry: A guide to policy making," Abu Dhabi, 2022.
11. H. Sayed-Ahmed, Á. I. Toldy, and A. Santasalo-Aarnio, "Dynamic operation of proton exchange membrane electrolyzers—Critical review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 189, p. 113883, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.rser.2023.113883.
12. C. Mebrahtu, F. Krebs, S. Abate, S. Perathoner, G. Centi, and R. Palkovits, "CO_2 Methanation: Principles and Challenges," 2019, pp. 85–103. doi: 10.1016/B978-0-444-64127-4.00005-7.
13. W. J. Lee *et al.*, "Recent trend in thermal catalytic low temperature CO_2 methanation: A critical review," *Catal. Today*, vol. 368, pp. 2–19, May 2021, doi: 10.1016/j.cattod.2020.02.017.
14. IEA, "Innovation in batteries and electricity storage," 2020.
15. IEA, "Batteries and Secure Energy Transitions," 2024.
16. Q. Abbas, M. Mirzaeian, M. R. C. Hunt, P. Hall, and R. Raza, "Current State and Future Prospects for Electrochemical Energy Storage and Conversion Systems," *Energies*, vol. 13, no. 21, p. 5847, Nov. 2020, doi: 10.3390/en13215847.
17. J. Mitali, S. Dhinakaran, and A. A. Mohamad, "Energy storage systems: a review," *Energy Storage Sav.*, vol. 1, no. 3, pp. 166–216, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.enss.2022.07.002.
18. IRENA, "Innovation Outlook: Thermal Energy Storage," Abu Dhabi, 2020.
19. A. G. Olabi, T. Wilberforce, M. Ramadan, M. A. Abdelkareem, and A. H. Alami, "Compressed air energy storage systems: Components and operating parameters – A review," *J. Energy Storage*, vol. 34, p. 102000, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.est.2020.102000.
20. M. Dooner and J. Wang, "Compressed-Air Energy Storage," in *Future Energy*, Elsevier, 2020, pp. 279–312. doi: 10.1016/B978-0-08-102886-5.00014-1.
21. M. Astolfi, D. Rizzi, E. Macchi, and C. Spadacini, "A Novel Energy Storage System Based on Carbon Dioxide Unique Thermodynamic Properties," *J. Eng. Gas Turbines Power*, vol. 144, no. 8, Aug. 2022, doi: 10.1115/1.4054750.
22. O. O'Callaghan, P. Donnellan, "Liquid air energy storage systems: A review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, 146 (2021), https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111113.

THE COLOSSEUM
Dynamic Behaviour and Monitoring of the Monument

FABRIZIO VESTRONI (*)

Nota presentata dal m.e. Carlo Cinquini
(Adunanza del 19 ottobre 2023)

SUNTO. – Il Colosseo aveva in origine una struttura molto robusta con una forma chiusa di anelli concentrici e pareti radiali collaboranti. In seguito a cedimenti della fondazione e agli effetti di terremoti la parte esterna sul lato sud è crollata e la struttura è divenuta più vulnerabile. Per mantenere questa situazione è necessaria un'adeguata attività di monitoraggio. In questo contesto un ruolo importante assume il monitoraggio dinamico basato sull'osservazione nel tempo di alcune proprietà dinamiche della struttura. Dopo un cenno di dinamica strutturale, si evidenzia che le grandezze modali, frequenze e modi di vibrazione, sono adatte al monitoraggio perché sono semplici da determinare sperimentalmente e variano a seguito di un danno. La tecnica è mostrata considerando due indagini sperimentali che hanno interessato il Colosseo nel 2006 e 2022. Inoltre, sulla base di registrazioni delle accelerazioni prodotte dal traffico e da un recente terremoto, si affronta il problema delle vibrazioni dovute al traffico e si sviluppano considerazioni preliminari sulla vulnerabilità sismica del monumento.

***

ABSTRACT. – The original design of the Colosseum was a robust, closed structure with concentric rings and radial walls. However, due to foundation settlements and earthquake vibrations, a significant portion of the external zone on the south side has collapsed, making the structure more vulnerable. To maintain the current situation and prevent further collapses, it is essential to support monitoring activities focused on the structural health conditions of the monument. This study centers on dynamic monitoring based on variations in specific dynamic properties over time. After reviewing some elements of structural dynamics, modal quantities, frequencies and vibration modes, are

(*) Department of Structural and Geotechnical Engineering, Sapienza University of Rome, Rome, Italy. E-mail: vestroni@uniroma1.it

shown to be suitable for monitoring because they can be easily determined experimentally and are sensitive to damage. The technique has been applied comparing the results obtained in two experimental campaigns in 2006 and 2022, where the Colosseum response to ambient excitation has been measured. Additionally, recorded accelerations from road traffic and a recent earthquake enable an assessment of traffic vibrations and a preliminary evaluation of the seismic vulnerability.

1. Introduction

The Colosseum is the most famous monument of ancient Rome and, as such, receives special attention from the Superintendent of Cultural Heritage, with a variety of conservation activities. Currently, a new underground metro line that crosses the center of Rome is under construction, running tangentially to the Colosseum [1]. This project has provided an excellent opportunity to carry out an extensive experimental investigation campaign on the monument material properties and dynamic characteristics during the design phase. Furthermore, the Colosseum has been equipped with a permanent sensor network to enable both static and dynamic monitoring.

In recent decades, Structural Health Monitoring (SHM) has gained significant importance. The increasing prevalence of SHM is partly due to advancements in instrumentation and reductions in associated costs. Concurrently, data processing methods and analytical techniques have become more sophisticated and effective. In this context, vibration-based methods for monitoring structural health have become well-established, particularly because valuable information can be gathered efficiently using ambient excitations, which have proven effective in detecting structural deterioration. For large structures and cultural heritage sites like the Colosseum, SHM should be considered essential [2,9].

In this paper, after providing general information on the history of the monument and a description of its current state, the focus shifts to the fundamentals of structural dynamics, which are essential for understanding the health monitoring approach based on the evolution of dynamic properties of the structure. The paper then examines the response of the monument to two significant dynamic excitations, traffic and earthquakes. This analysis is supported by available data from the monitoring instruments currently in operation.

2. The History of the Monuments and its Structure

The Flavian Amphitheater, more commonly known as the Colosseum, was constructed between 70 and 80 AD under the emperors Vespasian and Titus of the Flavian dynasty. The foundations rest on heterogeneous soil in an area that was once partially occupied by the artificial lake of the Domus Aurea. The Colosseum hosted gladiatorial games until 523 AD, when Emperor Theodoric banned them. Afterward, the structure entered a long period of decline until its restoration in the 19th century.

The amphitheater is elliptical in shape, with the major and minor axes measuring 188 meters and 156 meters, respectively. The structural design follows the well-established Roman technique for masonry buildings with orthogonal walls, adapted here to the elliptical form. A series of radial masonry walls, tied by concentric annular walls and inclined concrete vaults, creates concentric wedge-shaped cells (*Fig. 1*).

The materials used include travertine, tuff, masonry, and concrete. The external wall, standing approximately 50 meters high, was originally made of travertine blocks connected by iron pins and cramps without mortar joints, many of which have disappeared over the centuries. The engineers of the time were aware of the varying deformability of the soil across the large area occupied by the monument, and a large and deep foundation was built as a concrete ring, twelve meters thick. However, the northern side of the Colosseum is built on stiffer soil than the southern side (*Fig. 2a*).

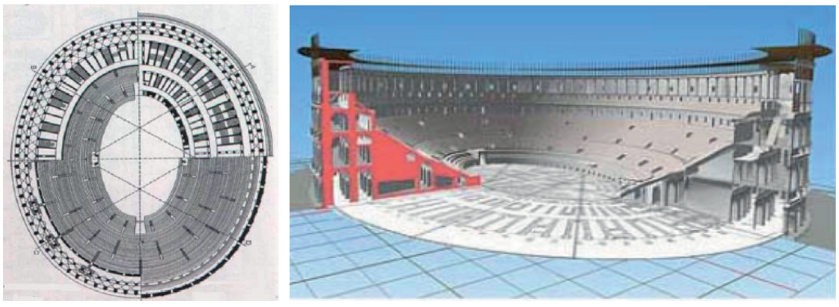


Fig. 1. Plan and sectional view of a model: the original design of the monument, characterized by its closed elliptical shape, composed of interconnected radial and circumferential walls, symmetrical with respect to the principal axes.

This geometrical configuration originally provided the structure with significant robustness against both vertical and horizontal forces, such as those induced by earthquakes. Unfortunately, these exceptional characteristics were compromised due to the varying deformability of the soil on which the foundation rests. Despite the rigidity of the base concrete ring, settlements on the south side caused discontinuities in the elevated structures. In the absence of internal circumferential constraints and the lack of iron pins between the blocks, the structure was unable to resist seismic horizontal forces. The partial collapse of the external walls led to the current world-renowned profile of the Colosseum (*Fig. 2b*), where the original symmetry has been partially lost, resulting in a negative impact on the structural robustness of the monument, as will be discussed later.

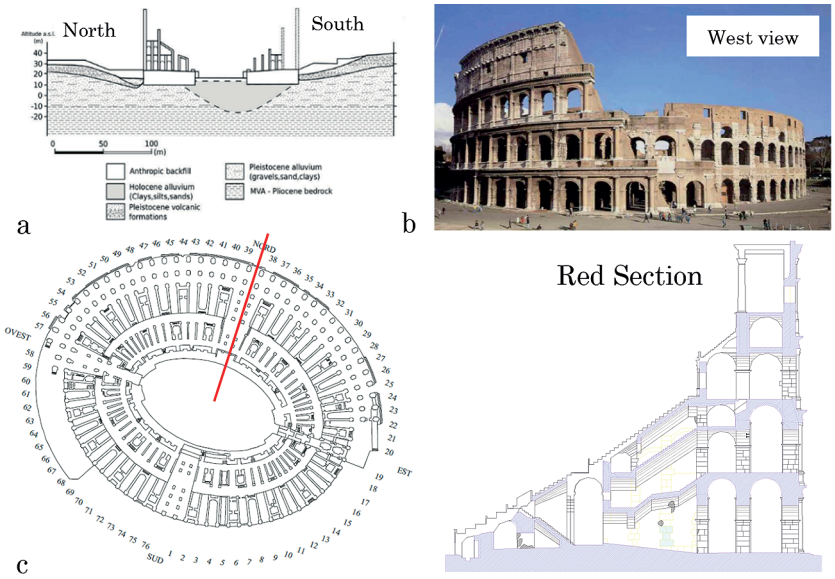


Fig. 2. a) A transversal section of the monument with the different soils under the base foundation; b) the iconic image of the Colosseum; c) actual plane and section of the North side.

In the 19th century, several interventions were carried out to halt the degradation of the monument. The most notable are the two large buttresses constructed at the eastern end by Stern (1805–1807) and at

the western end by Valadier (1820–1852), as shown in *Fig. 2b*. These buttresses were built to support the remaining portion of the external wall, attempting to compensate for the missing southern sections.

Despite these restoration efforts and the absence of recent severe earthquakes, various decay phenomena have occurred over time. Currently, the health status of the Colosseum is not very satisfactory, and the effectiveness of the connections between the bearing elements remains uncertain. An important factor to consider is that Rome is classified as a seismic zone, albeit with low intensity. For all these reasons, it is evident that monitoring of the monument is needed to assess its health status and to record potential vibrational events.

3. The Structural Dynamic Monitoring

Structural health monitoring (SHM) has garnered increasing attention in recent times. This interest arises from the need to assess the integrity of constructions and to plan maintenance interventions. The principles underlying monitoring are based on observing variations in certain structural characteristics. Monitoring methods differ according to the quantities observed, resulting in a wide variety of techniques developed [3,9]. A critical aspect of selecting the observed quantities is that they must be easily measurable and primarily related to the evolution of damage.

In this context, the dynamic properties of a structure meet these requirements satisfactorily. Indeed, they are distinct quantities of the structure, related to its health conditions, and can be experimentally determined in a simple manner. Before discussing the dynamic monitoring of a structure, it is necessary to introduce the fundamental descriptors of dynamic behaviour and their variations due to damage.

3.1 Dynamics of a structure

The study of the response of a mechanical system requires the use of a model. When the structure is relatively simple, such as the frame structure shown in *Fig. 3* with a rigid horizontal beam, it can be approximated by the simplest model: a single-degree-of-freedom (SDOF) system. In this model, the deformed shape is described by a single variable $u_1(t)$, the top mass displacement.

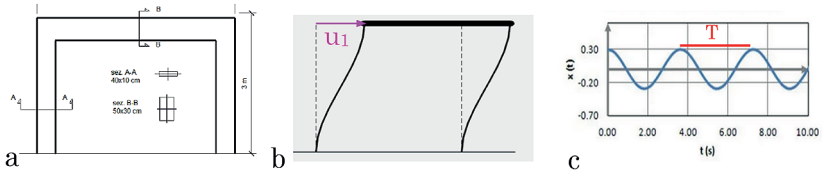


Fig. 3. The structure (a) and its deformed configuration (b) of a simple model described by only one variable $u_1(t)$*, time history of the free oscillations (c).*

When this structure is displaced from its initial position and then released, it oscillates in harmonic motion, characterized by a period, which is the time interval between two successive maxima (*Fig. 3c*). The period is a distinctive property of the structure and depends on both its mass and stiffness. Alternatively, it may be useful to refer to the frequency of the structure, which is the inverse of the period. The frequency indicates how many times $u_1(t)$ reaches its maximum within a unit of time.

It is worth noting that this quantity, the period or the frequency, depends directly on the stiffness of the structure, and thus indirectly reflects its structural health condition. For example, if a column in the frame is damaged, its stiffness decreases, causing the oscillation period to increase (or the frequency to decrease). In this scenario, when the same experiment shown in *Fig. 3* is repeated with a damaged column, the frame response is slower (*Fig. 4*). The damage produces a noticeable effect, making the oscillations visibly different.

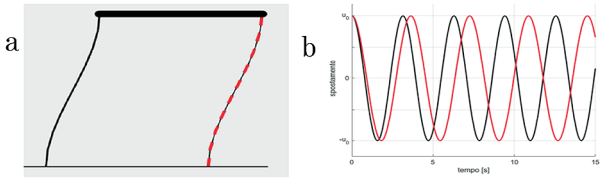


Fig. 4. The structure with a damaged column (red); (b) time histories of free oscillations of undamaged (black) and damaged (red) structures.

It can be concluded that the period (or frequency) of a structure is a crucial parameter to monitor over time. Its variation provides valuable information regarding the health of the structure, making it a useful indicator in structural health monitoring [6-9].

The structures we are discussing, such as the Colosseum, are obviously much more complex than the simple frame of *Fig. 3*. To capture their dynamic behaviour, we need to consider systems with more than one degree of freedom. A representative case of a multi-degree-of-freedom (MDOF) structure is shown in *Fig. 5*, where the deformed shape of the structure is described by three variables $u_i(t)$, with i=1,3, representing the displacements of the three masses. While this example remains relatively simple, it can illustrate the dynamic properties of a system with multi-degrees of freedom.

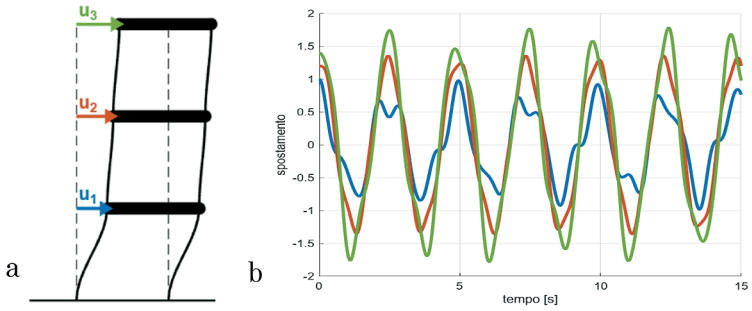


Fig. 5. A 3DOF structure (a) and the time hystories of the three displacements $u_1(t)$, $u_2(t)$, $u_3(t)$ *during a free oscillation caused by a generic initial condition (b).*

If the structure is displaced from its undeformed configuration, much like the SDOF system in *Fig. 3*, its response is now described by the time histories of the 3DOF system (*Fig. 5*). However, unlike the SDOF system, the response is far from harmonic. In this case, the initial deformed configuration is arbitrarily assumed, but there are countless possibilities - potentially ∞^3, given the three degrees of freedom - to define the shape of the initial deformation.

In this case, the mathematical analysis of the dynamic equations of motion for the model, which analytically represent the motion of the structure, provides an important result: for this model with three degrees of freedom, there exist three specific initial deformed configurations that generate free oscillations characterized by harmonic motion with periods T_1, T_2, T_3, where $T_1<T_2<T_3$. In these oscillations, the deformed shape remains constant over time while only its amplitude changing.

These deformed shapes, known as natural modes, or simply modes, are illustrated in *Fig. 6*. If the system is displaced from its undeformed

configuration according to the *i-th* mode and left to oscillate freely, it will oscillate harmonically with a period T_i, or frequency f_i, while maintaining the same shape throughout the motion. Since the shape is known and does not change, the system motion can be described by only one variable, the displacement of one mass, meaning it behaves like a single-degree-of-freedom system. In a sense, the 3DOF structure can be viewed as comprising three SDOF systems, each characterized by a period, a specific mode shape and a variable representing its amplitude.

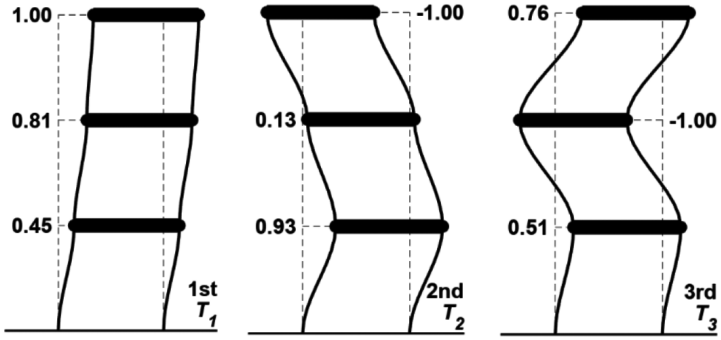


Fig. 6. The three modes of the structure: numerical values of masses displacements and deformed shapes.

3.2 Damage identification

Returning to the definition of the quantities that characterize the dynamic behavior of a multidegree-of-freedom (MDOF) structure, we can now list the periods (or frequencies) and the associated modes for each period. As previously mentioned, periods or frequencies are sensitive to damage, but modes are also sensitive to damage.

In particular, while frequency variations, being global quantities, cannot directly indicate the location of the damage, variations in the mode shapes - and especially in their derivatives, such as modal curvatures - are more sensitive to the localization of the damage [9]. Essentially, both periods and modes are reliable indicators for monitoring the evolution of a structure health. They are relatively easy to measure, and they show variations due to damage. However, while these variations can help in detecting the occurrence of damage, determining the precise location and extent of the damage involves solving an

inverse problem, which is complex and does not always yield a unique solution. Achieving reliable results requires a robust interpretative model and accurate experimental data [9].

At this stage, monitoring of the monument can reliably depend on measuring modal quantities, such as frequencies and certain components of mode shapes. By comparing the variations in the experimental results between undamaged and damaged conditions with the corresponding values provided by the structural model (which depend on the stiffness properties), it is possible to determine these parameters, which are directly related to the extent of the damage.

Roughly speaking, if $\mathbf{z}$ is a vector representing the observed modal quantities, the relationship between the experimentally measured modal quantities $\mathbf{z}_e$ and the numerically computed modal quantities $\mathbf{z(x)}$, which depend on the mechanical parameters $\mathbf{x}$, directly related to damage, can be described as:

$$z_e - z(x) = e \tag{1}$$

where e accounts for the unavoidable discrepancies between the experimental and numerical quantities due to the presence of experimental and modeling errors. The solution of the inverse problem - given $\mathbf{z}_e$, determine $\mathbf{x}$ - can be pursued by minimizing a suitable objective function of the difference e between the experimental and numerical values. The variation over time of the parameters $\mathbf{x}$ provide valuable information about the portion of the structure affected by damage and its severity [7-9].

As is well known, solving this inverse problem is significantly more challenging than the direct problem, where the model is already established, and the response to a known external excitation is determined. In contrast, in the inverse problem the response (derived from experimental data) is known, and the objective is to determine the model parameters, which are related to damage. Achieving a reliable solution requires highly refined models and good experimental data, as previously noted.

Nevertheless, if no significant variation in the modal quantities is observed across several successive tests, it can be confidently concluded that no global degradation in the structural characteristics has occurred. This outcome of the ongoing monitoring would provide assurance that the monument overall structural health remains intact.

4. The Case-Study of the Colosseum

To determine the structural behavior of the monument and its modal quantities, the finite element method (FEM) is employed. In this approach, the structure is divided into a large number of small solid elements, ensuring an accurate representation of the monument geometrical and mechanical characteristics (*Fig. 7*). Furthermore, this technique allows for the selection of appropriate materials for each section of the structure, considering the specific mechanical and inertial properties of the various materials used (*Fig. 8*). In this particular case, four different materials are considered: travertine, tuff, masonry, and concrete.

For monitoring purposes, the Colosseum has been equipped with accelerometers to measure its vibrations. Two verticals, B and C, are continuously monitored by fixed sensors (*Fig. 9*). Additionally, other verticals are monitored using six accelerometers at a time, allowing for a broader collection of data across different parts of the monument.

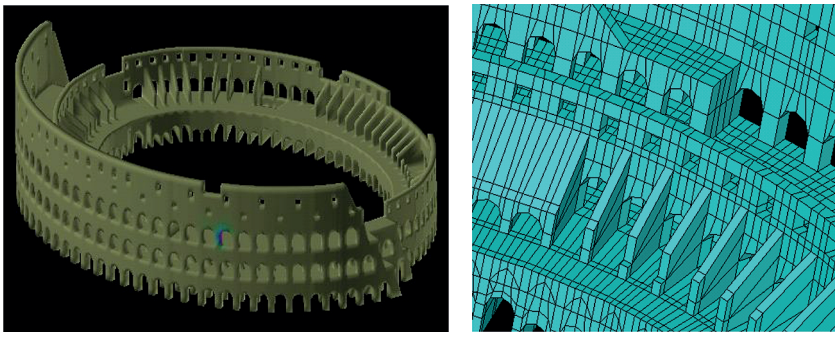


Fig. 7. The finite element model of Colosseum with a zoom of small zone.

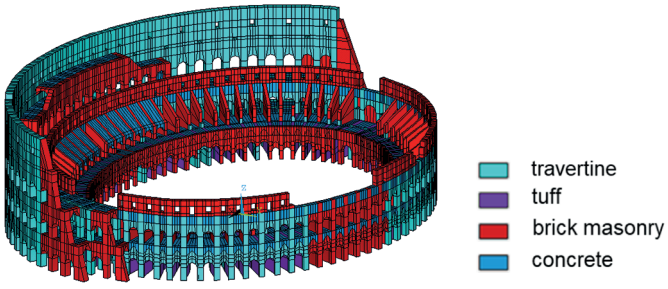


Fig. 8. Description of the zones with different materials.

Referring to the results of an experimental investigation conducted in 2006 [10], the model was used to carry out the modal analysis. The calculated frequencies are presented in *Tab. 1* and they were derived by assuming standard elastic material properties, which are well established in the literature [10]. However, a significant discrepancy was observed - the ratio f_a/f_e is around 2 - between the experimental f_e and analytical f_a frequencies. This discrepancy suggests that the elastic stiffness of materials might be overestimated in the model. This is likely due to the fact that the actual stiffness values are not specific to the materials of individual elements themselves, but rather to their assemblies. For instance, many of the vertical structural elements consist of assemblies of blocks, and the connections between these blocks are uncertain, likely relying on only a few contact points. This introduces a degree of flexibility that was not accounted for in the initial stiffness assumptions.

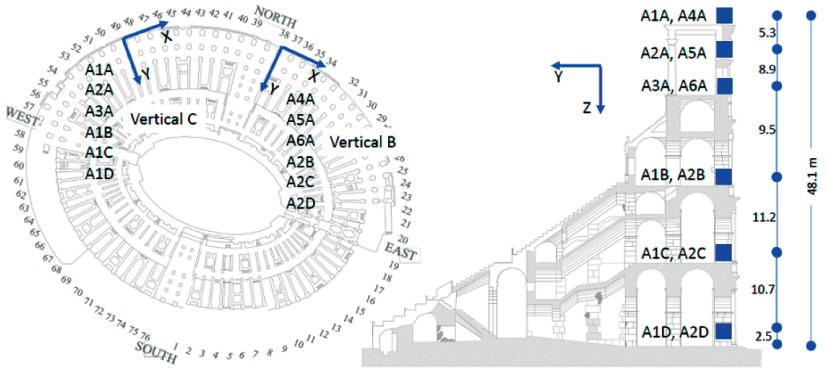


Fig. 9. Two instrumented verticals, B and C, with fixed positions of the accelerometers and sensors positive directions, plan and section.

Tab. 1. Experimental and numerical values (Hz) of the first six frequencies.

Mode	1	2	3	4	5	6
Experimental	**1.03**	**1.30**	**1.49**	**1.60**	**1.66**	**1.75**
Analytical original	2.32	2.34	3.12	3.17	3.58	3.61
f_a/f_e	2.21	1.80	2.09	1.98	2.16	2.07
Analytical updated	**1.13**	**1.14**	**1.51**	**1.54**	**1.74**	**1.76**

To further investigate this discrepancy and obtain a more accurate estimation of the mechanical properties representing these global structural elements, wave propagation phenomena are used [10]. There is indeed a relationship between the propagation velocity of pressure waves c_p and the continuum elastic properties:

$$c_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}\frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \tag{2}$$

where: E is the Young's modulus, ν is Poisson's ratio and ρ is the material density. This relationship allows for a more precise estimation of the effective stiffness, which considers the actual conditions of the structural assemblies rather than single material properties. The mean experimental value obtained for the pressure wave propagation speed c_p is 1220 m/s. This value leads to an estimate of the elastic modulus E that is significantly lower than the originally assumed value. Based on this experimental result, the elastic modules have been suitably scaled by a factor. The optimal scaling factor was determined by minimizing the differences between the experimental and numerical frequencies calculated by the finite element model.

The updated frequencies are reported in the last row of *Tab. 1*. While the remaining errors are still present, they are considered acceptable. These residual discrepancies are likely due to the fact that the model was optimized by adjusting only a single factor. Consequently, a homogeneous reduction of stiffnesses is not sufficient to precisely match all experimental data. Other factors, such as local variations in material properties, imperfections in block connections, or modeling assumptions, may contribute to these remaining differences.

The updated model has been employed to compute the mode shapes of the Colosseum, which are depicted in *Fig. 10* alongside the experimentally determined modes. Since the experimental modes are only available at instrumented points, the comparison is somewhat limited, yet still insightful. Overall, the comparison is quite satisfactory. The deformed shapes are qualitatively similar, with both numerical and experimental results showing that the external wall experiences the largest displacement, particularly at the free ends.

The identification of the first and second modes is quite accurate. These modes are primarily bending modes localized at Stern's and Valadier's buttresses, which emerge as the most vulnerable parts of the Colosseum, because they are the terminal portions of the interrupted external wall and are not retained by radial walls.

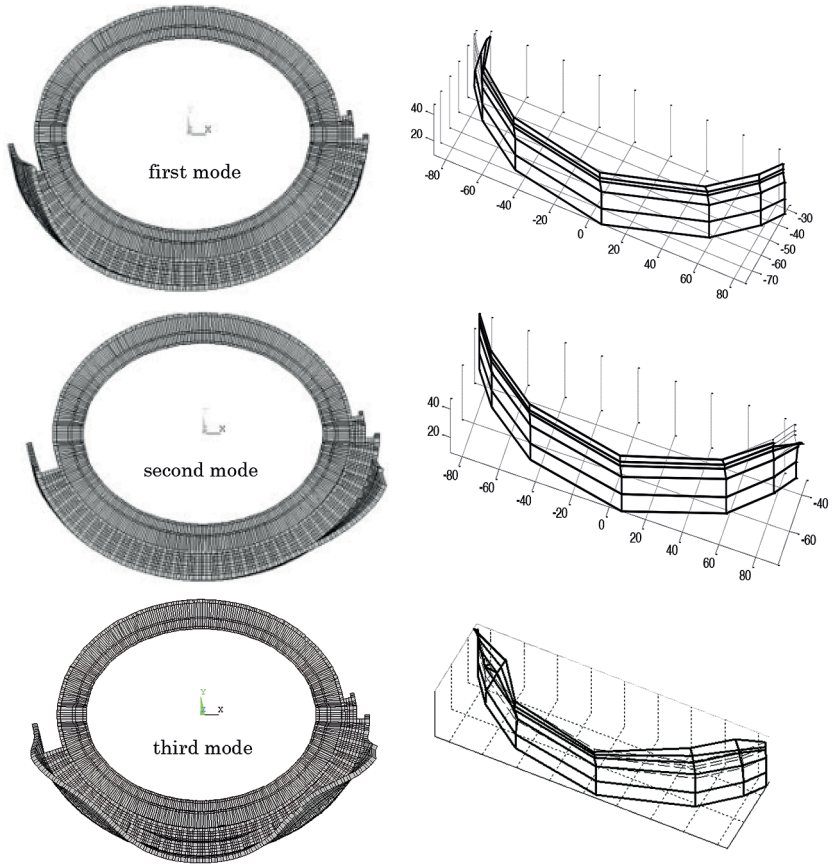


Fig. 10. Numerical modes (left column) and experimental modes of the instrumented zone (right column).

As the mode order increases, the external wall motion becomes more global, involving bending deformations in the horizontal planes. This behavior is particularly noticeable in the top displacements of the wall, indicating a broader participation of the structure in the oscillations. The comparison of the third mode between experimental and numerical results is again satisfactory, showing good agreement in the deformed shapes (*Fig. 10*). However, the fourth experimental mode does not correspond to any of the numerical modes, suggesting a discrepancy that may be attributed to localized structural complexities or

model limitations. On the other hand, there is a notable similarity between the fifth and sixth experimental modes and the fourth and fifth analytical modes, indicating that the model is generally accurate but may require further refinement.

Despite the slight observed discrepancies, the updated finite element model proves sufficiently accurate for analyzing the dynamic behavior of the Colosseum and monitoring its structural health. By regularly evaluating the modal quantities and identifying corresponding models over time, variations in mechanical properties can be detected, which may indicate the onset of structural damage.

Recent vibration data collected using accelerometers installed for the construction of the Metro C Line has provided an opportunity to re-identify the monument modal quantities. These new measurements, obtained in 2022, were compared with those from the 2006 experimental campaign, and the results are practically identical. Specifically, the frequencies identified in both experimental campaigns are nearly the same, as shown in *Tab. 2*. This consistency in modal quantities over a 16-year period indicates that no significant changes in the structural mechanical properties have occurred, confirming that the Colosseum has experienced no appreciable damage between 2006 and 2022.

Tab. 2. Frequencies of first modes (Hz) obtained from records of 2006 and 2022 experimental campaign.

Mode	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Frequency [10]	1.03	1.30	1.49	1.60	1.66	1.75
Frequency (this study)	1.04	1.28	1.47	1.62	1.71	-

It is important to note that the experimental investigation has revealed that the structure is much more flexible than anticipated, with the overall elastic modulus significantly lower than that of the specific material. As a result, the period of the monument is longer than expected, which provides a significant advantage in terms of its seismic vulnerability, as will be discussed later.

4.1 Traffic vibration

The accelerometric monitoring system, installed in 2014 and still operational, was initially introduced to monitor vibration levels during the construction of the underground line. This system also allows for the

analysis of the measured vibration levels and peak values related to the effects of road traffic.

The velocity has been recorded at the base and the top of the structure in two directions over one month (January 2020), during a period of construction inactivity, when road traffic was the primary source of vibration. At the base, the maximum values in the radial and circumferential directions are approximately 0.15 mm/s. The effective values, which are a synthetic measure of signal intensity, are much lower, at 0.04 mm/s and 0.02 mm/s, respectively.

The dynamic response of the structure amplifies these values at the top, where the maximum velocities reach approximately 0.5 mm/s, with effective values of 0.15 mm/s and 0.08 mm/s in the radial and circumferential directions, respectively. The vibration levels are very similar to those measured during the 2006 campaign and, more importantly, they do not exceed the limit values set by international codes [12], ensuring that there is no risk of structural degradation.

4.2 Seismic vulnerability

As is well known, Italy is a country with a significant risk of earthquakes. Throughout the centuries, numerous earthquakes have struck the region, some of which have caused severe destruction. Even Dante alludes to the phenomenon in Inferno (Canto III, Verses 130-136):

Finito questo, la buia campagna
tremò sì forte, che de lo spavento
la mente di sudor ancor mi bagna.
La terra lagrimosa diede vento,
che balenò una luce vermiglia
la qual mi vinse ciascun sentimento;
e caddi come l'uom cui sonno piglia.

Of course, the seismic risk is not uniform across the country; different areas are classified by increasing expected earthquake intensity, ranging from Zone I to Zone IV. Rome is situated in Zones II and III, which corresponds to medium-low seismic intensity. An earthquake acts as an acceleration imposed at the base of the structure, equivalent to a system of forces applied to the structure, which are proportional to the masses and base acceleration and alternate with positive and negative signs, with an average close to zero.

As is typical with dynamic forces, their effect depends not only on their intensity, as is the case with static forces, but more importantly on the similarity between the dynamic characteristics of the excitation and

those of the structure. This relates to the phenomenon of resonance, where a small force can produce a large response when the excitation frequencies are close to the natural frequencies of the structure. Additionally, the impact of an earthquake depends on how closely the force distribution matches the shape of the structural modes. Since the seismic forces at every moment are directed in the same direction, their distribution is most effective in the shape of the lower modes, which exhibit displacements in the same direction. For example, the first mode of the structure shown in *Fig. 6* plays the most significant role in the response, while the contributions of higher modes progressively diminish - this is a general observation in structural dynamics.

Earthquakes characterized by rapid temporal variations and high frequencies (or short periods) are not dangerous for highly flexible structures, which oscillate at low frequencies, like the first two shown in *Fig. 11*. However, such earthquakes pose a significant danger to rigid structures, like the last two shown in the figure. Unfortunately, the Colosseum falls into the latter category of rigid structures, and its seismic risk requires further investigation.



Fig. 11. Examples of flexible structures (left) and rigid structures (right).

Let us consider two simple frame structures, shown in *Fig. 12a*, with different dynamic characteristics: Frame A is rigid, with a short period, as evidenced by the fast time history of its free oscillations, shown in the zoomed section. Frame B, on the other hand, is flexible, with a long period, and its free oscillations are much slower, as clearly depicted in the related zoom. When the same seismic accelerogram (*Fig. 12b*), representing fast shaking, is applied to their bases, the effects on the two structures are quite different, as shown in *Fig. 12c*. The response of Frame A is much larger than that of Frame B because its dynamic characteristic - a short natural period - aligns with the fast components of the accelerogram. In contrast, Frame B, with a longer natural period, is less affected by these components. As a result, the maximum response displacement of Frame A is more than twice that of Frame B.

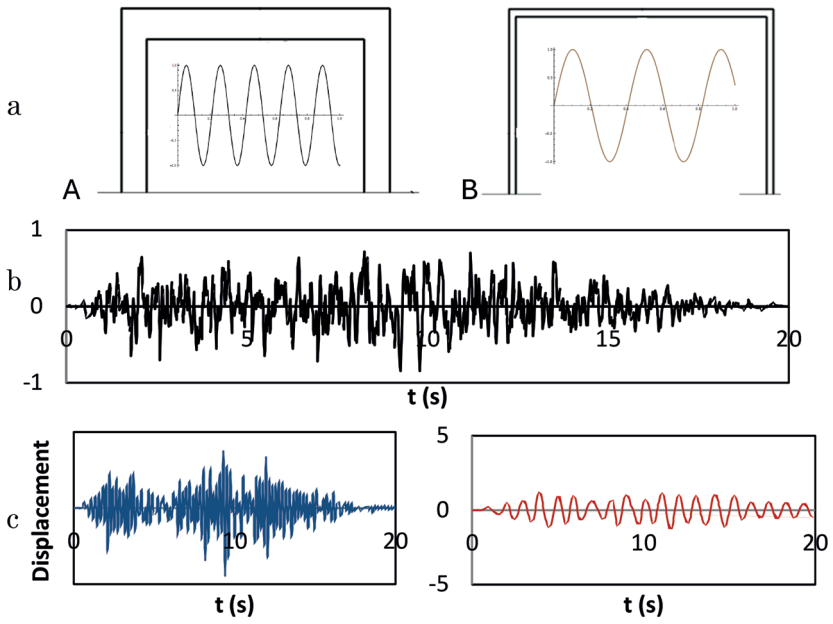


Fig. 12. (a) Earthquake accelerogram; (b) rigid and flexible frames; (c) time-history of the response of frame A and frame B to the earthquake.

Under the assumption of a linear behaviour, for a given family of earthquakes expected in a seismic zone, it is possible to calculate the maximum effect, such as the maximum acceleration, experienced by a structure based on its natural period. The result is shown in *Fig. 13* as the earthquake response spectrum in terms of acceleration. It is clear that the effect is greatest in the region of short periods, where rigid structures, like most masonry buildings, are located. The effect is moderate in the intermediate range, where framed structures with 6 to 12 floors are found, and it is minimal in the high-period zone, where flexible, slender structures are located.

It is worth noting that the first period of the Colosseum, equal to 0.43 s, determined based on literature values of material properties, falls within the range where earthquake effects are significant. However, the actual period determined from experimental results is higher, 0.97 s, placing it in a range where earthquakes are less hazardous, an encouraging outcome of this research (*Fig. 13*).

