

RENDICONTI



Istituto
Lombardo
Accademia
di Scienze
e Lettere

Vol. 158.2/2025

Classe di Scienze
matematiche
e naturali

FrancoAngeli 



RENDICONTI

Vol. 158.2/2025

Classe di Scienze matematiche
e naturali

Rendiconti dell'Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere



Comitato di direzione

Stefano Maiorana (Università degli Studi di Milano, Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere), Cinzia Bearzot (Università Cattolica del Sacro Cuore di Milano, Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere), Carlo Enrico Bottani (Politecnico di Milano, Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere), Giovanni Iamartino (Università degli Studi di Milano, Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere)

Direttrice responsabile

Rita Pezzola (Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere)

Comitato scientifico

Elena Agazzi (Università degli Studi di Bergamo, Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere), Giorgio Benedek (Università degli Studi di Milano-Bicocca, Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere), Carlo Cinquini (Università degli Studi di Pavia, Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere), Fiorenza De Bernardi (Università degli Studi di Milano, Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere), Maria Gigliola Di Renzo Villata (Università degli Studi di Milano, Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere), Renzo Dionigi (Università degli Studi dell'Insubria, Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere), Vincenzo Ferrari (Università degli Studi di Milano, Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere), Carlo Edoardo Gatti (Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere), Carlo Domenico Pagani (Politecnico di Milano, Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere)

Segreteria redazionale

Viola Bianchi

Contatti

Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere, Via Borgonuovo 25 – 20121 Milano, telefono +39 02 864087, redazione@istitutolombardo.it

La rivista adotta un sistema di valutazione anonima (*blind peer review*) dei saggi della Classe di Scienze morali.



Rendiconti dell'Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere

L'Istituto Lombardo pubblica con continuità dal 1864 i propri «Rendiconti», periodico istituzionale dell'Accademia, rappresentativo delle iniziative delle sue due Classi.

Ogni anno sono editi tre volumi: «Rendiconti. Parte generale e Atti ufficiali» che descrivono le attività svolte presso l'Istituto in ciascun Anno Accademico e contengono la relazione annuale tenuta dal Presidente durante l'Adunanza solenne; «Rendiconti. Classe di Scienze morali» e «Rendiconti. Classe di Scienze matematiche e naturali» che raccolgono le comunicazioni scientifiche presentate durante le Adunanze ordinarie da Membri e Soci, oltre che da relatori esterni invitati a intervenire.

Sommario

<i>Premessa, di S. Maiorana, C.E. Bottani, R. Pezzola</i>	Pag.	7
<i>M. Guidotti, La guerra senza fine: l'impatto a lungo termine sulla salute e sull'ambiente dei conflitti armati</i>	»	9
<i>F. Forneris, Biologia strutturale e intelligenza artificiale: una rivoluzione multidisciplinare nella comprensione delle strutture proteiche</i>	»	21
<i>S. Bruni, Cibi, bevande, profumi e molto altro. Le sostanze organiche nei reperti archeologici</i>	»	37
<i>D. Firrao, Alla ricerca di una bomba</i>	»	51
<i>F. Svelto, Sfide e prospettive dell'Università di Pavia</i>	»	61
<i>G. Sacchi Landriani, Joseph Vallot e Pierre Janssen. Un'avventura scientifica e alpinistica tra il 1890 e il 1906 sul Monte Bianco</i>	»	69
<i>S. Dipierro, E. Valdinoci, Cos'è la diffusione anomala (e perché è così consueta)</i>	»	97
<i>A. Bossi, La scoperta e la sintesi dei "punti quantici": una pietra miliare nel colorato futuro delle nanoscienze e della tecnologia</i>	»	123

A. Provenzale, <i>Avventure nella Zona Critica: una vita all'interfaccia</i>	»	135
A. Giorgilli, U. Locatelli, M. Sansoterra, <i>Collinear homographic orbits in the general problem of N bodies</i>	»	145
R. Psaro, <i>Storia del vetro siliceo: aspetti chimici e tecnologici</i>	»	171
M.D. Cappellini, <i>Dalla ricerca alla clinica: l'esempio delle emoglobinopatie</i>	»	201

Premessa

Quello relativo alla classe di Scienze fisiche e matematiche, che oggi abbiamo l'onore di presentare, è il secondo dei tre volumi dei «Rendiconti» pubblicati nel corso del 2025 ed è quello relativo alle note scientifiche presentate durante le adunanze tenute nel corso del 2024. Questa uscita segue la pubblicazione dei «Rendiconti – Parte generale e Atti ufficiali», già disponibile in OA, su *repository* noti e frequentati nei principali motori di ricerca, che ha inaugurato la collaborazione con l'editore FrancoAngeli, anche per la pubblicazione del nostro periodico istituzionale – così come ormai da due anni avviene per gli atti dei nostri convegni (con la collana “Incontri di studio”). Come abbiamo già avuto modo di ricordare in altre sedi, questa *partnership* rappresenta un passo importante nel nostro impegno, finalizzato a raggiungere un pubblico sempre più vasto, con l'obiettivo di condividere le nostre idee e le ricerche innovative in modo pienamente accessibile e sempre più ampio.

I dodici contributi raccolti in questo volume danno voce a tutte le sezioni della classe come, ad esempio, la matematica, con il saggio di A. Giorgilli, U. Locatelli e M. Sansoterra (*Collinear homographic orbits in the general problem of N bodies*) e con quello di S. Dipierro e E. Valdinoci (*Cos'è la diffusione anomala e perché è così consueta*). Analogamente il caso della medicina, grazie alla ricerca di M.D. Cappellini (*Dalla ricerca alla clinica: l'esempio delle emoglobinopatie*) e della geologia con il lavoro di Antonello Provenzale (*Avventure nella Zona Critica: una vita all'interfaccia*), disciplina rappresentata pure dal testo di G. Sacchi Landriani, nel quale l'ambiente alpino e la storia trovano una suggestiva descrizione (*Joseph Vallot e Pierre Janssen. Un'avventura scientifica e alpinistica tra il 1890 e il 1906 sul Monte Bianco*).

La lettura del volume rivela poi che la maggior parte dei saggi è caratterizzata dai tratti di una marcata interdisciplinarietà, che intercetta i cambiamenti epocali che stiamo vivendo. È questo il caso del lavoro proposto da F. Forneris (*Biologia strutturale e intelligenza artificiale: una rivoluzione multidisciplinare nella comprensione delle strutture proteiche*) e, con evidenti accenti applicativi, quello di A. Bossi (*La scoperta e la sintesi dei "punti quantici": una pietra miliare nel colorato futuro delle nanoscienze e della tecnologia*). Scorrendo il volume, si legge poi dell'incontro tra archeologia e chimica nel saggio Silvia Bruni (*Cibi, bevande, profumi e molto altro. Le sostanze organiche nei reperti archeologici*) e in quello di Rinaldo Psaro (*Storia del vetro siliceo: aspetti chimici e tecnologici*); nonché dell'intima relazione tra ingegneria, chimica e pratica forense nel testo di D. Firrao, autore di una perizia ormai entrata nella storia riguardo alla morte di Enrico Mattei nel 1962 (*Alla ricerca di una bomba*).

Desideriamo infine ricordare due contributi che, in modo particolarmente evidente e in modi diametralmente opposti, sono ancorati nell'attualità. Ci riferiamo da una parte alla ricerca prodotta da M. Guidotti su *La guerra senza fine: l'impatto a lungo termine sulla salute e sull'ambiente dei conflitti armati*; dall'altra alla progettualità esposta da F. Svelto che, declinando al futuro visioni strategiche, presenta le *Sfide e prospettive dell'Università di Pavia*.

Stefano Maiorana, Presidente dell'Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere

Carlo Enrico Bottani, Segretario della Classe di Scienze matematiche e naturali

Rita Pezzola, Cancelliere dell'Istituto Lombardo e Direttrice responsabile della rivista

La guerra senza fine: l'impatto a lungo termine sulla salute e sull'ambiente dei conflitti armati

Matteo Guidotti*

SUNTO – L'impatto delle guerre, attuali e passate, sull'ambiente è significativo e molteplice. Gli effetti negativi diretti della guerra sugli ecosistemi comprendono la contaminazione dell'aria, del suolo e delle acque, nonché i danni alle infrastrutture. Tra gli effetti indiretti vanno invece considerate le conseguenze negative a lungo termine su risorse naturali, agricoltura, foreste, fauna selvatica e, di conseguenza, sulla qualità della vita umana. È importante definire e riconoscere l'impatto nefasto che le attività militari hanno sull'ambiente e adottare misure adeguate per prevenirne i danni o, almeno, attenuarne gli effetti, investendo nella protezione e nella conservazione dell'ambiente, individuando le azioni criminali che intenzionalmente intendono colpire le risorse ambientali e, in ultima analisi, promuovendo la pace e la risoluzione dei conflitti. In tempi in cui è un dovere inevitabile essere responsabili e rendere conto alla collettività delle nostre azioni, è necessario considerare i crimini contro l'ambiente come crimini contro l'umanità.

PAROLE CHIAVE – Guerra; Inquinamento; Effetti a lungo termine; Armi convenzionali e non convenzionali; Protezione ambientale.