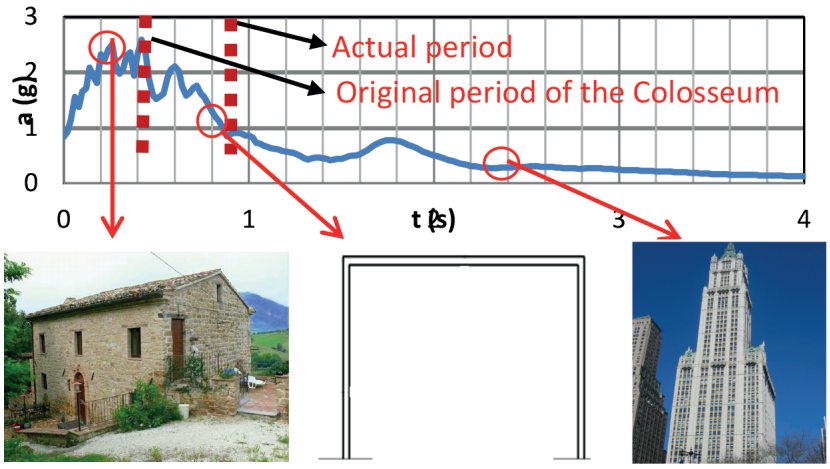


Fig. 13. (a) Earthquake Response Spectrum; (b) different effect for three samples of structure categories: rigid, frame, slender structures.

The accelerometric system installed on the monument recorded oscillations caused by recent earthquakes in Central Italy. Although the earthquake epicenters were nearly 100 kilometers from the Colosseum, resulting in mild shaking, analyzing these measurements provides a unique opportunity to understand the structure behaviour and test our predictive models [13,14]. Unfortunately, the current setup lacks instruments on the two external buttresses, which are likely the most critical parts of the structure, limiting the information we can obtain about them.

Referring to the earthquake event of October 30, 2016, which had a magnitude of 6.5, the response spectrum of the various components, shown in *Fig. 14*, indicates that the earthquake was particularly strong in the period range of 0.4 to 0.8 seconds. The periods of the first six modes of the monument are also plotted in the figure. It is a favorable outcome that the first two periods are largely outside this range, as previously noted, while the remaining four modes fall within it and are potentially affected by the seismic excitation. However, as explained earlier, higher modes (see *Fig. 10*) are less excited by uniformly distributed forces, as the seismic loads at each time instant, and therefore have a negligible impact on the overall response.

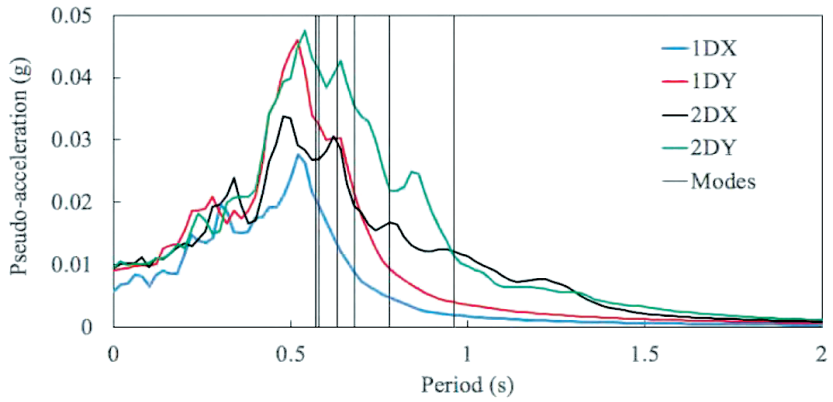


Fig. 14. Response spectra of the seismic event of October 30, 2016.

Based on the instrument setup shown in *Fig. 9*, the deformed shapes with maximum oscillation amplitude in the monument monitored portion were obtained from measurements during the seismic event. The deformations in the circumferential and radial directions are represented in *Fig. 15*. It is clear that the most affected area is the third level, which largely lacks the support from the lower radial structures in restraining the free flexion, particularly in the radial direction.

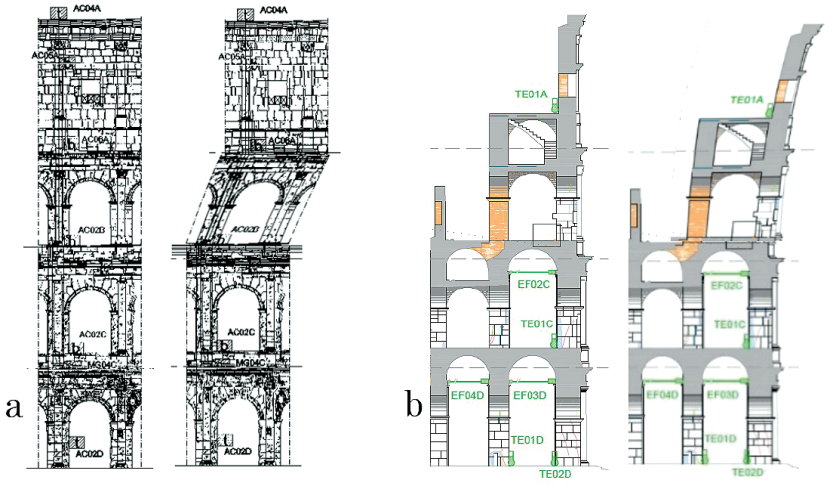


Fig. 15. Drift maximum amplitude in circumferential (a) and radial directions (b) recorded during the seismic event of October 30, 2016.

The results obtained from the recorded accelerations induced by an actual earthquake offer invaluable insights into the monument vulnerability. In the plane of the external wall (circumferential direction), a drift of 0.34 ‰ was measured between two levels, alongside a similar out-of-plane drift (radial direction), both indicating flexion in the columns of the third level in both directions. These values were measured during an earthquake recorded near the base of the monument with a peak ground acceleration of approximately 0.01g. In contrast, an expected earthquake in Rome, with a return period of 975 years, is characterized by a peak ground acceleration of around 0.14g. Assuming linear structural behaviour, this would result in a drift of 4.74 ‰. However, this value may be reduced by a factor of 1.5 to 2 due to the structure nonlinear behaviour, leading to an expected drift of about 3 ‰, which can be considered within acceptable limits.

Nonetheless, this preliminary evaluation of the seismic risk of the Colosseum necessitates a more sophisticated approach. This approach involves selecting acceptable protection levels and analyzing response data obtained from a reliable validated model for different earthquakes. Beyond assessing the overall behaviour, it is crucial to investigate local mechanisms, particularly at the top of the outer wall, where significant accelerations may occur.

The data collected from recording the monument response to future strong motions will be invaluable for understanding its dynamic behaviour and refining the predictive model to better assess the monument vulnerability. In this context, the current sensor setup should be expanded to cover critical areas that lack instrumentations, as identified by the numerical model, prioritizing locations with maximum displacement in the modal shapes.

5. Conclusions

The Colosseum was erected nearly two thousand years ago. The magnificent elliptical structure, originally designed, was highly resistant against both vertical and horizontal forces. However, foundation settlements, along with several earthquakes, have led to the collapse of significant portions of the external wall on the south side, making the structure more vulnerable, particularly to horizontal actions. Today, with modern knowledge and expertise, it is both possible and

essential to preserve the structure in its current state and prevent any further collapses.

A detailed description of the mechanical characteristics of the structure can be provided and accurate models capable of simulating its dynamic behaviour have been developed. The ability to easily determine the structure dynamic properties - such as natural frequencies and modes - based on measured responses to ambient excitations, like traffic, wind, and micro-earthquakes, is crucial for implementing an effective dynamic monitoring system. In this approach, any changes in the dynamic properties over time are observed, as they can indicate potential damage. Moreover, if the experimental data is accurate and the model is well-calibrated, the solution of an inverse problem can yield reliable insights into location and severity of damage.

As an example, a comparison of the dynamic properties obtained from two experimental campaigns conducted in 2006 and 2020 showed no significant variations in the structural characteristics, indicating that no appreciable damage occurred in the structure during this time interval.

The study concludes by discussing the effects of road traffic and potential earthquakes, both based on experimental recordings. The velocity values measured at the base and top of the monument due to traffic, across various investigations, remain within the limits set by international codes. The analysis confirms that traffic-induced vibrations are not of sufficient amplitude to cause structural damage. However, this phenomenon must be monitored over a long period to ensure ongoing safety.

Regarding seismic vulnerability, the measured response of the structure to a magnitude 6.5 earthquake during the 2016 seismic sequence in Central Italy has provided preliminary insights into the potential effects of an earthquake of the expected intensity in Rome. The initial conclusions are cautiously optimistic, but an accurate assessment of the monument seismic risk requires a reliable model and additional experimental data. The information gained from recording the monument response to future strong motions is important for enhancing our understanding of its dynamic behaviour and updating the predictive model used to assess its vulnerability more accurately. To achieve this, the current sensor setup should be enlarged to cover some critical areas, identified by numerical investigations, which presently lack sensor coverage.

REFERENCES

1. E. Romani, I. Mammone, S. Moretti, G. Pezzetti, Rome Metro Line Monitoring System: the C Line experience, *International Symposium on Field Measurements in Geomechanics*, 2018.
2. D. Capecchi, F. Vestroni, Monitoring of structural systems by using frequency data, *Earth. Eng. Struct. Dynamics*, 28(5), 447–461, 1999.
3. Morassi, A., Vestroni, F. (eds.): *Dynamic Methods for Damage Detection in Structures*. CISM International Centre Mechanical Sciences Series, Vol. 499. Springer, Wien 2008.
4. W. Fan, P. Qiao, Vibration-based damage identification methods: a review and comparative study, *Struct. Health Monit.* 10 (2011) 83–111.
5. S. Das, P. Saha, S. Patro, Vibration-based damage detection techniques used for health monitoring of structures: a review, *J. Civil Struct. Health Monit.* 6(3) 477–507, 2016.
6. F. Vestroni, A. Pau, Dynamic characterization and damage identification, in *Dynamic Inverse Problems: Theory and Application*, G. Gladwell and A. Morassi Eds., CISM Intern. Centre for Mechanical Sciences, Vol. 529, Springer 2011.
7. F. Vestroni, D. Capecchi, Damage detection in beam structures based on measurements of natural frequencies, *J. of Engineering Mechanics*, ASCE, 126(7), 761-768, 2000.
8. A. De Sortis, E. Antonacci, F. Vestroni, Dynamic identification of a masonry building using forced vibration tests, *Engineering Structures*, 27(2), 155–165, 2005.
9. F. Vestroni, A. Morassi, Structural Dynamic Identification and Damage Detection. In: Rega, G. (eds) *50+ Years of AIMETA*. Springer, pp 287-303, 2022.
10. A. Pau, F. Vestroni, Vibration analysis and dynamic characterization of the Colosseum, *Structural Control and Health Monitoring*, 15, 1105–1121, 2008.
11. A. Pau, F. Vestroni, Vibration assessment and structural monitoring of the Basilica of Maxentius in Rome, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 41(1-2), 454–466, 2013.
12. UNI 9916: Criteria for the measurement of vibrations and the assessment of their effects on buildings, 2014.
13. Vestroni, A. De Sortis, A. Pau, Measurements of the Colosseum response to environmental actions, *EASD Procedia EURODYN*, 2020.
14. F. Benedettini, A. De Sortis, G. Milana, In field data to correctly characterize the seismic response of buildings and bridges, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15(2), 643–666, 2017.

Istituto Lombardo (Rend. Scienze) 157, 135-146 (2023-2024)

ALLA SCOPERTA DI SCHEMI NASCOSTI NELLE DINAMICHE COMPLESSE: DAL PROBLEMA DEGLI N-CORPI ALLE RETI NEURALI (E RITORNO)

Nota di GIAN MARCO CANNEORI (*) e del s.c. SUSANNA TERRACINI (**)

(Adunanza del 9 novembre 2023)

SUNTO. – In questa nota presentiamo l'approccio teorico e computazionale che il nostro gruppo di ricerca sta sviluppando per ottenere evidenze di comportamenti caotici per il problema classico degli N-corpi in Meccanica Celeste. Ispirati dalla ormai nota congettura di Henri Poincaré, mostriamo come sia possibile determinare numericamente grandi insiemi di orbite periodiche e codificarle, rivelando l'esistenza di una dinamica simbolica. Infine, esploriamo una nuova idea che, impiegando algoritmi di IA, permetterà di combinare diverse orbite periodiche al fine di ottenere nuove soluzioni con ordine crescente di complessità. In questo contesto, rivediamo anche le applicazioni sulle orbite di trasporto interplanetario a bassa energia introdotte da Conley.

***

ABSTRACT. – In this note, we present the theoretical and computational approach our research group is developing to detect chaotic behaviours in the classical N-body problem of Celestial Mechanics. Inspired by the famous Poincaré conjecture, we numerically determine large sets of symmetric periodic orbits and we encode their simple motions by revealing the existence of a symbolic dynamics. Finally, we explore a new idea for combining periodic orbits to create new solutions with increasing complexity, using AI algorithms. We also revisit Conley's ideas on low-energy transport orbits.

(*) Dipartimento di Matematica "G. Peano", Università degli Studi di Torino, Italy. E-mail: gian.marco.canneori@gmail.com

(**) Dipartimento di Matematica "G. Peano", Università degli Studi di Torino, Italy. E-mail: susanna.terracini@unito.it

Il problema degli N corpi

Nel libro *Il problema dei 3 corpi* lo scrittore cinese Cixin Liu, descrivendo un mondo dove il susseguirsi delle stagioni, i mutamenti del clima e lo sviluppo di popolazioni immaginarie sono subordinati all'estrema complessità che caratterizza un sistema gravitazionale di questi 3 Soli, propone un approccio avvincente nel raccontare il caos deterministico a una platea non addetta ai lavori, citando con peculiare precisione le intricate definizioni matematiche che modellano il concetto di sistema dinamico caotico.

Il nostro gruppo di ricerca si dedica a un antico problema fisico-matematico che costituisce una generalizzazione del sistema di 3 Soli descritto da Cixin Liu: il *problema degli N-corpi*. Si tratta dello studio delle traiettorie di un numero N di corpi celesti nello spazio, soggetti esclusivamente alla reciproca attrazione gravitazionale e con masse costanti nel tempo.

Dal punto di vista matematico il moto di un sistema di corpi materiali è regolato da un sistema di equazioni differenziali ordinarie. Se indichiamo con $x_i\,(t)$ la posizione dell'i-esimo corpo nello spazio, l'accelerazione di quel corpo è data dalla velocità di variazione della sua velocità $(\dot{x}_i)(t)$, in definitiva, dalla derivata seconda della posizione rispetto al tempo:

$$\underbrace{m_i \ddot{x}_i}_{\text{massa} \times \text{accelerazione}} = \underbrace{F_i}_{\text{forza}}, \qquad i = 1, \ldots, n$$

Il moto dei pianeti e degli altri corpi celesti è regolato dalla legge di Newton della gravitazione universale secondo cui la forza di attrazione gravitazionale di un corpo su un altro è diretta secondo la congiungente dei due corpi ed ha intensità proporzionale all'inverso del quadrato della distanza ed al prodotto delle masse.

La forza totale agente su di un corpo è uguale alla somma di tutte le forze di attrazione esercitate su questo dagli altri:

$$F_i = \sum_{j \neq i} F_{ij}, \qquad i = 1, \ldots, n$$

Nel caso dei tre corpi si tratta del sistema di equazioni differenziali

$$\begin{cases} m_1\ddot{x}_1 = Gm_1m_2\dfrac{x_2 - x_1}{\|x_2 - x_1\|^3} + Gm_1m_3\dfrac{x_3 - x_1}{\|x_3 - x_1\|^3} \\ m_2\ddot{x}_2 = Gm_2m_1\dfrac{x_1 - x_2}{\|x_1 - x_2\|^3} + Gm_2m_3\dfrac{x_3 - x_2}{\|x_3 - x_2\|^3} \\ m_3\ddot{x}_3 = Gm_3m_1\dfrac{x_1 - x_3}{\|x_1 - x_3\|^3} + Gm_3m_2\dfrac{x_2 - x_3}{\|x_2 - x_3\|^3} \end{cases}$$

dove i numeri positivi m_i sono le masse dei corpi la cui posizione è rappresentata dai vettori tridimensionali

$x_i(t)$, funzioni del tempo t.

Se, grazie alla legge gravitazionale di Newton, siamo in grado di descrivere con formule semplici le traiettorie di due corpi, come potrebbero essere la Terra e la Luna, sorprendentemente, quando si sale a tre o più corpi la possibilità di descrivere con una formula matematica le loro traiettorie si perde. In altre parole, in questo caso le traiettorie sembrano evolvere senza uno schema preciso. Si parla allora di *sistema caotico*.

Quanto detto è stato osservato da Henri Poincaré, famoso matematico francese che, già a fine '800, ha formulato una congettura sulla caoticità di questo sistema. Si può pensare a un sistema caotico come a una coreografia segreta tra eventi o fenomeni, un intricato intreccio di imprevedibili mosse che, apparentemente casuali, nascondono un misterioso ordine da cui sono guidate; uno schema in cui un'impercettibile variazione può dare vita a risultati sorprendenti e anche molto diversi tra loro. C'è dunque un ordine segreto nel caos. Ma come si può cercare l'ordine nel caos del problema degli *N*-corpi?

Occorre anche verificare rigorosamente che quello degli *N*-corpi è davvero un sistema caotico, ma dimostrarlo in modo diretto è molto difficile. Un approccio intermedio consiste nell'identificare traiettorie via via sempre più complesse, che fungono da indicatori di una dinamica globale potenzialmente caotica.

Orbite periodiche

Il matematico che prima di tutti intuì l'importanza delle orbite periodiche per la comprensione della dinamica del problema degli *N*–corpi fu Henri Poincaré:

> *"D'ailleurs, ce qui nous rend ces solutions périodiques si précieuses, c'est qu'elles sont, pour ainsi dire, la seule brèche par où nous puissons essayer de pénétrer dans une place jusqu'ici réputée inabordable…".*

Secondo Poincaré, tutte le traiettorie sono approssimate da quelle periodiche:

> *"…voici un fait que je n'ai pu démontrer rigoureusement, mais qui me parait pourtant très vraisemblable. Etant données des équations de la forme définie dans*[1] *le n. 13 et une solution particulière quelconque de ces équations, on peut toujours trouver une solution périodique (dont la période peut, il est vrai, être très longue), ositive la différence entre les deux solutions soit aussi petite qu'on le veut, pendant un temps aussi long qu'on le veut."*

Il prototipo di sistema caotico e la dinamica simbolica

Introduciamo lo shift di Bernoulli (spostamento a destra): un sistema dinamico nello spazio delle successioni

$$T_r\colon \{0,1\}^{\mathbf{Z}} \quad \{0,1\}^{\mathbf{Z}}\colon (s_k) \quad T_r((s_k)) = (s_{k+1}),$$

che sposta di un posto a destra gli elementi della successione:

$$(\ldots, s_{-k}, \ldots, s_{-1}, s_0, s_1, \ldots, s_k \ldots) \quad (\ldots, s_{-k+1}, \ldots, s_0, s_1, s_2, \ldots, s_{k+1} \ldots).$$

In questo spazio, punti sono successioni bi-infinite di zeri e uni:

$$(s_k) = (\cdots, 0,1,1,1,0,0,1,0,0,1,1,0,\cdots)$$

Fra due elementi di questo spazio possiamo definire la distanza:

$$d((s_k),(t_k)) \doteq \sum_{k\in\mathbb{Z}} \frac{1}{2^{|k|}} |s_k - t_k|,$$

di modo che lo shift sia un omeomorfismo. L'*orbita* di $x=(s_k)$ è la successione delle iterate $(T_r^n(x))_n$, che possiamo identificare con x stesso. Fra le possibili orbite, riconosciamo le orbite periodiche semplici:

---

[1] La formula n. 13 menzionata da Poincaré è l'equazione di Hamilton.

$(s_k) = (\cdots, 0,1,0,1,0,1,0,1,0,1,0,\cdots)$ periodo 2

$(s_k) = (\cdots, 0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,0,\cdots)$ periodo 5.

Osserviamo la presenza di un'orbita densa, che cioè passa vicino ad ogni altra

$(s_k) = (\cdots,$
$0, \quad 1,$
$0,0, \quad 0,1, \quad 1,0, \quad 1,1,$
$0,0,0, \quad 0,0,1, \quad 0,1,0, \quad 1,0,0, \quad 1,0,1, \quad 1,1,0, \quad 1,1,1,$
$\cdots).$

Il sistema dinamico discreto $(\{0,1\}^{\mathbb{Z}}, T_r)$ gode delle seguenti proprietà:

- ha un insieme denso e numerabile di orbite periodiche,
- ha un'elevata sensibilità rispetto alle condizioni iniziali,
- ha un'entropia topologica positiva.

Cosa significa *elevata sensibilità rispetto alle condizioni iniziali*? L'effetto farfalla, coniato da Edward Lorenz nel 1961, teorizza che un evento minuscolo, come un minuscolo battito d'ali di una farfalla in Amazzonia, potrebbe ipoteticamente mettere in moto una catena di eventi che potrebbe causare un tornado in Texas pochi giorni dopo. Nello stesso modo, una differenza di una cifra remota della nostra successione (appena rilevabile dalla nostra nozione di distanza), dopo un numero opportunamente grande di iterazioni, arriverà a trovarsi nella posizione zero, rendendo la distanza almeno unitaria.

Possiamo arricchire il nostro prototipo di sistema caotico considerando un insieme con più simboli S invece di due soltanto (zero e uno) e le successioni bi-infinite di elementi di questo insieme. Dato un sistema dinamico (X,σ), diremo che questo ammette una dinamica simbolica se esiste un sottosistema (Π,σ) ed una mappa suriettiva $\pi:\Pi\rightarrow S^{\mathbb{Z}}$ che rende commutativo il diagramma:

$$\begin{array}{ccc} \Pi & \xrightarrow{\sigma} & \Pi \\ \pi \downarrow & & \downarrow \pi \\ S^{\mathbb{Z}} & \xrightarrow{T_r} & S^{\mathbb{Z}} \end{array}$$

In altre parole il sottosistema dinamico (Π,σ) è semi-coniugato allo shift di Bernoulli con simboli S.

La fabbrica delle orbite

Nei primi anni 2000, insieme a Davide Ferrario abbiamo cominciato a sviluppato un software basato sui nostri risultati teorici, che ha ispirato questo progetto. Con questo strumento è possibile determinare alcune soluzioni del problema che rispettano dei vincoli di simmetria geometrica. Utilizzando questo software abbiamo creato un database di orbite semplici, ovvero soddisfacenti un unico vincolo di simmetria; ne è un esempio (citato anche dallo stesso Cixin Liu) il famoso "8" di Alain Chenciner e Richard Montgomery, dove 3 corpi della stessa massa si inseguono lungo una traiettoria a forma di 8 rovesciato (*Fig. 1*).

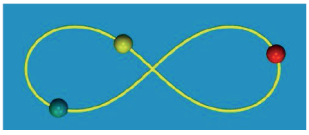


Fig. 1.

Le simmetrie dell'otto

Il più semplice del gruppo di simmetria che danno luogo all'otto si può definire come segue: le posizioni dei tre corpi si indicano con

$$x(t)=(x_1(t),x_2(t),x_3(t)).$$

Allora il gruppo di simmetrie si genera attraverso le due seguenti riflessioni spazio–temporali: la prima delle quali è:

$$x_1(-t)=-x_3(t),x_2(-t)=-x_2(t),x_3(-t)=-x_1(t)$$

Notiamo che al tempo $t = 0$ il secondo corpo è nell'origine mentre il primo è opposto al terzo. La seconda simmetria è simile, ma scambia i ruoli del corpo due con il corpo tre:

$$x_1(1-t)=-x_2(t),x_2(1-t)=-x_1(t),x_3(1-t)=-x_3(t)$$

Stavolta, al tempo $t = 1$ il terzo corpo è nell'origine mentre il primo e il secondo si oppongono. Componendo le due riflessioni spazio-temporali con uno scambio otteniamo

$$x_1(t-1)=x_1(-(1-t))=-x_3(1-t)=x_3(t)$$

e analogamente

$$x_2(t-1)=x_1(t), x_3(t-1)=x_2(t).$$

Cioè i tre corpi si inseguono sulla stessa curva.

SYMORB: UN SOFTWARE PER TROVARE LE ORBITE SIMMETRICHE

Ultimamente abbiamo continuato a perfezionare il software basato sui nostri risultati teorici e abbiamo iniziato un'esplorazione sistematica delle orbite con simmetrie spazio-temporali. Con questo strumento è stato possibile scoprire una grande quantità di soluzioni del problema dei 3-corpi che rispettano dei vincoli di simmetria geometrica. Utilizzando questo software abbiamo quindi creato un database orbite semplici, ovvero soddisfacenti un unico vincolo di simmetria, che costituiranno i mattoncini da cui partire per cercare le orbite più complesse (*Fig. 2*).

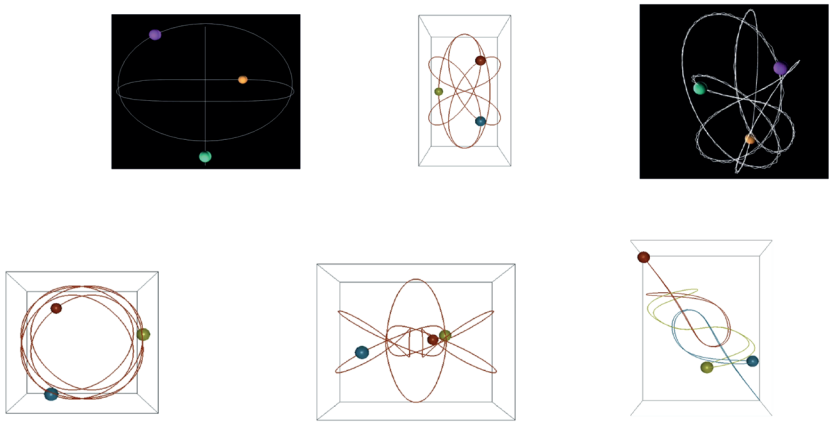


Fig. 2.

Come risultato preliminare abbiamo scoperto alcune orbite simmetriche già meno semplici di quanto ci si possa aspettare, dove vediamo i corpi impegnati in complicate coreografie (*Fig. 3*).

Pensiamo che si possa poi passare da orbite semplici a orbite complesse sfruttando algoritmi di intelligenza artificiale che, allenati opportunamente, riescano a produrre delle soluzioni che passino molto vicino a tante orbite semplici, creando delle traiettorie sempre più intricate.

Inoltre, stiamo sviluppando metodi di classificazione per valutare la complessità delle orbite, per sapere ad esempio quanto una soluzione minimizza il dispendio di energia. Con l'aggiunta di queste informazioni sarà infatti possibile istruire una rete neurale a individuare orbite sempre più complicate, fornendo quindi forti evidenze della caoticità del sistema.

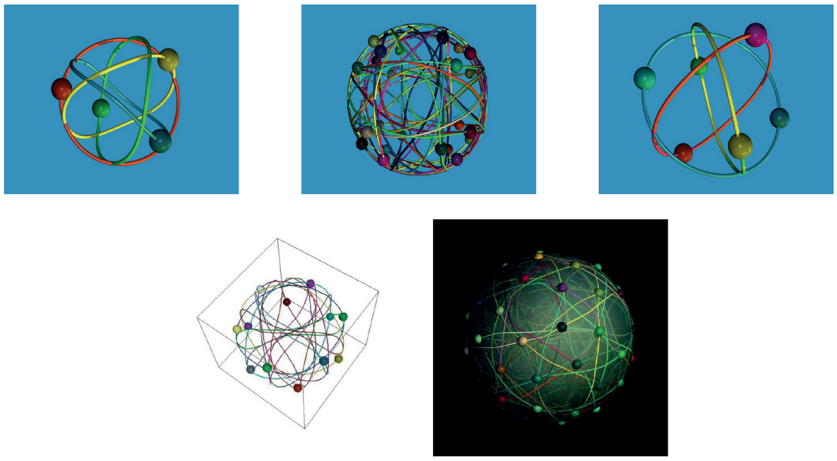


Fig. 3.

Intendiamo eseguire una ricerca computazionale assistita dall'intelligenza artificiale su larga scala per trovare soluzioni complesse di sistemi a *N*-corpi (e altri sistemi dinamici).

Il nostro obiettivo generale è quello di utilizzare macchine parametriche (una recente generalizzazione della rete neurale artificiale) per generare soluzioni periodiche complesse lavorando nello spazio delle curve e seguendo un approccio variazionale.

Ciò consentirà di scoprire nuove soluzioni periodiche complesse attraverso una combinazione di metodi analitico-funzionali. In questo il nostro approccio si differenzia da altre ricerche svolte nel passato attraverso la soluzione di problemi ai dati iniziali.

L'idea è di addestrare macchine parametriche alla generazione di archi di traiettoria, partendo da un insieme di traiettorie equivarianti (SYMORB) note. Utilizzando la programmazione differenziabile, saremo in grado di indirizzare la macchina verso la scoperta di soluzioni con caratteristiche specifiche (come la periodicità o altre simmetrie) e di ordine crescente di complessità.

Il nostro approccio è modulare e consiste in diverse fasi interconnesse.

- Addestrare macchine parametriche a generare archi di traiettoria, partendo da un set di dati di traiettorie equivarianti (SYMORB).

- Dotare lo spazio delle traiettorie di una struttura algebrica che codifichi la componibilità degli archi di traiettoria. Addestreremo macchine parametriche per generare incollamenti omogenei tra archi di traiettoria. Anche in questo caso, la definizione di una funzione di costo appropriata ci permetterà di valutare la qualità degli incollamenti e di spingere la macchina verso quelli ottimali.

- Esplorare lo spazio risultante di traiettorie complesse e la loro codifica nei *layers* intermedi della macchina parametrica.

Nonostante il suo respiro prevalentemente teorico, la nostra ricerca ammette interessanti applicazioni pratiche. Le orbite complesse che stiamo cercando potrebbero infatti essere utilizzate come transizioni di fase in varie situazioni, ad esempio nel cambio di rotta di un satellite con il minimo consumo di carburante (*transfer orbits*). Il fascino nell'affrontare questo tipo di problemi matematici risiede proprio nell'equilibrio tra la notevole complessità teorica e le svariate applicazioni reali che possono derivare dalla comprensione di fenomeni fisici naturali.

L'ambiente spaziale è modellato da un sistema dinamico complesso ad alta dimensione, affetto da incertezza (*Fig. 4*). È un sistema caotico le cui orbite complesse si possono utilizzare per viaggi spaziali

gratuiti o a basso costo, sviluppando e portando all'estremo le idee di Conley della Rete di Trasporto Interplanetario.



Fig. 4.

BIBIOGRAFIA

Baranzini S., Canneori G.M. - Chaotic phenomena for generalised N-centre problems. *Archive for Rational Mechanics and Analysis.* (2024), no. 3, Paper No. 39, 55 pp.

Barutello V., Canneori G.M., Terracini S. - Symbolic dynamics for the anisotropic N-centre problem at negative energies. *Archive for Rational Mechanics and Analysis.* 242 (2021), no. 3, pp. 1749-1834.

Chenciner A., Montgomery R. - A remarkable periodic solution of the three-body problem in the case of equal masses. *Annals of Mathematics.* (2) 152 (2000), no. 3, pp. 881-901.

Conley, C. C. - Low energy transit orbits in the restricted three-body problem. *SIAM Journal on Applied Mathematics.* 16 (1968), pp. 732-746.

Ferrario D.L., Terracini S. - On the existence of collisionless equivariant minimizers for the classical n-body problem. *Inventiones Mathematicae.* 155 (2004), no. 2, pp. 305-362.

Fusco, G., Gronchi, G. F., Negrini, P. - Platonic polyhedra, topological constraints and

periodic solutions of the classical N-body problem. *Inventiones Mathematicae.* 185 (2011), no. 2, pp. 283-332.

[Koon, W. S.; Lo, M. W.; Marsden, J. E.; Ross, S. D. - "Heteroclinic connections between periodic orbits and resonance transitions in celestial mechanics" *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science.* 10 (2000), no. 2, pp. 427-469.

Lagrange, J.L., Serret, P. - Essai sur le Problème des trois Corps. *Oeuvres de Lagrange*. Tome 6, pp. 229-332.

Poincaré H., Méthodes Nouvelles de la Mécanique Céléste (1892).

Poincaré, H. - Sur le problème des trois corps et les équations de la dynamique. *Acta Mathematica.* 13 (1890) no. 1-2.

[Sundman, K.F. - Mémoire sur le problème des trois corps. *Acta Mathematica.* (1913), no. 1, pp. 105-179.

Istituto Lombardo (Rend. Scienze) 157, 147-216 (2023-2024)

LA GEOLOGIA MARINA DURANTE IL REGNO D'ITALIA: 1861-1946 (tecnologia, industria, ricerca)

Nota del s.c. CESARE CORSELLI (*)

(Adunanza del 23 novembre 2023)

SUNTO. – La ricerca marina italiana non ebbe un particolare, organico, sviluppo tra il 1861 e il 1946 tranne la parentesi legata alle attività del Regio Comitato Talassografico tra il 1909 e il 1924. La geologia marina, a causa delle difficoltà tecniche legate alla ricerca, fu poco supportata e le attività principali si manifestarono nello studio dei sedimenti ottenuti dai sondaggi della Marina Militare e delle industrie private interessate alla posa dei cavi telegrafici sottomarini. In questo settore ricercatori ed operatori milanesi si distinsero particolarmente. Le altre attività riguardarono essenzialmente lo studio sull'erosione dei litorali e le ricerche gravimetriche. Alla fine del periodo considerato le riforme attuate a livello del CNR costrinsero la ricerca a ripartire quasi da zero. In generale i problemi principali furono collegati ad una visione poco lungimirante da parte dei politici dell'epoca.

***

ABSTRACT. – Italian marine research did not experience a significant organic development between 1861 and 1946, except for the parenthesis linked to the activities of the Regio Comitato Talassografico Italiano between 1909 and 1924. Marine geology, due to the technical difficulties linked to research, received limited support and the main activities consisted in the study of the sediments obtained from the surveys of the Navy and of private industries, related to the laying of submarine telegraph cables. In this sector, Researchers and operators from Milano particularly distinguished themselves. The other activities essentially concerned the study of coastal erosion and gravimetric research. At the end of such period, the reforms implemented within the CNR forced research to start almost from scratch. In general, the main problems were linked to a short-sighted vision from the politicians of the time.

(*) Professore di Paleontologia e Paleoecologia dell'Università degli Studi di Milano-Bicocca, Italy. E-mail: cesare.corselli@unimib.it

1. La ricerca in geologia marina dal XIX secolo fino alla Seconda Guerra Mondiale

I principali problemi che, a livello mondiale, incontrò la geologia marina furono di carattere tecnico e risiedevano nella capacità di prelevare un campione del fondo marino, di cui era stata misurata, in modo all'inizio approssimato, la profondità. Quest'ultimo dato, importantissimo per la navigazione costiera e negli estuari, veniva via via perdendo di interesse da parte degli idrografi man mano che il fondo marino si allontanava dalla superficie. Solo con le "vere" campagne di ricerca scientifica e a causa della necessità di posare i cavi telegrafici, a metà del XIX secolo si cominciarono a perfezionare le tecniche per gli scandagli e il prelievo di sedimenti dal fondo.

Georg Wust nel 1964 in *The Major Deep-Sea Expeditions and Research Vessels 1873-1960*, in quella che Lui definì *Era of exploration 1873-1924*, non segnalò nessuna crociera che prevedesse anche lo studio della geologia marina salvo quella della Challenger (1873-1876). Bisognerà attendere il periodo compreso fra il 1925 e il 1940, in quella che Lui definirà *Era of National Systematic Surveys*, per trovare crociere che avevano fra gli obiettivi anche lo studio della geologia e dei sedimenti marini: la nave tedesca Meteor (1925-1927), la olandese Willebrord Snellius (1929-1930) e la statunitense E.W. Scripps (1938).

Wust non citò la campagna della nave austro-ungarica Novara che, dal 1857 al 1859, affidata all'*Imperiale Accademia delle Scienze di Vienna* e con a bordo studiosi e specialisti, sotto la direzione del geologo von Hochstetter e dello zoologo von Frauenfeld, effettuò il giro del mondo. Circumnavigò l'Africa, l'India, toccò l'Indonesia, la Cina, L'Australia, la Nuova Zelanda. Traversò il Pacifico verso il Sud America costeggiandolo sino in Atlantico e, traversatolo, rientrò in Mediterraneo.

2. Il ruolo della cartografia nautica

Paola Presciuttini (2000) ha ben delineato lo scopo della cartografia scienza multidisciplinare. Legata alla sicurezza della navigazione, ma anche strumento di volontà espansionistica e strumento di conquista militare o di penetrazione commerciale, la cartografia nautica è diven-

tata con il tempo come una sorta di linguaggio comune a naviganti di lingue e civiltà differenti.

L'Italia è stata la terra di origine della *moderna* cartografia nautica nel tardo Medio Evo, come testimoniato dalla *Carta Pisana*, anonima, attribuita alla metà del 1200, rappresentante il Mar Mediterraneo, il Mar Nero e la costa atlantica dell'Europa fino all'attuale Olanda. Una carta portolanica, con due rose dei venti (Mediterraneo occidentale e Orientale) da cui si dipartono sedici linee lossodromiche, corrispondenti alle direzioni dei venti.

I grandi produttori di carte nautiche fino al XVI secolo furono genovesi, veneziani, spagnoli, portoghesi e francesi. Gerhard Kremer (1512-1594), latinizzato in Gerardus Mercator, matematico, astronomo e cartografo fiammingo, pubblicò nel 1569 una carta del globo terrestre: la *Nova et actua orbis terrae descriptio ad usum navigati emendata accomodata*.

Per la cartografia nautica il 1600 fu l'età d'oro per l'Olanda, dove Abraham Ortelius aveva pubblicato nel 1570 il *Theatrum*, la prima sistematica raccolta geografica comprendente 66 carte particolari di Europa, Asia, Africa e una carta generale per ciascun continente, comprese le Americhe.

In Inghilterra la cartografia nautica si sviluppò come espressione autonoma solo a partire dal 1700, essendo negli anni precedenti state utilizzate riedizioni in lingua inglese di carte olandesi o francesi. Nel 1795 fu fondato l'Hydrographic Department, portando la Gran Bretagna ad assumere la leadership della cartografia nel mondo, con una produzione nell'arco di un secolo di quasi 4.000 carte.

Giovanni Antonio Rizzi-Zannoni (1736-1814), astronomo e matematico, dopo aver lavorato per Austriaci e Francesi, fu chiamato dai Borboni a fondare e dirigere, nel 1781, l'Officio Topografico del Regno di Napoli, che nel corso degli anni pubblicò la carta costiera Adriatica (dal Tronto a Santa Maria di Leuca).