ABSTRACT – The consequences of present and past warfare on the environment are relevant and multifaceted. Direct detrimental effects of war include contamination of air, water and soil as well as damages to infrastructure. Indirect effects on ecosystems comprise long-lasting negative impacts on natural resources, agriculture, forests, wildlife and, eventually, human life quality. It is crucial to define and recognize the impact of military operations on the environment and to take action to prevent or, at least, mitigate such effects, investing in environmental protection and conservation initiatives, identifying deliberate crimes against

* CNR-SCITEC, Istituto di Scienze e Tecnologie Chimiche “Giulio Natta”, via C. Golgi 19, Milano. Accademia dei Fisiocritici, Siena. Membro del Consiglio scientifico consultivo dell’Organizzazione per la Proibizione delle Armi Chimiche, OPCW. E-mail: matteo.guidotti@scitec.cnr.it. Relazione tenuta il 1° febbraio 2024.

the environment and, ultimately, promoting peace and conflict resolution. In times where being responsible and accountable of our actions is an unavoidable duty, it is necessary to consider crimes against the environment as relevant as crimes against humankind.

KEYWORDS – Warfare; Pollution; Long-term effects; Conventional and unconventional weapons; Environmental protection.

INTRODUZIONE

Tutte le guerre, presenti e passate, hanno conseguenze nefaste sull'ambiente e, di conseguenza, sulla salute delle popolazioni locali. Gli effetti dei conflitti armati sull'ambiente possono essere diretti e indiretti, con danni anche a lungo o lunghissimo termine, soprattutto a partire dall'avvento della guerra moderna. Con l'inizio del XX secolo e nel corso delle due guerre mondiali, i combattimenti hanno visto l'impiego di una varietà sempre crescente di armi convenzionali o non convenzionali (armi incendiarie, illuminanti, chimiche o nucleari), di veicoli a motore a terra, in mare e nei cieli e, in particolare, l'allargamento delle azioni militari dai campi di battaglia alle aree urbane e industriali.

In tal modo, le operazioni su larga scala e i danni alle infrastrutture abitative e produttive hanno portato alla contaminazione dell'aria, dell'acqua e del suolo, nonché la distruzione degli *habitat* naturali (Dudley *et al.*, 2002). Tuttavia, gli effetti a lungo termine sulla salute e sugli ecosistemi, che possono manifestarsi anni o anche decenni dopo la fine di un conflitto, sono spesso sottovalutati o addirittura del tutto trascurati.

Uno degli effetti diretti più significativi della guerra sull'ambiente è legato al notevole rilascio di contaminanti pericolosi nell'atmosfera, nei corpi idrici e nel suolo delle aree circostanti la zona dei combattimenti, a seguito dell'uso di munizioni, quali proiettili, bombe, granate e missili, che rilasciano nell'ambiente composti organici tossici e metalli pesanti (Khan, 2022).

Le sostanze esplosive contenenti azoto, principalmente a base di composti nitroaromatici e nitroalifatici, e propellenti per razzi e missili (l'idrazina, $\text{H}_2\text{N-NH}_2$, altamente corrosiva, tossica e cancerogena, è uno dei componenti più comuni nelle miscele propellenti) sono inquinanti persistenti che si

ritrovano spesso in elevate concentrazioni nei terreni degli scontri, anche nei decenni a seguire (Fig. 1; Talmage *et al.*, 1999).

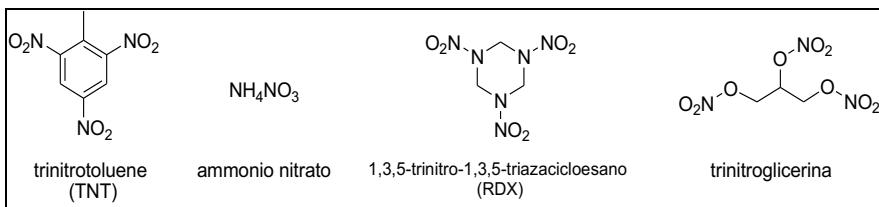


Fig. 1 – Gli esplosivi azotati più comuni.

Analogamente, i perclorati inorganici, ampiamente utilizzati nelle formulazioni pirotecniche militari, nelle miscele esplosive e nei carburanti per missili, sono stati classificati come composti che interferiscono con il sistema endocrino e che causano effetti nocivi sulla tiroide (REACH, 2016). Nell’ambito poi delle armi non convenzionali, l’impiego di armi chimiche, come gli aggressivi vescicanti a base di solfuri organici (mostarde allo zolfo), di cloroalchilammime (mostarde azotate) e gli agenti anticolinergici organofosforici (aggressivi nervini), può avere effetti devastanti sull’ambiente, oltre che sulla salute umana degli individui colpiti (Guidotti e Trifirò, 2016). L’esposizione anche a concentrazioni non letali di aggressivi chimici può provocare effetti a lungo termine sulla salute di un organismo, causando patologie neoplastiche, difetti congeniti e disturbi neurologici (Levy, 2021).

Un altro effetto diretto della guerra sull’ambiente è il danno alle infrastrutture. Ciò può includere danni a edifici, strade, ponti, impianti industriali, siti di produzione e altre infrastrutture critiche, che possono avere effetti duraturi sull’ambiente e sulla salute umana. Per esempio, la distruzione degli impianti di trattamento delle acque potabili e dei sistemi fognari può portare alla contaminazione delle risorse idriche e, in cascata, alla diffusione di malattie trasmesse da acqua inquinata.

Gli effetti indiretti della guerra sull’ambiente possono essere altrettanto significativi quanto gli effetti diretti. Tra questi va considerato lo spostamento forzato di intere popolazioni, che può essere indotto dalla distruzione di case e infrastrutture, da minacce e violenze e dalla paura della guerra stessa. Quando le popolazioni sfollate cercano rifugio in aree non adeguatamente attrezzate per gestire un gran numero di persone, si verificano fenomeni di sovraffollamento e di pressione eccessiva sulle risorse naturali, con il conseguente esaurimento delle scorte di acqua e di alimenti per la popolazione e di mangimi per gli animali. Allo stesso modo, in tempo di guerra, le

risorse economiche normalmente destinate a programmi di protezione ambientale e di conservazione degli ecosistemi vengono sospese e dirottate per sostenere lo sforzo bellico e finanziare operazioni militari (Chkhidze e Bandzeladze, 2022). Un'improvvisa mancanza di investimenti in questi settori porta spesso alla distruzione degli habitat protetti per la fauna selvatica, all'interruzione dell'applicazione di protocolli industriali ecosostenibili e a un calo (o all'abbandono) di controlli sulle buone pratiche di sicurezza nei siti produttivi. Tutto ciò può avere effetti a lungo termine sulla salute in prima battuta dei lavoratori, poi delle popolazioni circostanti, nonché sulla biodiversità e sugli ecosistemi delle zone colpite (Sowers e Weinthal, 2022).

Infine, ma non meno importante, gli effetti psicologici drammatici sulle popolazioni sempre generati dalle guerre, possono essi stessi portare a conseguenze indirette sull'ambiente. I danni causati dalla guerra, il senso di paura e incertezza costanti e l'attenzione solamente alla sopravvivenza quotidiana possono infatti portare a disturbi post-traumatici da stress, depressione, ansia e altri problemi di salute mentale. Tutto ciò può, a sua volta, ingenerare una mancanza di motivazione per impegnarsi in attività di protezione e conservazione dell'ambiente (Khrushch *et al.*, 2023).

1. RESIDUATI BELLICI

Il problema più evidente e immediato connesso all'inquinamento del suolo e del mare nelle zone colpite da un conflitto armato è l'impressionante quantità di ordigni inesplosi disseminati nell'ambiente, quali mine terrestri, munizioni difettose o nascoste intenzionalmente e armi contenute in relitti in mare. Si tratta di armi (bombe aeree, granate, mine antiuomo, mine navali, munizioni a grappolo, razzi, ecc.) che presentano ancora un serio rischio di detonazione accidentale, anche diversi decenni dopo il termine del conflitto. Ma la presenza di un residuato bellico non è necessariamente legata a episodi di guerra. Anche le aree addestrative militari, i poligoni di tiro, i vecchi arsenali o i siti di discarica sotterranea o nelle profondità marine delle munizioni obsolete possono contenere e celare un numero rilevante di ordigni (Della Torre *et al.*, 2014).

Le munizioni inesplose della Prima e Seconda guerra mondiale sono un duplice pericolo: col passare degli anni, infatti, il detonatore e la carica principale dell'ordigno si deteriorano, rendendo spesso questi sistemi più sensibili agli stimoli meccanici o termici e quindi estremamente pericolosi da gestire. Ci sono innumerevoli esempi di persone che si imbattono in vecchie

munizioni inesplose, spesso con esiti fatali. Tuttavia, anche quando le sostanze esplosive sono degradate e non più attivabili per innesco involontario, esiste ancora un rischio specifico di contaminazione del suolo e delle acque sotterranee, dovuto al rilascio di sostanze chimiche organiche e inorganiche pericolose da parte degli ordigni corrosi e deteriorati. Piombo, mercurio, rame, arsenico sono metalli contenuti in grandi quantità in proiettili e granate convenzionali, che possono essere rilasciate nell'ambiente attraverso fenomeni di lisciviazione favorita dalle acque meteoriche e l'azione complessante degli acidi umici del terreno, contaminando quindi le falde acquifere sotterranee e i suoli fertili (Skalny *et al.*, 2021; Kristoferson, 1981).