La carta fu completata con la collaborazione della Marina Imperiale austro-ungarica che, riorganizzando a Milano l'Istituto geografico militare dell'I. R. Stato Maggiore austriaco, trasferito poi a Vienna nel 1839, e utilizzando un Bureau topografico, voluto da Napoleone Buonaparte, pubblicò, in collaborazione con l'Ufficio Topo-idrografico napoletano e con l'ammiraglio H.S. Smyth della Marina britannica, nel 1822-24, la *Carta di cabotaggio del Mare Adriatico* in scala 1:750.000.

3. Il viaggio di circumnavigazione della R.N. Magenta 1865-1868

Indubbiamente il viaggio della Magenta fu il propulsore alla nascita dell'interesse alla ricerca marina, anche grazie alla diffusione dei risultati pubblicati o presentati ai congressi nazionali e internazionali da Enrico H. Giglioli.

Il viaggio verso l'estremo oriente (Giappone e Cina), programmato per il 1864, prevedeva che sulla nave fosse imbarcata una commissione scientifica, con l'incarico di compiere alcuni studi sulla geografia fisica, sull'astronomia e sulla storia naturale …. e le principali accademie scientifiche del regno avevano formulato i loro programmi" (Giglioli, 1875). La circumnavigazione iniziò nel 1865 da Montevideo e si concluse a Napoli nel 1868. Giglioli nel suo libro *Viaggio intorno al globo della pirocorvetta italiana Magenta* (*Fig. 1*) concluse così la sua narrazione:

> Duolmi però di dover dire che la Magenta, di ritorno in patria dopo aver circumnavigato il Globo e compiuto una nobile missione, fu accolta a Napoli con gelida indifferenza; qual contrasto con l'accoglienza fatta alla Novara! …Sono passati vari anni, ma l'amaro di quel freddo ricevimento non si dimentica! Sola la Società geografica italiana per mezzo del suo presidente comm. Cristoforo Negri, si ricordò in quei giorni che la Magenta aveva inaugurato una nuova Era per la Marina italiana; e mandò un saluto ed il benvenuto a quello Stato Maggiore ed a quell'equipaggio.

4. Il ruolo della Regia Marina, dell'Istituto Idrografico e i primi studi geologici

L'attività di ricerca nel campo marino dei geologi nazionali fu, per decenni, strettamente legata all'analisi dei saggi di fondo effettuati nelle operazioni di scandagliamento da parte delle navi idrografiche della Marina, dipendenti prima dall'Ufficio centrale per il servizio scientifico della marina, creato e successivamente soppresso a Livorno e poi ricostituito a Genova nel 1872 e ridenominato, nel 1900, Istituto Idrografico della Regia Marina. Le navi della Regia Marina effettuarono numerosi viaggi di circumnavigazione come quello effettuato dalla nave Magenta. Durante tutti questi viaggi di natura politica ed economica non mancarono da parte degli ufficiali comandanti eseguire tutta una

serie di operazioni di scandaglio, routine normale per una nave militare, con la raccolta dei sedimenti che costituivano il fondo marino.

Fra le navi idrografiche un ruolo importante fra il 1878 il 1894 fu rivestito dalla R.N. Washington (*Fig. 2*) così descritta in *Pelagos* (1884) da Giglioli:

> …una lunghezza di chiglia di m. 57,53, di coperta di m. 62,22; la sua larghezza massima è di m. 9,53. La sua immersione con carico e caldaie piene è di m. 4,32 a poppa e di m. 2,94 a prora. Ha una velocità massima di 9 miglia all'ora… Porta a bordo tre bellissime barche a vapore di cui una in acciaio, costruite da Yarow di Poplar (Londra), cinque superbe baleniere, due battelli e barche in tela pieghevoli, sistema Berton. L'equipaggio era di 148 uomini, compreso lo Stato Maggiore… … Per gli attrezzi per dragare, il comandante Magnaghi ed io ci attenemmo esclusivamente a quelli adoperati dal Sigsbee e che erano la ultima espressione delle innovazioni e dei perfezionamenti frutto di ripetute campagne talassografiche.

Il comandante della nave fu per lungo tempo Giovanni Battista Magnaghi, oceanografo e ammiraglio, comandante dell'Ufficio Scientifico Sperimentale e Direttore dell'Istituto Idrografico della R. Marina. Fu inventore di diversi strumenti: scandaglio a filo, bussola a liquido, circo a riflessione, bottiglia a rovesciamento, termometro a rovesciamento. Con Enrico H. Giglioli fu il promotore di una serie di campagne oceanografiche a bordo della Washington fra il 1881 e il 1884.

Il prelievo di campioni dal fondo fu per lungo tempo un problema di carattere tecnico. Il mantenere la nave ferma, specialmente su fondi di elevata profondità, la natura del cavo utilizzato e la tipologia della sonda da utilizzarsi furono le difficoltà che si manifestarono sin dall'inizio e che diedero luogo ad una serie di scandagli messi a punto dalle diverse marine.

Nel 1873 Carlo Mirabello sulla *Rivista Marittima*, nel descrivere i lavori idrografici eseguiti dalla R. Marina in Adriatico, trattò degli scandagli effettuati durante le attività idrografiche tra il 1867 e il 1870 e ottenuti con appositi scandagli a cucchiaia che fornivano copiosi saggi del fondo del mare, ognuno dei quali, raccolto, in vasetti portava segnato sulla propria etichetta il numero d'ordine, la profondità, la latitudine e la longitudine rispettiva…

> offrendo materia al geologo per l'analisi della formazione geognostica degli strati che lo compongono.

In una nota a piè di pagina l'Autore precisava che fin dal 1870 veniva inviata alla Società Geografica Italiana una cassetta contente i saggi. Difficile ritrovare nell'editoria scientifica del periodo lavori che riguardino tali campioni.

In previsione di un viaggio di circumnavigazione della R.N. Garibaldi nel 1873, sul *Bollettino della Società Geografica Italiana*, Angelo Manzoni pubblicò *Le ricerche scientifiche nelle profondità marine* dove descrisse gli strumenti di scandaglio e di dragaggio principalmente utilizzati. Lo stesso autore aveva pubblicato sulla *Rivista Marittima*, nel 1871, l'articolo *Delle esplorazioni nelle grandi profondità marine- Progetto e schema di una spedizione italiana per la esplorazione delle grandi profondità del Mediterraneo*, che faceva da appendice ad un suo lavoro precedente, sempre pubblicato sulla stessa rivista nei mesi di luglio e agosto del 1870. Manzoni si rifaceva in entrambi i lavori al *Preliminary Report of the scientific exploration of the deep in H.M. Porcupine, during the summer of 1869,* pubblicato nei *Proceedings of the Royal Society*.

In effetti i lavori di scandagliamento da qualche decennio oltre ad essere legati alla sicurezza della navigazione erano stati intensificati per la posa sul fondo marino dei cavi telegrafici che cominciavano ad unire i diversi continenti e le loro isole.

Nel 1874 sulla *Rivista Marittima* (I: 116-124) nel lavoro *MALTA residuo di una gran terra sommersa -schizzo geologico* Arturo Issel, nel descrivere brevemente la geologia e la morfologia delle isole maltesi, affermò:

> Sono piuttosto inclinato ad ammettere che l'Arcipelago di Malta fosse un poco più esteso che al presente, e tutto al più facesse corpo colla estremità meridionale della Sicilia, alla quale è d'altronde non poco somigliante per la costituzione geologica, per la configurazione del suolo ….

L'Autore non ammise l'ipotesi che l'arcipelago rappresentasse un ponte fra l'Africa e la Sicilia, come aveva sostenuto nel 1854 Thomas Abel Brimage Spratt, idrografo e scienziato inglese.

Un primo resoconto sulla natura dei fondi marini fu pubblicato, sempre sulla *Rivista Marittima*, nel novembre 1877, quale risultato degli scandagli effettuati dalla R. Nave-scuola Vittorio Emanuele nell'Oceano Atlantico sul banco Gorringe, con uno scandaglio Brooke (si veda più avanti). La massima profondità raggiunta fu di -1600 metri

e fu recuperata della sabbia corallina, con una misura della temperatura sul fondo di 10°C; l'operazione fu effettuata nell'arco di poco più di un'ora.

Descrivendo le varie tipologie di scandagli utilizzabili Arturo Issel (1881) descrisse anche lo scandaglio di Brooke (*Fig. 3*), utilizzato a bordo della Vittorio Emanuele.

Lo scandaglio Brooke, dal nome del suo inventore, era stato descritto da Matthew F. Maury nel suo libro *The physical geography of the sea*. Il tubo centrale, al cui interno era spalmato del sapone o del sego, una volta penetrato nel fondo marino, grazie al peso della palla di cannone, riportava in superficie un saggio del fondo, mentre il peso veniva sganciato. Maury nel suo libro riportò una lettera, datata 29 gennaio 1856, di J.W Bailey, professore di chimica, mineralogia e geologia all'Accademia Militare di West Point, dove venivano illustrati alcuni dei risultati dell'esame microscopico di diversi campioni provenienti dal Nord Pacifico. Nelle sue osservazione Bailey notò:

> All the specimens contain some mineral matter, which diminishes in proportion to the depth…. In the deepest soundings… (-2.700 e -1.700 fathoms) …All these specimens are very rich in the silicious shells of the Diatomaceae….a considerable number of silicious spicules of sponges and of the beautiful shells of Polycistinae.

Heidi M. Dierssen e Albert E. Theberge in *Bathymetry: Histoty of Seefloor Mapping* (2014) scrissero che i problemi e le imprecisioni inerenti alla realizzazione di batimetrie precise, legate ad esempio all'angolo di discesa dovuto alle correnti e allo scarroccio della nave, determinando così una posizione non precisa di quando la sonda toccava il fondo, portarono allo sviluppo del sistema ideato da William Thomson negli anni '70 dell'Ottocento. Il sistema di sondaggio con cavetto di pianoforte N. 2 era una tecnica line-and-sinker (letteralmente lenza e piombino) circa tre volte più veloce del vecchio sistema con corda di canapa. A causa della minore sezione trasversale del cavetto (*vs.* corda di canapa), poco influenzato dalla superficie e dalle correnti, si otteneva meno tempo per effettuare il sondaggio e una esatta indicazione di quando il peso toccava il fondo. Il metodo era approssimativamente un ordine di grandezza più preciso di un sondaggio con corda di canapa (un errore di 10-20 m in 2000-3000 braccia *vs.* un errore di 100 m con la canapa).

La Sounding Machine di Thomson (*Fig. 4*) e sue varianti, la Sigsbee Sounding Machine, sviluppata negli Stati Uniti dal Geodetic Survey (USC&GS) e la Lucas Sounding Machine sviluppata in Inghilterra, permisero di delineare le grandi caratteristiche dell'oceano mondiale prima dell'introduzione di sistemi di sonorizzazione acustica successivi alla Prima Guerra Mondiale.

5. La Società Geologica Italiana

I sedimenti campionati attrassero l'attenzione dei geologi italiani solo parzialmente. Solo particolari fenomeni geologici (eruzioni vulcaniche, terremoti e tsunami) attrassero l'attenzione degli studiosi di quegli anni e a volte il loro ruolo venne sostituito dagli ingegneri e dai fisici.

La Società Geologica Italiana fu fondata a Bologna il 29 settembre 1881. Le ricerche geologiche per un lungo periodo di tempo, anche per la mancanza di strumenti adeguati, si occuparono marginalmente dell'ambiente marino, almeno fino agli inizi degli anni '60 del XX secolo.

Arturo Issel nel 1881 aveva pubblicato per conto del Ministero di Agricoltura, Industria e Commercio, in collaborazione con diversi autori, *Istruzioni Scientifiche per Viaggiatori*, un volume di 556 pagine che comprendeva anche una parte dal titolo *ESPLORAZIONE DELLE PROFONDITÀ MARINE*, dove descriveva le varie tipologie di scandaglio in uso, le draghe e il loro impiego.

Nel marzo 1882 Giovanni Chierchia sulla *Rivista Marittima* pubblicò *Esplorazioni Abissali e Talassografiche eseguite dal r. piroscafo Washington durante la campagna idrografica del 1881. Mezzi e modo di rastrellare il fondo*. L'Autore descrisse per lo più i sistemi per il dragaggio utilizzati a bordo della nave. Per tali operazioni si utilizzarono 6.000 metri di un filo d'acciaio zincato a treccia con resistenza fino a 4 t. Una robusta gru di ferro, con puleggia in bronzo, era posizionata sul castello di prora a dritta del bompresso. Per evitare sforzi eccessivi sul filo per rollio o beccheggio della nave o per eccessiva resistenza al fondo veniva utilizzato poi un ammortizzatore, un po' diverso da quello utilizzato sulle navi inglesi o americane

Gli scandagli utilizzati nel corso delle campagne della Vettor Pisani furono descritti in dettaglio, sulla *Rivista Marittima* da Marcacci nel 1885 e dimostrarono la difficoltà delle operazioni a grande profondità utilizzando gli scandagli dell'epoca. A bordo della nave i problemi furono

legati da un lato all'utilizzo di cavi, di diversa natura, (dalla canapa al filo d'acciaio per pianoforte), dall'altro al dover adattare e modificare gli strumenti classici utilizzati da navi straniere nel corso delle diverse crociere.

Venne illustrato uno scandaglio modificato ad opera del comandante Giuseppe Palumbo (*Fig. 5*).

Pochi giorni prima di essere armata per la campagna del 1884, l'11 maggio, la Washington salpava dal porto di Genova per una verifica del funzionamento degli strumenti e apparati ad uso talassografico. Arturo Issel, Giacomo Doria, Enrico D'Albertis e Decio Vinciguerra furono invitati a bordo. Le prove, durate un giorno, consentirono l'uso degli scandagli e del gangano e permisero di ottenere una serie di campioni di fondo compresi fra -310 e -750 metri di profondità. Arturo Issel (1885) analizzò e descrisse dal punto di vista petrografico, mineralogico e biologico il contenuto di 3 saggi. Fu uno dei primi lavori di geologia marina pubblicati in Italia su *Bollettino del Regio Comitato Geologico* (n.5 e 6). I campioni erano stati prelevati usando lo scandaglio Magnaghi:

> …un tubo cilindrico d'acciaio, il quale per il proprio peso penetra più o meno addentro nella materia molle del fondo, della quale frattanto si riempie. Nell'atto in cui lo scandaglio vien salpato, un otturatore, che automaticamente si chiuse per lo scattare di una molla, impedisce l'uscita del saggio…un cilindro del diametro di 4 centimetri e di lunghezza variabile secondo la natura del fondo, lunghezza che può raggiungere 95 centimetri.

Sul *Bollettino del Regio Comitato Geologico* nel 1886 (N.9-10) fu pubblicato un articolo del geologo tedesco Johannes Walther sulla geologia del Golfo di Napoli, grazie alla collaborazione con il tenente di vascello Ambrogio Colombo della Regia Marina, esecutore dei prelievi sul fondo, con apparecchi forniti dalla Stazione Zoologica; Walther suppose la presenza nel Golfo di edifici vulcanici sottomarini (*Fig. 6*).

Nel 1887 Arturo Issel presentò all'Accademia delle scienze francesi una nota dal titolo *Sur l'existence de vallées submergées dans le golfe de Gênes* (*Comptes Rendus Hebdomadaires des séances de l'Accademie des scieces,* 1887, n. 01), utilizzando i dati raccolti dalla nave Washington. Le sue osservazioni si basarono sull'andamento sinuoso delle curve batimetriche di -50, -200, -500, -1000 e -2000 metri. L'autore osservò che le

> vallées de presque tous les cours d'eau de la Ligurie occidentale…se continuent dans del vallées sous-marines….

Issel pubblicò nel 1888 sulle *Mémoires de la Société Belge de geologie, de paléontologie & d'hydrologie* (Tome II) la presentazione, da lui effettuata durante la riunione del 18 dicembre 1887 alla Società Scientifica Belga, riguardante note geologiche sugli alti fondi marini. Nelle note Issel distinse i depositi profondi in 6 categorie principali:

> litogeni, pirogeni (o vulcanici), nautogeni (o glaciali), picnogeni (o chimici), biogeni (od organici) e anemogeni (o meteorici).

Nella presentazione Issel descrisse i sedimenti da lui ottenuti, tra gli anni 1882-1884, dal comandante della Washington G.B. Magnaghi e provenienti dal Mediterraneo occidentale e dominati, a detta dell'Autore, da gusci di foraminiferi, con scarsi rari esemplari di diatomee e radiolari. La terza parte del lavoro raccoglieva le ipotesi e le proposte di Issel su diversi argomenti, fra i quali la ricerca di valli sommerse lungo altre piattaforme continentali mediterranee, simili a quelle da Lui osservate nel Golfo di Genova, e la necessità di ottenere campioni di fondo con spessore maggiore per studiare le differenze occorse nella sedimentazione anche biogena nel recente passato.

Orazio Silvestri (1889) pubblicò negli *Atti della Accademia Gioenia di Scienze Naturali* il lavoro *Le maggiori profondità del Mediterraneo recentemente esplorate ed analisi geologica dei relativi sedimenti marini*, descrivendo 4 saggi di fondo ricevuti dal comandante Magnaghi e provenienti da una campagna idrografica del 1887, durante la quale furono scandagliati 26 punti nel Mar Ionio. L'Autore sulla base dei rilievi scrisse:

> queste misure fanno ammettere indubitatamente il carattere sottomarino di una estesa grande e profonda vallata longitudinale da N.W. a S.E..

Dopo aver discusso le diverse ipotesi sulla formazione del Mare Mediterraneo descrisse i campioni più profondi ricevuti in esame:

> Tutti mi vennero …consegnati in largo e lunghi tubi di cristallo in cui per ciascuno era distinta e separata una parte superiore, una parte media ed una parte inferiore relativamente allo strato di circa un metro di fondo marino attraversato dalla sonda.

Le profondità dei campioni erano di -4067, -4055, -3976, -3335 metri. L'Autore dopo aver esaminato il materiale riassunse i risultati

in un prospetto riassuntivo delle diverse specie (pteropodi e foraminiferi) rinvenute nel sedimento da lui definito a componente argillosa predominante. La fauna rinvenuta era stata descritta anche grazie all'aiuto di Giuseppe Seguenza.

Sulla *Rivista Marittima* (Secondo trimestre, 1891) fu pubblicato un lungo lavoro di G.B. Magnaghi dedicato alle caratteristiche di uno scandaglio per le grandi profondità. L'Autore, dopo aver descritto gli scandagli utilizzati e in uso presso le diverse marinerie, trattò degli scandagli ideati nella marina italiana nelle prime campagne idrografiche e successivamente dei diversi tipi utilizzati nelle campagne successive (1870, 1882-1883). Magnaghi fece una analisi accurata delle condizioni in cui avrebbe dovuto operare uno scandaglio e delle problematiche incontrate dagli strumenti, utilizzati fino ad allora, comprese le fasi di discesa, di atterraggio sul fondo dello strumento, delle problematiche legate alle fasi di recupero e alla natura del substrato.

Infine, descrisse nei dettagli lo scandaglio utilizzato a bordo della Washington a partire dal 1882 e modificato nel corso del tempo sulla base delle esperienze acquisite (*Fig. 7*).

L'Autore fornì anche le dimensioni principali dello strumento.

Fra gli eventi naturali che colpirono l'Italia di quegli anni vi furono i terremoti e le eruzioni vulcaniche che interessarono l'isola di Pantelleria e che videro impegnate le navi della Regia Marina. Negli *Annali della Meteorologia Italiana* Annibale Riccò, geofisico dell'Università di Catania, per primo relazionò, da bordo della nave Bagnara, dirottata dalla sua meta Tunisi, con notevole quantità di osservazioni, l'eruzione dell'ottobre 1891 (*Fig. 8*).

Con l'arrivo della R.N. Bausan, incrociatore protetto di 85,3 m di lunghezza, l'esplorazione dell'area interessata dai fenomeni eruttivi continuò, utilizzando una lancia a vapore della stessa nave. Oltre ai rilievi eseguiti dagli ufficiali della nave per delimitare l'area marina sede dell'attività, anche esplosiva, dell'eruzione, durante l'esplorazione dell'area furono raccolti diversi campioni dei materiali emessi. A queste prime esplorazioni seguirono le attività di ricerca svolte dalla Torpediniera 67S e ancora dal Bausan.

La Regia Nave Washington operò una serie di rilievi e di campionamenti nei mesi di luglio e agosto del 1892 (*Rivista Marittim*a, dicembre 1892) (*Fig. 9*), provvedendo ad una dettagliata batimetria dell'area.

Nel numero 18-19 di *Neptunia* (1892) Eugenio Buzzi pubblicò una relazione dell'attività svolta dalla nave Scilla in Mar Rosso nel corso della quale, grazie all'utilizzo del grande apparato a scandagliare, si campionò, durante il viaggio di trasferimento, alcune aree profonde del Mediterraneo (-3042 m, -3180 m) e del Mar Rosso fino ad una profondità massima di -1619 metri. Nel corso della spedizione vennero dragati i fondali fino a -1519 metri e il materiale raccolto, abbondante, variegato, interessantissimo, fu al termine della crociera distribuito

> fra i gabinetti naturalistici del Museo Civico di Genova (Villetta di Negro), dell'Università di Modena (prof. dott. Pantanelli) e del Museo Zoologico di Napoli (prof. Anthon Dohrn).

Nel 1892 Tito Bentivoglio pubblicò, negli *Atti della Società dei naturalisti e matematici di Modena* (ser. 3, v.8-11: 178-181), la *Nota: Analisi dei sedimenti marini di due grandi profondità del Mediterraneo*, dove descrisse due campioni ricevuti dal comandante Cassanello e prelevati durante la crociera della nave Scilla, in viaggio verso il Mar Rosso (*Fig. 10*). Sulla base della mappa pubblicata e delle coordinate i due campioni (-3180 e -3.042 m), provenivano: il secondo in prossimità occidentale della Dorsale Mediterranea e il primo ad oriente della stessa. I campioni furono setacciati con tre crivelli, uno di 3 mm, uno di 0,8 mm, il terzo di 0,2 mm. Il campione 1 venne descritto come un fango grigio-giallognolo, con globigerine e qualche guscio di pteropodo, il campione 2 come un fango giallognolo, sottile, con pochi avanzi di organismi viventi.

I carbonati costituivano la componente principale in entrambi i campioni.

Negli *Atti della Accademia gioenia di scienze naturali in Catania* (1894, ser. 4, v. 7, Memoria X: 1-13) Gaetano e Giovanni Platania pubblicarono il lavoro: *Le interruzioni del cavo telegrafico Milazzo-Lipari e i fenomeni vulcanici sottomarini nel 1888-92* (*Fig. 11)*. I due Autori, dopo aver ricordato l'attività di Vulcano nel periodo 3 agosto 1888 e 22 marzo 1890 e riportato le osservazioni dei tecnici della nave Amber, addetta al ripristino della linea telegrafica, interrotta per 3 volte, e relative alle profonde modifiche subite dal fondo marino, descrissero una quarta interruzione avvenuta nel novembre 1892, più vicina all'Isola di Lipari, ad una profondità di -695 m. Il materiale ricevuto in studio con-

sistette di 3 campioni di cui 2 erano saggi di fondo. Gli Autori poterono poi studiare un saggio spedito dal Sig. Pirelli e relativo ad un guasto evidenziato nel 1891 sul cavo

> Panaria-Stromboli…a 1.500 circa da Panaria verso Stromboli. Nella parte guasta si era formato un ammasso incrostato nel cavo, del peso di parecchie decine di chilogrammi....

L'esame mineralogico e chimico mostrò una

> roccia, abbastanza friabile, trattata con HCl lascia liberi numerosi frammenti di quarzo, di feldspato… e qualche granulo bruno-nero, non trasparente, arrotondato. Tutto è spesso arrossato per l'abbondanza di idrossido di ferro.

I due Platania ipotizzarono che il guasto fosse dovuto a sorgenti termali sottomarine, già segnalate nell'area.

Nel 1896 Ettore Artini pubblicò nei *Rendiconti dell'Istituto Lombardo di Scienze e Lettere* (serie II, Vol. XXIX: 800-804) la composizione mineralogica di due sabbie di Pesaro e Grottamare confutando la diagnosi di Traverso e Niccoli pubblicata nello stesso anno.

Nel Volume III degli *Annali Idrografici* fu pubblicata una tabella degli *Scandagli a grande profondità eseguiti dalla R. Nave Città di Milano, Com.te A. Resio, 1901* (*Fig. 12*). La profondità massima raggiunta fu -915 metri, a Latitudine N. 41° 20 00 Long. E. Gr. 10° 06 40 su di un fondo a Fango molle.

Nel 1902 la nave Città di Milano effettuò nel Mar Tirreno meridionale una serie di scandagli in profondità, misurando -3460 metri (LATITUDINE N. 38° 52 30 LONGIT. E. Gr. 13° 17 0).

Le navi posacavi con il nome Città di Milano furono due. La prima, varata in un cantiere inglese nel 1886, fu costruita per conto della ditta Pirelli e data in gestione alla Marina Militare. Affondò per una collisione con uno scoglio presso Filicudi nel 1919. La seconda (ex nave germanica costruita nel 1905) entrò in servizio nel 1921 e partecipò alla spedizione polare dell'aeronave Italia.

Sui dati gravimetrici acquisiti nella campagna di circumnavigazione della R. Nave Calabria (4 febbraio 1905 -3 febbraio 1907) Alberto Alessio pubblicò *Determinazione della gravità relativa fra Padova e Postdam e valori delle durate d'oscillazione dei pendoli dell'apparato tri-*

pendolare del R. Istituto Idrografico a Padova, prima e dopo della campagna di circumnavigazione della R. Nave Calabria. L'apparato fu utilizzato a bordo della nave e le analisi svolte a terra permisero di valutare l'esattezza dei dati acquisiti.

Nel volume VIII degli *Annali* fu pubblicato un nuovo lavoro di Alberto Alessio dal titolo *Osservazioni gravimetriche dal 1903 al 1911*. L'autore dopo aver ricordato le osservazioni da lui compiute a Padova, a Genova, a Venezia e a Postdam descrisse con estremo dettaglio tecnico le osservazioni eseguite tra il 4 febbraio 1905 e il 3 febbraio 1907 a bordo della Calabria nelle diverse località, dei diversi mari e oceani, visitate dalla nave nel corso della lunga circumnavigazione e le correzioni apportate dopo l'utilizzo del sistema Postdam.

Nel 1908 il terremoto di Messina del 28 dicembre diede lo spunto per una serie di lavori e di Commissioni. Giovanni Platania nel 1909 nel *Bollettino della società Sismologica Italiana* (vol.13: 369-458) analizzò, nell'articolo *Il maremoto dello Stretto di Messina del 28 dicembre 1908*, nel dettaglio e con un'accurata indagine, il maremoto che interessò lo Stretto di Messina a seguito del sisma. L'Autore ricostruì l'altezza dell'onda che raggiunse il suo massimo nella località S. Alessio presso la galleria (11,70 m) e concluse che per le diverse altezze raggiunte nelle diverse località della costa siciliana e calabrese:

> La causa principale di queste altezze eccezionali risiede nella sinuosità della costa e nell'orientazione rispetto....

6. Il Regio Comitato Talassografico Italiano

Nel 1909 su iniziativa del matematico Vito Volterra, della Società Italiana per il Progresso delle Scienze (SIPS.), venne costituito il Comitato Talassografico Italiano. Nell'anno successivo, con legge dello Stato, il Comitato divenne il Regio Comitato Talassografico Italiano, espressamente dedicato alle ricerche talassografiche. Il Comitato era formato da politici, ricercatori universitari e di pubbliche istituzioni, ufficiali della Marina, il presidente era il Ministro della Marina.

Francesco Salmoiraghi (1909) in una nota *Alcuni saggi di fondo dei nostri mari* (*Reale Istituto Lombardo di Scienze e Lettere. Rendiconti*. Serie II, Vol XLII, Fasc. I-II: 698-719) descrisse, allegando due tabelle e una mappa (*Fig. 13*), il materiale, ricevuto dalla Compagnia Pirelli,

rimasto aderente o all'ancora o al grappino con cui si tentava di recuperare il cavo durante le campagne della Città di Milano, svolte dal novembre 1901 al febbraio 1909, per la riparazione dei cavi: la Maddalena-Italia, Ustica-Palermo, Palermo-Napoli, Panarea-Stromboli, Reggio-Messina, Otranto-Vallona. I 22 campioni, prelevati a profondità comprese fra -45 e -3.500 m e di cui vennero trascritte la data e la posizione geografica, furono suddivisi dall'Autore in tre categorie: ghiaie, sabbie e arenarie, melme. Il fondo ghiaioso proveniva dalla riparazione del cavo fra Reggio e Messina ed era composto di ciottoli di diversa dimensione di granito, diorite, pegmatite, gneiss, micascisti e quarziti. Le sabbie provenienti dalle aree vulcaniche erano tipiche di sedimenti di quelle zone e un campione proveniente dallo Stretto di Messina era stato raccolto dopo il terremoto del 1908. Le melme risultarono formate in gran parte da carbonato di calcio di origine organica.

L'Autore raccolse i risultati in una tabella con ordine tipologico, distinguendo i minerali, a differenza di quanto proposto da Issel (1888), in autigeni (opale, glauconite, solfuri di ferro, limonite, ematite e carbonato di calcio d'origine organica) ed allotigeni (di provenienza dalle terre emerse e con distribuzione geografica legata alla geologia della terra emersa di provenienza).

In particolare, per le provenienze Salmoiraghi suppose: per lo Stretto di Messina le rocce cristalline dell'Aspromonte e dei Peloritani, per quelli ad est delle Bocche di Bonifacio i graniti che caratterizzano le aree costiere corse, per le adiacenze alle isole di Ustica e di Panarea i minerali vulcanici corrispondenti ai basalti e andesiti dell'una e dell'altra isola. Infine, mise in evidenza l'importanza del trasporto eolico nella composizione di taluni sedimenti raccolti a grande profondità (*Fig. 14*).

Lo stesso Autore, nel 1910, nei medesimi *Rendiconti* (*Reale Istituto Lombardo di Scienze e Lettere. Rendiconti*. Serie II, Vol XLIII, Fasc. I-II: 432-453) pubblicò *Saggi di fondo raccolti dal R. Piroscafo Washington nella campagna idrografica del 1882* studiando 41 campioni ricevuti da Arturo Issel che li aveva ottenuti dal R. Istituto Idrografico (*Fig. 15*). In una nota iniziale del lavoro l'Autore scrisse:

> Presso il Museo geologico dell'Università di Genova si trovano molti altri saggi di fondo di mare, provenienti pure dall'Istituto Idrografico…. Ma essi sono per lo più distinti solo da una data e da un numero d'ordine, cui non corrisponde un catalogo ordinato; perciò, non possono essere studiati se non dopo un lungo lavoro per rintracciarne l'ubicazione.

Notò, inoltre, per quanto riguardava la numerazione:

> … mentre per alcuni sono doppi e in tal caso distinti colle parole: sopra, mezzo o sotto, riferentesi alla posizione in cui il saggio fu preso nel cilindro di melma estratto con lo scandaglio.

In una tabella divise i campioni in gruppi, sulla base dell'area di provenienza, elencandoli con il numero, la posizione nella carota, la stazione, la profondità, la data, la posizione geografica (Latitudine e Longitudine) e con un numero d'ordine in funzione della profondità della carota. I gruppi della divisione furono: Gruppo H, 15 saggi (dall'isola d'Elba al capo S. Vito in Sicilia); Gruppo I, 8 saggi (ad oriente di capo Passero); Gruppo J, 1 saggio (tra la Sicilia e la Sardegna); Gruppo K, 17 saggi (dall'isola di Tavolara in Sardegna all'isola di Montecristo). L'autore pubblicò una carta in scala 1:2.000.000 con segnati i punti di prelievo. Al gruppo I venne aggiunto un saggio prelevato dalla nave inglese Amber a -1920 metri, durante la riparazione del cavo tra Malta e Zante, interrotto durante il terremoto del 1908. L'Autore descrisse i metodi utilizzati anche per lo studio delle melme raccolte e da Lui studiate, dalla nave Città di Milano:

> …una decalcificazione e ad una levigazione allo scopo di espellere i carbonati (per lo più foraminiferi e resti testacei) ed il limo ed infine sul piccolo residuo ottenuto di sabbia, generalmente molto fina, determinando al microscopio e con gli altri sussidi della tecnica psammografica la composizione mineralogica ed i gradi di frequenza dei componenti.

La scala numerata utilizzata andava da 10. ultradominante a 1. rarissimi. In nota Salmoiraghi descrisse lo studio di un campione di melma in stato naturale:

> …lavare la melma con acqua distillata per sciogliere i sali di cui è impregnata, indi fare dei preparati in acqua che evaporata, si sostituisce con essenza di garofano.

Nello studio al microscopio con forte ingrandimento apparivano dominanti particelle di limo isotrope o con punti birifrangenti ed esili scagliette di miche e cloriti. I carbonati erano formati da forme organiche e cristalline e fra le prime coccoliti, più raramente rabdoliti e qualche foraminifero. I radiolari erano presenti:

> ma tranne alcuni aghetti di rutilo procedenti da scaglie di fillade, non rinvenni nessuno dei minerali allotigeni…minerali la cui ricerca forma lo scopo esclusivo del presente studio.

Nella Tabella 2 l'Autore riassunse risultati del suo studio limitandosi al Gruppo I, 8 campioni provenienti ad oriente del capo Passero da profondità comprese fra -2700 e -3836 m e il singolo campione appartenente al Gruppo J e proveniente ad uno scandaglio isolato prelevato fra la Sicilia e la Sardegna a -1583 metri di profondità (*Fig. 16*).

Nel Gruppo I i componenti autigeni (solfuri, limonite, ematite, opale e glauconite) risultarono una parte secondaria del residuo. Gli allotigeni risultarono più numerosi (quarzo, calcedonio, feldspati, pirosseni monoclini, anfiboli, olivina, epidoto, biotite, clorite, vetro vulcanico); fra le paste di rocce effusive ben evidenti erano i basalti e rocce affini. Sull'origine del materiale l'Autore mise in evidenza il trasporto ad opera delle correnti e del moto ondoso, ma anche il trasporto eolico, per giustificare la presenza dei detriti provenienti dall'Etna e riportò a sostegno la statistica di Riccò, Mendola ed Eredai, relativa al periodo 1892-1906 e basata su 1000 osservazioni sulla direzione del fumo del cratere centrale del vulcano, con 609 osservazioni per il vento da nord-nord-ovest. Sull'origine dei minerali provenienti da rocce intrusive e scisti cristallini la fonte, secondo Salmoiraghi, era da ricercarsi nei Peloritani e nell'Aspromonte. L'Autore, a giustificare le differenze riscontrate in alcuni campioni prelevati a breve distanza l'uno dall'altro, formulò diverse ipotesi compresa quella di un differente comportamento dello scandaglio nel raggiungere e penetrare nel fondo marino. Per il Gruppo J (1 solo campione, tra Sicilia e Sardegna) l'Autore si limitò ad osservare il maggiore arrotondamento dei granuli di quarzo e le tracce di arrotondamento sui granuli di ilmenite, orneblenda, zircone e tormalina, un contributo di elementi eolici dall'Africa. Al termine della pubblicazione l'Autore rimandò l'analisi dei gruppi H e K e le conclusioni ad un successivo lavoro.

Con la morte di Salmoiraghi, uscì postumo, un lavoro, pubblicato a cura di Ettore Artini, nei *Rendiconti* del 1911 (Serie II, Vol. XLIV: 952-963) (*Fig. 17*). Nei campioni riuniti nei gruppi H (16 scandagli fra l'Isola d'Elba - Capo S. Vito, di cui 2 con due livelli campionati) e K (6 scandagli fra l'isola di Tavolara e Montecristo, di cui 3 con due livelli campionati) due erano le categorie di minerali identificati:

una derivata da rocce vulcaniche augitiche, l'altra da rocce rocce scisto-so-cristalline od eruttivo-estrusive.

Italo Chelussi (*Bollettino della Società Geologica Italiana*, vol. XXX, part I: 183-202) pubblicò, nel 1911, il lavoro *Contribuzione alla psammografia dei litorali italiani*, nello stesso volume XXX l'Autore descrisse tra l'altro, in *Nuove contribuzioni alla psammografia dei litorali italiani -II- Sabbie del litorale da Molfetta a Taranto*, 3 campioni di fondo inviatigli da Arturo Issel e relativi alla campagna idrografica del 1895, prelevati al largo della costa pugliese fra -21 e -29,5 metri di profondità.

Nel Volume XXXI Chelussi pubblicò *Di alcuni saggi di fondo del Mediterraneo,* dove descrisse 15 campioni ricevuti da Arturo Issel e raccolti nel corso di diverse campagne idrografiche tra il 1885 e il 1890.

Un articolo di Arturo Issel nel 1911 fu allegato al *Bollettino Bimestrale del Regio Comitato Talassografico Italiano* (n. 15, Allegato I: 221-226), istituito ufficialmente nel 1910. L'autore suggerì in *Indagini e lavori da eseguirsi nel Mare Ligure*, al paragrafo B *Per la posizione del Golfo di Genova e del Tirreno Settentrionale*, dal punto di vista della morfologia, di effettuare una serie ravvicinata di scandagli per completare lo studio del fondo marino e dare così una visione completa della complessa morfologia sottomarina dell'area.

In quegli anni nelle *Memorie* edite dal Regio Comitato Talassografico Italiano furono stampati solo 3 lavori inerenti i risultati delle crociere e ricerche con attinenza alla geologia marina. In particolare, la *Memoria XII* (1912) e la *Memoria XXIV* (1913), a firma di Domenico Omodei, descrissero le condizioni e l'idrografia della spiaggia di Chiavari e Lavagna. Altra attività fu quella svolta dalla posacavi Città di Milano. Negli *Annali Idrografici* furono riportati, come si è visto, i risultati di alcuni dragaggi effettuati dalla nave.