2. LA PRIMA GUERRA MONDIALE E LA “ZONA ROSSA” NELLA FRANCIA SETTENTRIONALE

La Prima guerra mondiale ha visto lo sviluppo e l'uso sul campo di battaglia di diversi tipi di nuove armi che hanno continuato ad avere un impatto notevole sull'ambiente anche molto tempo dopo la fine delle ostilità. Alcune regioni dell'Europa centrale, dove i combattimenti sono stati più intensi, sono tra i luoghi del mondo colpiti dal maggior numero di proiettili per unità di superficie e continuano a pagare un pesante tributo in termini di contaminazione del suolo causata da composti organici tossici e metalli pesanti. Uno degli esempi più eclatanti è la cosiddetta “Zona rossa” nel nord-est della Francia, un'area di esclusione totale che si sviluppa lungo i campi delle sanguinose battaglie del 1914-1918. Questo territorio, che si estende per oltre 1.200 km², è stato considerato troppo compromesso e inquinato per poter tornare a ospitare insediamenti abitativi, colture agricole o pascoli, ed è stato dunque abbandonato e chiuso a qualsiasi utilizzo. La Zona rossa, intorno a Lille, Cambrai, Soissons e Nancy, vicino al confine belga, è stata istituita dal governo francese poco dopo la fine della Grande guerra nelle zone più devaste, in cui i danni alle proprietà e ai terreni agricoli avevano raggiunto il 100%, e in quei luoghi nei quali la vita umana era ormai considerata impossibile. La distruzione causata dalla guerra ha lasciato un paesaggio segnato da trincee, crateri e rovine, con il suolo fortemente inquinato da numerose sostanze pericolose. L'impressionante ambiente della Zona rossa è caratterizzato dalla presenza di ordigni inesplosi, da un'altissima contaminazione dovuta a inquinanti pericolosi e dai resti di vittime umane e animali. Nell'area si riscontra ancora oggi una densità impressionante di proiettili inesplosi, munizioni a caricamento speciale (armi chimiche), granate e sistemi

d'arma arrugginiti. Inoltre, il suolo è stato inquinato da metalli pesanti, tra cui Pb, As, Cr, Hg, Cd, composti organici clorurati e altre sostanze altamente tossiche derivanti dai sottoprodotti della detonazione o della distruzione degli ordigni. Le analisi *in loco* hanno rivelato che la maggior parte della contaminazione nei primi 20 cm dello strato superiore del suolo è essenzialmente composta da residui di combustione e composti carbonizzati, con concentrazioni estremamente elevate di metalli pericolosi per l'uomo e per l'ecosistema: fino a 26.398 mg/kg per il Pb, 133.237 mg/kg per lo Zn e il sorprendente contenuto di 175.907 mg/kg per l'As (Bausinger *et al.*, 2007). Questi valori sono chiaramente incompatibili con qualsiasi attività umana e, per questo, l'edilizia abitativa, l'agricoltura e la silvicoltura sono ancora vietate nella Zona rossa, dopo più di un secolo, facendo sì che alcuni paesi e villaggi non stiano stati ricostruiti dopo la guerra. Poi, l'uso estensivo, da entrambe le parti, di proiettili d'artiglieria caricati anche con armi chimiche, durante i combattimenti, ha contribuito ulteriormente alla contaminazione del terreno (Guidotti e Ranghieri, 2022). Ogni anno vengono recuperate diverse tonnellate di ordigni inesplosi, ma si stima che ci vorranno ancora centinaia di anni per ripulire completamente la zona al ritmo attuale (Freemantle, 2018). Tuttavia, le operazioni di bonifica e decontaminazione di questi siti compromessi sono ancora in corso, con progetti che mirano a reintrodurre specie vegetali autoctone, creare *habitat* per la fauna selvatica e ripristinare la salubrità in generale della zona. In aree specifiche, il ritorno alla fruibilità della Zona rossa non solo è una conquista per l'ambiente, ma contribuisce anche a preservare la memoria e la storia della Prima guerra mondiale.

3. LA PESANTE EREDITÀ DELLA GUERRA DEL VIETNAM

Il Laos è la nazione al mondo che detiene il triste primato di territorio più pesantemente bombardato per abitante (BBC News, 2018). Nel corso della Guerra del Vietnam più di 2 milioni di ordigni esplosivi furono sganciati sul Laos in circa 500.000 missioni condotte dalle Forze Armate USA. In molti casi sono state impiegate bombe a grappolo (*cluster bombs*) antiuomo, ciascuna delle quali conteneva al suo interno centinaia di ordigni più piccoli (*bomblets*) delle dimensioni di un'arancia, un terzo delle quali, secondo alcune recenti stime, sono rimaste inesplose (Martin *et al.*, 2019). Inoltre, più della metà del territorio laotiano è stato dichiarato “gravemente contaminato” da proiettili di artiglieria, bombe da mortaio, granate, mine, bombe a mano, razzi, armi incendiarie e altri residuati bellici di varia natura e origine. La

presenza ancora molto diffusa di ordigni inesplosi è un perenne ostacolo alla ripresa delle attività agricole in molte zone rurali e, soprattutto, una minaccia costante per i bambini, che spesso sono attratti da questi dispositivi, scambiati per giocattoli. Le stime parlano di circa 288 milioni di bombe a grappolo e più di 75 milioni di ordigni inesplosi abbandonati sul suolo del Laos al termine della guerra (Alexander, 2015). Parallelamente, nel vicino Vietnam, circa 800.000 tonnellate di mine e bombe inesplose dovrebbero ancora essere presenti nelle foreste e nelle aree montane. Sebbene dal 1996 al 2009 più di un milione di ordigni abbandonati siano stati bonificati e distrutti, tra il 1999 e il 2008 vi sono stati più di 2.100 incidenti gravi, con 834 morti, tra la popolazione civile. Si calcola che, dal 1975 al 2015, quasi 100.000 persone siano state ferite o abbiano perso la vita per gli ordigni lasciati sul terreno dalla Seconda guerra dell'Indocina (Alexander, 2015).

Tuttavia, i danni più ingenti all'ambiente nelle aree del conflitto vietnamita sono da attribuire all'uso massiccio di agenti defolianti come arma non convenzionale. "Agente Arancio" (*Agent Orange*) è il nome di una miscela di erbicidi usati dalle forze armate statunitensi in Vietnam dal 1962 al 1971. L'uso di questa sostanza era duplice: rimuovere la copertura delle foglie delle foreste che davano riparo e rifugio ai Viet Cong e alle forze armate del Vietnam del Nord e distruggere i raccolti agricoli che avrebbero approvvigionato il nemico. La formulazione del defoliente, dispersa sulla vegetazione tramite aeroplani a bassa quota, conteneva, grosso modo, una miscela 1:1 di esteri butilici degli acidi 2,4-diclorofenossiacetico (2,4-D) e 2,4,5-triclorofenossiacetico (2,4,5-T), con un'elevata quantità di impurezze (Fig. 2). Tra queste ultime, l'Agente Arancio conteneva piccole – ma non assolutamente trascurabili – quantità di 2,3,7,8-tetraclorodibenzo-*p*-diossina (nota comunemente come "diossina"), che era presente come sottoprodotto della produzione del 2,4,5-T. La diossina è un inquinante estremamente tossico, tristemente noto (si pensi al disastro di Seveso del 1976) e in grado di causare intossicazioni gravi con quantità dell'ordine dei microgrammi (Bajgar *et al.*, 2015). Il totale degli agenti defolianti ed erbicidi sparsi nelle operazioni di guerra è stata di circa 75.800 t, in cui erano contenuti ca. 170 kg di diossina, che sono dunque finiti sul suolo vietnamita (Dwernychuk *et al.*, 2002). Più recentemente si è scoperto che l'Agente Arancio è la causa di numerose e spesso poco note patologie gravi, tra cui tumori, sterilità, malformazioni nella prole, malattie croniche cutanee e problemi neurologici e psicologici a lungo termine, riscontrati sia nella popolazione vietnamita, che nei veterani delle forze armate USA e nelle loro famiglie.

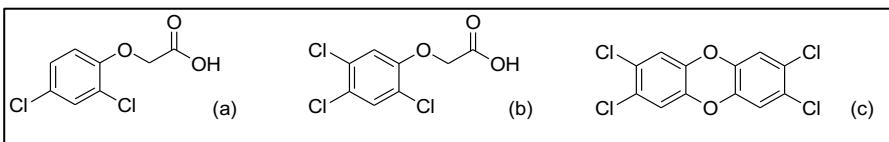


Fig. 2 – Gli ingredienti attivi dell’Agente Arancio, 2,4-D (a) e 2,4,5-T (b), e l’“impurezza” 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-diossina (c).

4. I RECENTI CONFLITTI NELL’EUROPA ORIENTALE

Quando i combattimenti si svolgono in zone densamente industrializzate o in aree di particolare rilevanza naturalistica, come parchi naturali, biotopi unici, ecosistemi protetti, l’impatto delle operazioni militari sull’ambiente è spesso amplificato e, talvolta, irreversibile. Gli impianti industriali possono venire danneggiati e dar luogo a rilasci accidentali e fughe di sostanze pericolose in aria, nel suolo e nelle acque (UN Environmental Programme, 2021). Questi incidenti sono spesso considerati come “danni collaterali” accettabili e inevitabili nella condotta delle azioni di guerra.