Lo scoppio della Prima Guerra Mondiale fermò le attività di ricerca e nel 1919 la Marina Militare assegnò la nave Tremiti (*Fig. 18*) al Regio Comitato per svolgere attività di ricerca.

La Conferenza Internazionale per l'Esplorazione Scientifica del Mediterraneo (CIESM) si svolse a Madrid nel novembre del 1919; nel corso dei lavori venne affidata all'Italia l'organizzazione della campagna negli Stretti orientali.

Nel *Bollettino* della Regio Comitato dei mesi gennaio-giugno 1920 (n. 63, 64 e 65) venne pubblicato, in dettaglio, il *Programma delle ricerche da eseguirsi dalla Missione Italiana incaricata dell'esplorazione*

scientifica degli Stretti di Costantinopoli, con capo missione Giovanni Magrini, in collaborazione con A. Manuelli, chimico capo e L. Sanzo biologo capo.

Il vasto programma di ricerca prevedeva attività di oceanografia fisica e oceanografia biologica. Degno di nota per l'oceanografia fisica era la parte dedicata alla forma del rilievo sottomarino e alla natura del fondo. Erano previsti una serie di scandagli nell'area: in ogni stazione, attraverso un apparato maggiore, dotato di motore elettrico e una serie di scandagli utilizzando strumenti più piccoli tipo Magnaghi. Il programma prevedeva di intensificare le misure se due scandagli, vicini fra loro, avessero dato misure molto differenti e in corrispondenza delle cosiddette soglie. Per investigare la natura del fondo sarebbero state utilizzate una sonda Ekmann e una benna a tenaglia. Il materiale raccolto doveva essere studiato direttamente a bordo, nel laboratorio chimico che provvedeva anche all'analisi chimica dei campioni d'acqua raccolti.

6. Il ruolo del Ministero dell'Agricoltura

La legge 24 marzo 1921 n. 312 sui provvedimenti a favore della pesca e dei pescatori stabilì:

> … L'azione degli osservatori di pesca marittima sarà integrata, per le indagini pratiche al largo, da quella della squadriglia sperimentale creata con R. decreto 10 giugno 1920". Il Regio decreto n. 913 del 1920 aveva stabilito carattere normale: "Art. 1. Per ricerche ed operazioni attinenti al progresso dell'industria peschereccia…. è messa a disposizione dell'Ispettorato generale per la pesca del Ministero di agricoltura una squadriglia sperimentale di pesca… costituita da piccole unità del Regio naviglio equipaggiate da personale militare e comprende al minimo una vedetta e due motoscafi di massimo tonnellaggio, armati in permanenza.

Il Ministero con le sue attività verrà ad affiancarsi e successivamente a competere con il Regio Comitato Talassografico.

Nel numero 73 di settembre-ottobre del *Bollettino Bimestrale* il nuovo presidente del Regio Comitato, onorevole Bergamasco, annunciò l'intenzione di rinominare, su proposta di Leonardi Cattolica, la nave Tremiti in R.N. Luigi Ferdinando Marsigli.

La crociera nell'area dello Stretto di Messina, con la nave L.F. Marsigli, divisa in due periodi temporali, dai primi di agosto fino alla

metà di novembre (1922) e dal primo febbraio a metà maggio (1923), ebbe un'importanza fondamentale per la conoscenza delle leggi che regolano tanto l'andamento delle correnti nello Stretto quanto gli scambi fra il Mar Tirreno e il Mar Ionio e delle fluttuazioni della marea. Inoltre, servì a meglio conoscere le leggi che regolano la distribuzione della temperatura, salinità, densità e di altri parametri.

La prima crociera si svolse dall'11 agosto al 20 settembre 1922; furono compiute complessivamente 50 stazioni oltre ad un rilievo idrografico, all'impianto di 4 mareografi, lanci di galleggianti. Il personale della crociera era costituito da Vercelli, Sanzo, Alpago, Picotti.

La seconda crociera si svolse dal 15 marzo al 20 giugno 1923; vennero effettuate 75 stazioni e i risultati delle crociere furono pubblicati in seguito in due memorie a cura di Vercelli e di Picotti.

La Luigi Ferdinando Marsigli fu poco utilizzata per le ricerche talassografiche negli anni successivi. La sua strumentazione e i suoi apparati per le ricerche talassografiche vennero trasferiti sulla nave Ammiraglio Magnaghi (*Fig. 19*) nel corso del 1923 per la campagna nel Mar Rosso.

La R.N. Ammiraglio Magnaghi I, impostata nei Cantieri Navali Odero di Sestri Ponente nel 1913, era entrata in servizio il 16 novembre 1914 come nave sussidiaria di terza classe, con un dislocamento a pieno carico di 2.111 tonnellate, la nave era lunga 82,2 m, larga 11,4 m, con una immersione di 4 metri. L'apparato motore le forniva una potenza di 2.000 hp con una velocità massima di 13,5 nodi. Con un equipaggio di 159 uomini, compresi 12 ufficiali, la nave era dotata delle sistemazioni logistiche e laboratori per ricercatori, che imbarcavano in occasione delle campagne idrografiche.

Il disastro del Titanic (1912) aveva portato allo sviluppo di un trasduttore acustico capace di emettere e ricevere un suono, allo scopo di segnalare oggetti presenti nell'acqua. Nel 1914, durante le prove del nuovo strumento, si osservò che veniva riflesso anche il segnale del fondo marino. La tecnologia venne implementata a scopo bellico nel corso della Prima Guerra Mondiale e successivamente utilizzata anche nelle campagne oceanografiche. Il primo scandaglio ultrasonoro Langevin-Florisson fu installato sulla Ammiraglio Magnaghi nel 1923.

Nel frattempo, furono effettuate, nel 1921, nelle acque della Sardegna, la prima crociera di pesca marittima e, nell'Arcipelago toscano, la seconda, nel 1922.

Renzo Mancini pubblicò nel 1922, come comandante della

Squadriglia sperimentale, la relazione sulla seconda crociera di pesca marittima nell'Arcipelago Toscano. La pubblicazione di Mancini, dopo aver analizzato i nomi e le tipologie del fondo marino, descriveva, con dati relativi alla posizione geografica (latitudine e longitudine), gli impedimenti sul fondo e '*afferature*' pericolo per le reti, gli esperimenti di pesca a strascico (25 stazioni), gli esperimenti con pesca coi '*palangresi*' con profondità e tipologia del fondo (26 stazioni), gli esperimenti di pesca con la lampara con profondità (10 stazioni), le ricerche di plancton superficiali e pelagiche, il benthos e i campioni di fondo marino con la profondità (in totale 61 stazioni). Il lavoro veniva completato con 2 carte della pesca e delle stazioni effettuate a scala 1:186.000, che riportavano anche la natura del fondo marino (*Fig. 20*).

La nave Ammiraglio Magnaghi effettuò (3 ottobre 1923-7 giugno 1924) una lunga campagna di ricerca, idrografica e talassografica, nel Mar Rosso. Il capo della spedizione scientifica era il prof. Francesco Vercelli, mentre a bordo erano presenti per la chimica il prof. Mario Picotti e per la biologia il prof. Luigi Sanzo, oltre al disegnatore biologo Filiberto Mazza e al preparatore-pescatore Giuseppe Arena. Alla spedizione fu aggregata un'altra unità navale di stanza a Massaua la R. Cannoniera Generale Arimondi. I risultati della Campagna nel Mar Rosso dell'Ammiraglio Magnaghi del 1923-1924 furono oggetto di pubblicazione, ad opera dell'Istituto Idrografico, nei due volumi degli *Annali Idrografici* XI e XI bis (*Figg. 21* e *22*).

La sezione *Ricerche biologiche su materiali raccolti dal Prof. L. Sanzo* comprendeva 9 Memorie; nella Memoria I. *Itinerario e stazioni biologiche della crociera* Sanzo descrisse la posizione delle 163 stazioni effettuate, la tipologia di strumenti utilizzati per il campionamento e le finalità del campionamento stesso. Si trattò di pescate di plancton con varie tipologie di retini, di utilizzo di reti a strascico, di reti di fondo, di pesca con lenza e infine di poche stazioni utilizzando la draga.

Nel 1923 fu promulgato il decreto istitutivo del Consiglio Nazionale di Ricerche e il 30 giugno 1924 sulla G.U. fu pubblicato il decreto-legge n.994 del 4 maggio:

> Modifica alla composizione del Comitato talassografico… "Art. 7 Il Comitato aderisce al Consiglio nazionale di ricerche istituito con il R. decreto 18 novembre 1923, n. 2805, secondo i suoi statuti o regolamenti.

Da questo momento in poi il Regio Comitato Talassografico venne a perdere via via la sua importanza, anche per la istituzione dei Comitati nazionali di consulenza scientifica, basati sulle singole discipline.

Nel 1924 erano continuate le ricerche della squadriglia marittima per le ricerche sulla pesca e per le quali venne utilizzata la nave Tritone (ex Sardegna), con una lunghezza di 42,2 m, una larghezza di 7 m e immersione di 4,3 m, mossa da un motore da 544 HP che le consentiva una velocità 13 nodi.

Il 21 luglio 1925 la R. Nave Ammiraglio Magnaghi iniziò una ricerca sui banchi Graham e Pantelleria per definirne l'esatta posizione ed effettuare uno scandagliamento sistematico volto ad ottenere una esatta morfologia dell'area; a tal scopo venne utilizzato l'apparecchio ultrasonoro Langevin-Florisson, controllato, ad intervalli, con le misure di uno scandaglio a filo metallico. Furono effettuati, nei giorni compresi fra il 22 e il 27 luglio, 1560 scandagli e il risultato fu di stabilire, per l'area investigata, la presenza di un solo banco con fondale minimo di 12 metri. Un ulteriore controllo fu effettuato, con scandaglio a filo metallico, nei giorni seguenti (31 luglio-4 agosto) dalla R. Vedetta Idrografica Mario Bianco (*Fig. 23*).

Pasquale Pasquini nel 1926, pubblicò i risultati della ricerca, da Lui definita talasso-biologica, svolta dal 1° agosto al 30 ottobre 1924, a bordo della Tritone, in Adriatico e nel mare della Sicilia orientale e meridionale. I saggi di fondo furono effettuati con scandagli, con misurazioni, ove possibile, di temperature a diverse profondità, e draghe. Le ricerche interessarono il mare da Ancona fino a Termoli, il distretto peschereccio di Manfredonia con Barletta, le Isole Tremiti, Pianosa, Pelagosa, Lagosta, le acque albanesi da San Giovanni di Medua a Valona, la regione di Brindisi, la Sicilia orientale e meridionale. L'esame del fondo marino fu effettuato in 29 stazioni, con profondità che raggiunsero in qualche caso -180 metri, e corredato da una descrizione sommaria del materiale che lo costituiva.

Gustavo Mazzarelli pubblicò sempre 1926 *Osservazioni eseguite durante campagna della R.N. Tritone nei mesi di agosto-ottobre 1925*. La pubblicazione era corredata di una serie di tabelle (*Fig. 24*), molto particolareggiate, per ogni stazione effettuata: giorno, numero della stazione, latitudine e longitudine, profondità, qualità del fondo, orario del campionamento, temperatura dell'aria, profondità di osservazione in metri, temperatura dell'acqua, salinità, densità *in situ*, direzione e velo-

cità in miglia della corrente, trasparenza (con disco di rame con diametro di 50 cm, verniciato in smalto bianco, con dipinte due lettere maiuscole B e K, lunghe 40 cm), colore, stato del mare (direzione e forza stimata), stato del cielo, direzione e velocità, in km/h, del vento, osservazioni sulla strumentazione utilizzata o particolarità del contenuto del campione. Le stazioni furono: 3 lungo la rotta Siracusa-Tripoli, 23 in un'area denominata Tripolitania prima Zona, 34 nell'area Tripolitania seconda Zona, 1 a Lampedusa. A bordo il tecnico preparatore era Cesare Nanni.

Gustavo Mazzarelli, dell'Università di Messina, responsabile della ricerca a bordo della R.N. Tritone, pubblicò i risultati sul *Bollettino di pesca, di piscicoltura e di idrobiologia* nel 1929. L'area investigata comprendeva il tratto di mare Adriatico intorno alle isole di Lagosta, Cazza, Cazziol e Pelagosa e le coste calabresi sia dell'Ionio che del Tirreno.

La Regia Vedetta Tritone, tra il novembre 1927 e il luglio 1928, dopo aver terminato una campagna talassobiologica in Tripolitania, ebbe l'ordine di intraprendere una Campagna idrografica in Adriatico. La campagna talassobiologica portata a termine dalla Tritone in Tripolitania faceva parte delle campagne nei mari della Libia, promosse dall'Ispettorato generale per la Pesca. Le tre campagne (1925, 1927 e 1928) erano state affidate a Gustavo Mazzarelli che ne pubblicò una sintesi nel 1936. La nave esplorò, nel 1925, il mare compreso tra la Tunisia e il Capo Misurata, nel 1927 tutta la porzione di Mediterraneo compresa tra la costa meridionale della Sicilia e quella della Tripolitania e nel 1928 la costa della Cirenaica fino al confine egiziano, con particolare attenzione al Golfo di Bomba.

Nasceva nel 1927, a Roma, l'Istituto centrale di idrobiologia sotto l'egida del Ministero dell'Agricoltura, come previsto nella legge n. 312 del 24 marzo 1921, dove, al Titolo XI (Servizi tecnici), si poteva leggere:

> Per le ricerche scientifiche applicate alla pesca e per tutte le indagini relative all'incremento di tale industria, l'Ufficio della pesca presso il Ministero di agricoltura, si varrà…nonché di un laboratorio centrale di idrobiologia…. Esso armonizzerà la sua attività con quella degli Istituti scientifici del R. Comitato talassografico e altri istituti del genere …"

La nascita di questo istituto accentuò la contrapposizione fra il Regio Comitato e il Ministero dell'Agricoltura, anche se in apparenza vi sarebbe dovuta essere piena collaborazione fra le due istituzioni.

La nave Ammiraglio Magnaghi nella seconda metà del 1928 partì da Genova per una nuova campagna in Mar Rosso (ottobre 1928-agosto 1929); nel corso della campagna imbarcarono Francesco Vercelli, Giorgio Bini e Emilio Ninni, incaricati i primi due dal R.Comitato Talassografico per compiere ricerche geofisiche e chimico-biologiche ed il terzo per compiere ricerche e studi sull'ittiologia del Mar Rosso per conto dell'Istituto centrale di idrobiologia. Il programma dei lavori comprendeva: rilievo di un canale navigabile fra le Isole Dhalak, misure di magnetismo terrestre, misure di gravità, ricerche talassografiche, osservazioni meteorologiche e ricerche talassobiologiche. La relazione di Francesco Vercelli fu pubblicata nel 1936, nel Volume XII Parte Seconda (Anni 1925-1928) degli *Annali Idrografici*, con il titolo *Nuove ricerche sulle correnti marine nel Mar Rosso*. Nel capitolo iniziale Vercelli ricordò che, in concomitanza dei lavori idrografici che la Ammiraglio Magnaghi avrebbe eseguito nell'area, si era pensato di svolgere un ristretto programma di ricerche talassografiche, con limitazioni nell'attrezzatura imbarcata. Solo con gli accordi presi con il comandante della Ammiraglio Magnaghi e con il comandante della nave Lepanto, aggregata alla spedizione, fu possibile aumentare il programma con ampliazioni essenziali. L'Autore terminò il I capitolo scrivendo:

> Per valutare il complesso dei lavori eseguiti si deve tener presente che la Campagna 1929 non fu, propriamente, una crociera talassografica, eseguita con pienezza di mezzi, con partecipazione di personale sufficiente e navi largamente attrezzate. Le ricerche vennero eseguite in massima parte sulle navi Lepanto e Porto Corsini, sulle quali furono improvvisate, alla meglio, le istallazioni e le attrezzature occorrenti. Le manovre strumentali furono compiute però con molta cura: la sorveglianza di esse, quando non era curata personalmente dal direttore scientifico dei lavori, era assunta a turno dagli ufficiali e dai sottufficiali, con grande diligenza e coscienza.

La nave Città di Milano effettuò una lunga spedizione in Artico a supporto della spedizione del dirigibile Italia effettuando allo stesso tempo misure geofisiche. A seguito del disastro dell'aeronave partecipò alle operazioni di ricerca.

Nella giornata del 29 maggio 1929 al Senato fu approvato il disegno di legge *Passaggio del Regio Comitato Talassografico italiano al Consiglio Nazionale delle ricerche*.

Di particolare significato fu la crociera gravimetrica effettuata dal R. Sommergibile 'Vettor Pisani' (*Fig. 25*) nei mari italiani (Tirreno, Ionio, Mar di Sicilia) nell'estate del 1931. Il battello percorse 4.600 miglia, di cui 265 in immersione, a profondità comprese fra -10 e -35 m, con 88 misure in navigazione e 14 nei porti. Lo strumento impiegato era un apparato pendolare Meinesz, prestato dalla Commissione geodetica olandese.

La crociera gravimetrica e alcuni risultati furono illustrati in dettaglio da Gino Cassinis e Manlio De Pisa in un articolo nel volume tredicesimo degli *Annali Idrografici* (1965).

Nell'elenco delle relazioni presentate al Congresso Internazionale di Geografia (Parigi, 16-24 settembre 1931) nella sezione I. Topografia e cartografia comparve, fra le relazioni italiane, quella di Renato Toniolo *Variazioni dei litorali sabbiosi italiani*.

Nell'elenco delle attività di ricerca delle Università e Istituti nazionali, fra gli Istituti di Geografia, figurava la ricerca sulle *Recenti variazioni delle spiagge italiane specialmente toscane* dell'Istituto di Geografia generale dell'Università di Firenze.

Nel numero 7 (1933) della *Ricerca scientifica* nell'organigramma del CNR venne riportato l'elenco delle Commissioni permanenti e delle Commissioni speciali di studio fra le quali la numero 13 era dedicata allo *Studio del moto ondoso nel mare* e il ricostituito Comitato nazionale per la Geografia comunicò l'attività inerente *Indagini sulle recenti variazioni di spiagge italiane* che metteva in luce come circa il 70% delle spiagge alluvionali fossero in fase di ritiro, redendo necessaria la collaborazione con il Comitato geofisico e il Comitato geologico. Il Comitato annunciava l'inizio di uno studio dettagliato del fenomeno sotto la direzione del prof. Toniolo, studio che sarebbe stato completato entro 3 anni.

Il Comitato nazionale di Geografia informò della pubblicazione (n. 11 della *La Ricerca Scientifica*) *Indagine preventiva sulle recenti variazioni della linea di spiaggia delle coste italiane* a cura di Dina Albani. Il coordinamento per lo studio del fenomeno era stato affidato all'Istituto di Geografia generale dell'Università di Pisa e la pubblicazione terminava con una guida-questionario per ricerche locali curata da Toniolo.

Ricerche collegate all'ambiente marino furono portate avanti nel Comitato Nazionale per la Geografia dove le ricerche sulla variazione delle spiagge italiane, dirette da Antonio Renato Toniolo, furono concentrate sulle spiagge tirreniche della penisola, da Capo Mortola

(Liguria) fino a Capo dell'Armi (Calabria) ed eseguite da 14 ricercatori. Nel numero 4 della rivista *La Ricerca Scientifica*, nella relazione di Toniolo sull'attività scientifica del Comitato nazionale per la geografia, vennero riportate con maggior dettaglio le ricerche eseguite nel 1933 sulle variazioni di spiagge italiane. Dopo aver ricordato il lavoro preliminare di Albani e la guida-questionario proposta dallo stesso Toniolo, furono esposti sommariamente i risultati sulle aree tirreniche: in Liguria le spiagge presentavano notevoli retrocessioni a partire dai primi del '900; le spiagge toscane e laziali avevano maggiori erosioni in corrispondenza delle foci dell'Arno e del Tevere; in Campania l'erosione era accentuata alla foce del Volturno; in Calabria a spiagge soggette a fenomeni erosivi si alternavano spiagge in avanzamento.

Nella sezione *Notizie Varie* della *La Rivista Scientifica* (Anno VI, Vol. I, N. 2) venne pubblicato l'elenco, per il 1934, delle ricerche affidate dal CNR ad Istituti delle Università e delle Scuole superiori, in seguito ad accordi con il Ministero dell'Educazione Nazionale. L'unica attività inerente al mare erano le *Ricerche sulle recenti variazioni delle spiagge italiane* affidate all'Istituto di Geografia della R. Università di Pisa.

Nel mese di settembre del 1935 (numeri 5–6) della *La Ricerca Scientifica,* fra le *Attività del Consiglio delle Ricerche*, il Comitato Nazionale per la Geodesia e la Geofisica diede notizia dell'avvenuta conclusione, anticipata, della crociera del R. Sommergibile Des Geneyes, seconda crociera, dopo quella del Vettor Pisani, dedicata allo studio della gravimetria. La crociera, iniziata il 4 luglio, doveva estendere le misure al Mediterraneo centrale, Ionio orientale, Adriatico ed Egeo. Fu sospesa, per le sopravvenute complicazioni internazionali, il 29 agosto a Taranto. Le misure effettuate, sotto la direzione di Gino Cassinis e con il nuovo apparecchio Meinesz, durante le 4.500 miglia di navigazione, furono 47 in navigazione e 8 nei porti. Si dava poi notizia che la crociera sarebbe ripresa non appena la situazione politica lo avesse consentito.

Nel numero di dicembre (N. 11-12, Anno VI, Vol. II) Gino Cassinis pubblicò una relazione preliminare della seconda crociera gravimetrica italiana sul sommergibile Des Geneyes.

L'Autore divise la relazione in due periodi temporali: il primo (4 luglio-23 luglio) da Genova a Cagliari, Tripoli, Augusta e Taranto, il secondo dall'1 al 28 agosto da Taranto al Pireo, a Lero e a Rodi, eseguendo determinazioni nell'Egeo meridionale e intorno a Creta.

Durante la riunione XXIII della Società italiana per il Progresso

delle Scienze, tenuta nel 1935 a Napoli, Antonio Renato Toniolo presentò una relazione sulle variazioni dei litorali sabbiosi dell'Italia e del Mediterraneo. Nella stessa riunione Agatino D'Arrigo trattò delle fasi di regime ed evoluzione morfologica della piattaforma litorale del delta del fiume Volturno dal 18° secolo fino ai tempi recenti. Un lavoro simile dal titolo *Ricerche sulla linea neutra inerente il Golfo di Gaeta e sul regime del litorale deltizio del Volturno* l'autore l'aveva pubblicato negli *Annali dei lavori pubblici* (LXXII, 1934, pagine 925-955).

Nel febbraio 1936 sulla *La Rivista Scientifica* (Anno VII, Vol. I, N. 3-4) il Comitato nazionale per la Geografia annunciò l'associazione per lo studio sulle variazioni delle spiagge italiane con il Comitato Nazionale per l'Ingegneria. Segnalò, inoltre, la prossima uscita del volume *Ricerche sul regime dei litorali del Mediterraneo* a cura di Agatino D'Arrigo.

Nel numero 11-12 della stessa rivista in *Notizie varie* si diede un riassunto del volume *Ricerche sul regime dei litorali del Mediterraneo*, una memoria che, secondo quanto stampato, avrebbe preceduto le altre dieci previste dal piano di collaborazione fra i Comitati di Geografia e di Ingegneria. Il Volume, dopo una lunga parte teorica sull'azione del moto ondoso e delle correnti sui sedimenti costieri, sulla morfologia della spiaggia sommersa e della piattaforma continentale, prese come esempi per l'area mediterranea il delta del Nilo, il delta padano, il delta del Rodano, il delta del Tevere, la baia di Taormina, il litorale di Algeria e il promontorio dell'Argentario. Nelle conclusioni l'Autore trattò della direttrice d'interramento e d'erosione di una spiaggia, dei limiti e dei rilievi batilitologici, del settore di traversia e dei profili di equilibrio di una spiaggia. Il volume venne corredato da 8 grandi tavole a colori mostranti le variazioni morfologiche subite nel tempo nelle aree studiate (*Fig. 26*).

Negli *Annali dei Lavori Pubblici* (1937) fu pubblicato, oltre a un lavoro di D'Arrigo, il lavoro di Luigi Manfredonia sulla carta generale batilitologica della piattaforma litorale italiana. La pubblicazione, corredata di 5 carte a colori (a scala diversa), descriveva la natura del fondo marino fino al bordo della piattaforma continentale e oltre. La carta, proposta dalla Commissione di Studi sul regime dei litorali del Regno e presentata in via preliminare, raccoglieva tutti i dati desumibili sia dai dati dell'Istituto Idrografico della R. Marina sia da quelli dei rilievi del Servizio Idrografico della Marina Francese e dell'Ammiragliato Inglese.

I fogli preliminari erano: Litorale da Oneglia a Mentone (Scala 1:50.000), da Imperia a Capo dell'Armi (Scala 1:1.000.000), Sardegna e Corsica (Scala 1:1.000.000), Sicilia e aree a adiacenti (Scala 1:1.000.000), da Capo Rizzuto a Capo Promontore (Scala 1:1.000.000), da Capo Promotore all'Isola di Corfù (Scala 1:1.000.000). Le litologie rappresentate con colori diversi erano 3: fango, sabbia e roccia; la batimetria era indicata con le isobate -10, -50, -100, -200, -500, e punti quotati; inoltre veniva disegnata la costa, la linea di spiaggia e l'ugnatura della piattaforma litorale (*Figg. 27* e *28*).

Nel N.11-12 (Anno IX, Vol. I) della *La Ricerca Scientifica* con il titolo *Assemblea plenaria del 19 aprile 1938-XVI* fu pubblicata una lunga relazione dell'assemblea del R. Comitato Talassografico Italiano.

L'assemblea si svolse sotto la presidenza del presidente del R. Comitato, Pietro Badoglio, presidente del CNR. Badoglio esordì nell'aprire l'assemblea ricordando:

> Il R. Comitato Talassografico è, accanto all'Istituto Idrografico della R. Marina, una delle più importante organizzazione scientifiche per lo studio del mare.

Il presidente proseguì affermando che da lungo tempo i rapporti tra il Comitato e la R. Marina rappresentavano una tradizione, conservata anche col passaggio del Comitato al Consiglio delle ricerche. Dopo aver ricordato che sulla nave Cherso compivano, in quel periodo, una campagna di ricerche talassografiche due specialisti del R. Comitato (Spartà e Picotti), auspicò:

> ..vicino il tempo in cui il R. Comitato Talassografico possa avere una propria nave di ricerche, e intensificare questo suo importante settore di attività.

Prese poi la parola il vicepresidente del CNR, Gustavo Brunelli (che aveva sostituito Giovanni Magrini, già segretario del Regio Comitato) che riassunse l'attività del Comitato la cui situazione dal punto di vista tecnico fu riassunta nei seguenti termini:

> Disarmate le RR. Navi Marsigli e Tritone, che avevano seguito la R. Nave Ciclope…moltiplicate in dismisura le istituzioni a terra…: Istituto Centrale di Biologia Marina di Messina, Sezione Italiana dell'Istituto Italo-Germanico di Biologia Marina di Rovigno, Istituto

> Geofisico del R. Comitato Talassografico di Trieste, Biblioteca oceanografica a Strà, partecipazione a nuovi Istituti affini: Istituto Adriatico di Venezia, Istituto di Ricerche Biologiche di Rodi Egeo.

Brunelli proseguì:

> Se dovessimo ritenere la storia dei summenzionati Istituti vi sarebbe da fare qualche critica; la critica è sempre più facile dell'azione, soprattutto si potrebbe dire che era meglio non far sorgere qualcuna delle ultime istituzioni…Vi è poi come sempre la contropartita. L'Italia con una estensione così grande di costa…non si potrebbe contentare di un solo Istituto.

Dopo aver ricordato l'attività del Geofisico di Trieste che, oltre al campo talassografico, si occupava anche di sismica e di chimica, riferì che:

> Quanto al servizio sismico, gli illustri colleghi del Comitato Geofisico, hanno preso con noi preliminari accordi per una definitiva sistemazione

Il riferimento era al nuovo Istituto Nazionale di Geofisica di Roma

> … Più volte ho pensato se non converrebbe trasferire il personale talassografico di Trieste a Messina o a Venezia, dove potrebbe sorgere un centro mareografico. C'è un ma: Trieste non ha una Università e toglierle le poche istituzioni scientifiche, e che sarebbe stato meglio non farvi sorgere, sarebbe male accolto: è un problema …che si potrebbe solo risolvere con una soluzione totalitaria, o almeno con quella relativa al riordinamento del servizio meteorologico e sismico

Passò poi ad elencare quelle che, a suo giudizio, erano le due lacune presenti nel R. Comitato. La prima riguardava la mancanza di una sezione dedicata alla

> geologia del mare, di tanta importanza non solo per la scienza, ma anche per i lavori idraulici costieri, e che ci risparmierebbe notevoli somme spese in errori troppo frequenti in alcune opere marittime….

Il problema della geologia marina e della mancanza di ricerche nel settore, specialmente quello che riguardava la zona costiera, era emerso a seguito degli studi sull'erosione dei litorali.

Nelle conclusioni della relazione tenuta da Francesco Vercelli, direttore di Trieste, dopo aver ricordato che l'Italia aveva la sua vita nel Mediterraneo, di cui avrebbe dovuto avere anche il dominio scientifico, ancora da conquistare, concluse:

> se tardiamo, si rinnoverà lo spettacolo di navi nordiche che vengono a dirci ciò che succede nelle acque di casa nostra

e ribadendo che

> per agire occorre una nave talassografica, attrezzata in modo adeguato e lasciata a disposizione del Comitato in modo permanente… impiegare navi provvisorie, mutate ad ogni ciclo di lavoro, è cosa assurda… E' presumibile però che non potremo avere i mezzi nautici occorrenti se non in un futuro incerto e forse remoto. Dovremo per ora contentarci di lavori di laboratorio e di studi particolari….

Per il Comitato nazionale per la Geografia fu riportata la relazione sempre di Toniolo, tenuta in occasione del XIII Congresso Italiano, dove venne dato l'annuncio dell'uscita del I volume dal titolo *Variazioni storiche delle spiagge liguri* redatto da Ascari, Baccino, Sanguinetti e la prossima stampa del volume VIII *Spiagge padane* a cura di Visentini e Borghi, relativo alle spiagge padane e in particolare modo al delta padano, estendendo le ricerche alle spiagge romagnole. La serie era curata dall'Istituto di Geografia della Regia Università di Bologna diretto da Toniolo. Gli autori Marco Visentini e Giuseppe Borghi trattarono: il primo gli studi relativi all'area tra Portofossone e Cervia, il secondo tra Cervia e Punta Gabicce. Marco Visetini, direttore dell'Ufficio idrografico del Po, presentò un quadro completo delle condizioni fisiografiche del delta padano nei 120 anni precedenti.

Antonio Spartà (1939) nella *Memoria CCLXIX* del R.C.T.I. pubblicò i risultati della "*breve*" campagna della nave R.N. Cherso (*Fig. 29*) in Somalia, specificando che le ricerche biologiche, disposte da Brunelli (vicepresidente del R. Comitato Talassografico Italiano):

> …venivano subordinate al compito idrografico della nave, mancarono, sia pure per un breve periodo, di uno svolgimento autonomo; non si poterono eseguire obiettivi speciali, e ci si dovette limitare alle possibilità offerte dalle soste, che la nave effettuava per le proprie necessità.

Nel 1939 uscì la rivista *Geofisica pura ed applicata* che, nel numero 1, pubblicò un articolo di Mario Bossolasco dal titolo *L'erosione del litorale di Belvedere Marittimo*. L'autore segnalò la notevole regressione subita dalla linea di spiaggia di Belvedere Marittimo (Cosenza) nel periodo 1913-1938, discutendone diversi possibili fattori, fra cui l'effetto del vento sull'erosione del fondo marino e accennando alle indagini intraprese dal R. Istituto Geofisico e geodetico di Messina.

Nel gennaio 1940 il Regio Comitato Talassografico Italiano, divenuto Regio per legge nel 1910, malgrado l'assemblea plenaria del 1938 e i discorsi di Badoglio e Brunelli, cessava, dopo 30 anni di attività, di esistere e veniva incorporato nel CNR come Comitato Talassografico Italiano. Inoltre, il CNR acquisiva il Regio Istituto demaniale di biologia marina di Taranto.

Il memoriale di Pio Calletti, a nome della Commissione permanente per lo studio delle sabbie ferrifere, fu pubblicato nel numero di giugno (6) della *La Rivista Scientifica*, nella sezione *Attività del Consiglio Nazionale delle Ricerche*. Nel memoriale, dopo aver ampiamente illustrato le attività e gli studi precedenti e le caratteristiche meccaniche e fisiche che portavano all'arricchimento in materiali ferriferi nelle spiagge (caratteristiche delle rocce di provenienza, azione e trasporto fluviale, elaborazione operata dall'attività di onde e correnti) veniva illustrato il programma di lavoro che la Commissione proponeva per il futuro. La Commissione si sarebbe riunita nel corso del 1940, 1941, 1942, 1943 giungendo alla conclusione che poche località potevano fornire materiale sufficiente per un uso industriale.

Luigi Greco, e Alessandro Camanzi (1941) pubblicarono (*La Ricerca scientifica*, Anno XII, n. 7-9) una relazione sulle ricerche di sabbie ferrifere lungo i litorali italiani. Gli Autori, dopo aver descritto le metodiche utilizzate (draga succhiante, benna, metodi geofisici) e averne descritto le problematiche a loro legate, riassunsero i risultati ottenuti lungo il litorale laziale e campano. Vennero poi analizzati i fenomeni legati alla formazione dei giacimenti nelle diverse situazioni geologiche e geomorfologiche e i due autori conclusero che oltre una certa profondità e in corrispondenza di situazioni particolari (spiagge contigue ai vulcani o caratterizzate da opere di difesa) fosse difficile rinvenire sabbie con concentrazioni adeguate. Nella conclusione si riteneva che oltre l'isobata dei 3 metri, risultando al momento difficile utilizzare mezzi marittimi di dragaggio, lo sfruttamento industriale risultasse problematico.

A seguire sulla stessa rivista Arnaldo Zabelli della Commissione permanente per lo studio delle sabbie ferrifere, nel lavoro *Esplorazioni geofisiche per ricerche di sabbie ferrifere, effettuate specialmente sul fondo del mare*, espose i risultati ottenuti utilizzando uno scandaglio elettromagnetico, da Lui brevettato e di cui descrisse i particolari tecnici ed il funzionamento. Le profondità esplorate lungo il litorale di Ostia raggiunsero -10 metri.

Nello 1941 usciva il primo numero dell'*Archivio di oceanografia e limnologia* edito dal Comitato Talassografico Italiano del C.N.R. dove nel *Notiziario* vennero descritte, a firma di Giuseppe Morandini, le Commissioni permanenti del C.N.R. nel settore della Talassografia: 1. Commissione mareografica, 2. Commissione permanente per lo studio della geologia marina, 3. Commissione permanente per lo studio del moto ondoso.

Le finalità della Commissione per la geologia marina non furono ben delineate, anche per la presenza di altre attività che già si occupavano di alcuni aspetti particolari (Commissione di Studio per i Litorali del Ministero dei Lavori Pubblici, gli studi del Comitato per la Geografia e del Comitato per l'Ingegneria sulle variazioni delle spiagge italiane, le ricerche sulle sabbie ferrifere) e si decise di estendere le attività della commissione alla geologia lagunare e lacustre. Lo scopo principale era quello di creare uno spirito collaborativo per raggiungere col minimo dispendio di fondi i maggiori risultati possibili.

Nel fascicolo 3 della rivista il comandante Eugenio Modena, in un articolo intitolato *Caratteristiche della nave idrografica e oceanografica*, descrisse in dettaglio tutte le caratteristiche che una nave avrebbe dovuto possedere, comprese le imbarcazioni di supporto per le campagne idrografiche, gli strumenti necessari per i lavori di oceanografia fisica e biologica, gli strumenti campionatori, illustrando quelle che dovevano essere le tipiche ricerche oceanografiche: geologiche (saggi di fondo, topografia sottomarina).

Nel 1942 sempre nell'*Archivio di Oceanografia e Limnologia,* nelle *Comunicazioni*, Francesco Vercelli pubblicò alcuni commenti all'articolo di Eugenio Modena sulle caratteristiche della nave idrografica-oceanografica. Nella *Lettera alla redazione* scrisse:

> Sul problema della nave talassografica Io ritengo però che il problema della nave sia stato male impostato. L'idea di costruire una nave

> che in pari tempo sia talassografica e idrografica ci riporta ai primordi delle campagne marine e alle condizioni di disagio in cui furono svolte le crociere italiane nel Mar Rosso. Si è sempre constatato che una nave avente finalità idrografiche e talassografiche abbinate dà un pessimo rendimento: se lavorano gli idrografi, devono essere sospese le ricerche talassografiche; se operano i talassografi, restano condannati all'inerzia gli addetti ai lavori idrografici. I due ordini di lavori si svolgono in aree marine diverse… cessa normalmente l'interesse dei rilievi idrografici dove comincia quello delle determinazioni talassografiche, e viceversa.

Dopo aver osservato che la funzione di comando, il personale e l'organizzazione di una campagna mutano a seconda del tipo di lavoro che si intende intraprendere, Vercelli aggiungeva:

> Ritengo quindi che si deve limitare la finalità della nave, questa dev'essere o puramente idrografica o puramente talassografica; non può avere carattere anfibio. nessuna delle navi che legarono il proprio nome a crociere di fama mondiale, ricordate dal Com. Modena, ha tale carattere…Le navi talassografiche sono per lo più indipendenti dall'elemento militare, sono poste alle dirette dipendenze degli enti talassografici nazionali e guidate da un capo che ha funzioni scientifiche indipendenti da quelle che spettano al comandante della nave.

Ribadì che la nave, qualunque soluzione si voglia adottare, dovesse essere destinata a ricerche scientifiche con criteri nell'organizzazione completamente diversi da quelle seguiti per altre navi.