Nel 1999, durante le incursioni aeree della NATO contro la Jugoslavia, gli aerei dell’Alleanza bombardarono alcuni impianti industriali di produzione di fertilizzanti e di polivinilcloruro (PVC), oltre al polo petrolchimico di Pancevo, vicino Belgrado. L’attacco sprigionò una nube tossica in atmosfera e migliaia di tonnellate di composti pericolosi contenenti mercurio, diossine, cloruro di vinile e i loro sottoprodoti si riversarono nel Danubio (Schwabach, 2000).

Un disastro ambientale ancora in corso, su scala ben più ampia, sta avvenendo nei territori dell’Ucraina orientale, come conseguenza delle operazioni di guerra condotte in quell’area dal febbraio 2022. Si tratta del conflitto che vede i combattimenti più imponenti in Europa dalla fine della Seconda guerra mondiale, con le maggiori conseguenze negative sulla popolazione e sull’ecosistema. Fin dall’inizio è stato evidente un rapido peggioramento dei servizi di distribuzione dell’acqua potabile e delle condizioni igienico-sanitarie nei centri abitati, dal momento che gli impianti degli acquedotti e i sistemi di gestione delle acque reflue e sanitarie sono stati colpiti negli attacchi aerei e missilistici. La qualità dell’aria nelle aree residenziali è andata rapidamente peggiorando, come conseguenza dei continui bombardamenti e degli incendi che ne derivano. La combustione incontrollata dei depositi di carburante genera infatti ingenti quantità di particolato fine e micrometrico che

contamina l'atmosfera nelle aree vicine a quelle colpite e che causa non pochi danni agli apparati respiratori delle fasce più deboli della popolazione, in particolare tra bambini e anziani. Oltre a ciò, un'ampia fetta di edifici in Ucraina contiene componenti in asbesto, visto che fino al 2005 il Paese era tra i principali produttori e trasformatori di minerali ignifughi al mondo (l'Ucraina usava 183.000 t solo per manifattura interna nel 2005). In seguito, a partire dal 2012, durante la “International Asbestos Conference” tenutasi a Kyiv, il 21 e 22 novembre di quell'anno, incominciò il progetto di graduale eliminazione dell'impiego e della lavorazione dell'asbesto, che portò poi al bando totale di questo materiale solo nel 2017 (Holmes, 2013; Kazan e Allen, 2017). Bombardamenti e distruzioni su vasta scala di strutture civili e militari, anche nelle aree urbane e residenziali, accrescono quindi il rischio di diffusione di grandi quantità di polveri contenenti fibre di asbesto nelle macerie e nei detriti.

Un'ulteriore causa di preoccupazione, soprattutto per la regione del Donbass, è data dall'inquinamento progressivo delle riserve d'acqua e delle falde sotterranee, causato dalla percolazione delle acque di miniera, che sempre contengono elevate quantità di metalli tossici e di composti corrosivi. L'improvvisa interruzione delle attività estrattive e il blocco dei sistemi di pompaggio e di gestione delle acque reflue minerarie, contenenti notevoli quantità di inquinanti, ha portato in molti punti alla permeazione di questi fluidi contaminati verso gli acquiferi di acqua dolce, compromettendo così per i decenni a venire la salubrità e la potabilità di queste acque.

Vi è poi anche il rischio di rilascio involontario e incontrollato di materiale e di rifiuti radioattivi dagli impianti termonucleari e dai siti di stoccaggio del materiale fissile esausto. Sono infatti ben 15 gli impianti nucleari di potenza attivi in Ucraina, tra cui il sito di maggiori dimensioni di Zaporizhzhya, e, fino al 2020, metà del fabbisogno energetico interno della nazione era coperto dall'energia nucleare (World Nuclear Association, 2024).

Le caratteristiche fisiche, chimiche e biologiche dei suoli agricoli ucraini sono state in molti casi compromessi dai bombardamenti e dall'uso di armi su un così ampio raggio d'azione. Le operazioni militari hanno causato danni a vaste aree di foresta, anche a causa di un gran numero di incendi boschivi seguiti ai combattimenti. A rischio sono anche la biodiversità e le specie protette di molte aree dell'Ucraina, visto che più del 40% delle zone a rilevanza naturalistica del Paese, tra cui parchi nazionali e biotopi unici, è stato danneggiato gravemente o irreversibilmente dalle azioni di guerra (Rawtani, 2022). A causa di ciò, il Ministero dell'Ecologia e delle Risorse naturali dell'Ucraina, già a fine 2022, aveva denunciato 330 episodi di crimini contro

l’ecosistema, che sono saliti a 7439 casi di danni ambientali conseguenti alle operazioni militari, alla fine di gennaio 2025 (EcoZagroza, 2025).

Queste informazioni, ancora parziali e in costante evoluzione, mostrano come l’Ucraina, nazione altamente industrializzata, con già alle spalle una pesante eredità di questioni ambientali irrisolte provenienti dall’epoca dell’Unione sovietica, stia affrontando una crisi ambientale complessa e in continua crescita, dovuta alla drammatica situazione di guerra. È dunque altamente probabile che il Paese e tutta l’area dell’Europa orientale e del Mar Nero risentano a lungo degli effetti nefasti sull’ambiente e sulla salute umana di questo conflitto in corso.

CONCLUSIONI

Così come è di primaria importanza ricordare e commemorare i sacrifici e le sofferenze provate da tutte le popolazioni del mondo durante i periodi di guerra, è altrettanto importante proteggere e preservare l’ambiente a livello globale, consentendo alle future generazioni di vivere in un mondo libero dalla guerra e dalle sue devastanti conseguenze sulla salute umana e sugli ecosistemi.

L’impronta ecologica a lungo termine dei conflitti armati e degli ordigni bellici abbandonati o inesplosi è un tema che merita ulteriori studi e una maggiore attenzione. I notevoli sforzi, in termini di risorse umane ed economiche, per la decontaminazione e la bonifica di vaste aree che erano state scenario di guerre del XX secolo (la Zona rossa della Prima guerra mondiale nel nord della Francia, i campi di battaglia in Vietnam o la regione dell’ex Jugoslavia nei Balcani) devono servire come monito per comprendere quanto difficilmente reversibile sia l’impatto dei conflitti sull’ambiente.

Inoltre, per una nazione in stato di guerra, gli impegni e gli sforzi normalmente intrapresi per affrontare gli obiettivi chiave per uno sviluppo sostenibile, tesi a mitigare gli effetti del cambiamento climatico, a conservare e proteggere la biodiversità e a controllare e ridurre l’inquinamento, passano del tutto in secondo piano rispetto allo sforzo bellico. Le distruzioni arrecate agli ecosistemi durante le guerre non dovrebbero più essere considerate come inevitabili “danni collaterali”, dato che il benessere ambientale e umano sono intimamente legati.

Per contrastare l'effetto negativo sull'ecosistema e rendere i responsabili di questi crimini verso l'ambiente perseguitibili in futuro, sono perciò necessarie nuove e più rigorose norme di diritto internazionale, per salvaguardare l'ambiente durante i conflitti armati e per considerare i crimini ambientali tanto gravi quanto i crimini contro l'umanità.

BIBLIOGRAFIA

- Alexander D. (2015). *Disability and disaster: an overview*. In: Kelman I. and Stough L.M., eds., *Disability and disaster studies*. London: Palgrave Macmillan.
- Bajgar J., Kassa J., Fusek J., Kuca K. and Jun D. (2015). *Other toxic chemicals as potential chemical warfare agents*. In: Gupta R.C., ed., *Handbook of toxicology of chemical warfare agents*. Cambridge: Academic Press (2nd edition), 337-345.
- Bausinger T., Bonnaire E. and Preuss J. (2007). *Exposure assessment of a burning ground for chemical ammunition on the Great War battlefields of Verdun*. In: «Sci Total Environ», 382 (2-3): 259-271.
- BBC News (2016). *Laos: Barack Obama regrets “biggest bombing in history”*, September 6, 2016. Testo disponibile all'url: <https://www.bbc.com/news/world-asia-37286520> [consultato il 18 settembre 2025].
- Chkhirodze D. and Bandzeladze M. (2022). *War and its impact on sustainable development*. In: «Econ Profile», 1(23): 126-131.
- Della Torre C., Corsi I., Tursi A., Amato E. and Focardi S. (2014). *Residuati bellici affondati in mare: studio di una contaminazione dimenticata*. In: «EtruriaNatura», 10: 35-42.
- Dudley J.P., Ginsberg J.R., Plumptre A.J., Hart J.A. and Campos L.C. (2002). *Effects of war and civil strife on wildlife and wildlife habitats*. In: «Conserv Biol», 2(16): 319-329.
- Dwernychuk L.W., Cau H.D., Hatfield C.T., Boivin T.G., Hung T.M., Dung P.T. and Thai N.D. (2002). *Dioxin reservoirs in southern Vietnam. A legacy of Agent Orange*. In: «Chemosphere», 47(2): 117-137.
- EcoZagroza, Official resource of the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine (2025). *Eco threat*, update February 2025. Testo disponibile all'url: <https://ecozagroza.gov.ua/> [consultato il 18 settembre 2025].
- Freemantle M. (2018). *The great war clean-up*. In: «Chem World». Testo disponibile all'url: <https://www.chemistryworld.com/features/the-great-war-clean-up/3009456.article> [consultato il 18 settembre 2025].
- Guidotti M. and Ranghieri M. (2022). *Armi chimiche: il lato oscuro della scienza*. In: «Saperè», 88(3): 10-15.
- Guidotti M. and Trifirò F. (2016). *Chemical risk and chemical warfare agents: science and technology against humankind*. In: «Toxicol Environ Chem», 98(9): 1018-1025.