L'Autore chiuse la sua nota scrivendo:

> Un'importante questione deve essere anche discussa: nave unica o flottiglia di navi? Per saggiare la potenzialità degli istituti talassografici, i colleghi d'oltre oceano sogliono chiedere: Com'è costituita la vostra flotta?
> I grandi centri di studi marini posseggono infatti una flottiglia di piccole imbarcazioni per lo sviluppo dei normali programmi di lavoro e una nave maggiore per le imprese di più ampio raggio. Ritengo utile tale sistema. Meglio avere una nave modesta, ma affiancata da naviglio minore posto a permanente disposizione degli istituti, piuttosto che avere una grande nave, unica, molto costosa, e non sfruttabile economicamente nelle attività continuative che devono svolgere gli istituti.

Epilogo

Nel 1943 Il Comitato Talassografico Italiano venne ridefinito come Comitato nazionale di talassografia e limnologia.

Nel passaggio fra la monarchia e la repubblica, con la rinascita del CNR, sotto la presidenza Colonnetti, vi furono alcune delibere che segnarono profondamente la ricerca scientifica marina nazionale e nel 1945 il Comitato del 1943 venne accorpato nel nuovo Comitato nazionale per la geografia, la geologia e la talassografia e gli Istituti Talassografici di Trieste, Taranto e Messina furono trasferiti al Ministero dell'Agricoltura.

Gustavo Brunelli, nel dicembre 1945, fu uno dei fautori del passaggio degli Istituti talassografici al Ministero dell'Agricoltura e nel trattare delle indagini di ordine scientifico-tecnico affermò che la ricerca scientifica sulla pesca

> ..verrà facilitato dal recente passaggio degli Istituti Talassografici alle dipendenze del Ministero dell'Agricoltura secondo la giusta interpretazione della vecchia legge istitutiva di Luzzati e Leonardi Cattolica che poneva la pesca fra le prime finalità del Comitato Talassografico.

Il presidente Colonnetti nel discorso del 14 febbraio 1946, nell'adunanza generale degli organi direttivi del CNR, precisò:

> Per gli studi del mare è in corso di attuazione di un piano organico degli istituti e delle attività talassografiche, degno delle tradizioni marinare dell'Italia. Il centro di studio principale avrà la sua sede a Venezia e ad esso verrà coordinata l'attività di enti ed istituti di tutta la regione veneta, mettendo a profitto un ingente patrimonio scientifico esistente.

Il Comitato nazionale per la Geografia, la Geologia e la Talassografia vedeva nel proprio consiglio direttivo: Roberto Almagià, presidente, Ettore Onorato, segretario, Giuseppe Montalenti. Componenti: Gustavo Brunelli, Francesco Elter, Ramiro Fabiano, Riccardo Riccardi, Antonio Renato Toniolo, Francesco Vercelli. Lo stesso Almagià nel marzo aprile-aprile 1946 affermò:

> Particolarmente complesso si presenta il problema della riorganizzazione degli studi sul mare….

Colonnetti nell'Assemblea plenaria dei Comitati Nazionali (14-16 novembre 1946) dichiarò:

> …io vorrei richiamare la vostra attenzione sulla necessità di dare nuova vita alle attività del comitato talassografico. Un primo passo verrà fatto quanto prima con l'istituzione in Venezia di un centro di studi sul mare che comprenderà quattro sezioni: fisica mareografica, chimica, geomorfologica e biologica; ed assicurerà la continuità dell'opera degli Istituti di Trieste e di Rovigno d'Istria… Per quanto la costituzione di questo centro non sia ancora interamente definita, posso dirvi che esso ha già cominciato a funzionare…

Il riferimento era relativo a studi sul livello del mare e sulla temperatura dell'Alto Adriatico, sulle variazioni delle spiagge venete, dall'Adige all'Isonzo, su studi nella zona di Chioggia e della laguna veneta.

Il termine talassografia scomparirà dopo il 1950 dal Comitato nazionale per la geografia e la geologia e verrà istituita al suo posto una Commissione per la Talassografia e la Limnologia.

Tutto ciò che era stata l'idea di Vito Volterra per la costituzione del Comitato Talassografico Italiano veniva abbandonata e la ricerca in geologia marina ripartiva da zero.

A commento finale si può ricordare Linguerri (2005) che riportò quanto scritto da David Levi-Morenos (1891), algologo di Venezia, sulla rivista *Neptunia*, da Lui fondata, relativamente al mondo scientifico nazionale dell'epoca. L'autore sottolineava come i maggiori ostacoli allo studio del mare erano venuti, oltre che dalla penuria degli aiuti governativi, dalla scarsa abitudine dell'ambiente scientifico nazionale alla cooperazione:

> spontanea, pronta, geniale, zelante corrispondenza dell'opera di molti all'iniziativa di pochi.

L'opinione di Levi-Morenos è rimasta valida nel corso dei diversi decenni successivi e forse lo è ancora tutt'oggi.

BILIOGRAFIA

Wust, Georg 1964 — The major deep-sea expeditions and research vessels 1873-1960. A contribution to the history of oceanography. Progress in oceanography. 2 S: 1-62. London-New York.

Presciuttini, Paola 2000 — Coste del mondo nella Cartografia europea 1500-1900. Collana di antica cartografia. Volume di 180 pagine. Ivrea, Priuli & Verlucca, editori.

Giglioli, Enrico Hillyer 1875 — Viaggio intorno al globo della R. Pirocorvetta Magenta negli anni 1865-1866-1867 sotto il comando del capitano di Fregata V.F. Arminjon. Relazione descrittiva e scientifica, pubblicata sotto gli auspici del Ministero Agricoltura, Industria e Commercio. p.XXXVIII,1031, Milano, V. Maisner e Compagnia, Editori.

Giglioli, Enrico Hillyer- Issel, Arturo 1884 — Pelagos. Saggi sulla vita e sui prodotti del mare. Vol. di 437 pagine. Tipografia del R. Istituto de' sordo-muti. Genova.

Mirabello, Carlo 1873 — Notizie sui lavori idrografici eseguiti dalla R. marina nel Mare Adriatico e sulla pubblicazione delle carte generali parziali di esso. Rivista Marittima. Anno 6. n.2: 222-238, Roma.

Manzoni, Angelo 1871 — Delle recenti esplorazioni nelle grandi profondità marine-progetto e schema di una spedizione italiana per la esplorazione delle grandi profondità del Mediterraneo. Appendice. Rivista Marittima, Anno III, Secondo Semestre, fascicolo V: 506-512, Roma.

Manzoni, Angelo 1873 — Le ricerche scientifiche nelle profondità marine. Bollettino della Società geografica Italiana. Anno VII, Volume X, Fascicolo 2: 3-25. Stabilimento Giuseppe Civelli, Roma.

Issel, Arturo 1874 — Malta residuo di una gran terra sommersa- Schizzo geologico. Rivista Marittima. Anno VII, Primo Trimestre: 116-124. Cotta & Co. Tipografi del Senato. Roma.

Thomson, William 1878 — On compass adjustment in iron ship, and on a new sounding apparatus. The Journal of the Royal United Service Institution. Vol. XXII, N° XCIV: 111-119.

Issel, Arturo 1881 — Istruzioni Scientifiche per Viaggiatori, in collaborazione dei signori Giovanni Celoria, Michele Stefano De Rossi, Raffaello Gestro, Enrico Giglioli, Guido Grassi, Angiolo Manzoni, Antonio Piccone, Gustavo Uzielli e Arturo zannetti. Volume di 556 pagine. Tipografia Eredi Botta-Roma.

Maury, Matthew Fontaine 1858 — The physical geograpphy of the sea. an entirely new edition, with addenda. Volume di 360 pagine. Harper & Brothers Publishers -New York, Sampson Low, Son & Co. -London.

Dierssen Heidi M., Theberge Albert E. 2014	Bathymetry: Histoty of Seefloor Mapping. In: Encyclopedia of Natural Resources. Volume II- Water and air: 1-6. Taylor & Francis Group.
Chierchia, Giovanni 1882	Esplorazioni Abissali e Talassografiche eseguite dal r. piroscafo Washington durante la campagna idrografica del 1881 -Mezzi e modo di rastrellare il fondo. Rivista Marittima. Anno XV, Primo Trimestre, Fascicolo III: 437-454. Forzani &C., Tipografi del Senato. Roma.
Marcacci, Cesare 1885	Scandagli attraverso l'Oceano Pacifico fatti dalla corvetta Vettor Pisani (Comandante G. Palumbo). Rivista Marittima. Anno XVIII, Secondo Trimestre: 203-221. Forzani &C., Tipografi del Senato. Roma.
Issel, Arturo 1885	Esame sommario di alcuni saggi di fondo raccolti nel Golfo di Genova. Bollettino del R. Comitato Geologico d'Italia. Serie II, Vol. VI, N. 5 e 6: 129-139.
Walther, Johannes 1886	I vulcani sottomarini del Golfo di Napoli; nota dott. J. Walther. Bollettino del R. Comitato geologico d'Italia. V.17: 360-369. Firenze.
Issel, Arturo 1887	Sur l'existence de vallées submergées dans le golfe de Gênes. Compte rendus hebdomadaires des séances de l'Accadémie des sciences. Géologie: 250-253. Source gallica.bnf.fr /Bibliothèque nationale de France
Issel, Arturo 1888	Note geologiche sugli alti fondi marini. Mémoires de la Société Belge de geologie, de paléontologie & d'hydrologie (Tome II): 19-48.
Silvestri, Orazio 1889	Le maggiori profondità del Mediterraneo recentemente esplorate ed analisi geologica dei relativi sedimenti marini. Atti della Accademia gioenia di scienze naturali in Catania. Ser.4: v.1: 158-173. Tipografia Zuccarello & Izzi, Catania. https://www.biodiversitylibrary.org/item/189673
Magnaghi Giovanni Battista 1891	Lo scandaglio per grandi profondità. Adoperato nelle campagne idrografiche del R. piroscafo 'Washington'. Rivista Marittima. Anno XXIV, Secondo Trimestre: 5-43.
Riccò, Annibale 1889	Terremoti, sollevamento ed eruzione sottomarina a Pantelleria, nella seconda metà dell'ottobre 1891. Annali della Meteorologia Italiana. Volume IX, Parte III: 9-27.
Magnaghi, Giovanni Battista (?) 1892	L'eruzione sottomarina di Pantelleria. Brani di rapporto del comandante della spedizione idrografica. Rivista Marittima. Anno XXV, Fascicolo XII, Dicembre 1892: 387-394.
Bentivoglio, Tito 1892	Nota: Analisi dei sedimenti marini di due grandi profondità del Mediterraneo. Atti della Società dei naturalisti e matematici di Modena., ser. 3, v.8-11: 178-181.
Platania, Gaetano & Platania, Giovanni 1894	Le interruzioni del cavo telegrafico Milazzo-Lipari e i fenomeni vulcanici sottomarini nel 1888-92. Atti della Accademia gioenia di scienze naturali in Catania, ser.4, v.7, Memoria X: 1-13.

Alessio, Alberto 1909 Determinazione della gravità relativa fra Padova e Postdam e valori delle durate d'oscillazione dei pendoli dell'apparato tripendolare del R. Istituto Idrografico a Padova, prima e dopo della campagna di circumnavigazione della R. Nave Calabria. Annali Idrografici, v.6 Anni 1907-908-909: 1-148. Genova, Stabilimento Tipo-Litografico Pietro Pellas Fu I.

Alessio, Alberto 1913 Osservazioni gravimetriche dal 1903 al 1911. Annali Idrografici, v.8- Anni 1911-1912: 3-218. Stabilimento Tipo-Litografico Pietro Pellas Fu I.

Salmoiraghi, Francesco 1909 Alcuni saggi di fondo dei nostri mari. Reale Istituto Lombardo di Scienze e Lettere. Rendiconti. Serie II, Vol XLII, Fasc. I-II: 698-719. Ulrico Hoepli, Milano.

Salmoiraghi, Francesco 1910 Saggi di fondo raccolti dal R. Piroscafo Washington nella campagna idrografica del 1882. Reale Istituto Lombardo di Scienze e Lettere. Rendiconti. Serie II, Vol XLIII, Fasc. I-II: 432-453. Ulrico Hoepli, Milano.

Salmoiraghi, Francesco 1911 Saggi di fondo di mare raccolti dal R.Piroscafo "Washington" nella campagna del 1882. Nota 2ª postuma del M.E. prof. Francesco Salmoiraghi, letta nell'adunanza del 16 novembre 1911 del R.Ist. Lomb. di S. e Lett. Ee pubblicata a cura dal M.E. prof. Ettore Artini. Estratto dai Rendiconti del R. Ist. Lomb. di sc. e lett. Serie II, Vol. XIIV: 951-963. Tipo-Lit. Rebeschini di Turati e C., Milano.

Chelussi, Italo 1911 Contribuzione alla psammografia dei litorali italiani. Bollettino della Società Geologica Italiana, vol. XXX, part I: 183-202. Tipografia della Pace e. Cuggiani. Roma.

Chelussi, Italo 1911 Nuove contribuzioni alla psammografia dei litorali italiani -II- Sabbie del litorale da Molfetta a Taranto. Bollettino della Società Geologica Italiana, vol. XXX, part I: 736-738. Tipografia della Pace e. Cuggiani. Roma.

Chelussi, Italo 1912 Di alcuni saggi di fondo del Mediterraneo. Bollettino della Società Geologica Italiana, vol. XXXI: 79-88. Tipografia della Pace e. Cuggiani. Roma.

Issel, Arturo 1911 Indagini e lavori da eseguirsi nel Mare Ligure. Bollettino Bimestrale del Regio Comitato Talassografico Italiano, n. 15, Allegato I: 221-226. Premiate Officine grafiche di Carlo Ferrari. Venezia.

Magrini, Giovanni 1916 Gli scopi e l'attività del R. Comitato talassografico Italiano. Memoria XXI. Volume di 116 pagine. Venezia. Premiate officine grafiche di C. Ferrari.

Mancini, Renzo 1922 L'Arcipelago Toscano Seconda crociera di pesca marittima. Ministero per l'Agricoltura. Ispettoratp Generale della Pesca. Squadriglia Sperimentale di Pesca della R. Marina. Volume di 130 pagine, 2 carte. Tipo-Litografia del Commercio, Genova.

Sanzo, Luigi 1930 Ricerche oceanografiche e di biologia marina. Memoria

I Itinerario e stazioni biologiche della crociera. Annali Idrografici. Volime Undecimo BIS – Anni 1923-1924: 117-164. Genova, Tipogrfia dell'Istituto Idrografico della R. Marina.

Pasquini, Pasquale 1926 — Per una maggiore conoscenza della pesca adriatica e insulare. Risultati di ricerche talasso-biologiche eseguite durante la Campagna della R. Nave "Tritone" in alto, medio e basso Adriatico e nel mare della Sicilia orientale e meridionale (1924). Bollettino di pesca, di piscicoltura e di idrobiologia. Anno II, Fasc. II: 3-64. Ministero dell'Economia Nazionale, Ispettorato generale della pesca. Roma, Società Tipografica A. Manuzio.

Mazzarelli, Gustavo 1926 — Osservazioni eseguite durante la campagna della R.N."Tritone" nei mesi di agosto-ottobre 1925. Bollettino di pesca, di piscicoltura e di idrobiologia. Anno II, Fasc. VI: 6-31. Ministero dell'Economia Nazionale, Ispettorato generale della pesca. Roma, Società Tipografica A. Manuzio.

Mazzarelli, Gustavo 1929 — Osservazioni eseguite durante la campagna della R.N."Tritone" nei mesi di luglio-settembre 1926. Estratto dal Bollettino di pesca, di piscicoltura e di idrobiologia. Anno IV, Fasc. VI: 1-27. Roma, Società Tipografica A. Manuzio.

Mazzarelli, Gustavo 1936 — I campi di pesca delle acque della Libia, esplorati con la R. Nave "Tritone". Memorie di biologia marina e di oceanografia. Vol. IV, N. 8: 1-11. Messina, Tip. Psg. C. Saitta.

Vercelli, Francesco 1936 — Nuove ricerche sulle correnti marine nel Mar Rosso. ANNALI IDROGRAFICI— Raccolta di documenti e notizie circa l'idrografia e la navigazione. Volume XII Parte Seconda Anni 1925-1928: 217-290, 15 figure. Genova,Tipografia dell'Istituto Idrografico della R. Marina.

Cassinis, Gino e De Pisa, Manlio 1965 — La Crociera gravimetrica del R. Sommergibile "Vettor Pisani". ANNALI IDROGRAFICI—Raccolta di documenti e notizie circa l'idrografia e la navigazione. Volume Anni 1928-1939: 129-191. Genova, Tipo-litografia dell'Istituto Idrografico della R. Marina.

Cassinis, Gino 1935 — La seconda crociera gravimetrica italiana in sommergibile nel Mediterraneo (Anno 1935-XIII). La Ricerca Scientifica ed il progresso tecnico dell'economia nazionale. Anno VI, Vol. II, N. 11-12: 386-388. Ministero dell'educazione Nazionale. Venezia, Ditta Carlo Ferrari di Pasquale Ferrari.

D'Arrigo, Agatino 1934 — Ricerche sulla linea neutra inerente il Golfo di Gaeta e sul regime del litorale deltizio del Volturno. Annali dei lavori pubblici, Anno LXXII: 925-955. Roma, Istituto Poligrafico dello Stato.

D'Arrigo, Agatino 1936 — Ricerche sul regime dei litorali nel Mediterraneo. Volume

di 172 pagine e VIII tavole. Consiglio Nazionale delle Ricerche. Comitato perla Geografia- Comitato per l'Ingegneria. Ricerche sulle variazioni delle spiagge italiane (Istituto di Geografia Generale della R. Università di Pisa). Roma, Stabilimento tipografico "Aternume".

D'Arrigo, Agatino 1937 — Ricerche sulle caratteristiche del moto ondoso nel Mediterraneo e sulla teoria del Cornaglia. Annali dei Lavori Pubblici. anno LXXV, Fasc. 3°: 207-219, Fasc. 4°: 286-309. Ministero dei Lavori Pubblici. Consiglio Superiore. Roma, Istituto Poligrafico dello Stato.

Manfredonia, Luigi 1937 — Cenni illustrativi sulla carta generale batilitologica della piattaforma litorale italiana. Annali dei Lavori Pubblici. anno LXXV, Fasc. 5°: 389-401 e 5 tavole a colori. Ministero dei Lavori Pubblici. Consiglio Superiore. Roma, Istituto Poligrafico dello Stato.

Badoglio, Pietro 1938 — Parole inaugurali del presidente S.E: Pietro Badoglio. R. Comitato Talassografico Italiano. Assemblea plenaria del 19 aprile 1938-XVI. La Ricerca Scientifica ed il progresso tecnico dell'economia nazionale. Anno IX, Vol. I, N. 11-12: 611. Ministero dell'educazione Nazionale. Venezia, Ditta Carlo Ferrari di Pasquale Ferrari.

Brunelli, Gustavo 1938 — Relazione generale del vice-presidente. R. Comitato Talassografico Italiano. Assemblea plenaria del 19 aprile 1938-XVI. La Ricerca Scientifica ed il progresso tecnico dell'economia nazionale. Anno IX, Vol. I, N. 11-12: 612-617. Ministero dell'educazione Nazionale. Venezia, Ditta Carlo Ferrari di Pasquale Ferrari.

Vercelli, Francesco 1938 — Attività scientifiche dell'Istituto Geofisico di Trieste, nel triennio 1935-37. Allegato B. R. Comitato Talassografico Italiano. Assemblea plenaria del 19 aprile 1938-XVI. La Ricerca Scientifica ed il progresso tecnico dell'economia nazionale. Anno IX, Vol. I, N. 11-12: 621-626. Ministero dell'educazione Nazionale. Venezia, Ditta Carlo Ferrari di Pasquale Ferrari.

Bossolasco, Mario 1939 — L'erosione del litorale di Belvedere Marittimo. Geofisica pura ed applicata. Vol. 1, n. 1: 47-51. Messina, Regio Istituto Geofisico e Geodetico.

Caletti, Pio 1940 — Commissione permanente per lo studio delle sabbie ferrifere: Insediamento e Programma di lavoro. La Ricerca Scientifica ed il progresso tecnico nell'economia nazionale. Anno XI, n.6: 478-481. Ministero dell'educazione Nazionale. Venezia, Ditta Carlo Ferrari di Pasquale Ferrari.

Greco, Luigi e Camanzi, Alessandro, 1941 — Commissione permanente per lo studio delle sabbie ferrifere. Relazione sui giacimenti ferriferi di alcune spiagge sottomarine del litorale italiano. La Ricerca scientifica ed il progresso tecnico nell'economia nazionale, Anno XII, n. 7-8-9: 900-907. Ministero

dell'educazione Nazionale. Venezia, Ditta Carlo Ferrari di Pasquale Ferrari.

Zabelli, Arnaldo 1941 — Commissione permanente per lo studio delle sabbie ferrifere. Esplorazioni geofisiche per ricerche di sabbie ferrifere, effettuate specialmente sul fondo del mare. La Ricerca scientifica ed il progresso tecnico nell'economia nazionale, Anno XII, n. 7-8-9: 908-910.. Ministero dell'educazione Nazionale. Venezia, Ditta Carlo Ferrari di Pasquale Ferrari.

Modena, Eugenio 1941 — Caratteristiche della nave idrografica e oceanografica. Archivio di Oceanografia e Limnologia. Anno I, Fascicolo 3: 231-226. Roma, Consiglio Nazionale delle Ricerche. Comitato Talassografico Italiano.

Vercelli, Francesco 1942 — Lettera alla redazione: Sul problema della nave talassografica. in Comunicazioni. Archivio di Oceanografia e Limnologia. Anno II, fascicolo I: 73-74. Roma, Consiglio Nazionale delle Ricerche. Comitato Talassografico Italiano.

Brunelli, Gustavo 1946 — La ricostruzione della pesca nazionale. Ricerca Scientifica e Ricostruzione. Anno 16°, N.3-4: 252-256. Roma, Consiglio Nazionale delle Ricerche.

Colonnetti, Gustavo 1946 — Il discorso del Prof. Colonnetti. Ricerca scientifica e ricostruzione, anno 16°, n. 1-2: 5-11. Roma, Consiglio Nazionale delle Ricerche.

Almagià, Roberto 1946 — I compiti attuali della Geografia e il Consiglio Nazionale delle Ricerche. Ricerca Scientifica e Ricostruzione. Anno 16°, N.3-4: 243-251. Roma, Consiglio Nazionale delle Ricerche.

Colonnetti, Gustavo 1946 — L'Assemblea plenaria dei Comitati nazionali. Ricerca scientifica e ricostruzione. Anno 16°, N. 11: 1597-1605. Roma, Consiglio Nazionale delle Ricerche.

Linguerri, Sandra 2005 — Vito Volterra e il Comitato Talassografico Italiano, Imprese per mare e per terra nell'Italia Unita. Volume di 272 pagine. Firenze, Leo S. Olschki.

DATI E IMMAGINI DELLE NAVI

Almanacco Navale 1939 — Almanacco Navale 1940- XVIII. Vol. di 703 pagine. Ufficio collegamento stampa del Ministero della Marina. Milano, S.A. Arti Grafiche Alfieri & Lacroix.

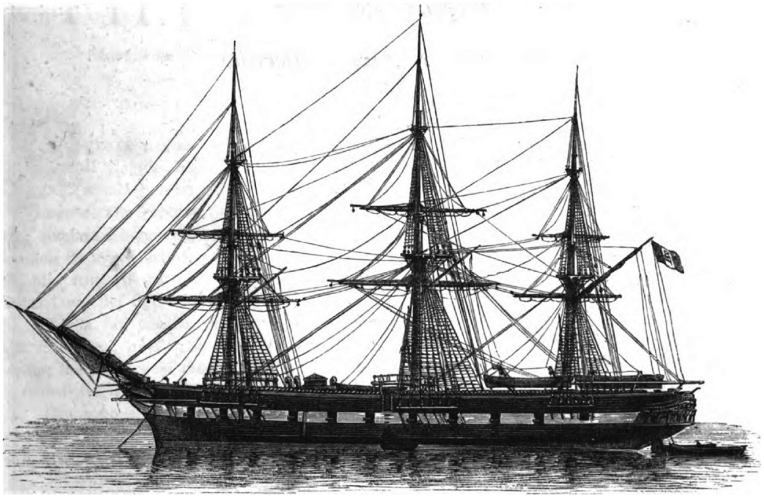
Giorgerini, Giorgio con Nani, Augusto 1978 — Almanacco Storico delle Navi Militari d'Italia 1861-1975. Vol. di 897 pagine. Roma, Ufficio Storico della marina Militare.

Bargoni, Franco 2012 — Tutte le navi militari d'Italia 1861-2011. Volume di 283 pagine. Roma, Ufficio Storico della Marina Militare. http://www.agenziabozzo.it

VIAGGIO
INTORNO AL GLOBO
DELLA R. PIROCORVETTA ITALIANA
MAGENTA
NEGLI ANNI 1865-66-67-68
SOTTO IL COMANDO DEL CAPITANO DI FREGATA V. F. ARMINJON.

RELAZIONE DESCRITTIVA E SCIENTIFICA
PUBBLICATA SOTTO GLI AUSPICI DEL MINISTERO DI AGRICOLTURA, INDUSTRIA E COMMERCIO
DAL DOTTORE
ENRICO HILLYER GIGLIOLI
Professore di Zoologia ed Anatomia comparata dei Vertebrati nel Regio Istituto di Studj Superiori di Firenze
già membro della Commissione Scientifica imbarcata su quella nave.

CON UNA INTRODUZIONE ETNOLOGICA DI PAOLO MANTEGAZZA.



REGIA PIROCORVETTA MAGENTA.

MILANO, V. MAISNER E COMPAGNIA, EDITORI.
1875.

Fig. 1. E.H. Giglioli, *Viaggio intorno al globo della r. pirocorvetta italiana Magenta negli anni 1865-66-67-68 sotto il comando del capitano di fregata V. F. Arminjon*, V. Maisner e Compagnia, Milano 1875, frontespizio (Biblioteca Nazionale Braidense, SC.CHIU-SO202.0028 - aut. MIC_PIN-BR_UO13|17/12/2024|0001621-P, © Su concessione del Ministero della Cultura - Pinacoteca di Brera - Biblioteca Braidense, Milano - divieto di ulteriore riproduzione o duplicazione con qualsiasi mezzo).

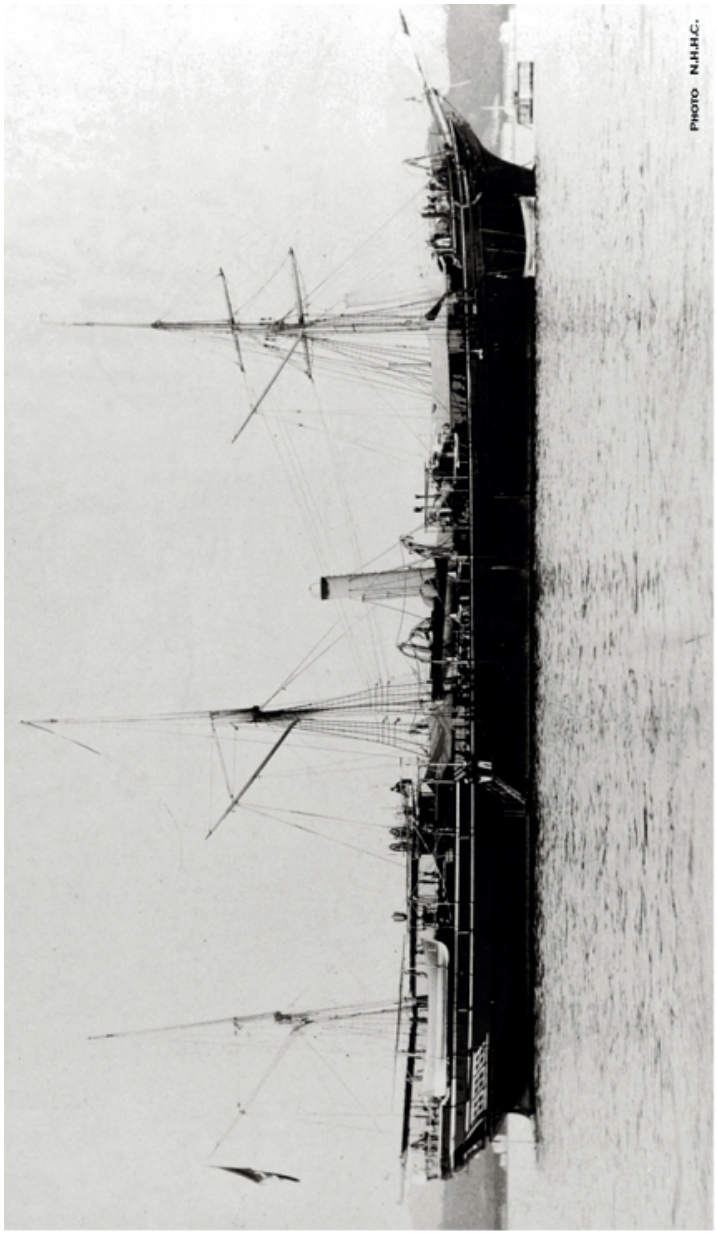


Fig. 2. La Regia Nave Washington (aut. https://www.naviearmatori.net, 13/12/2024, foto Capt. Haddock).

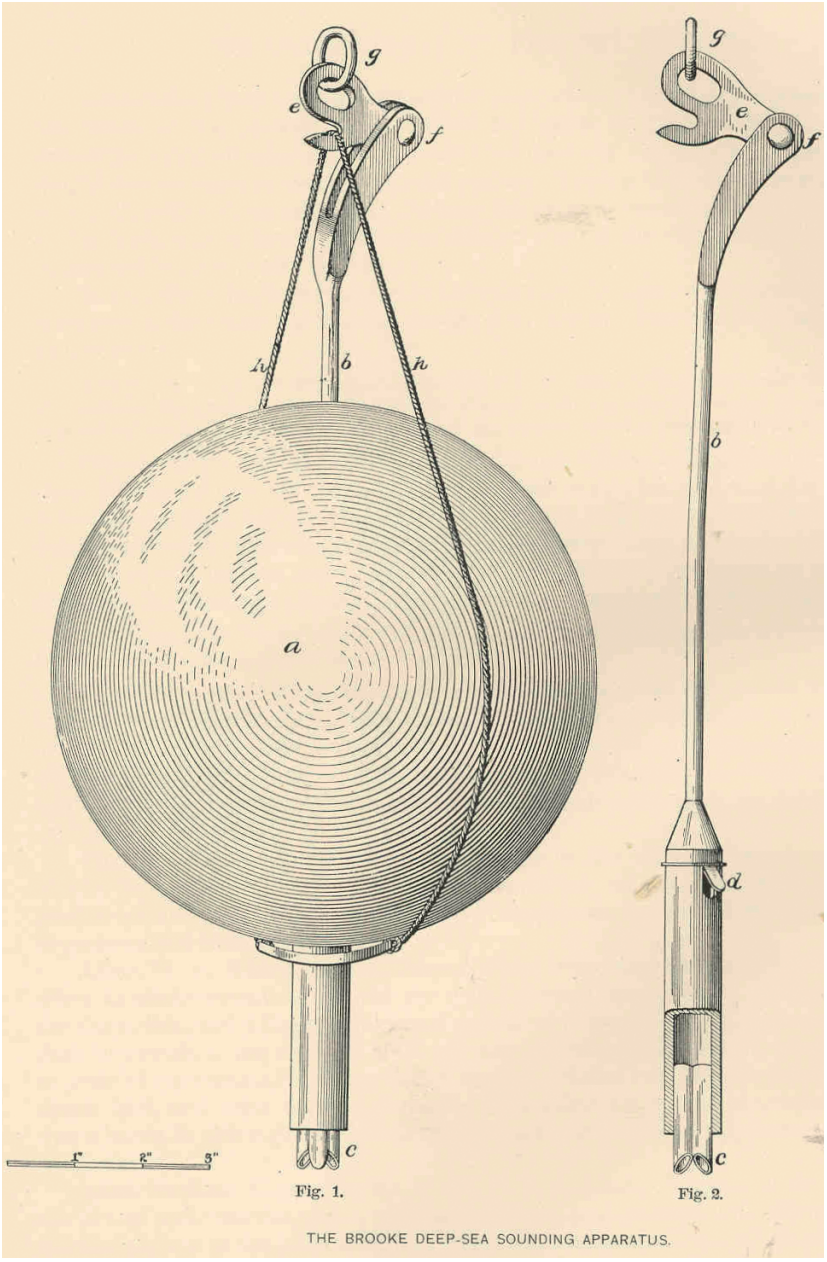


Fig. 3. Il Brooke deep-sea Sounding Apparatus (collezione privata).

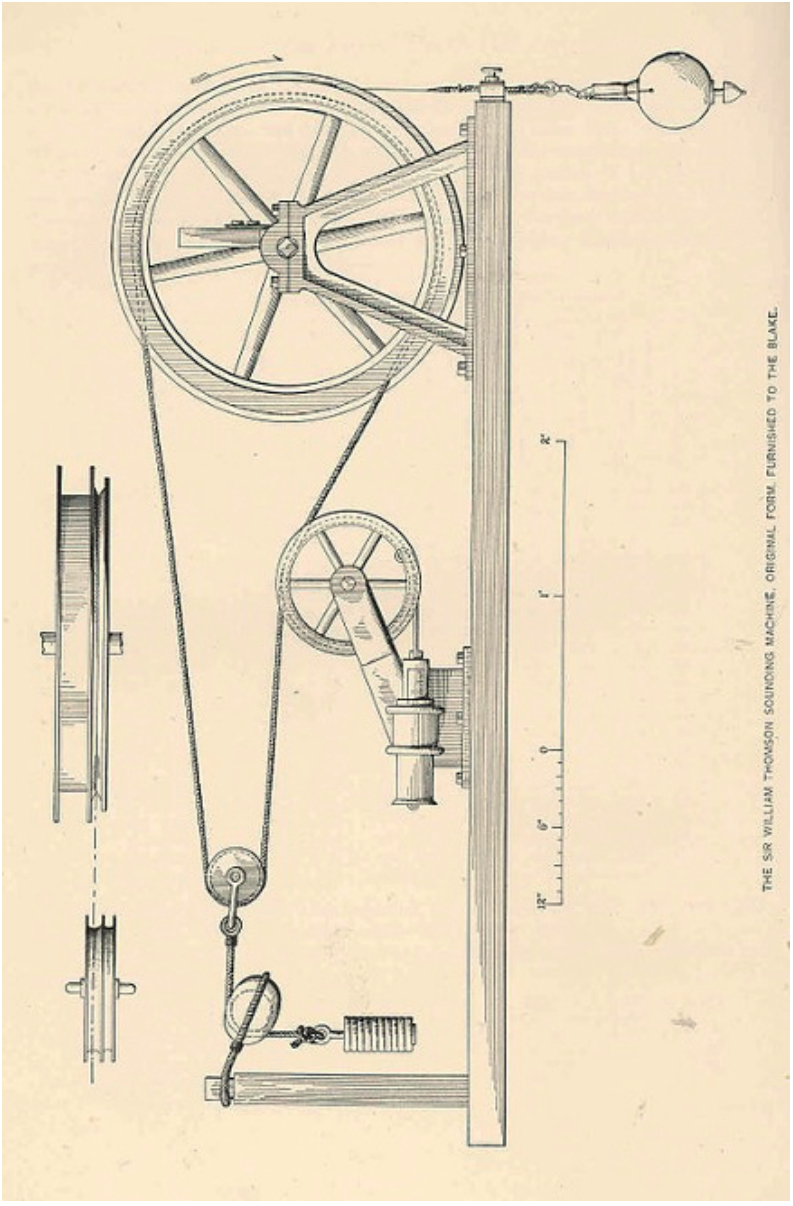


Fig. 4. La Thomson Sounding Machine. Da: Z.L. Tanner, *Deep-Sea Exploration: A General Description of the Steamer Albatross, Her Appliances and Methods*, in *Bulletin of the United States Fish Commission*, vol. 16, 1897 (collezione privata).

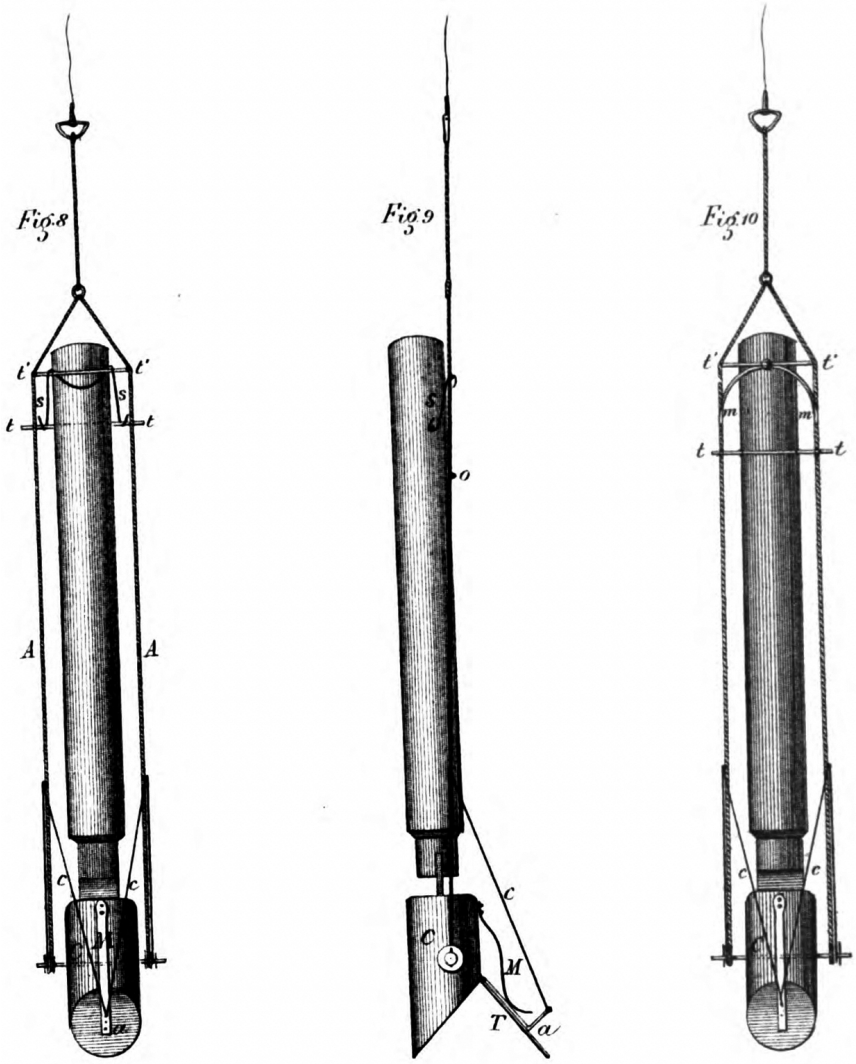


Fig. 5. Scandaglio Palumbo. Da: C. Marcacci, *Scandagli attraverso l'Oceano Pacifico fatti dalla corvetta Vettor Pisani (Comandante G. Palumbo)*, in *Rivista Marittima*, anno XVIII, 1885, II trimestre, p. 203-221 (Biblioteca Nazionale Braidense, PER.4.0035 - aut. MIC_PIN-BR_UO13|17/12/2024|0001620-P, © Su concessione del Ministero della Cultura - Pinacoteca di Brera - Biblioteca Braidense, Milano - divieto di ulteriore riproduzione o duplicazione con qualsiasi mezzo).