- Holmes D. (2013). *IARC in the dock over ties with asbestos industry*. In: «*Lancet*», 381: 359-361.
- Kazan-Allen L. (2017). International Ban Asbestos Secretariat, *Ukraine's asbestos debacle*. Testo disponibile all'url: <http://ibasecretariat.org/lka-ukraines-asbestos-debacle.php> [consultato il 18 settembre 2025].
- Khan M. (2022). *The environmental impacts of war and conflict*, K4D Helpdesk Report, Institute of Development Studies. Testo disponibile all'url: <https://doi.org/10.19088/k4d.2022.060> [consultato il 18 settembre 2025].
- Khrushch O., Moskalets V., Fedyk O., Karpiuk Y., Hasiuk M., Ivantsev N., Ivantsev L. and Arjumend H. (2023). *Environmental and psychological effects of Russian war in Ukraine*. In: «*Grassroots J Nat Res*», 1(6): 37-84.
- Kristoferson L. (1981). *Modern weapons and the environment*. In: «*Environ Conserv*», 4(8): 257-258.
- Levy B.S. (2021). *Collective violence: war*. In: R. Detels *et al.*, eds., *Oxford textbook of global public health*, Oxford: Textbooks in Public Health (7th edition), 393-400.
- Martin M., Feichert A., Dolven B. and Lum T. (2019). *War legacy issues in Southeast Asia: unexploded ordnance (UXO)*, Report R45749. Washington DC: Library of Congress.
- Rawtani D., Gupta G., Khatri N., Rao P.K. and Hussain C.M. (2022). *Environmental damages due to war in Ukraine: a perspective*. In: «*Sci Total Environ*», 850: 157932.
- REACH (2016). *Substance evaluation conclusion as required by REACH article 48 and evaluation report for sodium perchlorate*. Testo disponibile all'url: <https://echa.europa.eu/documents/10162/9b321f81-f314-8969-25e2-15183cb39f3c> [consultato il 18 settembre 2025].
- Schwabach A. (2000). *Environmental damage resulting from the NATO military action in Yugoslavia*. In: «*Columbia J. Environ. L.*», 25(1): 117-140.
- Skalny A.V., Aschner M., Bobrovnitsky I.P., Chen P., Tsatsakis A., Paoliello M.M.B., Djordjevic A.B., and Tinkov A.A. (2021). *Environmental and health hazards of military metal pollution*. In: «*Environ Res*», 201: 111568.
- Sowers J. and Weinthal E. (2022). *War and environmental politics: a comparative perspective*. In: Sowers J., Van Deveer S.D. and Weinthal E., eds., *The Oxford handbook of comparative environmental politics*. Oxford: University Press.
- Talmage S.S., Opresko D.M., Maxwell C.J., Welsh C.J.E., Cretella F.M., Reno P.H. and Daniel F.B. (1999). *Nitroaromatic munition compounds: environmental effects and screening values*. In: «*Rev Environ Contamination Toxicol*», 161: 1-156.
- UN Environmental Programme (2021). *Environmental legacy of Explosive Weapons in Populated Areas*. Testo disponibile all'url: <https://www.unep.org/news-and-stories/story/environmental-legacy-explosive-weapons-populated-areas> [consultato il 18 settembre 2025].
- World Nuclear Association (2024). *Nuclear power in Ukraine*, updated March 2024. Testo disponibile all'url: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/ukraine.aspx> [consultato il 18 settembre 2025].

Biologia strutturale e intelligenza artificiale: una rivoluzione multidisciplinare nella comprendizione delle strutture proteiche

Federico Forneris*

SUNTO – La biologia strutturale è una disciplina affascinante e in continua evoluzione, che si occupa dello studio della struttura tridimensionale delle macromolecole biologiche e della loro relazione con la funzione cellulare. Attraverso avanzate tecniche sperimentali e computazionali, si procede alla progressiva comprensione dei meccanismi molecolari che governano la vita, con implicazioni dirette sulla salute umana attraverso la comprensione dei meccanismi molecolari alla base di molteplici malattie, aprendo prospettive innovative per lo sviluppo di farmaci specifici ed efficaci. L'intervento che segue si propone di offrire un'introduzione alla biologia strutturale, con particolare attenzione al problema del *folding* delle proteine e all'impatto rivoluzionario che l'intelligenza artificiale sta avendo da qualche anno in questo settore. In relazione alla tematica e per sottolineare quanto gli strumenti basati sull'intelligenza artificiale possano rappresentare, se ben utilizzati, una preziosa risorsa per la ricerca scientifica, desidero precisare di aver fatto uso di strumenti basati sull'intelligenza artificiale nella redazione del presente testo. In particolare, la prima stesura di questa relazione è stata generata dal *software* ChatGPT a partire dalla trascrizione dell'intervento tenuto presso l'Istituto Lombardo, ottenuta anch'essa sfruttando l'intelligenza artificiale facendo analizzare la registrazione, disponibile su YouTube, al *software* Panopto.

PAROLE CHIAVE – Biologia strutturale; *Folding* delle proteine; Intelligenza artificiale.

ABSTRACT – Structural biology is a fascinating and constantly evolving discipline that focuses on studying the three-dimensional structure of biological macromolecules and their relationship with cellular functions. Through advanced experimental and computational techniques, researchers progressively gain a deeper understanding of the molecular mechanisms

* Laboratorio Armenise-Harvard di Biologia strutturale, Dipartimento di Biologia e Biotecnologie, Università degli Studi di Pavia, Via Ferrata 9A, 27100 Pavia, <http://fornerislab.unipv.it>. E-mail: federico.forneris@unipv.it. Relazione tenuta il 7 marzo 2024.

that govern life. This knowledge has direct implications for human health by shedding light on the molecular basis of various diseases, opening up innovative perspectives for the development of targeted and effective drugs. The following presentation aims to provide an introduction to structural biology, with particular emphasis on the problem of protein folding and the revolutionary impact that artificial intelligence has had in this field in recent years. In relation to this topic, and to highlight how AI-based tools can serve as a valuable resource for scientific research when used appropriately, I would like to clarify that I have utilized artificial intelligence tools in drafting this text. Specifically, the first draft of this presentation was generated by the ChatGPT software based on the transcription of a talk given at the Lombard Institute. This transcription was also obtained using artificial intelligence by analyzing the recording of the talk available on YouTube through the Panopto software.

KEYWORDS – Structural biology; Protein folding; Artificial intelligence.

1. IL MONDO INVISIBILE DELLA BIOLOGIA MOLECOLARE

Quando si parla di cellule e processi biologici, spesso si ha un’immagine semplificata della realtà microscopica. Nei libri di testo, le cellule vengono rappresentate come ambienti spaziosi e ordinati, con pochi elementi distinti che interagiscono tra loro. Tuttavia, la realtà è molto più complessa, e per comprendere davvero il funzionamento della cellula bisogna scendere a livello molecolare. Qui, proteine, DNA, RNA e altre biomolecole interagiscono costantemente in un intricato “balletto molecolare”, che rende possibile la vita. La biologia strutturale si occupa proprio di studiare come queste molecole comunicano tra loro e come la loro forma tridimensionale influenzia la loro funzione. Comprendere questa relazione è cruciale per molteplici applicazioni, dalla biotecnologia alla medicina.

Particolarmenete sfidante è poi riuscire a integrare l’informazione relativa a singole macromolecole all’interno di complesse architetture quali organelli, compartimenti sub-cellulari o intere cellule. Un esempio significativo è il modello dettagliato dell’organizzazione molecolare di una cellula di *Mycoplasma genitalium*, reso possibile attraverso sforzi congiunti di ricerca sperimentale, modellistica e grafica molecolare (Maritan *et al.*, 2022). Questa rappresentazione (disponibile in modalità interattiva all’url: https://ccsb.scripps.edu/gallery/mycoplasma_model/, consultato il 18 settembre 2025) mostra un ambiente incredibilmente affollato, in cui proteine, acidi nucleici e altre macromolecole interagiscono costantemente per mantenere il funzionamento cellulare. Ogni singola proteina svolge una funzione specifica, contribuendo al

metabolismo cellulare, alla regolazione dell'espressione genica, alla risposta agli stimoli esterni e ad altre funzioni essenziali.

Tra tutte le macromolecole biologiche, le proteine sono particolarmente affascinanti: questi polimeri composti da lunghe catene di amminoacidi costituiscono i mattoni fondamentali della vita, svolgendo funzioni strutturali, catalitiche ed enzimatiche, regolatorie e molto altro. Ma il segreto della loro funzione sta nella loro forma tridimensionale, un aspetto che la biologia strutturale cerca di comprendere da decenni. Il processo dinamico attraverso cui una proteina raggiunge la propria configurazione funzionale è noto come *folding*. Questo meccanismo è estremamente complesso, in quanto la stessa catena di amminoacidi potrebbe teoricamente assumere un numero enorme di conformazioni. Tuttavia, in natura, ogni proteina adotta una sola o poche configurazioni stabili e funzionali.

Fin dalle prime determinazioni strutturali, la complessità nel ripiegamento della sequenza proteica in articolate strutture tridimensionali ha rappresentato una componente particolarmente sfidante della comprensione delle macromolecole. A differenza del DNA, la cui struttura a doppia elica appariva straordinariamente regolare e intuitivamente semplice da visualizzare, le proteine presentavano architetture più difficili da rappresentare e, di conseguenza, da interpretare. Un esempio evidente di questo è dato dalla presentazione della struttura cristallografica del lisozima fatta da David Phillips alla Royal Society negli anni '60, in cui per evidenziare la difficoltà del problema, Phillips mostrò due modelli metallici fianco a fianco. Il primo era il modello della proteina correttamente ripiegata. Questo modello era piccolo, compatto e altamente organizzato per via delle estese interazioni non covalenti tra gli amminoacidi ripiegati a costituire la struttura globulare. Il secondo era il modello della stessa proteina, completamente srotolato: un filo metallico che si estendeva fino al soffitto della hall della Royal Society, mostrando quanto fosse lunga la sequenza amminoacidica in assenza di un ripiegamento ordinato.

Oggi, grazie a tecniche sperimentali avanzate e all'intelligenza artificiale, decifrare la relazioni struttura-funzione di molte proteine (e quindi decifrare, almeno in parte, il problema del *folding*) è diventato una sfida sempre più possibile. I prossimi paragrafi presentano una sintetica descrizione dei momenti chiave dell'evoluzione della biologia strutturale, il problema del *folding* delle proteine, le metodiche sperimentali di più frequente utilizzo per la determinazione delle strutture molecolari delle proteine.

2. I PRIMI STUDI SULLE PROTEINE E LA RIVOLUZIONE DELLA CRISTALLOGRAFIA A RAGGI X

I primi studi biochimici contenenti descrizioni legati all’isolamento e alla caratterizzazione delle proteine risalgono al XIX secolo, ma la loro struttura tridimensionale rimase un mistero fino alla metà del secolo successivo.

Uno dei primi a proporre un modello strutturale fu Linus Pauling, che nel 1951 propose per la prima volta, quali elementi ricorrenti nell’architettura molecolare delle proteine, le strutture secondarie a α -elica e a foglietto β (Eisenberg, 2003). Queste intuizioni furono fondamentali per comprendere la complessità delle proteine e prepararono il terreno per scoperte ancora più grandi.

La vera svolta avvenne alla fine degli anni ’50, quando Max Perutz e John Kendrew riuscirono a determinare le strutture tridimensionali rispettivamente di mioglobina e dell’emoglobina usando la cristallografia a raggi X (Strandberg, 2009). Questa tecnica permette di analizzare le proteine in forma cristallina, rivelandone l’organizzazione atomica. Da allora, la cristallografia a raggi X ha permesso di risolvere migliaia di strutture proteiche, fornendo informazioni cruciali su enzimi, recettori cellulari e proteine coinvolte in malattie. A queste si sono uniti progressivamente i modelli molecolari ottenuti attraverso altre tecniche sperimentali (descritti nel §4), mettendo a disposizione dei ricercatori preziose informazioni circa l’architettura molecolare di proteine e complessi macromolecolari presenti in una moltitudine di organismi diversi.

3. IL PROBLEMA DEL *FOLDING* DELLE PROTEINE: UNA SFIDA SCIENTIFICA APERTA

Una delle domande più difficili della biologia molecolare è: *come fa una proteina a ripiegarsi nella sua forma tridimensionale corretta?* Il *folding* delle proteine è uno dei più intriganti e difficili problemi scientifici aperti. In teoria, data una sequenza di 100 amminoacidi, esistono circa 10^{100} possibili combinazioni tridimensionali plausibili (Regan *et al.*, 2015). Tuttavia, solo una è biologicamente attiva.

Al problema combinatorio si aggiunge una componente dinamica. Il processo di biosintesi delle proteine inizia a partire dai ribosomi, da cui queste macromolecole vengono generate come lunghe catene di amminoacidi prive di una struttura tridimensionale definita. Alla fine degli anni ’60, il fisico

Cyrus Levinthal sottolineò l'apparente paradosso del *folding* delle proteine. Se una proteina dovesse esplorare tutte le possibili conformazioni prima di trovare quella corretta, ci vorrebbero miliardi di anni. Bastano tuttavia pochi millisecondi perché queste catene si ripieghino spontaneamente in una singola architettura tridimensionale, precisa e funzionale (Levinthal *et al.*, 1968; Id., 1969).

Tutto ciò è possibile poiché le proteine non esplorano a caso tutte le conformazioni, ma seguono percorsi energeticamente favorevoli, in cui i legami chimici e le interazioni tra amminoacidi guidano il *folding* in modo estremamente rapido ed efficiente. Tanto che errori sistematici nel *folding* proteico che portano ad architetture tridimensionali stabili differenti da quelle fisiologicamente funzionali sono causa di gravi malattie, tra le quali figurano il morbo di Alzheimer e il morbo di Parkinson, causati dall'aggregazione di proteine non correttamente ripiegate (Fitzpatrick *et al.*, 2017; Yang *et al.*, 2022).

4. LE PRINCIPALI TECNICHE Sperimentali PER STUDIARE LA STRUTTURA DELLE PROTEINE

Accanto alla cristallografia a raggi X, negli ultimi decenni sono state sviluppate diverse tecniche sperimentali per studiare la struttura e il *folding* delle proteine, che rappresentano al giorno d'oggi un importante portfolio di metodologie applicabili per la caratterizzazione di complesse architetture molecolari. Ciascuna tecnica presenta alcune prerogative legate al proprio funzionamento, cui sono associati vantaggi e svantaggi applicativi. Questo fa sì che non esista una tecnica che può essere considerata universalmente migliore di altre: la scelta della migliore metodica di indagine è un passaggio fondamentale nelle indagini di biologia strutturale, poiché a seconda della tipologia di campione oggetto di studio e agli obiettivi della ricerca, un metodo potrebbe presentare indubbi vantaggi o svantaggi rispetto a un altro.

- La cristallografia a raggi X ha per decenni rappresentato l'unico approccio allo studio della struttura tridimensionale delle proteine. Indubbi vantaggi sono la possibilità di ottenere dati a risoluzione atomica (1-2 Å), permettendo la comprensione dei meccanismi di interazione tra proteine e piccole molecole, come ad esempio le relazioni enzima: substrato o i processi di interazione alla base del meccanismo di farmaci specifici per bersagli molecolari ben definiti. Le strutture tridimensionali delle proteine vengono generate attraverso l'interpretazione del dato sperimentale,

sotto forma di mappa di densità elettronica all'interno della quale è possibile modellare le posizioni dei singoli atomi presenti all'interno della struttura macromolecolare. Questa tecnica, tuttavia, richiede che le proteine vengano cristallizzate, un processo spesso complesso e non sempre possibile. Inoltre, le strutture tridimensionali ottenute attraverso la cristallografia a raggi X non consentono di decifrare molti dei processi dinamici alla base delle interazioni osservate, poiché il dato mostra quanto è stato “intrapolato” all'interno del cristallo in merito a quelle che sono le conformazioni della proteina oggetto di studio compatibili con il processo di cristallizzazione.

- La Risonanza magnetica nucleare (NMR) consente di studiare le proteine in soluzione sfruttando le proprietà magnetiche dei nuclei degli atomi presenti negli amminoacidi, evitando la cristallizzazione (Marion, 2013). Si tratta di un approccio con caratteristiche uniche in grado di analizzare proteine caratterizzate da architetture altamente dinamiche (ad esempio, proteine che presentano regioni intrinsecamente disordinate) e i loro cambiamenti conformazionali in soluzione. Da un esperimento NMR su proteine si ottiene una mappa di possibili distanze interatomiche, basata sull'identificazione di specifici segnali di risonanza associati ai nuclei delle specie chimiche presenti all'interno del campione. Questa tecnica è particolarmente adatta allo studio di proteine di piccole dimensioni. Data la complessità delle proteine (costituite da moltissimi atomi ma da pochissimi elementi, C, H, N, O, S), per poter ottenere spettri NMR decifrabili è infatti necessario procedere a complesse procedure di *labeling* isotopico, necessario per far emergere all'interno dello spettro NMR segnali interpretabili associati a specifici residui amminoacidici. Queste procedure, particolarmente onerose dal punto di vista sperimentale, sono in molti casi non applicabili a proteine di grandi dimensioni (>30 kDa), per le quali gli spettri NMR risulterebbero comunque non interpretabili a causa dell'elevato numero di atomi presenti nel campione.
- La microscopia elettronica criogenica (Cryo-EM) è stata per decenni una tecnica relegata allo studio a bassissima risoluzione di pochi e ben definiti sistemi molecolari di grandi dimensioni (ad esempio, i ribosomi). Negli ultimi 10 anni questa tecnica è andata incontro a una vera e propria rivoluzione (Bai *et al.*, 2015; Kuhlbrandt, 2014), causata dall'introduzione di strumentazioni, tecniche di manipolazione del campione, automazione e procedure di analisi dati innovative che hanno permesso al Cryo-EM di diventare, oggi, l'approccio più frequentemente utilizzato per lo studio di macromolecole di grandi dimensioni (>100 kDa) e per le proteine di

membrana, notoriamente difficili da cristallizzare. Indubbio vantaggio del Cryo-EM è la possibilità di ovviare al problema della cristallizzazione e alle complesse procedure di *labeling* come nel caso del NMR, e di richiedere quantità di campione davvero ridotte rispetto alle altre tecniche qui descritte. Le moderne immagini di microscopia elettronica, rielaborate attraverso procedure di classificazione per l'individuazione delle proiezioni relative alle proteine, permettono di ottenere ricostruzioni tridimensionali sotto forma di mappe di densità, con risoluzioni locali in molti casi confrontabili con la cristallografia a raggi X. Elemento limitante degli studi Cryo-EM è al momento la dimensione delle proteine oggetto di indagine, in quanto il rapporto segnale/rumore per macromolecole non globulari o di massa inferiore ai 100 kDa risulta molto ridotto e spesso non permette di ottenere ricostruzioni tridimensionali di qualità. Il recente progresso tecnologico associato a questa tecnica (anche attraverso l'implementazione di tecniche basate sull'intelligenza artificiale (Thorn, 2022) è davvero straordinario, rendendo possibili ricostruzioni di proteine di dimensioni sempre più piccole a risoluzioni sempre maggiori (Wu *et al.*, 2020).