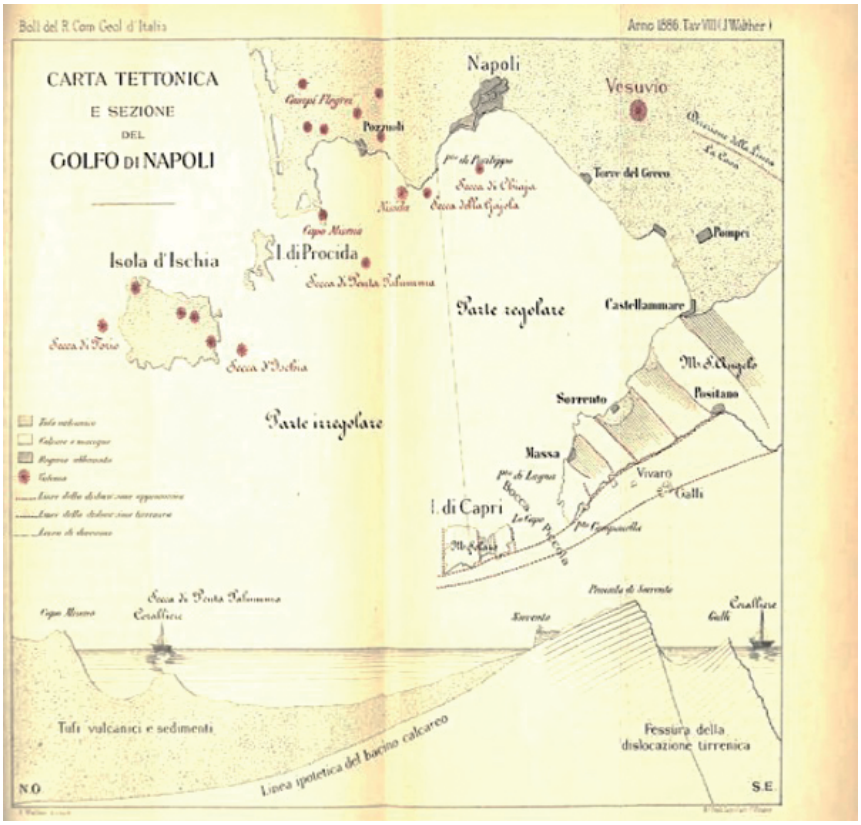


Fig. 6. Carta Tettonica del Golfo di Napoli. Da: J. Walther, *I vulcani sottomarini del Golfo di Napoli*, in *Bollettino del Regio Comitato Geologico d'Italia*, 1886, vol. XVII, n.9-10, p. 360-369 (Biblioteca Nazionale Braidense, PER.5.0007 - aut. MIC_PIN-BR_UO13|17/12/2024|0001619-P, © Su concessione del Ministero della Cultura - Pinacoteca di Brera - Biblioteca Braidense, Milano - divieto di ulteriore riproduzione o duplicazione con qualsiasi mezzo).

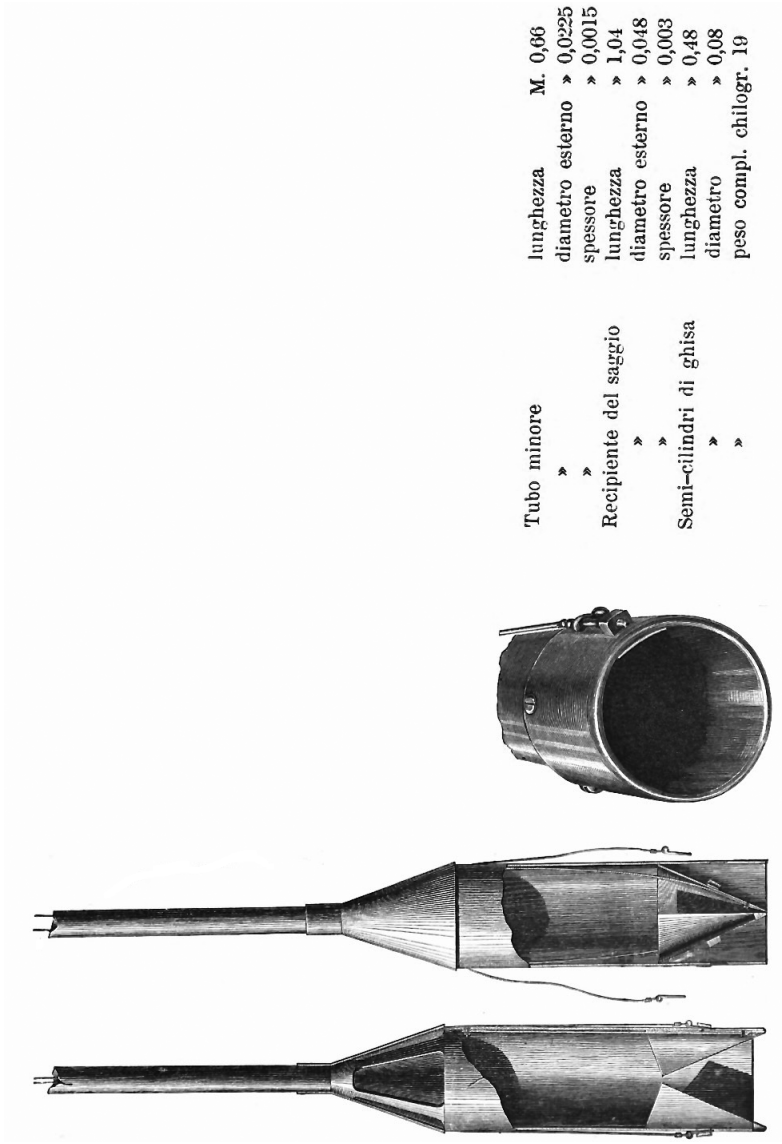


Fig. 7. Le parti inferiori dello scandaglio utilizzate per fondi resistenti e le dimensioni principali dello scandaglio. Da: G.B. Magnaghi, *Lo scandaglio per grandi profondità. Adoperato nelle campagne idrografiche del R. piroscafo "Washington"*, in *Rivista Marittima*, 1891, anno XXIV, II trimestre, p. 5-43 (collezione privata, rielaborazione dell'autore).



Fig. 8. Mappa di Pantelleria. Da A. Riccò, *Terremoti, sollevamento ed eruzione sottomarina a Pantelleria, nella seconda metà dell'ottobre 1891*, in *Annali della Meteorologia Italiana*, vol. IX, parte III, 1892, p. 9-27 (collezione privata).

Temperature e saggi di fondo raccolti presso l'isola di Pantelleria nel punto dove avvenne l'eruzione vulcanica sottomarina nel mese di ottobre 1891.

Num. d'ordine	Data	Numero dello scandaglio	Profondità	Temperatura alla superficie	Temperatura a 5 metri dal fondo	Annotazioni
1	luglio 26	7	375	....	....	Punto indicato dal pratico come centro di massima attività eruttiva. Il saggio di fondo è conservato in un bicchiere piccolo.
2	id.	8	287	....	....	Id.
3	id.	10	271	23° 5	14° 8	Id.
4	id.	11	401	....	14° 8	Id.
5	id.	12	338	....	14° 4	Id.
6	id.	13	356	....	14° 3	Id.
7	id.	14	309	....	14° 7	Id.
8	id.	16	298	....	14° 8	Id.
9	id.	18	213	....	14° 8	Id
10	id.	19	227	....	14° 9	Id.
11	id.	20	341	....	....	Id.
12	id.	23	219	....	15° 0	Id.
13	id.	24	205	....	15° 7	Id.
14	id.	25	264	....	....	Id.
15	id.	27	307	....	....	Id.
16	id.	31	92	....	....	Id.
17	id.	33	68	....	....	Id.
18	id.	35	51	....	....	Id.
19	luglio 27	8	188	....	....	Id.
20	id.	9	375	....	14° 4	Punto indicato dal Sindaco come centro di massima attività eruttiva. Il saggio di fondo è conservato in un pacchetto.
21	id.	11	127	....	....	Il saggio è conservato in un bicchiere piccolo.
22	id.		103	....	....	Il saggio è conservato in un pacchetto.

Fig. 9. Tabella parziale degli scandagliamenti e misure eseguiti dalla R.N. Washington. Da: *Brani di rapporto del Comandante della spedizione idrografica*, in *Rivista Marittima*, anno XXV, fasc. XII, dicembre 1892, p. 387-394 (collezione privata, rielaborazione dell'autore).

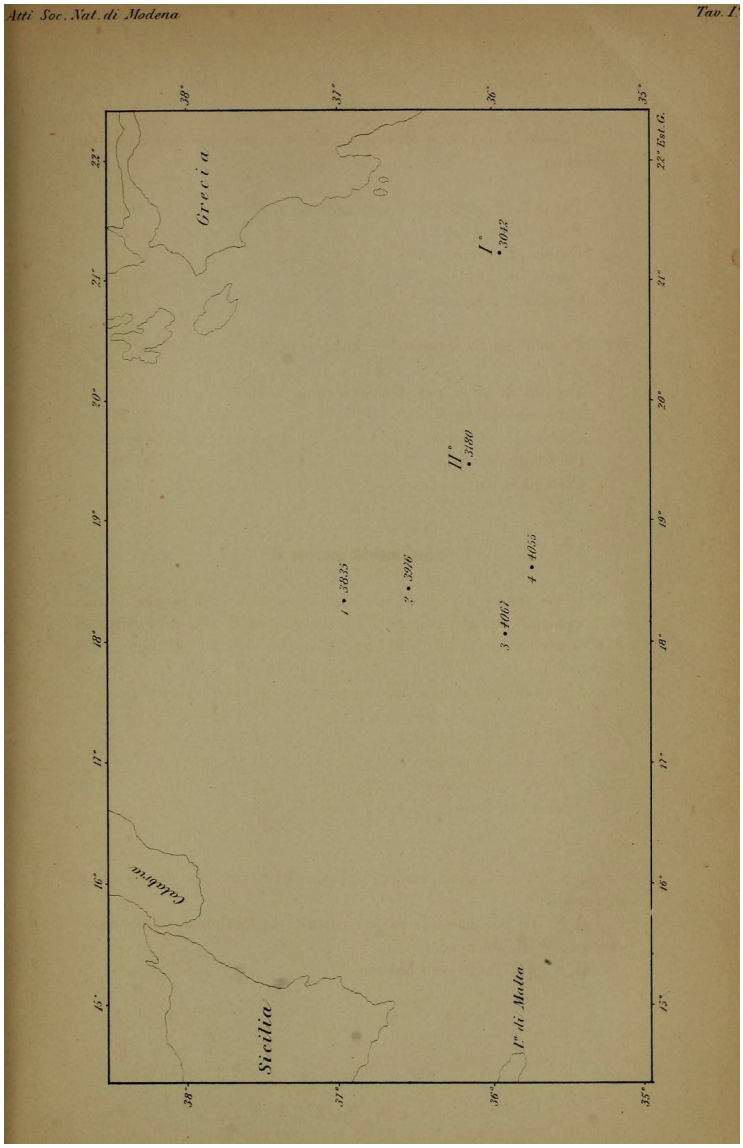


Fig. 10. Mappa dei prelievi effettuati dalla R.N. Scilla. Da: T. Bentivoglio, *Analisi dei sedimenti marini di due grandi profondità del Mediterraneo*, in *Atti della Società dei naturalisti e matematici di Modena*, serie III, vol. 8-11, 1892, p. 178-181, (Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere, G.11.2, © Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere).

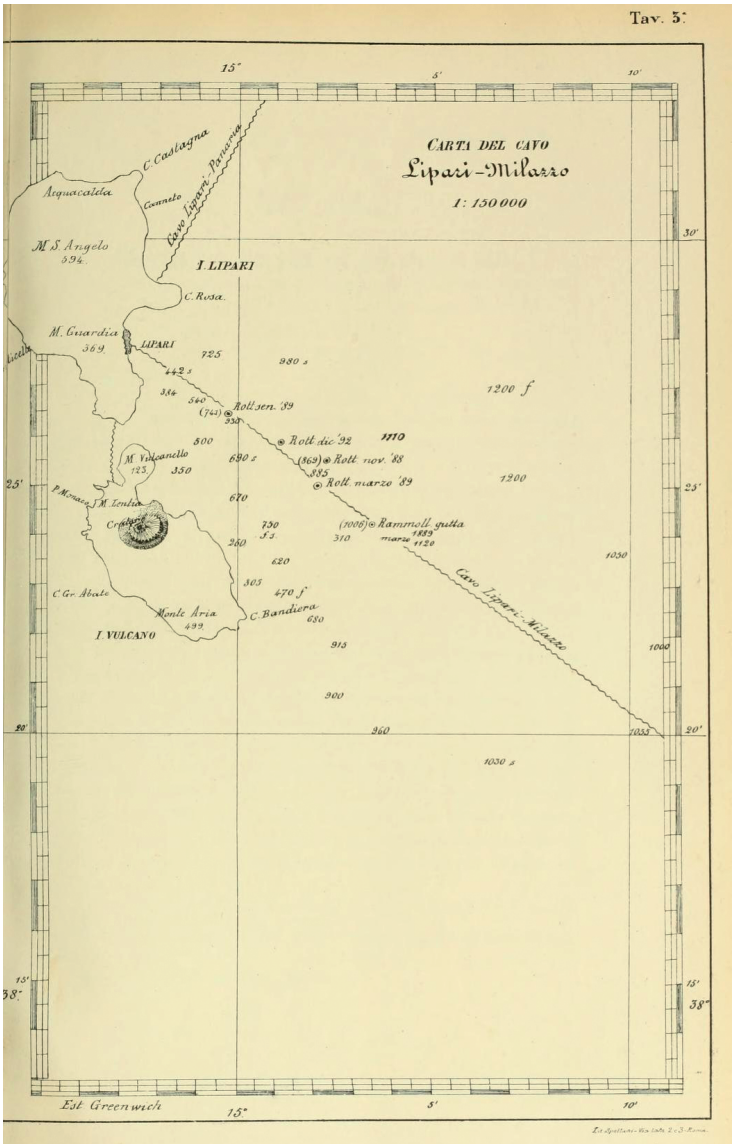
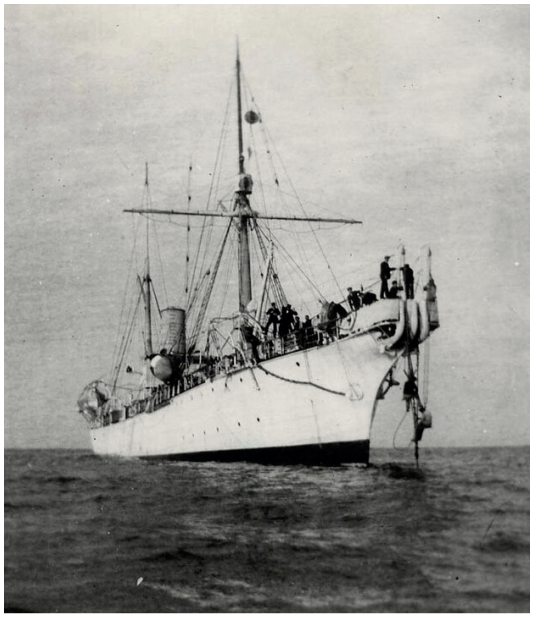


Fig. 11. Carta del tracciato del cavo Lipari-Milazzo. Da: Gaetano e Giovanni Platania, *Le interruzioni del cavo telegrafico Milazzo-Lipari e i fenomeni vulcanici sottomarini nel 1888-92*, in *Atti della Accademia gioenia di scienze naturali in Catania*, serie IV, vol. VII, 1894, memoria X, p. 1-13 (Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere, N24/1-2, © Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere).



MARE MEDITERRANEO

SCANDAGLI A GRAN PROFONDITÁ

eseguiti dalla R. Nave "Città di Milano", Com.te A. Resio, 1901

N.° D'ORDINE	POSIZIONE		PROFONDITÀ	NATURA
	LATITUDINE N.	LONG. E. Gr.	METRI	DEL FONDO
1	38° 00' 30"	25° 53' 40"	210	Fango
2	37 59 05	25 52 30	250	»
3	37 58 50	25 54 10	290	Fango e sabbia
4	37 58 50	25 51 30	300	Scoglio
5	37 57 00	25 55 50	350	Fango
6	37 59 00	25 56 30	310	»
7	39 00 20	25 51 40	170	Fango molle
8	39 02 00	25 50 30	170	»
9	39 01 00	25 50 00	160	»
10	39 05 40	25 49 30	140	»
11	39 02 00	25 48 20	170	»
12	41 15 45	9 52 20	550	»
13	41 16 00	9 59 00	620	»
14	41 16 40	9 52 10	550	»
15	41 18 00	9 50 20	570	»
16	41 18 20	10 06 00	960	»
17	41 18 50	9 58 20	785	»
18	41 19 50	9 59 40	820	»
19	41 21 40	9 57 20	790	»
20	41 22 30	9 54 20	930	»
21	41 22 20	10 06 40	880	»
22	41 21 40	10 07 00	805	»
23	41 20 00	10 06 40	915	»

Fig. 12. La nave posacavi Città di Milano (collezione privata). Gli scandagli del 1901. Da: A. Resio, *Scandagli a grande profondità eseguiti dalla R. Nave Città di Milano, Com.te A. Resio*, in *Annali Idrografici*, vol. III, 1903 (collezione privata).

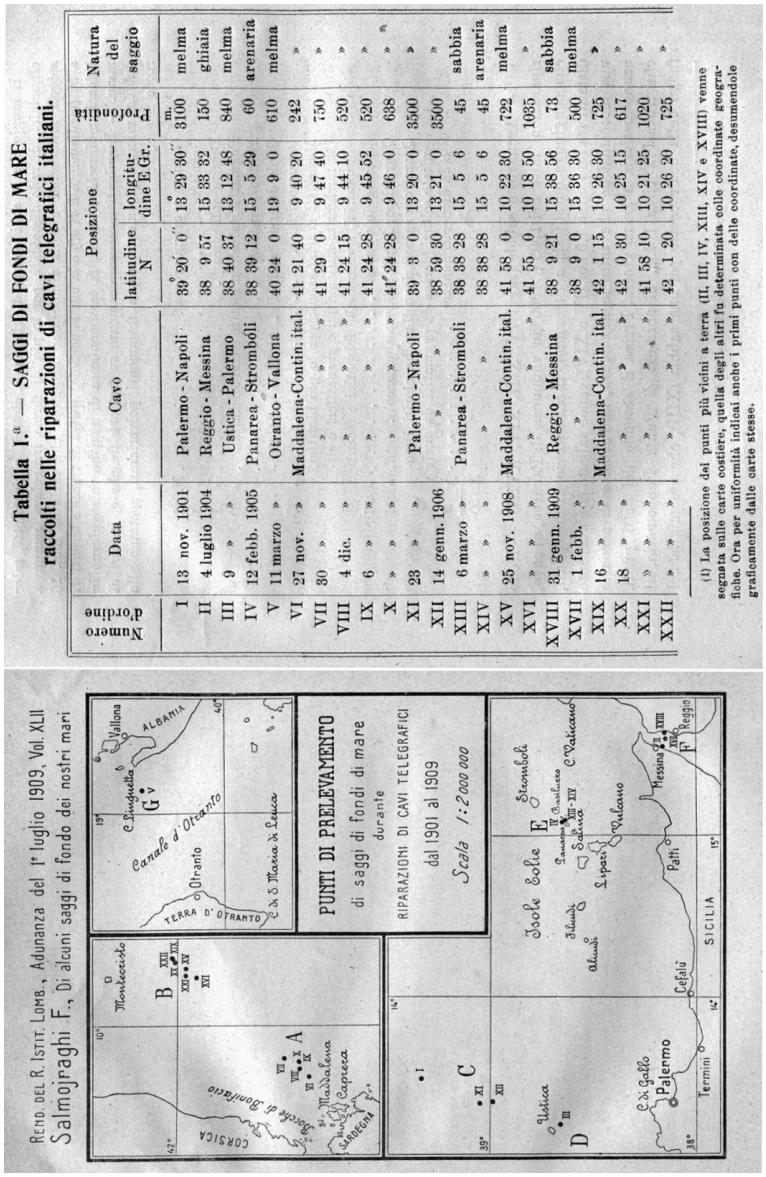


Tabella 1.ª — SAGGI DI FONDI DI MARE raccolti nelle riparazioni di cavi telegrafici italiani.

Numero d'ordine	Data	Cavo	Posizione latitudine N	Posizione longitudine E Gr.	Profondità	Natura del saggio
			° ′ ″	° ′ ″	m.	
I	13 nov. 1901	Palermo - Napoli	39 20 0	13 29 30	3100	melma
II	4 luglio 1904	Reggio - Messina	38 9 57	15 33 32	150	ghiaia
III	9 » »	Ustica - Palermo	38 40 37	13 12 48	840	melma
IV	12 febb. 1905	Panarea - Stromboli	38 39 12	15 5 29	60	arenaria
V	11 marzo »	Otranto - Vallona	40 24 0	19 9 0	610	melma
VI	27 nov. »	Maddalena-Contin. ital.	41 21 40	9 40 20	242	»
VII	30 » »	» »	41 29 0	9 47 40	750	»
VIII	4 dic. »	» »	41 24 15	9 44 10	520	»
IX	6 » »	» »	41 24 28	9 45 52	520	»
X	» » »	» »	41 24 28	9 46 0	638	»
XI	23 » »	Palermo - Napoli	39 3 0	13 20 0	3500	»
XII	14 genn. 1906	» »	38 59 30	13 21 0	3500	»
XIII	6 marzo »	Panarea - Stromboli	38 38 28	15 5 6	45	sabbia
XIV	» » »	» »	38 38 28	15 5 6	45	arenaria
XV	25 nov. 1908	Maddalena-Contin. ital.	41 58 0	10 22 30	792	melma
XVI	» » »	» »	41 55 0	10 18 50	1035	»
XVII	31 genn. 1909	Reggio - Messina	38 9 21	15 38 56	73	sabbia
XVII	1 febb. »	» »	38 9 0	15 36 30	500	melma
XIX	16 » »	Maddalena-Contin. ital.	42 1 15	10 26 30	725	»
XX	18 » »	» »	42 0 30	10 25 15	617	»
XXI	» » »	» »	41 58 10	10 21 25	1020	»
XXII	» » »	» »	42 1 20	10 26 20	725	»

(1) La posizione dei punti più vicini a terra (II, III, IV, XIII, XIV e XVIII) venne segnata sulle carte costiere, quella degli altri fu determinata colle coordinate geografiche. Ora per uniformità indicai anche i primi punti con delle coordinate, desumendole graficamente dalle carte stesse.

Fig. 13. Mappa ed elenco dei saggi studiati. Da: F. Salmoiraghi, *Alcuni saggi di fondo dei nostri mari*, in *Rendiconti del Reale Istituto Lombardo di Scienze e Lettere*, serie II, vol. XLII, 1909, fasc. 1-2, p. 698-719 (Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere, Sala lettura, © Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere).

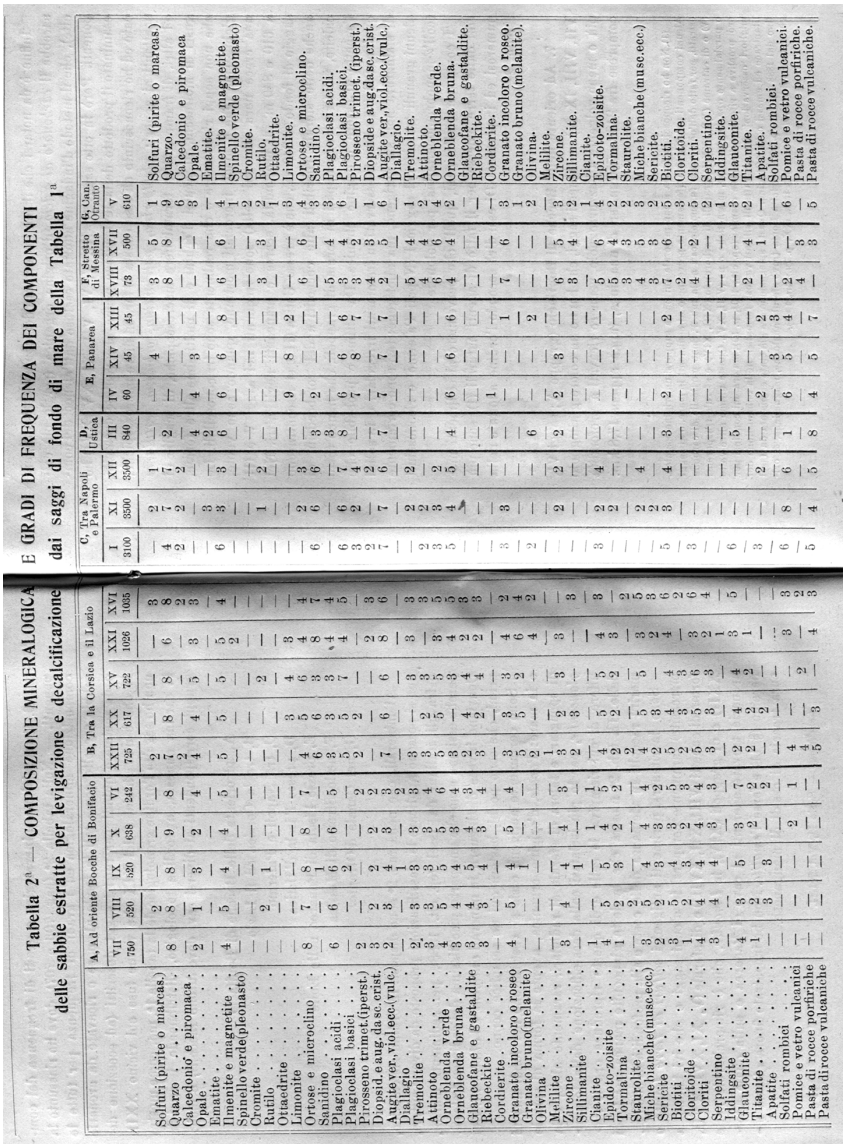


Fig.14. Composizione mineralogica e frequenza dei componenti. Da: F. Salmoiraghi, *Alcuni saggi di fondo dei nostri mari*, in *Rendiconti del Reale Istituto Lombardo di Scienze e Lettere*, serie II, vol. XLII, 1909, fasc. 1-2, p. 698-719 (Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere, Sala lettura, © Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere).

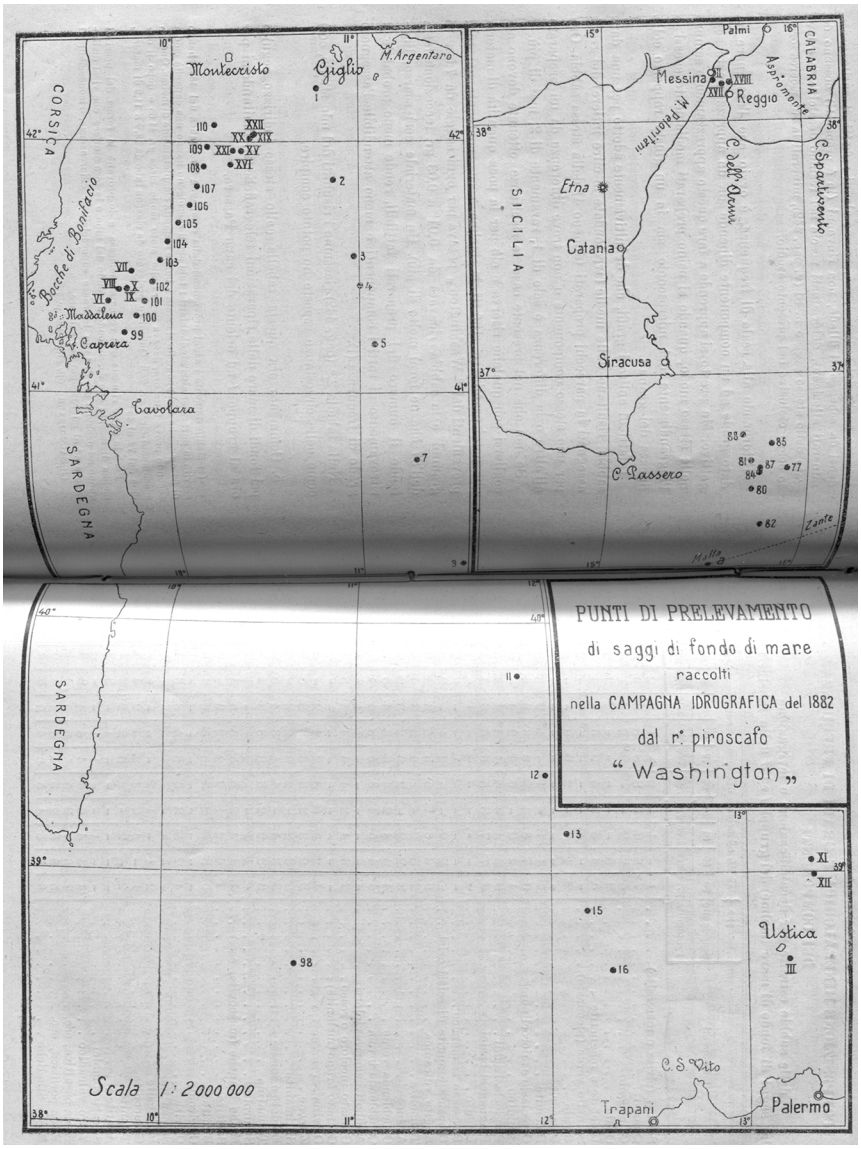


Fig. 15. Punti di prelevamento nella campagna del 1882. Da: F. Salmoiraghi, *Saggi di fondo di mare raccolti dal R. Piroscafo "Washington" nella campagna idrografica del 1882*, in *Rendiconti del Reale Istituto Lombardo di Scienze e Lettere*, serie II, vol. XLIII, 1910, p. 432-453 (Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere, Sala lettura, © Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere).

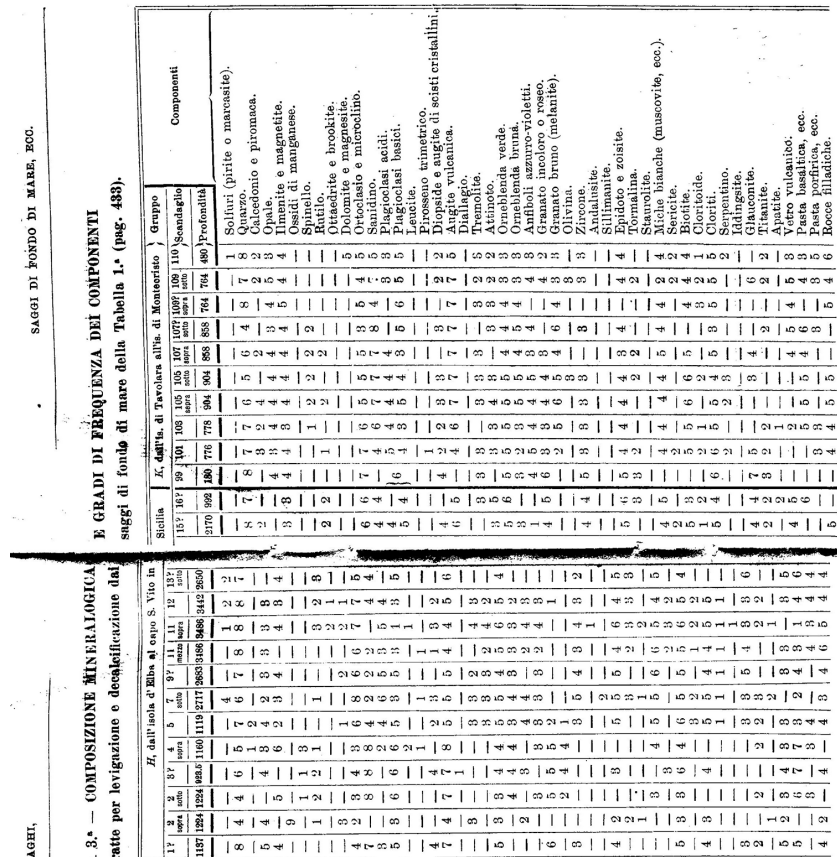
TABELLA 2.ª

COMPOSIZIONE MINERALOGICA E GRADI DI FREQUENZA DEI COMPONENTI

delle sabbie estratte per decalcificazione e levigazione dai saggi di fondo di mare (melme) dei gruppi *I* ed *J* della tabella 1.ª

Componenti	Gruppo	*I*, ad oriente del capo Passero									*J* (*)
	Scandaglio	88	85	81	87	84	77	80	82	*a*	98
	Profondità	2792	2836	3335	2700	3276	3306	3404	3444	1920	1583
Solfuri (pirite o marcasite)		1	–	1	–	2	–	1	2	2	1
Quarzo		7	8	7	5	8	8	8	8	9	8
Calcedonio		–	2	2	–	–	2	2	2	1	1
Opale		2	5	–	–	–	–	–	2	3	2
Ilmenite e magnetite		5	4	5	8	4	5	5	4	4	4
Spinello verde (pleonasto)		–	–	–	–	–	–	–	–	–	2
Rutilo		2	1	2	–	2	3	2	–	–	3
Ottaedrite		–	–	–	–	–	–	–	–	–	1
Dolomite		2	1	1	–	1	–	1	2	3	2
Ortoclasio e microclino		5	7	6	4	7	6	6	6	6	7
Sanidino		4	4	2	–	5	4	2	4	–	3
Plagioclasi acidi		3	3	4	3	4	4	4	4	5	5
Plagioclasi basici		6	7	7	8	5	6	6	6	4	4
Leucite		–	–	–	–	–	–	–	1	–	1
Pirosseno trimetrico		–	–	–	–	–	1	–	–	–	2
Diopside e augite di scisti crist.		–	2	2	–	–	2	1	–	2	2
Augite vulcanica		6	6	6	7	5	5	6	6	4	5
Tremolite		2	3	2	–	2	4	3	3	4	4
Attinoto		2	2	2	–	2	3	2	3	3	4
Orneblenda verde		4	4	4	2	4	6	3	4	5	5
Orneblenda bruna		4	4	5	4	3	5	3	4	4	4
Anfiboli azzurro-violetti		–	–	–	–	–	–	1	1	–	1
Granato incoloro o roseo		2	3	4	2	4	4	4	4	5	4
Granato bruno (melanite)		–	–	–	–	–	–	–	–	–	2
Olivina		4	2	4	5	3	2	4	2	–	2
Zircone		3	2	3	2	3	4	3	3	5	5
Sillimanite		2	2	2	–	2	3	2	3	–	2
Epidoto e zoisite		3	3	4	–	4	4	3	4	5	5
Tormalina		3	2	2	2	3	3	3	3	4	3
Staurolite		–	1	1	–	–	2	1	–	1	1
Miche bianche (muscovite, ecc.)		4	4	4	2	5	5	5	5	4	4
Sericite		2	2	2	1	2	2	2	3	–	3
Biotite		5	3	6	2	3	5	5	6	4	6
Cloritoide		–	–	–	–	–	–	–	–	–	1
Cloriti		4	2	5	3	3	6	5	6	6	4
Serpentino		–	–	–	–	–	–	–	–	–	1
Iddingsite		2	1	–	1	1	–	–	–	–	–
Glauconite		1	–	4	2	4	2	4	2	4	5
Titanite		2	–	2	–	2	3	2	2	2	2
Apatite		–	–	–	–	–	–	1	–	3	2
Solfati rombici		–	–	1	–	–	1	1	–	–	–
Vetro vulcanico		4	4	4	6	4	4	4	4	3	3
Pasta basaltica, ecc.		7	6	7	8	5	5	5	5	4	1
Pasta porfirica, ecc.		5	5	5	2	5	5	4	4	4	5
Rocce filladiche		6	5	5	4	5	6	4	5	5	4

Fig. 16. Tabella della composizione mineralogica. Da: F. Salmoiraghi, *Saggi di fondo raccolti dal R. Piroscafo "Washington" nella campagna idrografica del 1882*, in *Rendiconti del Reale Istituto Lombardo di Scienze e Lettere*, serie II, vol. XLIII, 1910, p. 432-453 (Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere, Sala lettura, © Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere).



954 F. SALMOJRAGHI, SAGGI DI FONDO DI MARE, ECC.

TABELLA 3.ª — COMPOSIZIONE MINERALOGICA E GRADI DI FREQUENZA DEI COMPONENTI delle sabbie estratte per levigazione e decalcificazione dai saggi di fondo di mare della Tabella 1.ª (pag. 433).

Fig. 17. La tabella con la composizione mineralogica e frequenza dei componenti. Da: F. Salmoiraghi, a cura di E. Artini, *Saggi di fondo di mare raccolti dal R. Piroscafo "Washington" nella campagna idrografica del 1882*, in *Rendiconti del Reale Istituto Lombardo di Scienze e Lettere*, serie II, vol. XLIV, 1911, p. 951-963 (Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere, Sala lettura, © Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere).