- La spettrometria di massa, pur non essendo una tecnica “strutturale” per se, sta contribuendo in modo sempre più significativo all’ottenimento di informazioni strutturali accurate relative alle macromolecole biologiche. Moderne strumentazioni consentono infatti la determinazione di spettri di massa di proteine e complessi macromolecolari allo stato nativo, dai quali è possibile risalire a regioni coinvolte in contatti molecolari essenziali per la stabilità di queste architetture tridimensionali allo stato nativo (Heck, 2008). Ulteriori metodiche basate sull’analisi in spettrometria di massa di digeriti triptici di macromolecole trattate con *cross-linkers* chimici (Iacobucci *et al.*, 2019), o attraverso lo scambio isotopico in soluzione tra acqua di solvatazione e acqua pesante (c.d. *hydrogen-deuterium exchange*) (Yan *et al.*, 2009) permettono di ottenere dettagli accurati circa la posizione di specifiche porzioni di una macromolecola nello spazio tridimensionale che, combinate con altri dati strutturali provenienti da tecniche sperimentali o computazionali, facilitano la determinazione dell’architettura della macromolecola oggetto di studio.

L'importanza delle strutture tridimensionali delle macromolecole biologiche è stata oggetto di riconoscimento fin da subito, portando alla creazione di un archivio digitale, il Protein Data Bank (PDB), che raccoglie, standardizza e mette a disposizione centinaia di migliaia di strutture proteiche determinate sperimentalmente (Berman *et al.*, 2003). Il PDB è una risorsa unica per la comunità scientifica internazionale e, vedremo nei prossimi paragrafi, ha contribuito in modo imprescindibile al successo delle tecnologie computazionali basate sull'intelligenza artificiale per la modellistica molecolare.

5. GLI APPROCCI COMPUTAZIONALI PER STUDIARE LA STRUTTURA DELLE PROTEINE

L'utilizzo della bioinformatica per cercare di comprendere l'architettura tridimensionale delle proteine risale a molto prima dell'avvento delle tecniche basate sull'intelligenza artificiale. Tra le metodiche *in silico* più diffuse per lo studio della biologia strutturale si annoverano:

- Le predizioni di struttura tridimensionale di proteine a partire dalla loro sequenza. Sono disponibili moltissimi algoritmi per la predizione di architetture molecolari. La maggior parte di questi metodi si basa sull'applicazione consecutiva di predizioni relative a elementi di struttura secondaria (α -eliche e β -foglietti) e di vincoli (*constraints*) di interazione tra aminoacidi presenti all'interno delle sequenze proteiche basati statisticamente su architetture determinate sperimentalmente in precedenza. Il problema principale di questi metodi è sempre stato quello relativo all'incertezza della predizione, tanto che da decenni si tiene una competizione aperta agli sviluppatori (CASP, Elofsson, 2023) per identificare le migliori metodiche e migliorare iterativamente gli algoritmi di predizione.
- Le predizioni di siti di interazione tra proteine, o tra proteine e piccole molecole. Queste metodiche (dette di *docking*) sfruttano approcci statistici basati sul posizionamento delle molecole oggetto di interazione in molteplici pose differenti, compatibili dal punto di vista dei contatti tridimensionali, della complementarietà dei contatti eletrostatici e dei contatti tra regioni idrofobiche adiacenti (Morris *et al.*, 2008). Le pose testate vengono poi disposte in ordine di plausibilità in base al calcolo di molteplici parametri, tra i quali tipicamente vengono considerati l'energia libera di interazione/dissociazione e l'effettiva complementarietà sterica. Nel contesto del *drug discovery*, questi approcci rappresentano al giorno d'oggi

un passaggio fondamentale prima di affrontare qualsiasi tipo di indagine sperimentale, poiché consentono una rapida valutazione della plausibilità delle interazioni molecolari a una frazione esigua del costo di una validazione sperimentale. Il successo di queste metodiche è intrinsecamente legato alla presenza di molteplici contatti non ambigui tra le molecole oggetto di interazione: è indubbiamente più semplice svolgere un esperimento di *docking* di una piccola molecola all'interno di una tasca profonda dalla forma ben definita all'interno di una proteina rispetto all'individuare un possibile sito di interazione su di una superficie convessa priva di cavità. Analogamente, il *docking* è sicuramente di più facile applicazione in assenza di cambiamenti conformazionali e processi dinamici che possono modificare la forma dei siti di interazione, rendendoli compatibili per il contatto oggetto di studio solo quando l'interazione è di fatto avvenuta.

- Le simulazioni di dinamica molecolare, con cui è possibile effettuare predizioni del comportamento di macromolecole in soluzione per intervalli temporali nell'ordine dei micro/millisecondi, tipicamente sufficienti per valutare processi legati alla diffusione di substrati all'interno di enzimi o la stabilità di una specifica interazione in presenza di particolari condizioni di pH, di temperatura, o di forza ionica. Il progresso tecnologico associato al calcolo computazionale consente di svolgere simulazioni sempre più accurate ed estese su sistemi macromolecolari di dimensioni crescenti, rendendo queste tecniche di calcolo sempre più utilizzate per la validazione di dati sperimentali e, in congiunzione con le tecniche di *docking* discusse al punto precedente, di prendere in considerazione gli aspetti dinamici del riconoscimento molecolare per una migliore valutazione e quantificazione delle interazioni tra macromolecole.

La differenza fondamentale tra le tecniche predittive e quelle basate sul *docking* e sulla dinamica molecolare è che le prime ambiscono a ovviare all'utilizzo di metodiche sperimentali per la determinazione dell'architettura tridimensionale delle macromolecole oggetto di studio, mentre le altre fanno largo uso delle informazioni già disponibili sperimentalmente per fornire informazioni complementari e favorire sviluppi applicativi attraverso di esse.

6. LA RIVOLUZIONE DI ALPHAFOLD E DEI METODI DI PREDIZIONE DI STRUTTURE TRIDIMENSIONALI BASATI SULL'INTELLIGENZA ARTIFICIALE

L'intelligenza artificiale ha nuovamente rivoluzionato la biologia strutturale. Uno degli sviluppi più importanti è stato AlphaFold (Jumper *et al.*, 2021), un *software* sviluppato da DeepMind (Google), presentato nel gennaio 2020 e salito agli onori delle cronache per essere stato in grado di prevedere la struttura di migliaia di proteine con un'accuratezza vicina a quella sperimentale, di fatto superando di ordini di grandezza quanto ottenuto con gli algoritmi di predizione strutturale utilizzati fino a quel momento, come evidenziato dai risultati del CASP 2020 (Kryshtafovych *et al.*, 2021).

L'algoritmo di AlphaFold2 utilizza reti neurali profonde per predire la struttura tridimensionale di una proteina basandosi sulla sua sequenza amminoacidica. Combinato con l'analisi delle relazioni evolutive tra le migliaia di strutture proteiche disponibili attraverso il PDB, genera predizioni accurate delle strutture tridimensionali di proteine, finora mai caratterizzate. Questo approccio, una volta messo a disposizione della comunità scientifica (dopo insistenza della stessa nei confronti di Google, che aveva inizialmente circolato versioni "chiuse" e molto limitate di AlphaFold2) ha reso più rapida, efficiente e accurata la predizione di strutture proteiche rispetto a qualsiasi altro algoritmo disponibile in quel momento. Un secondo fondamentale traguardo è stato raggiunto quando AlphaFold2 è stato applicato sistematicamente a tutte le sequenze proteiche note presenti negli organismi i cui genomi sono stati sequenziati (Tunyasuvunakool *et al.*, 2021; Varadi *et al.*, 2022), di fatto mettendo a disposizione della comunità scientifica modelli predittivi di milioni di architetture molecolari mai studiate in precedenza.

Sviluppi successivi, sia da parte del team di Google Deepmind che di altri gruppi di ricerca (tra i quali anche il gruppo di David Baker, tra i principali attori coinvolti nello studio computazionale delle strutture proteiche) hanno messo a disposizione svariati algoritmi basati sull'intelligenza artificiale, con i quali è oggi possibile effettuare predizioni di architetture, non solo di proteine, ma anche di complessi contenenti ligandi e modificazioni post-traduzionali (Humphreys *et al.*, 2021; Thompson *et al.*, 2024; Wohlwend *et al.*, 2024).