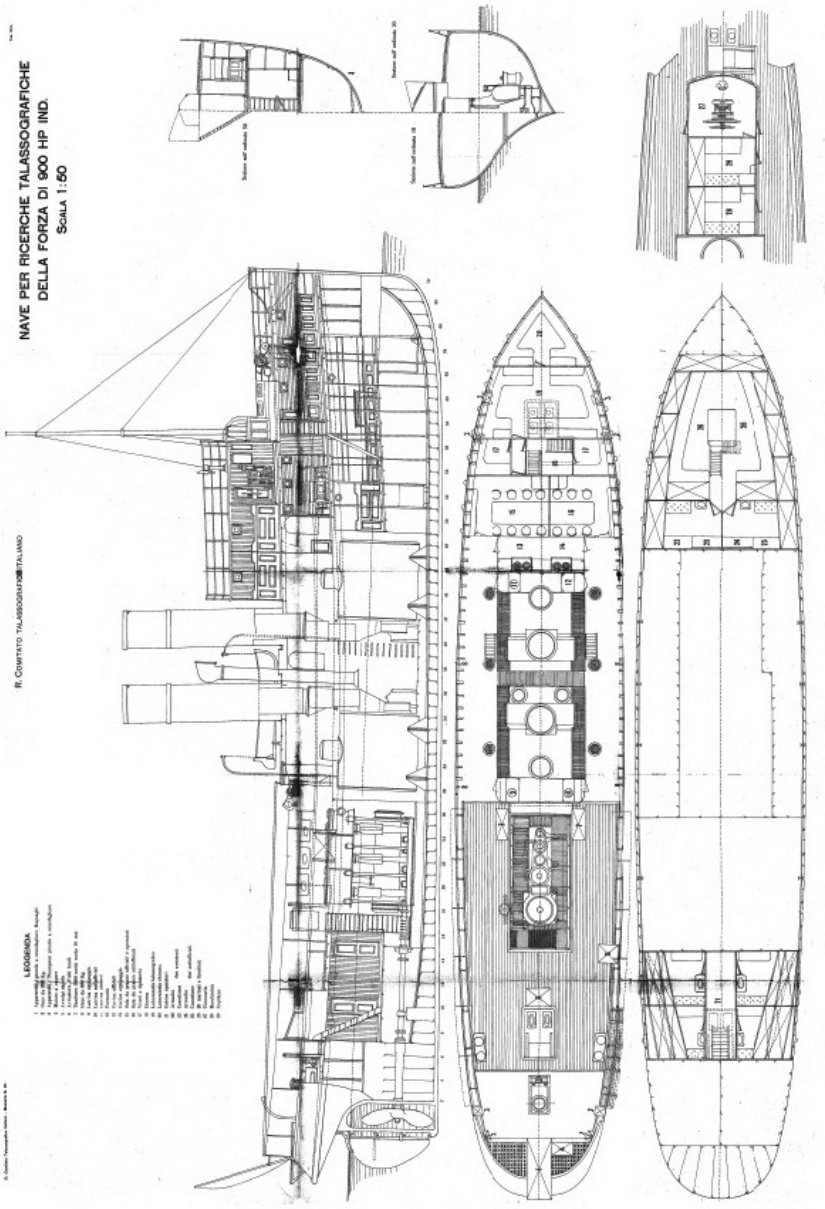


Fig. 18. La nuova nave Tremiti. Da: G. Magrini, *Gli scopi e l'attività del R. Comitato Talassografico Italiano: Memoria XXI*, 1916 (collezione privata).



Fig. 19. La Regia Nave Ammiraglio Magnaghi (aut. https://www.naviearmatori.net, 13/12/2024, foto Marcello Risolo).

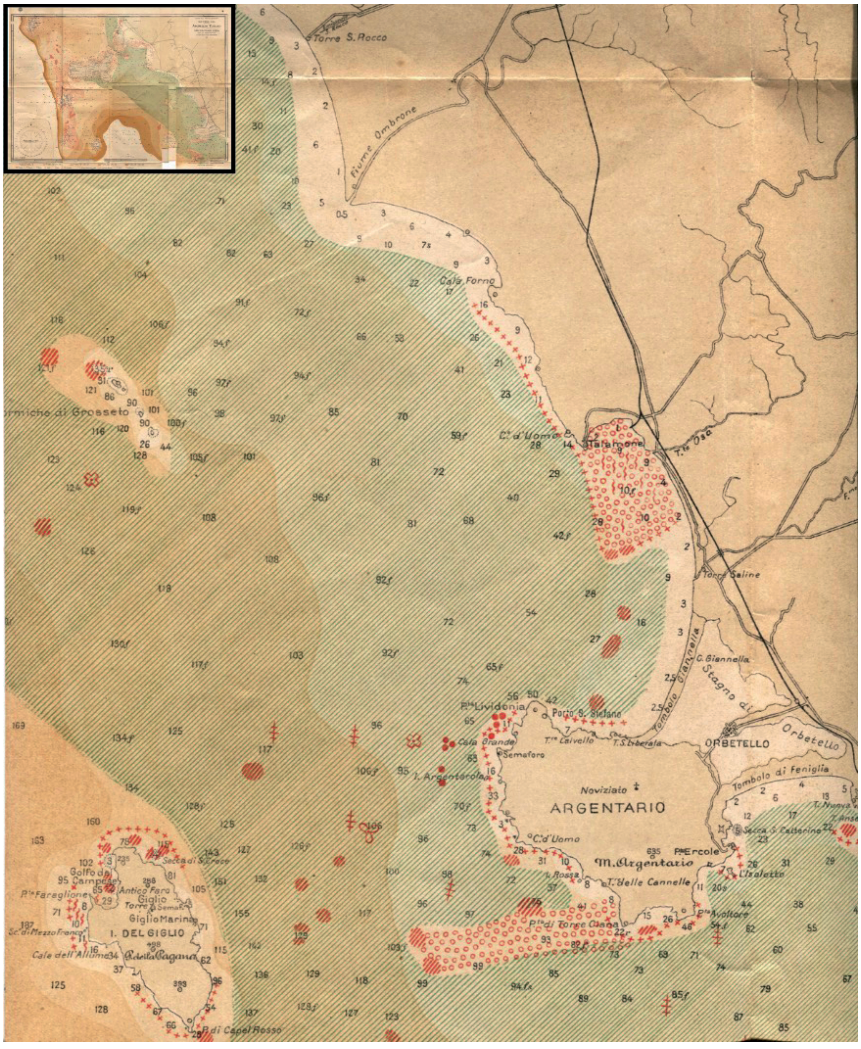


Fig. 20. La carta delle stazioni di pesca, particolare con indicata la natura del fondo. Da: R. Mancini, *L'Arcipelago Toscano Seconda crociera di pesca marittima*, Ministero per l'Agricoltura - Ispettorato Generale della Pesca, Tipo-Litografia del Commercio, Genova 1922 (collezione privata).

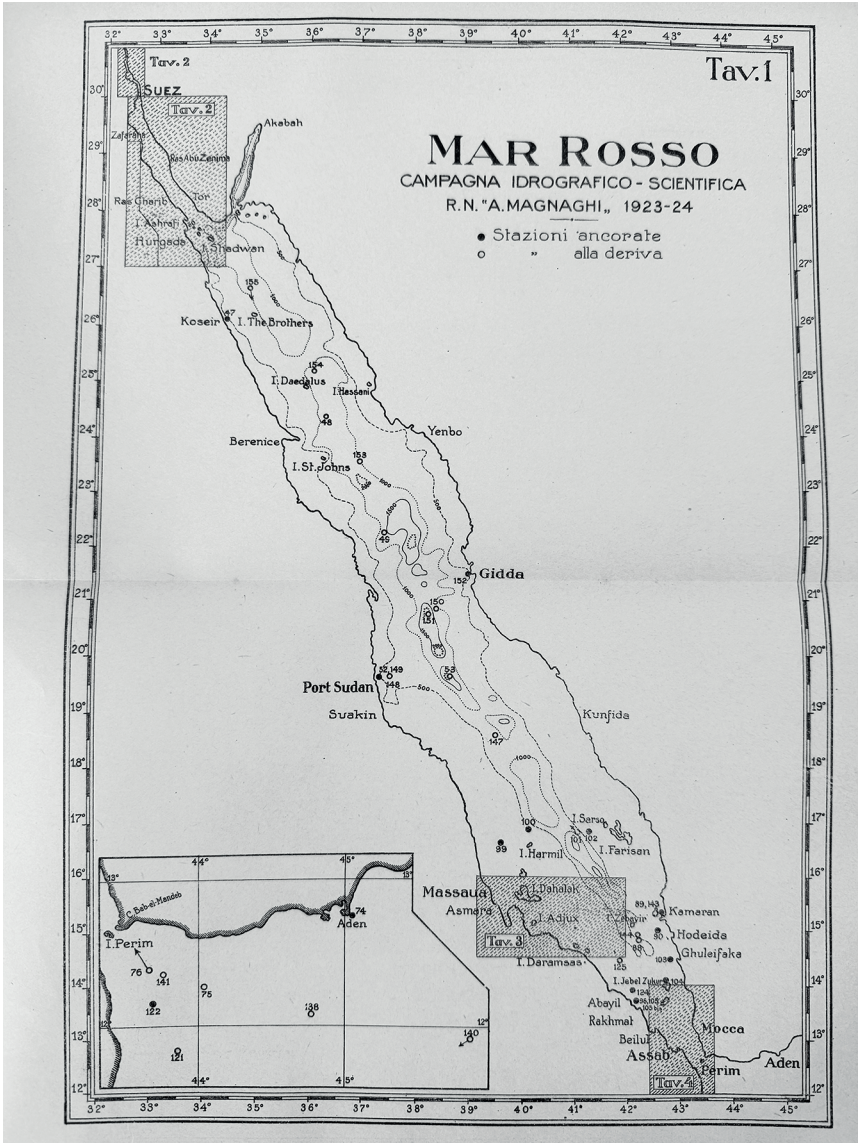


Fig. 21. Stazioni ancorate e con nave in moto nella campagna del 1923-24. Da: M. Picotti, *Ricerche di oceanografia chimica eseguite dalla R. Nave "Ammiraglio Magnaghi" (1923-1924)*, in *Annali Idrografici*, Vol. XI bis, 1930, p. 69-115 (collezione privata).



Fig. 22. Il laboratorio chimico-biologico sulla Ammiraglio Magnaghi. Da: M. Picotti, *Ricerche di oceanografia chimica eseguite dalla R. Nave "Ammiraglio Magnaghi" (1923-1924)*, in *Annali Idrografici*, Vol. XI bis, 1930, p. 69-115 (collezione privata).

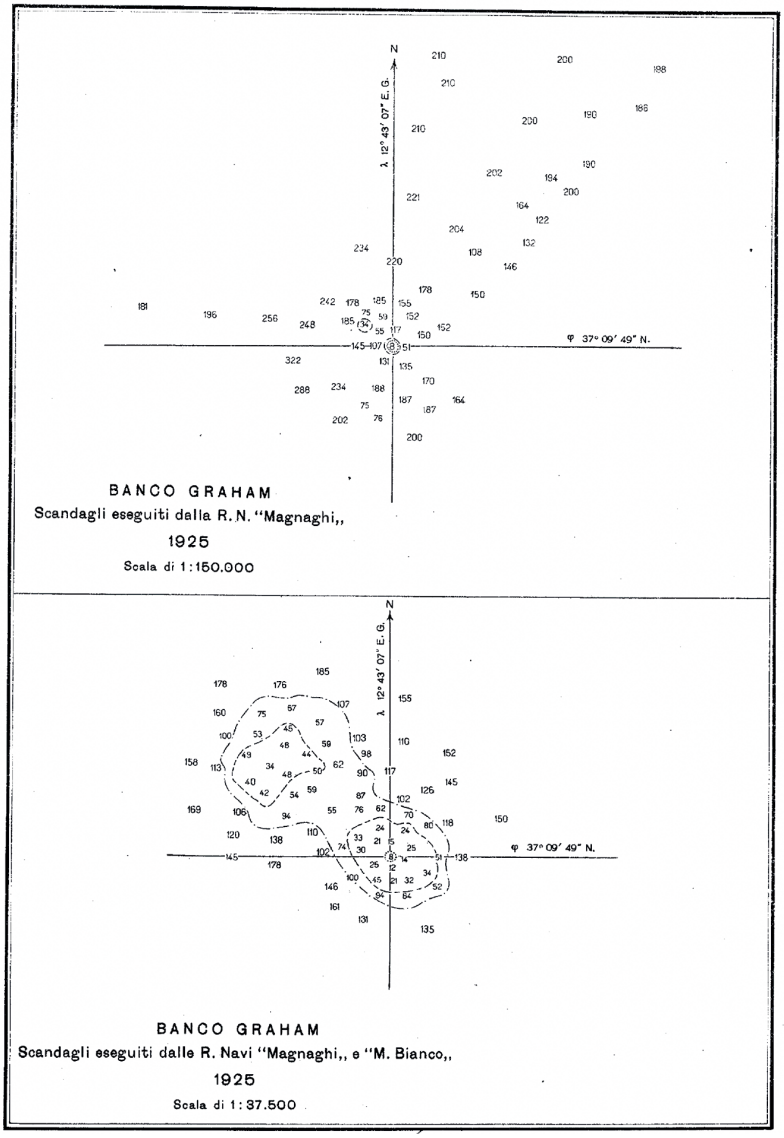
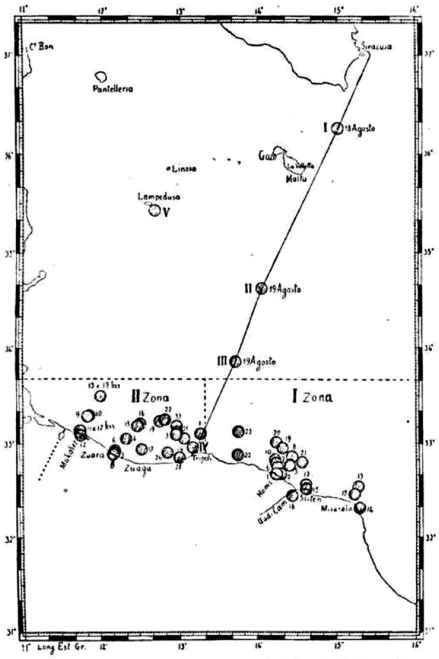


Fig. 23. I rilievi delle navi Ammiraglio Magnaghi e Mario Bianco nel 1925. Da: L. Tonta *Campagna Idrografica della R.N. Magnaghi Marzo-Settembre 1925* e G. Correale *Campagna idrografica della R. Vedetta Mario Bianco Gennaio-Ottobre 1925)*, in *Annali Idrografici*, vol. XII, parte I, anni 1925-1928, 1939 (collezione privata, rielaborazione dell'autore).



Carta delle stazioni eseguite per le osservazioni di ordine fisico-biologico compilata dal Dott. G. Mazzarelli (scala 1:4 000 000).

— 14 —

— 15 —

TABELLE RIASSUNTIVE

delle osservazioni eseguite durante la campagna della R. Nave "Tritone" nell'estate del 1925

ROTTA SIRACUSA-TRIPOLI

Mese	Giorno	N. della stazione	Coordinate della Stazione: lat. N	Coordinate della Stazione: long. E Gr.	Profondità della Stazione in m.	Qualità del fondo	Ora	Temperatura dell'acqua: superficie	Temperatura dell'acqua: profondità in m.	Temperatura dell'acqua: fondo	S (millesimi)	σ (densità in unità)	Correnti: Direzione	Correnti: Velocità in miglia	Trasparenza dell'acqua: Lunghezza della visibilità del disco bianco	Trasparenza dell'acqua: Colore del mare (Scala Forel)	Stato del mare: Direzione	Stato del mare: Forza	Stato del cielo	Vento: Direzione	Vento: Velocità in km. all'ora	Osservazioni
Agosto	19	I	38°17'00"	15°03'"	62	Sabbia e conchiglie	15h30m	26°6	0	26°7	38,30	1,02256	—	—	—	II	N	legg. mosso	sereno	NE	8	Si adopera l'"ingegno" per pescare coralio, e la draga. Inoltre si fanno pesche planktoniche. Si scorgono in superficie grandi sciami di *Corycleus rubrovalis*, e qualche *Thalassochelys* sp.
								25°6	20	26°6	38,30	1,02256										
								25°6	40	26°5	38,30	1,02256										
								25°6	75	18°7	38,30	1,02871										
Agosto	19	II	34°37'00"	19°47'"	?	?	9h00m	26°6	0	27°0	38,34	1,02252	—	—	—	I	N	legg. mosso	sereno	NE	12	Pesca planktonica. Sciami di *Corycleus*.
								26°6	10	26°5	38,39	1,02715										
								26°6	20	26°5	38,39	1,02715										
								25°6	75	17°7	38,34	1,02784										
								25°6	150	14°5	—	—										
								25°6	200	13°5	—	—										
Agosto	19	III	33°05'00"	15 d'0'"	?	?	17h00m	26°5	0	27°7	38,31	1,02516	—	—	—	II	N	legg. mosso	sereno	NE	8	Si vedono sempre estesi sciami di *Corycleus*.
								26°5	10	26°5	38,39	1,02825										
								26°5	20	26°5	38,39	1,02825										
								25°6	75	17°7	38,47	1,02825										
								25°6	150	15°2	—	—										
								25°6	200	14°2	—	—										

TRIPOLITANIA — I° ZONA

Mese	Giorno	N. della stazione	Coordinate della Stazione: lat. N	Coordinate della Stazione: long. E Gr.	Profondità della Stazione in m.	Qualità del fondo	Ora	Temperatura dell'acqua: superficie	Temperatura dell'acqua: profondità in m.	Temperatura dell'acqua: fondo	S (millesimi)	σ (densità in unità)	Correnti: Direzione	Correnti: Velocità in miglia	Trasparenza dell'acqua: Lunghezza della visibilità del disco bianco	Trasparenza dell'acqua: Colore del mare (Scala Forel)	Stato del mare: Direzione	Stato del mare: Forza	Stato del cielo	Vento: Direzione	Vento: Velocità in km. all'ora	Osservazioni
Agosto	21	1	In rada	ad Homs	10	Sabbia finissima	13h30m	29°6	0	27°0	38,38	1,02252	—	—	—	III	—	calmo	sereno	—	calmo	Alle 11h. a circa un miglio dalla costa, mentre la nave si dirige verso l'ancoraggio, si osserva a fior d'acqua un grosso squalo, che, stante la distanza, non fu possibile determinare.
							15 40	—	8	24°2	38,61	1,02256			fino al fondo							

Fig. 24. Tabelle riassuntive e carta delle stazioni. Da: G. Mazzarelli, *Osservazioni eseguite durante la campagna della R.N. Tritone nei mesi di agosto-ottobre 1925: relazione preliminare*, Società tip. A. Manuzio, Roma 1926 (collezione privata).



Fig. 25. Il sommergibile Vettor Pisani (aut. https://www.naviearmatori.net, 13/12/2024, foto Marcello Risolo).

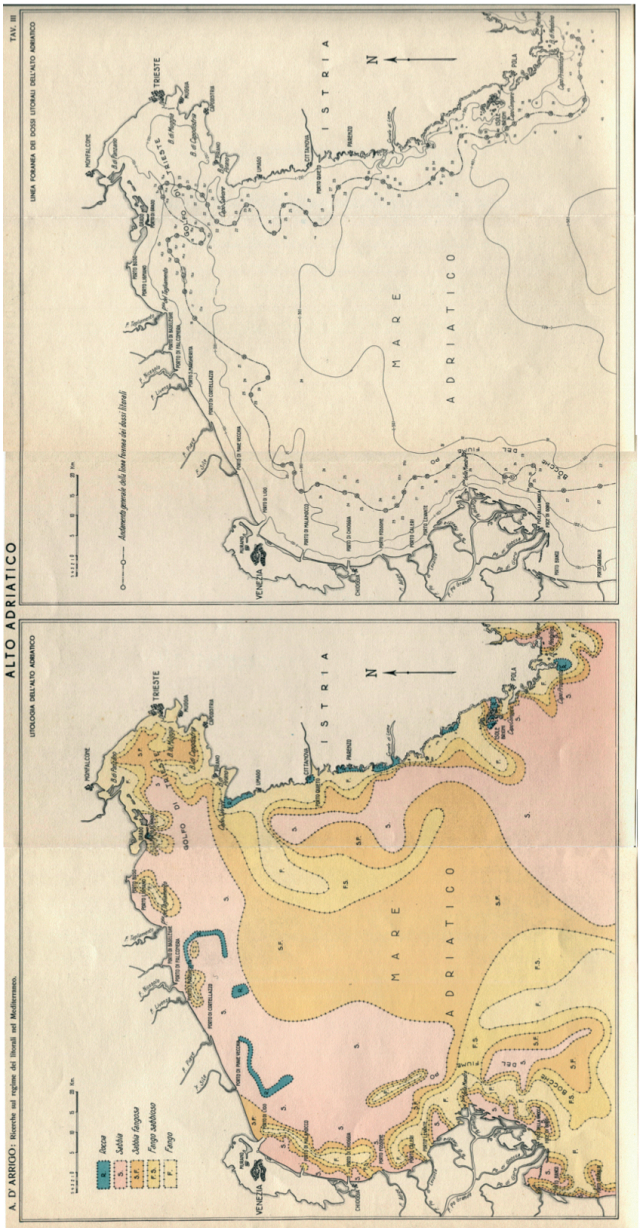


Fig. 26. L'Alto Adriatico. Da: A. D'arrigo, *Ricerche sul regime dei litorali nel Mediterraneo*, tavola allegata (collezione privata).

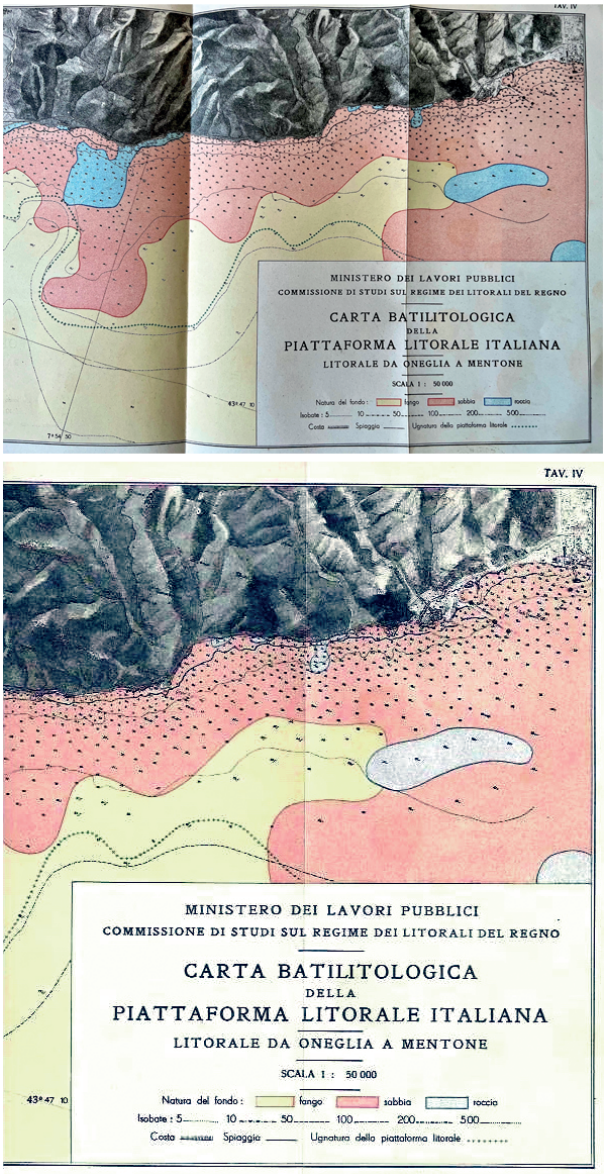


Fig. 27. Carta batilitologica del litorale da Oneglia a Mentone e un particolare. Da: L. Manfredonia, *Cenni illustrativi sulla carta generale batilitologica della piattaforma litorale italiana*, in *Annali dei Lavori Pubblici*, anno LXXV, Fasc. 5, 1937, p. 389-401, tavola a colori allegata (collezione privata).

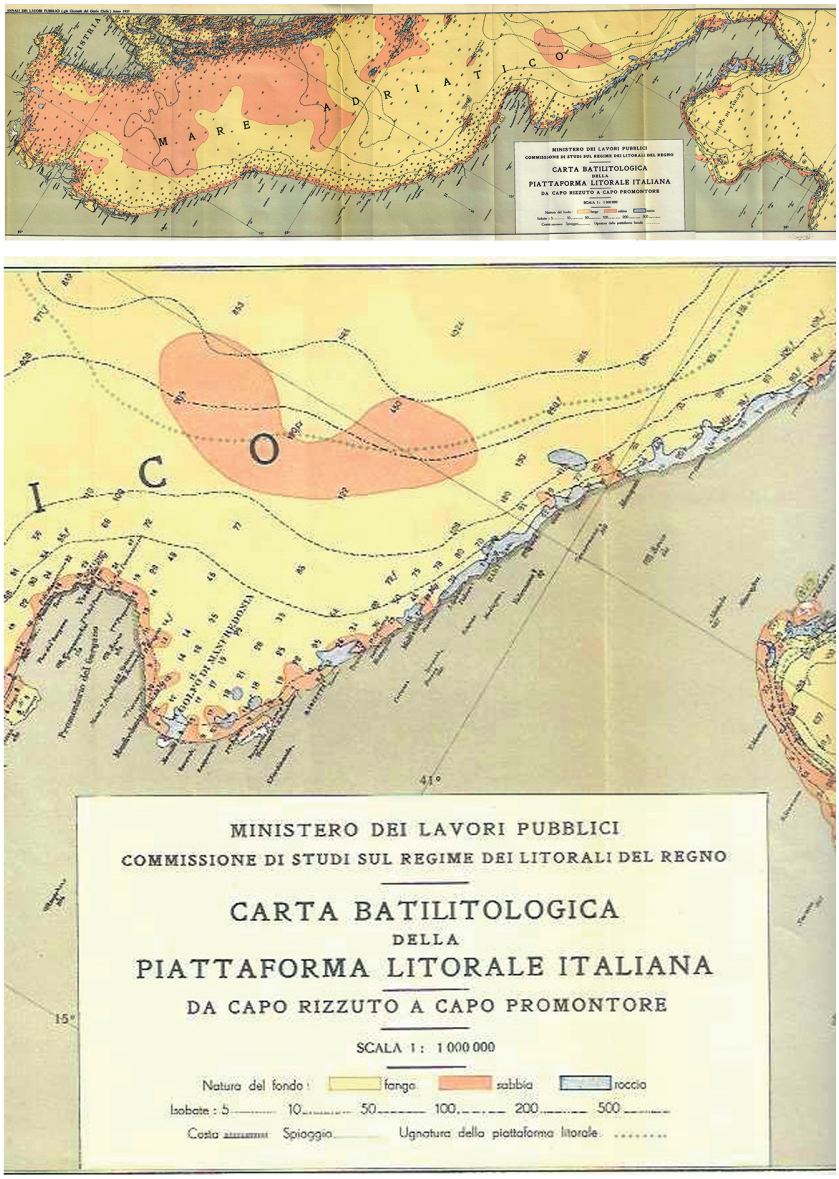


Fig. 28. Carta batilitologica del Mare Adriatico e un particolare. Da: L. Manfredonia, *Cenni illustrativi sulla carta generale batilitologica della piattaforma litorale italiana*, in *Annali dei Lavori Pubblici*, anno LXXV, fasc. 5, 1937, p. 389-401, tavola a colori allegata (collezione privata).

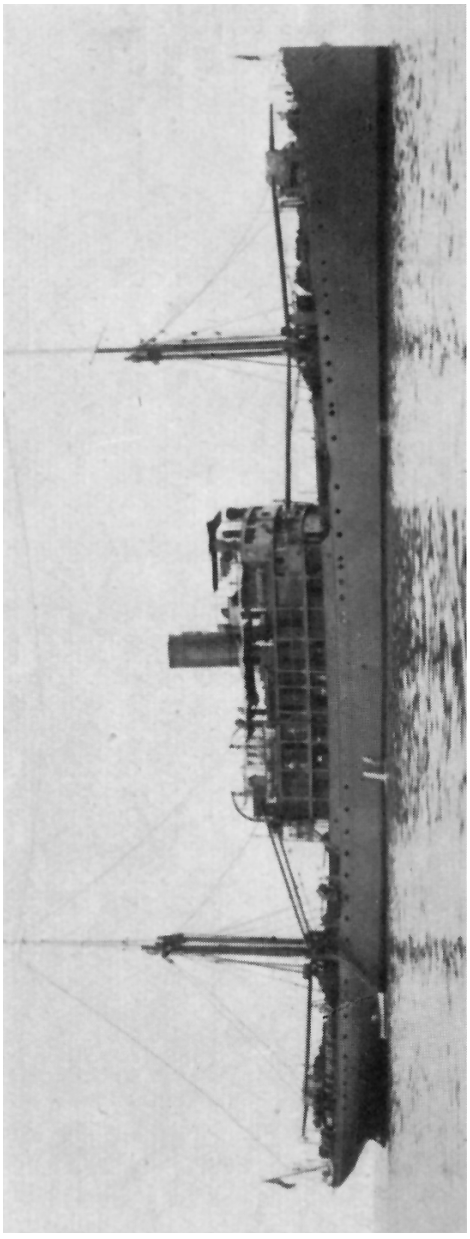


Fig. 29. La R.N. Cherso (aut. https://www.naviearmatori.net, 13/12/2024, foto m1000f).

Istituto Lombardo (Rend. Scienze) 157, 217-236 (2023-2024)

ITALO CALVINO E ILYA PRIGOGINE, UN'APPASSIONATA MEDITAZIONE

LUIGI FINARELLI (*)

Nota presentata dal m.e. Giorgio Benedek
(Adunanza del 14 dicembre 2023)

SUNTO. – Nella duplice ricorrenza del centenario di Italo Calvino (1923-1985) e dei venti anni dalla morte di Ilya Prigogine (1917-2003) percorriamo il loro dialogo a distanza tra espliciti riferimenti e reciproche ispirazioni. Dalle *Lezioni americane,* nelle quali traspare il pensiero di Prigogine, alla recensione che Calvino dedicò al saggio *La nuova alleanza* ben prima che fosse pubblicato in Italia. Dalla dimensione narrativa dell'universo, agli eventi imprevisti e le biforcazioni del tempo. E ancora: *Le cosmicomiche* e il reincantamento della scienza, la *Modernità liquida,* l'esperimento come arte, la poesia come grande nemica del caso.

***

ABSTRACT. – On the double occasion of Calvino's centenary (1923-1985) and of the twenty years since the death of Ilya Prigogine (1917-2003) we follow their dialogue at a distance between explicit references and mutual inspirations. From the *Six Memos for the Next Millennium*, in which Prigogine's thoughts shine through, to the review dedicated from Calvino to the essay *La Nouvelle Alliance* some years before the italian and english translations were published. From the narrative dimension of the universe, to unexpected events, to time bifurcations. And over again: *Cosmicomics* and the reenchantment of science, Bauman's *Liquid Modernity*, experiment as art and poetry as the great enemy of chance.

(*) Centro di ricerca Ishtar, Università di Bergamo, Italy.
E-mail: luigi.finarelli@gmail.com

All'inizio di questa panoramica consideriamo brevemente alcune prospettive del futuro tratteggiate dai due autori.

Nel 1985, anno della sua morte, Calvino stava mettendo a punto le conferenze per le *Norton Lectures* con il titolo *Six Memos for the Next Millennium* che saranno poi pubblicate in italiano come *Lezioni americane.* Nella quinta conferenza ha dichiarato esplicitamente che la conoscenza come molteplicità è "un filo che – al di là di tutte le etichette – vorrei continuasse a svolgersi nel prossimo millennio[1]." Pochi anni dopo l'Unesco pubblicava una raccolta di *Letters to future generations* affidate a varie e differenti personalità tra le quali anche Prigogine:

> My message to future generations is, therefore, that the die has not been cast, and that the branch taken following the bifurcation has yet to be chosen. We are in a period of fluctuations in which individual action remains essential. The more science advances, the more astonished we are by it[2].

Lo stesso Prigogine che scrive "Il futuro non è determinato" e che si stupisce ammirato per gli avanzamenti della scienza, in occasione della celebrazione del 25° anniversario del suo premio Nobel nel 2002 afferma: "*Astonishment leads to creativity*". Possiamo vedere come nella sua lettera alle future generazioni è soprattutto notevole l'importanza attribuita all'azione degli individui, similmente al ruolo di partecipazione all'evoluzione cosmica che Calvino aveva dichiarato nel 1970: "L'uomo collabora con la sua immaginazione e il suo lavoro all'autocostruzione continua dell'universo[3]."

---

[1] Calvino Italo, *Lezioni americane*, *Molteplicità*, Garzanti, Milano, 1988, p. 113.

[2] Prigogine Ilya, *The die is not cast* in *Letters to future generations - Original texts selected and compiled by Federico Mayor,* Unesco Publishing, Paris, 1999, p. 138.

[3] Wagener Françoise, intervista a Italo Calvino *Nous vivons désormais dans une métropole unique*, Le monde, 25 aprile 1970, traduzione italiana *Un paesaggio ininterrotto di carta*, in *Sono nato in America, Interviste 1951-1985,* a cura di Luca Baranelli, Mondadori, Milano, 2002, p. 154.

1. Dialoghi incrociati

Da questo breve scambio indiretto possiamo cominciare a delineare il loro dialogo a distanza: in particolare l'importanza che il rapporto tra letteratura e pensiero scientifico ha avuto per Calvino e il ruolo che ha svolto Prigogine in quanto uno degli scienziati che lo hanno ispirato. Non è difficile infatti riconoscere il suo pensiero sullo sfondo della Lezione dedicata alla *Molteplicità:*

> Da quando la scienza diffida dalle spiegazioni generali e dalle soluzioni che non siano settoriali e specialistiche la grande sfida per la letteratura è il saper tessere insieme i diversi saperi e i diversi codici in una visione plurima, sfaccettata del mondo[4].

tanto che secondo Adriano Piacentini "Prigogine ... cura il substrato scientifico della Molteplicità senza mostrarsi[5]." E ulteriormente nella Lezione intitolata *Esattezza* l'emergere di zone che tendono verso un ordine si contrappone all'ineluttabilità del disordine termodinamico finale:

> L'universo si disfa in una nube di calore, precipita senza scampo in un vortice d'entropia, ma all'interno di questo processo irreversibile possono darsi zone d'ordine, porzioni d'esistente che tendono verso una forma, punti privilegiati da cui sembra di scorgere un disegno, una prospettiva[6].

La tematica di fondo si avvicina decisamente alle motivazioni che hanno portato all'attribuzione del premio Nobel per la Chimica del 1977 a Ilya Prigogine grazie ai suoi studi dedicati ai sistemi termodinamici lontani dall'equilibrio. In estrema sintesi: contrariamente a quanto avviene nei sistemi vicini all'equilibrio, dove l'aumento dell'entropia

---

4 Calvino Italo, *Lezioni americane*, *Molteplicità*, cit., p. 110. Ma segnala Marco Belpoliti che la Lezione maggiormente citata e ricordata non è certo quella sulla Molteplicità, ma invece la prima delle Lezioni, dedicata alla Leggerezza: "Le Lezioni americane hanno prodotto nella vulgata corrente una distorsione nella percezione del lungo, ampio e complesso lavoro di Calvino. Le citazioni prevalenti vanno alla lezione sulla Leggerezza, o al massimo a quella sulla Rapidità, mentre quasi nessuno richiama Visibilità o Molteplicità, ben più complesse, e certamente meno cool." in Belpoliti Marco, *Ripensare Calvino oltre il cliché della leggerezza*, La Stampa, Torino, 16 Settembre 2015.

5 Piacentini Adriano, *Tra il cristallo e la fiamma. Le "Lezioni americane di Italo Calvino"*, Atheneum, Firenze, 2002, pp. 222-223.

6 Calvino Italo, *Lezioni americane*, *Esattezza*, cit., pp. 68-69.

porta a condizioni caotiche sempre più disordinate, nell'ambito dei sistemi termodinamici che si trovano lontani dal loro equilibrio, in opportune condizioni, possono emergere spontaneamente nuove forme di ordine auto organizzato. Proprio come avviene nel caso degli organismi viventi. E, secondo Calvino, anche nel caso della letteratura:

> L'opera letteraria è una di queste minime porzioni in cui l'esistente si cristallizza in una forma, acquista un senso, non fisso, non definitivo, non irrigidito in una immobilità minerale, ma vivente come un organismo. La poesia è la grande nemica del caso, pur essendo anch'essa figlia del caso e sapendo che il caso in ultima istanza avrà partita vinta[7].

Quindi, pur senza illusori finali ottimistici, per Calvino fare letteratura è un atto creativo che non si colloca nello scenario senza speranze descritto da Jacques Monod ne *Il caso e la necessità* del 1970: "l'antica alleanza è rotta: l'uomo sa finalmente d'essere solo nell'immensità indifferente dell'universo nel quale è emerso per caso". La letteratura per Calvino è invece tessitura vitale e interazione col mondo in una prospettiva di evoluzione che è chiaramente in sintonia con la risposta a Monod che Prigogine e Stengers pubblicano nel loro *La nuova alleanza* del 1979: "È ormai tempo di nuove alleanze, alleanze da sempre annodate, per tanto tempo misconosciute, tra la storia degli uomini, delle loro società, dei loro saperi e l'avventura esploratrice della natura[8]." Lo conferma Calvino stesso in una delle sue ultime interviste nel 1985:

> Come uomo la posizione di Prigogine mi interessa contrapposta a quella di Jacques Monod, che vedeva l'uomo completamente solo e sospeso tra caso e necessità nell'assoluta indifferenza dell'universo. Prigogine avanza invece l'immagine di una natura grande organismo di cui facciamo anche noi parte. È l'integrazione dell'uomo nel cosmo attraverso un intimo legame che passa per il tempo. E a questa comunione sono particolarmente sensibile. Anche se non ho il coraggio di esplicitare una filosofia, mi appassiona l'immagine di un universo unitario a cui siamo tutti chiamati a collaborare[9].

---

7 *Ibidem*.

8 Prigogine Ilya - Stengers Isabelle, *La nuova alleanza - Metamorfosi della scienza*, Giulio Einaudi editore, Torino, 1981, p. 288.

9 Neri Michele, *Italo Calvino: Vivere ogni secondo per vincere il tragico divenire*, Panorama mese, IV, 1, gennaio 1985, pp. 73-74, anche in *Sono nato in America,* cit., pp. 597-603.

Vediamo qui come Calvino ponga l'accento sulla collaborazione collettiva in un universo unitario e attribuisca proprio a Prigogine la paternità di due temi a lui molto cari: l'uomo come parte dell'organismo naturale e il tempo come asse del divenire cosmico. A questo punto "il razionalista Calvino, abituato a diffidare dei sentimenti e degli 'abissi interiori' si trasforma in un critico implacabile dei limiti della ragione"[10] tanto da arrivare a dichiarare i propri sentimenti e addirittura, apertamente, la propria passione. Ma, nonostante ciò, si conferma la fondamentale relazione con il pensiero scientifico affermata in prospettiva storica nel 1977:

> Io non faccio altro che basare la mia letteratura su una visione del mondo elaborata dalla scienza. Così come i poeti del Duecento basavano la loro sulla filosofia e scienza medievale. Così come – con maggiore o minore coscienza – hanno sempre fatto gli scrittori, riferendosi – più delle volte inconsapevolmente – a un modello del mondo che era quello che la scienza precedente a loro aveva elaborato[11].

Ma scienza e letteratura non sono poi molto distanti per Prigogine quando afferma che le condizioni di non equilibrio, assieme alla molteplicità del tempo, che "gli scienziati hanno semplicemente smesso di negare"[12], consentono una nuova e migliore integrazione della fisica teorica e della chimica con le discipline che descrivono altri aspetti della natura e di conseguenza "l'universo ha una dimensione 'narrativa'. Ad ogni livello, constatiamo che vi è una forma di storia[13]." e ce lo conferma anche l'io narrante de *Il cavaliere inesistente* quando confessa:

---

[10] Milanini Claudio, *Introduzione*, in Italo Calvino, *Romanzi e racconti*, a cura di Mario Barenghi e Bruno Falcetto, Mondadori, Milano, 1994, vol. II, p. XV.

[11] Calvino Italo, lettera a Daniela Colamasi del 19/9/1977, in *Lettere 1947-1985*, a cura di L. Baranelli, Mondadori, Milano, 2000, p. 916.

[12] Prigogine Ilya - Stengers Isabelle, *La nuova alleanza - Metamorfosi della scienza*, cit., p. 274. La citazione completa è "La scoperta della molteplicità del tempo non è avvenuta come un'improvvisa 'rivelazione'. Gli scienziati hanno semplicemente smesso di negare ciò che, per così dire, tutti sapevano. È per questo che la storia della scienza, della scienza che negava il tempo, fu anche una storia di tensioni culturali."

[13] Prigogine Ilya, *Prigogine: con Bruno dentro l'infinito*, cit.. Corriere della Sera, 30 maggio 2003, p. 37, (uno dei suoi ultimi testi, inviato alla presentazione parigina delle Opere italiane di Giordano Bruno, curate da Nuccio Ordine, edite da Utet).

> L'arte di scriver storie sta nel saper tirar fuori da quel nulla che si è capito della vita tutto il resto; ma finita la pagina si riprende la vita e ci s'accorge che quel che si sapeva è proprio un nulla[14].

Per Prigogine "il carattere narrativo significa che ci sono eventi imprevisti"[15] e ancor più che "la fisica del non equilibrio ci ha fornito una migliore comprensione del meccanismo della comparsa degli eventi. Gli eventi vengono associati alle biforcazioni[16]." La molteplicità del tempo di cui Prigogine scrive che "tutti sapevano" è ben nota anche a Calvino che ne scrive nel saggio dedicato a Carlo Levi:

> Egli è il testimone della presenza d'un altro tempo all'interno del nostro tempo, è l'ambasciatore d'un altro mondo all'interno del nostro mondo […] Ma quello che conta è questo senso della compresenza dei tempi che Carlo Levi trasmette, questo suo tenersi librato come in un punto in cui può vedere scorrere le lancette degli orologi in sensi divergenti[17].

Abbiamo visto che per Calvino l'opera letteraria è una di quelle minime parti dell'esistente nelle quali l'ordine emerge dal caos affermando così la libera volontà creativa dell'autore. A questo proposito Bucciantini descrive come Calvino negli anni Ottanta continui a guardare insistentemente alla scienza, anche se meno ottimisticamente che nel passato, e come sia consapevole di vivere in un universo di cui l'uomo è parte e in cui la scienza svolge un ruolo determinante, ma la sua fiducia è ridotta a dimensioni microscopiche, interstiziali:

> Di fronte alla minaccia continua e pervasiva di restare schiacciati che sempre più domina e determina ogni aspetto del vivere, per uno scrittore opporsi significa prima di tutto rifiutare il linguaggio astratto del mondo, proponendo 'un altro codice, un'altra sintassi, un altro lessico'[18].

---

14 Calvino Italo, *Il cavaliere inesistente*, in *Romanzi e racconti*, a cura di Mario Barenghi e Bruno Falcetto, Mondadori, Milano, 1991, vol. I, p. 1001.

15 Prigogine Ilya, *Prigogine: con Bruno dentro l'infinito*, cit., p. 37.

16 Prigogine Ilya, *Il futuro è già determinato?*, Di Renzo, Roma, 2003, p. 45.

17 Calvino Italo, *La compresenza dei tempi*, Galleria, XVII, maggio-dicembre 1967 pp. 237-240; anche in *Saggi 1945-1985*, a cura di Mario Barenghi, Mondadori, Milano, 1995, I, pp. 1123-1125.

18 Bucciantini Massimo, *Pensare l'universo - Italo Calvino e la scienza*, Donzelli, Roma, 2023, p. 172. La citazione è da Calvino Italo, *Quale utopia,* in *Saggi 1945-1985,* cit., p. 310.

È stato un altro grande del Novecento: il sociologo Zygmunt Bauman, nel suo *Modernità liquida* del 2000, a riconoscere a Calvino il merito di essere:

> L'inventore di quei personaggi totalmente liberi (liberi in modo completo, in virtù del loro essere inafferrabili, elusivi, impossibili da intrappolare e controllare), il Barone rampante e il Cavaliere inesistente, come la più piena, quintessenziale, incarnazione dell'intera funzione emancipatrice dell'arte letteraria[19].

Una liberazione effettivamente confermata, nell'ultima pagina de *Il cavaliere inesistente,* dalla narratrice che abbandona la funzione di cronista, esce dal proprio ruolo e si svela essere Bradamante, la vera protagonista, che ora può finalmente guardare verso il futuro e cavalcare incontro al proprio destino:

> Dal raccontare al passato, e dal presente che mi prendeva la mano nei tratti concitati, ecco, o futuro, sono salita in sella al tuo cavallo[20].

E sorprendentemente lo stesso Bauman, in una delle sue ultime interviste, attribuisce proprio a Prigogine la genesi dell'idea di modernità liquida sorta dalla comparazione delle relazioni sociali con i legami energetici delle sostanze nei diversi stati:

> Fin da bambino sono stato affascinato dalla fisica. Poi sono diventato un sociologo e non un astronomo come sognavo. L'idea della modernità liquida mi è venuta leggendo il fondamentale libro di Ilya Prigogine, *The End of Certainty*. Prigogine parlava della debolezza dei legami tra le molecole dei liquidi contrapposta alla forza di questi legami nei corpi solidi[21].

In conclusione potremmo pensare a Cavino come un alfiere della funzione emancipatrice dell'arte letteraria che è inserita nella dimensione narrativa dell'universo descritta da Prigogine il quale, a sua volta, è l'ispiratore della moderna liquidità sociale di Bauman.

---

19 Bauman Zygmunt, *Modernità liquida*, Laterza, Roma-Bari, 2002, p. 134.

20 Calvino Italo, *Il cavaliere inesistente*, 1959, cit., p. 1064.

21 Bauman Zygmunt, intervista di Wlodek Goldkorn: *Zygmunt Bauman: "Io, sempre straniero, l'unico giudice è la mia coscienza"*, la Repubblica, 18 novembre 2015.

2. Polimorfismo narrativo

Le molteplici possibilità di sviluppo della narrazione è evidentemente un tema che risuona nell'opera di Calvino: da *Il castello dei destini incrociati* del 1973 fino a *Se una notte d'inverno un viaggiatore* del 1979. Come lui stesso dichiara, la sua proposta di 'iper-romanzo' è basata sullo

> stesso principio di campionatura della molteplicità potenziale del narrabile [...] che vuol essere una specie di macchina per moltiplicare le narrazioni partendo da elementi figurali dai molti significati possibili come un mazzo di tarocchi. […] queste strutture mi permettono d'unire la concentrazione nell'invenzione e nell'espressione con il senso delle potenzialità infinite[22].

E in proposito cita anche Borges "perché ogni suo testo contiene un modello dell'universo o di un attributo dell'universo" e in particolare il racconto *Il giardino dei sentieri che si biforcano*

> in cui il futuro si presenti irrevocabile come il passato […] un tempo plurimo e ramificato in cui ogni presente si biforca in due futuri, in modo di formare 'una rete crescente e vertiginosa di tempi divergenti, convergenti e paralleli'[23].

Calvino ribadisce nel 1980 il collegamento con il pensiero di Prigogine :

> Nel libro di Prigogine *La Nouvelle Alliance* il problema del tempo nella scienza si collega strettamente al problema narrativo. Inoltre la scienza è problematica dei possibili, ed anche la narrativa è problematica dei possibili[24].

Un probabile riferimento è *L'uomo senza qualità* di Musil con il suo senso della possibilità che "si potrebbe anche definire come la

---

22 Calvino Italo, *Lezioni americane*, *Molteplicità*, cit., pp. 117.

23 *Ivi*, pp. 115-116.

24 Calvino Italo, *C'è ancora possibilità di narrare una storia? (Conversazione tra Italo Calvino e Daniele Del Giudice)*, Pace e Guerra, I, 8, novembre 1980 pp. 24-26; anche in *Sono nato in America,* cit., p. 406.

capacità di pensare tutto quello che potrebbe egualmente essere, e di non dar maggiore importanza a quello che è, che a quello che non è"[25] giacché "l'andamento della storia è un continuo sbandamento. Il presente è sempre un'ultima casa al margine, che in qualche modo non fa più completamente parte delle case della città[26]." Quindi per Calvino:

> la conoscenza come molteplicità è il filo che lega le opere maggiori, tanto di quello che viene chiamato modernismo quanto di quello che viene chiamato il *postmodern*[27].

Constatando la molteplicità della natura, *La nuova alleanza* di Prigogine e Stengers conduce verso una concezione della scienza che dialoga sia con la natura che con gli uomini:

> Noi pensiamo che la nostra scienza si aprirà all'universale quando essa smetterà di negare, di volersi estranea alle preoccupazioni e alle domande delle società nel cui seno essa si sviluppa, nel momento in cui essa sarà capace di un dialogo con la natura di cui finalmente si apprezzino le molteplici malie, e con gli uomini di tutte le culture, di cui finalmente si rispettino i problemi[28].

La conoscenza pulviscolare[29] di questo dialogo con la natura emerge anche nella dimensione domestica e quotidiana: l'osservazione

---

25 Musil Robert, *L'uomo senza qualità*, Einaudi, Torino, 1957, p. 12.

26 *Ivi*, pp. 349-350.

27 Calvino Italo, *Lezioni americane*, *Molteplicità*, cit., pp. 113.

28 Prigogine Ilya - Stengers Isabelle, *La nuova alleanza - Metamorfosi della scienza*, cit., p. 23. Poche righe prima si trova un riferimento a Chuang Tsu e si auspica una nuova sintesi con l'antica cultura cinese "centrata intorno ad una concezione di un mondo spontaneamente organizzato." Chuang Tsu, o Chuang-tzu o Zhu ngz è stato un filosofo e mistico cinese daoista del IV secolo a. C., un maestro di quella visione che "si radica in un rapporto di fondamentale fiducia dell'uomo rispetto al mondo in cui vive, e nella convinzione che egli possiede la capacità di abbracciare la totalità del reale mediante la sua conoscenza e la sua azione – totalità che è una e a cui si rapporta l'infinita molteplicità delle sue parti» (Anne Cheng, *Storia del pensiero cinese*, Einaudi, Torino 2000, vol. I, p. 20).

29 L'espressione *conoscenza pulviscolare* come anche, *enciclopedia e nulla*, *polimorfismo*, *multiplicity*, *manifoldness*, *interweaving connectedness,* sono tratti dagli appunti di Calvino in preparazione delle *Lezioni americane. Note e notizie sui testi, Lezioni americane*, in *Saggi 1945-1985*, cit., pp. 2957-2985.

del prato di casa da parte del signor Palomar inizia dalla molteplicità delle piante e delle varietà botaniche, si potrebbe dire la biodiversità, per arrivare all'innumerabilità degli infiniti universi nei quali è facile riconoscere il pensiero di Giordano Bruno:

> Contare quanti fili d'erba ci sono, di quali specie, quanto fitti e come distribuiti.[…] Contare i fili d'erba è inutile, non s'arriverà mai a saperne il numero.[…] L'universo forse finito ma innumerabile, instabile nei suoi confini, che apre entro di sé altri universi. L'universo, insieme di corpi celesti, nebulose, pulviscolo, campi di forze, intersezioni di campi, insiemi di insiemi...[30]

Anche Prigogine, alcuni anni dopo, evidenzia la modernità di Giordano Bruno, il quale

> pensava alla potenzialità della materia che poteva causare la vita e diventare complessa. […] Le sue idee sulla potenzialità della materia, la multiversità, l'infinità dei mondi, sono diventate idee centrali della fisica moderna[31].

Per Calvino quindi la molteplicità costituisce un valore fondante della narrazione in sé:

> La narrativa, probabilmente, è stata sempre l'*escamotage* all'unicità, è stata sempre la contemplazione della molteplicità, un sistema di moltiplicazione dei possibili per esorcizzare la tragicità dell'unicità[32].

E di conseguenza la lezione dedicata alla *Molteplicità* è posta a conclusione – ma ne era prevista una successiva dedicata alla *Consistency* – dell'intero percorso delle Lezioni Americane:

> Nella mia prima conferenza [Leggerezza] ero partito dai poemi di Lucrezio e di Ovidio e dal modello d'un sistema d'infinite relazioni di tutto con tutto che si trova in quei due libri così diversi. In questa

30 Calvino Italo, *Palomar* (1983). Mondadori, Milano, 1994, pp. 33-34.

31 Prigogine Ilya, *Pensare l'incerto*, Campus Calabria, I-II, 1998, pp. 11-14.

32 Calvino Italo, *C'è ancora possibilità di narrare una storia? (Conversazione tra Italo Calvino e Daniele Del Giudice)*, Pace e Guerra, I, 8, novembre 1980 pp. 24-26; anche in *Sono nato in America,* cit., p. 406-407.

> conferenza credo che i riferimenti alle letterature del passato possano essere ridotti al minimo, a quanto basta per dimostrare come nella nostra epoca la letteratura sia venuta facendosi carico di questa antica ambizione di rappresentare la molteplicità delle relazioni, in atto e potenziali[33].

Troviamo un ulteriore interessante esempio del dialogo a distanza tra Calvino e Prigogine ne *Le cosmicomiche* che erano state presentate da Calvino nel 1964 descrivendone le ascendenze: "soprattutto Leopardi, i *comics* di Popeye, Samuel Beckett, Giordano Bruno, Lewis Carrol[34]." Il valore innovativo e sperimentale di quest'opera è stato ben caratterizzato da Milanini che rileva come l'autore stesso la considerasse

> un'esperienza di svolta, come un 'luogo' deputato per eccellenza alla sperimentazione, la scrittura cosmicomica comporta una tensione immaginativa e una raffinata elaborazione formale che nulla hanno in comune con le coeve poetiche della neoavanguardia, con la contestazione oltranzistica della lingua d'uso e la manipolazione distruttiva d'ogni codice limpidamente comunicativo. […] Per altri versi la scelta dell'occultamento di sé, connaturata all'invenzione cosmicomica, permette all'autore sia di estrinsecare con veemenza inconsueta il proprio spirito libertario, sia di soffermarsi su sentimenti e stati d'animo primari, sfuggenti a qualsivoglia dominio razionale[35].

In questa raccolta di racconti*,* che sono stati pubblicati con successive integrazioni tra il 1963 e il 1984, affiora un certo "*re-enchantment of science as a point of departure for a new harmony between human beings and nature*"[36] che è facilmente riconducibile al pensiero di Prigogine. Il quale, nel suo *La fine delle certezze,* per argomentare come il futuro non sia già dato cita proprio quest'opera di Calvino riconoscendo il valore della sua descrizione dell'universo primordiale:

---

33 Calvino Italo, *Lezioni americane*, *Molteplicità,* cit., pp. 109-110.

34 Calvino Italo, *Le cosmicomiche* in 'Il Caffè', XII, 4 novembre 1964, p. 40, in *Sono nato in America,* cit., p. 112.

35 Milanini Claudio, *Introduzione*, cit., p. XXIII-XXIV.

36 Pilz Kerstin, *Mapping Complexity: Literature and Science in the Works of Italo Calvino*, Troubador Publishing, Leicester, 2005, p. 29.

> In una deliziosa raccolta di racconti, le *Cosmicomiche*, Italo Calvino immagina degli esseri che vivono in una fase primordiale dell'universo. Essi si riuniscono ancor oggi e ricordano l'epoca difficile in cui l'universo era così piccolo che i loro corpi lo riempivano completamente. La capacità di immaginare il possibile, di speculare su ciò che avrebbe potuto essere e non è stato, è tra le caratteristiche fondamentali dell'intelligenza umana […] Come le domande poste dagli esseri immaginari di Calvino trovano il loro senso nell'epoca cosmologica primordiale in cui il loro autore li fa esistere, così i sistemi semplici della meccanica quantistica e classica si riferiscono al nostro universo tiepido[37].

Se da un lato Prigogine apprezza l'immagine fantastica calviniana di un universo primordiale dominato da leggi fisiche ben diverse da quelle a noi conosciute, dall'altro vi riconosce anche la problematica dei possibili che è tanto della narrativa quanto della scienza. Analogamente per il multiforme scrittore Calvino immaginare e narrare hanno la valenza di dare forma vivente a parole e idee in un processo empirico, quasi sperimentale che si confronta di continuo con il contesto storico, la conoscenza scientifica e la molteplicità del reale. Quindi:

> Per me la letteratura coincide col dubbio. Essa deve avanzare a tentoni, insegnare alle altre discipline che si può avanzare solo brancolado, tenendo conto di tutte le facce della realtà[38].

e di conseguenza:

> Ogni narrazione ha una componente logica. Ogni pensiero è in primo luogo un racconto. Io sono un narratore che segue la logica interna della sua narrazione. […] il mio Settecento si situa al centro di un progetto di costruzione cosmogonica che viene dal Rinascimento, da Giordano Bruno e anche da più lontano[39].

---

[37] Prigogine Ilya, *La fine delle certezze - Il tempo, il caos e le leggi della natura*, Bollati Boringhieri, Torino, 1997 pp. 173-174.

[38] Calvino Italo, intervista a C. Bonnefoy, *Les deux tentations d'Italo Calvino*, 1964, in *Sono nato in America,* cit., p. 107. Aggiungerà Gianni Celati a proposito di Ariosto: 'C'è solo pensiero figurale, pensiero per figure e immagini, che ci trascina. Una bella terapia, soprattutto contro i malanni del pensiero discorsivo, del pensare per generalità.' in Celati Gianni, *L'assoluto della prosa*, conversazione con A. Cortellessa, in *Il Verri*, XLVII(19, maggio 2002), p.63.

[39] Calvino Italo, intervista a Françoise Wagener, *Nous vivons désormais dans une*

Quasi come un suggello conclusivo dedicato alla molteplicità e alla dimensione evolutiva della conoscenza, Prigogine in prima persona (riferito da Stengers), nelle ultime pagine de *La nuova alleanza* e precisamente nel paragrafo intitolato *La metamorfosi della natura* – penultima pagina sia della versione francese che di quella italiana e addirittura sentenza conclusiva dell'intero saggio nella versione inglese – ha voluto inserire un *midrash* che narra come numerosi tentativi abbiano preceduto l'attuale creazione del mondo:

> Ventisei tentativi hanno preceduto la genesi attuale e tutti erano destinati a fallire. Il mondo dell'uomo è uscito dal grembo caotico di questi detriti anteriori, ma nemmeno esso ha un certificato di garanzia: anche esso è esposto al rischio del fallimento e del ritorno al nulla. 'Speriamo che questo funzioni' esclamò Dio creando il mondo, e questa speranza che ha accompagnato tutta l'ulteriore storia del mondo e dell'umanità ha sottolineato fin dall'inizio come questa storia è segnata col marchio della radicale incertezza[40].

3. Il suono di qualcosa di solido

Il momento forse più significativo del dialogo a distanza tra Calvino e Prigogine è la recensione del saggio *La Nouvelle Alliance - Metamorphose de la Science* che ne ha preceduto di circa due anni la traduzione italiana pubblicata da Einaudi[41].

---

métropole unique, Le monde, 25 aprile 1970, traduzione italiana *Un paesaggio ininterrotto di carta*, in *Sono nato in America,* cit., p. 154.

[40] Prigogine Ilya - Stengers Isabelle, *La nuova alleanza - Metamorfosi della scienza*, cit., p. 287. Citazione da André Neher, *Vision du temps et de l'histoire dans la culture juive*, Les presses de l'UNESCO, Paris, 1975, p. 179.

[41] La vicenda della pubblicazione italiana de *La nuova alleanza* merita un breve chiarimento. Nel 1977 Prigogine e Stengers pubblicarono nel vol. 112 del semestrale *Scientia*, edito da Zanichelli, un articolo in tre lingue (francese, italiano tradotto da R. Morchio, inglese tradotto da I. McGilvray) intitolato *La Nouvelle Alliance.* Il testo in italiano è poi confluito, assieme ad altri scritti di Prigogine e collaboratori nel volume curato da Renzo Morchio: Ilya Prigogine, *La nuova alleanza - uomo e natura in una scienza unificata*, Longanesi, Milano, maggio 1979. Gallimard pubblicò nell'autunno del 1979 il saggio completo *La Nouvelle Alliance - Metamorphose de la Science*, questa è la versione recensita da Italo Calvino che viveva a Parigi in quegli anni. Durante il 1980 Pier Daniele Napolitani fu incaricato da Einaudi di curare la traduzione italiana del

Dopo avervi riconosciuto la risposta a quel paesaggio di solitudine completa ai margini dell'Universo descritto da Monod, Calvino però inizialmente si ritrae:

> Ora, devo dire che la mia prima reazione quando vedo le enunciazioni d'uno scienziato inclinare verso il 'poetico' è un moto di diffidenza; uno dei primi punti fermi della nostra (o almeno della mia) educazione intellettuale vuole infatti che la scienza ci si presenti col suo volto più burbero e disadorno; se dai risultati del suo impassibile procedere salta fuori quella che sarà da me considerata una suggestione poetica, la saluto come benvenuta, ma devo essere io a scoprirla[42];

come se si sentisse scavalcato nella sua sensibilità:

> se dai risultati del suo impassibile procedere salta fuori quella che sarà da me considerata una suggestione poetica, la saluto come benvenuta, ma devo essere io a scoprirla; se è la scienza stessa a dirmi: 'hai visto come sono poetica!' io non ci sto, anzi ho una reazione di rifiuto[43].

Ma più avanti si mostra indulgente poiché "mi pare di riconoscere il suono di qualcosa di solido che sorregge il discorso, qualsiasi sia il suo involucro retorico[44]." e verosimilmente si riferisce al passo:

> la nostra scienza occupa la singolare posizione di ascolto poetico della natura – nel senso etimologico della parola, per cui un poeta è un artefice – cioè esplorazione attiva, manipolatrice e calcolatrice ma ormai capace di rispettare la natura che essa fa parlare[45].

---

volume Gallimard, ma durante il periodo di lavoro gli furono consegnate le bozze della traduzione inglese che era in corso di lavorazione e che sarebbe uscita solo nel 1984. La traduzione di Napolitani (*La nuova alleanza - Metamorfosi della scienza,* Einaudi, Torino, 1981) è quindi una versione intermedia tra quella francese del 1979 e quella inglese che, a detta degli autori, è stata l'occasione per un ampliamento e una riscrittura di alcune parti del testo.

42 Calvino Italo, *No, non saremo soli*, la Repubblica, 3 maggio 1980, pp. 16-17; anche in *Saggi 1945-1985*, cit., pp. 238-44; anche in *Mondo scritto e mondo non scritto*, a cura di Mario Barenghi, Mondadori, Milano, 2002, pp. 277-84.

43 *Ibidem.*

44 *Ibidem.*

45 *Prigogine Ilya - Stengers Isabelle, La nuova alleanza - Metamorfosi della scienza,* cit., p. 282. Nella versione originale francese il testo è letteralmente "*écoute poétique de la nature*". È interessante prendere in considerazione la versione inglese del medesimo

che si trova nella parte conclusiva del saggio di Prigogine e Stengers che poi continua:

> Il sapere scientifico sbarazzato dalle fantasticherie di una rivelazione ispirata, soprannaturale, può oggi scoprirsi essere ascolto poetico della natura e contemporaneamente processo naturale nella natura, processo aperto di produzione e di invenzione, in un mondo aperto, produttivo e inventivo[46].

Nella conclusione della sua autobiografia per il Nobel, Prigogine aveva prefigurato la complementarietà di dinamica e termodinamica come descrizioni della natura e Calvino all'inizio della sua recensione le dedica un po' di attenzione in una prospettiva ben più ampia di quella classica:

> La termodinamica (da cui fino a ieri ci venivano gli annunci dell'ineluttabile morte dell'universo, del trionfo dell'entropia, della degradazione d'ogni energia in calore senza ritorno) oggi, attraverso 'la scoperta dei processi d'organizzazione spontanea e delle strutture dissipative' si dichiara in grado di spiegarci come le organizzazioni più complesse, cioè le forme del mondo vivente, non sono un accidente della natura ma si situano sulla sua via maestra, sul tracciato del suo sviluppo più logico[47].

In questa concezione della scienza, che si dispone senza alterità nei confronti della natura che osserva, o meglio ascolta, riconosciamo quel carattere della poesia, come anche di tanta letteratura, che Calvino descrive come "grande nemica del caso". E possiamo anche notare come Calvino nel "riconoscere il suono di qualcosa di solido" si rivolga proprio al mondo dei suoni così come Prigogine con il suo "ascolto poetico della natura": è al suono, con tutte le sue sottigliezze, che l'ascolto si rivolge, ma si tratta di un ascolto attivo, così come attivo è l'ascolto del poeta - artefice capace di rispettare la natura.

A questo proposito ricordiamo, per inciso, il racconto di Calvino

---

paragrafo in cui il termine *ascolto poetico* è reso con *poetical interrogation* (da notare che non viene menzionato un traduttore)*, Order out of Chaos - Man's new dialog with nature,* Bantam New York, 1984 p. 301.

46 *Ivi*, p. 288.

47 Calvino Italo, *No, non saremo soli*, cit..

Un re in ascolto, pubblicato nel 1986 all'interno della raccolta postuma *Sotto il sole giaguaro,* e il libretto, curato da Calvino stesso per l'omonima opera di Luciano Berio del 1984, la cui idea iniziale era scaturita dalla lettura dell'articolo di Roland Barthes *Ascolto* per il primo volume della *Enciclopedia* Einaudi in cui si enuncia che "*Udire* è un fenomeno fisiologico; *ascoltare* è un atto psicologico[48]."

Continuando la recensione Calvino rileva nel libro una fitta trama di collegamenti tra cultura scientifica e filosofica dalla quale emerge la figura del filosofo Bergson:

> Mi pare 'faccia notizia' il fatto che un autore che da anni non si sentiva nominare se non con sufficienza e ripulsa, Bergson, viene qui considerato con molta attenzione, come colui che ha constatato il divorzio più completo tra scienza e 'spirito' ma anche come colui che ha rivolto alla scienza una critica che ora la scienza sta facendo propria[49].

In effetti per Prigogine la figura di Bergson ha avuto un particolare rilievo come dichiarato in varie occasioni:

> Da ragazzo leggevo molta filosofia e sono stato particolarmente impressionato dall'Evoluzione creatrice di Bergson: ricordo ancora la sua affermazione che 'il tempo è invenzione, o non è niente'[50].

Con grande coinvolgimento Calvino considera che: "la *Nouvelle Alliance* è un libro di storia della scienza e insieme di scienza nel suo farsi […] ma è anche una meditazione appassionata sull'uomo e l'universo, che rifiutando la separazione tra le 'due culture' intesse fittamente in uno stesso discorso le vie aperte dagli scienziati e le domande dei filosofi; non solo, ma non considera estranee o lontane le vie battute dalla poesia." Oltre a riconciliare la cultura scientifica con quella umanistica, pur senza tralasciare la poesia, va sottolineato come al termine meditazione, la quale si estende massimamente dall'interiorità al macrocosmo, viene accostato l'aggettivo appassionata, e proprio

---

48 Barthes Roland - Havas Roland, *Ascolto,* in *Enciclopedia*, Einaudi, Torino, 1977, vol. I, p. 982.

49 Calvino Italo, *No, non saremo soli*, cit..

50 Odifreddi Piergiorgio, *Incontri con menti straordinarie,* Longanesi, Milano, 2006, p. 240.

questa aggettivazione, così inusuale e al tempo stesso ispirata, conferma il particolare valore attribuito da Calvino al libro di Prigogine e Stengers. Pochi anni dopo l'editore Bantam ne pubblicò la traduzione inglese, curata e ampiamente rivista dagli autori stessi, con il titolo *Order out of Chaos - Man's new dialog with nature,* che riporta in copertina la definizione di Calvino: "*A passionate meditation on Man and Universe*" collocata sopra al titolo del volume.

Il titolo stesso della recensione di Calvino, *No, non saremo soli,* conferma la sua adesione alla visione di Prigogine e Stengers piuttosto che a quella di Monod. Al centro della sua vibrante recensione si evidenzia che "Il punto di partenza di Prigogine è la separazione che avviene con Newton tra mondo umano e natura fisica, da una parte 'il mondo in cui viviamo, amiamo e moriamo', il nostro habitat fatto di qualità e percezioni e intenzioni, e dall'altra il mondo della quantità e della geometria, delle leggi e matematizzabili, la natura vista come macchina, la natura regolare e armoniosa ma irreparabilmente 'stupida'[51]." Calvino prosegue apprezzando l'approccio evolutivo con cui gli autori leggono la storia della scienza e segnala ai lettori italiani:

> tra i più bei capitoli del libro sono quelli sulla rivoluzione newtoniana e la nascita della scienza moderna incontro di tecnica e teoria che sarebbe stato impensabile al tempo dei Greci, per i quali i termini stessi 'macchina' e 'meccanica' implicavano inganni tesi alla natura, e la scienza escludeva la manipolazione, cioè l'esperimento. L'esperimento è 'arte', interrogatorio capzioso della natura, messa in scena (fino all'esperimento che avviene soltanto nel pensiero, come i treni e gli ascensori dei ragionamenti di Einstein). Galileo, che esclude dai suoi interessi i perché di Aristotele per concentrare la sua ricerca sul come, vuole raggiungere la verità globale della natura, scritta in linguaggio matematico, unico per tutti i fenomeni e prova di una omogeneità del tutto[52].

In conclusione poi Calvino ricorda che pochi mesi prima (il 4 gennaio 1980) era stato "Michel Serres a salutare su *Le Monde* la pubblicazione de *La Nuova Alleanza* con una prosa carica di entusiasmo lirico e densità di sapere che potremmo definire lucreziana, e soprattutto d'un ottimismo quale non si sentiva da tempo." E Serres – già più volte

51 Calvino Italo, *No, non saremo soli*, cit..
52 *Ibidem.*

citato nell'opera di Prigogine e Stengers tanto che Calvino gli riconosce "un posto di tutto rilievo, che testimonia un dialogo assiduo e non occasionale" – in conclusione della propria recensione afferma che "l'idea dell'ordine dalle fluttuazioni non è solamente una nuova idea ma è la novità stessa per definizione" e termina domandosi: "il ventesimo secolo è finalmente nato?"[53] Ci appare quindi chiara la loro convergenza non solo negli aspetti epistemologici e filosofici ma anche nella dimensione storico-narrativa così come nell'apertura alle molteplici discipline. E allora Italo Calvino si trova talmente in sintonia con Michel Serres da affidare proprio alle sue parole – che sono personali e poetiche come anche visionarie e scientifiche – la conclusione della propria recensione de *La Nuova Alleanza:*

> 'Gli universalisti d'una volta avvertivano la legge morale solo nelle notti di bel tempo: circostanza piuttosto rara sulle rive del Baltico', scrive Michel Serres. 'Finalmente si fa giorno su cose che io non posso prevedere, come non posso prevedere me stesso. Solo una pietra, un astro, uno sciocco possono essere, talvolta, prevedibili. Finalmente si fa giorno su un mondo circostanziale, differenziato, rischioso, improbabile, altrettanto concreto, variopinto, inatteso, e sì, bello, quanto quello che io vedo, sento, tocco, ammiro'[54].

[53] Scrive al proposito Enrico Giannetto nel 2019: "come se fosse nuovamente proclamata con grande forza la possibilità di una *Nuova Alleanza* fra umanità, Natura e finanche Dio, fra scienze umane e scienze naturali, fra filosofia, religione e scienza, fra psicologia e fisica, fra cultura umanistica e cultura scientifica, un'alleanza che sembrava ormai irrimediabilmente disfatta dalla storia, sin dall'alba della modernità." in *Ilya Prigogine e la concezione termodinamica della Natura*, *La memoria del cielo*, Maat Studies 4, A&G – CUECM, Catania, 2019, pp. 7-42.

[54] Serres Michel, *Une présentation de "la Nouvelle Alliance"*, Le Monde, 4 gennaio 1980, in Calvino Italo*, No, non saremo soli,* cit..

BIBLIOGRAFIA

Calvino Italo, *Lezioni americane*, Garzanti, Milano, 1988.
Calvino Italo, *Romanzi e racconti*, a cura di Mario Barenghi e Bruno Falcetto, vol. I-III, Mondadori, Milano, 1991.
Calvino Italo, *Saggi 1945-1985,* a cura di Mario Barenghi, Mondadori, Milano, 1995.
Calvino Italo, *Sono nato in America, Interviste 1951 – 1985*, a cura di Luca Baranelli, Mondadori, Milano, 2002.
Prigogine Ilya – Stengers Isabelle, *La nuova alleanza - Metamorfosi della scienza,* Einaudi, Torino,1981.
Prigogine Ilya, *La fine delle certezze – Il tempo, il caos e le leggi della natura*, Bollati Boringhieri, Torino, 1997.
Bucciantini Massimo, *Pensare l'universo – Italo Calvino e la scienza*, Donzelli, Roma, 2023.
Giannetto Enrico, *Ilya Prigogine e la concezione termodinamica della Natura*, Maat Studies 4, *La memoria del cielo,* A&G – CUECM, Catania, 2019.
Finarelli Luigi, *Il suono di qualcosa di solido*, Giornale di Fisica, vol. LXIV, n. 3, 2023, pp. 213-221.
Finarelli Luigi, *Il poeta della termodinamica. Tempo e musica tra Ilya Prigogine e Luigi Nono*, Collana della Scuola di Alta Formazione Dottorale, Università degli studi di Bergamo, 2022.

INDICE DEL VOLUME

SALMONA M., The saga of the peptide A 1-6A2V(D) 3

LESCAI F., Big data e innovazione: prospettive per la salute e i dati personali 9

SERRA S., C'è un problema con la vanillina 19

GATTO M., Ecologia e dinamica delle malattie infettive legate all'acqua 33

TIRA M., La mobilità per lo sviluppo sostenibile delle città 45

PROSPERI G.M., Interpretazione della teoria quantistica, cosmologia e gravitazione 65

SUMMA V., I "farmaci" per le persone sane: mistificazioni e realtà 97

CONSONNI S., Perspectives on energy transition and energy storage 107

VESTRONI F., The Colosseum
Dynamic Behaviour and Monitoring of the Monument 113

CANNEORI G.M., TERRACINI S., Alla scoperta di schemi nascosti nelle dinamiche complesse: dal problema degli N-corpi alle reti neurali (e ritorno) 135

CORSELLI C., La geologia marina durante il Regno d'Italia: 1861-1946
(tecnologia, industria, ricerca) 147

FINARELLI L., Italo Calvino e Ilya Prigogine, un'appassionata meditazione 217

INDICE PER MATERIA

BIOLOGIA MOLECOLARE

LESCAI F., Big data e innovazione: prospettive per la salute e i dati personali 9

CHIMICA

SALMONA M., The saga of the peptide A 1-6A2V(D) 3

SERRA S., C'è un problema con la vanillina 19

CHIMICA FARMACEUTICA

SUMMA V., I "farmaci" per le persone sane: mistificazioni e realtà 97

ENERGETICA

CONSONNI S., Perspectives on energy transition and energy storage 107

FISICA TEORICA

PROSPERI G.M., Interpretazione della teoria quantistica, cosmologia e gravitazione 65

GEOLOGIA MARINA

CORSELLI C., La geologia marina durante il Regno d'Italia: 1861-1946 (tecnologia, industria, ricerca) 147

INGEGNERIA E ARCHITETTURA

VESTRONI F., The Colosseum Dynamic Behaviour and Monitoring of the Monument 113

PIANIFICAZIONE TERRITORIALE

TIRA M., La mobilità per lo sviluppo sostenibile delle città 45

RETI NEURALI

CANNEORI G.M., TERRACINI S., Alla scoperta di schemi nascosti nelle dinamiche complesse: dal problema degli N-corpi alle reti neurali (e ritorno) 135

Scienze matematiche e naturali - Scienze naturali

Scienze biologiche - Ecologia

GATTO M., Ecologia e dinamica delle malattie infettive legate all'acqua 33

Studi transculturali

FINARELLI L., Italo Calvino e Ilya Prigogine, un'appassionata meditazione 217

Finito di stampare nel mese di gennaio 2025

Decreto Pres. Tribunale 10 gennaio 1961, n. 5504 registro cancelleria
Direttore responsabile: Rita Pezzola