7. LA FINE DELLA BIOLOGIA STRUTTURALE SPERIMENTALE? TUTT'ALTRO

La narrazione di cui sopra può suggerire al lettore inesperto che gli sforzi finora condotti per determinare sperimentalmente strutture tridimensionali di proteine siano da considerarsi quasi obsoleti, in virtù dell'avvento di tecnologie computazionali con accuratezza molto elevata. Ci sono tuttavia alcuni aspetti che sottolineano come la realtà attuale sia assolutamente diversa da questo scenario.

Prima di tutto, è necessario considerare che gli algoritmi di predizione strutturale basati su intelligenza artificiale hanno ottenuto questi straordinari risultati grazie a *training* effettuato interpretando le interazioni molecolari presenti nelle strutture tridimensionali determinate sperimentalmente e messe a disposizione della comunità attraverso il PDB: senza decenni di sforzi sperimentali, nessun algoritmo di intelligenza artificiale sarebbe mai stato in grado di predire alcunché.

In secondo luogo, per quanto le predizioni risultino statisticamente piuttosto accurate, l'errore associato a queste quando si procede al confronto dettagliato con analoghe strutture sperimentali non è trascurabile. Questo fa sì che, nello studio di interazioni molecolari, così come nello sviluppo di farmaci e negli approcci di ingegneria proteica, i modelli predittivi ottenuti mediante tecniche basate sull'intelligenza artificiale risultino meno affidabili rispetto alle strutture sperimentali, soprattutto quando le molecole oggetto di studio sono particolarmente complesse (ad esempio nel caso proteine di membrana o grandi complessi macromolecolari). Scostamenti anche di pochi decimi di Å relativi a specifiche catene laterali di amminoacidi critici per interazioni molecolari possono risultare critici per la comprensione di contatti specifici e per successivi approcci di ottimizzazione di queste interazioni, ad esempio nello sviluppo di farmaci. La precisione offerta dalle metodiche sperimentali resta pertanto un elemento imprescindibile per questo tipo di approcci.

In questo contesto, la maggiore disponibilità di modelli predittivi accurati va considerata come una risorsa aggiuntiva, anziché sostitutiva, dei metodi sperimentali. Disporre di un “punto di partenza” più accurato per elaborare ipotesi di studio sperimentale offre indubbi vantaggi e consente di affrontare indagini più complesse, facendo affidamento (con le dovute cautele!) alla modellistica basata sull'intelligenza artificiale per la comprensione delle architetture “base” che caratterizzano i domini e più in generale le “forme” delle macromolecole oggetto di studio (Bai *et al.*, 2024). Ed è proprio attraverso questa integrazione degli approcci che stanno emergendo i più

straordinari recenti risultati di ricerca nel campo della biologia strutturale (Mahamid *et al.*, 2016; Oikonomou *et al.*, 2017; van den Hoek *et al.*, 2022).

Va inoltre sottolineato che il problema del *folding* descritto precedentemente è tutt’altro che risolto, poiché anche le più moderne metodiche di indagine basate sull’intelligenza artificiale riescono a fornire predizioni di quello che è lo stato finale (e quindi stabile) di una macromolecola, ma non i dettagli del processo che permette il raggiungimento di questo stato a partire da un polimero caratterizzato da una amminoacidica non ripiegata. Considerata la complessità del processo, anche in questo caso è altamente probabile che, se mai riusciremo a comprendere le basi di questo articolato processo, ci riusciremo combinando insieme una moltitudine di approcci di indagine, operando in sinergia e fornendo anche validazione ortogonale dei dati ottenuti.

CONCLUSIONI E PROSPETTIVE FUTURE

La biologia strutturale ha vissuto numerose “rivoluzioni” che hanno permesso di ampliare le possibilità di indagine attraverso l’utilizzo di una molitudine di metodiche di indagine. Dalle prime strutture molecolari determinate con la cristallografia a raggi X all’avvento di nuove tecnologie quali l’NMR e più recentemente i “passi da gigante” del Cryo-EM, fino all’introduzione dell’intelligenza artificiale, ogni “rivoluzione” ha esteso le opportunità di comprensione molecolare della materia vivente e lo sviluppo di farmaci molecolari specifici contro bersagli sempre più complessi.

Anche il biologo strutturale è una figura in costante cambiamento: da sempre unisce competenze in ambito sperimentale e computazionale. I recenti progressi evidenziano come la combinazione e l’integrazione delle metodiche a disposizione (e delle competenze a queste associate) sia la ricetta per raggiungere i più ambiziosi risultati di ricerca. L’approccio allo studio delle macromolecole biologiche, sempre più multidisciplinare, ambisce ora a caratterizzare le relazioni struttura-funzione *in situ*, ossia nel contesto biologico in cui queste molecole si trovano a livello fisiologico. Un risultato che già è stato raggiunto attraverso approcci pionieristici di integrazione delle metodiche per un numero molto ristretto di studi, ma che nel prossimo futuro diventerà sempre più convenzionale.

Un punto fermo, nonostante le numerose “rivoluzioni”, è la disponibilità delle informazioni circa le strutture tridimensionali delle macromolecole. Il PDB, ora integrato anche con i modelli predetti dall’intelligenza artificiale, e gli altri *database* ora disponibili con le informazioni strutturali determinate

attraverso i numerosi approcci sperimentali disponibili, costituiscono una risorsa fondamentale, preziosa e insostituibile per il futuro. Futuro che, per la biologia strutturale e chi vi opera, è più entusiasmante che mai.

BIBLIOGRAFIA

- Bai X.C., Gonen T., Gronenborn A.M., Perrakis A., Thorn A. and Yang J. (2024). *Challenges and opportunities in macromolecular structure determination*. In: «Nat Rev Mol Cell Biol», 25: 7-12. Doi: 10.1038/s41580-023-00659-y.
- Bai X.C., McMullan G. and Scheres S.H. (2015). *How cryo-EM is revolutionizing structural biology*. In: «Trends Biochem Sci», 40: 49-57. Doi: 10.1016/j.tibs.2014.10.005.
- Berman H., Henrick K. and Nakamura H. (2003). *Announcing the worldwide Protein Data Bank*. In: «Nat Struct Biol», 10: 980. Doi: 10.1038/nsb1203-980.
- Eisenberg D. (2003). *The discovery of the α -helix and β -sheet, the principal structural features of proteins*. In: «Proceedings of the National Academy of Sciences», 100: 11207-11210. Doi: 10.1073/pnas.2034522100.
- Elofsson A. (2023). *Progress at protein structure prediction, as seen in CASP15*. In: «Curr Opin Struct Biol», 80: 102594. Doi: 10.1016/j.sbi.2023.102594.
- Fitzpatrick A.W.P., Falcon B., He S., Murzin A.G., Murshudov G., Garringer H.J., Crowther R.A., Ghetti B., Goedert M. and Scheres S.H.W (2017). *Cryo-EM structures of tau filaments from Alzheimer's disease*. In: «Nature», 547: 185-190. Doi: 10.1038/nature23002.
- Heck A.J. (2008). *Native mass spectrometry: a bridge between interactomics and structural biology*. In: «Nat Methods», 5: 927-933. Doi: 10.1038/nmeth.1265.
- Humphreys I.R., Pei J., Baek M., Krishnakumar A., Anishchenko I., Ovchinnikov S., Zhang J., Ness T.J., Banjade S., Bagde S.R., Stancheva V.G., Li X.H., Liu K., Zheng Z., Barrero D.J., Roy U., Kuper J., Fernandez I.S., Szakal B., Branzei D., Rizo J., Kisler C., Greene E.C., Biggins S., Keeney S., Miller E.A., Fromme J.C., Hendrickson T.L., Cong Q. and Baker D. (2021). *Computed structures of core eukaryotic protein complexes*. In: «Science», 374: eabm4805. Doi: 10.1126/science.abm4805.
- Iacobucci C., Gotze M. and Sinz A. (2019). *Cross-linking/mass spectrometry to get a closer view on protein interaction networks*. In: «Curr Opin Biotechnol», 63: 48-53. Doi: 10.1016/j.copbio.2019.12.009.
- Jumper J., Evans R., Pritzel A., Green T., Figurnov M., Ronneberger O., Tunyasuvunakool K., Bates R., Žídek A., Potapenko A., Bridgland A., Meyer C., Kohl S.A.A., Ballard A.J., Cowie A., Romera-Paredes B., Nikolov S., Jain R., Adler J., Back T., Petersen S., Reiman D., Clancy E., Zielinski M., Steinegger M., Pacholska M., Berghammer T., Bodenstein S., Silver D., Vinyals O., Senior A.W., Kavukcuoglu K., Kohli P. and Hassabis D. (2021).

- Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold.* In: «Nature», 596: 583-589. Doi: 10.1038/s41586-021-03819-2.
- Kryshtafovych A., Schwede T., Topf M., Fidelis K. and Moult J. (2021). *Critical assessment of methods of protein structure prediction (CASP)-Round XIV.* In: «Proteins», 89: 1607-1617. Doi: 10.1002/prot.26237.
- Kuhlbrandt W. (2014). *Cryo-EM enters a new era.* In: «eLife», 3: e03678. Doi: 10.7554/eLife.03678.
- Levinthal C. (1968). *Are there pathways for protein folding?* In: «J. Chim. Phys.» 65: 44-45. Doi: 10.1051/jcp/1968650044.
- Id. (1969). *How to fold graciously.* In: *Mössbauern spectroscopy in biological systems proceedings. Univ. of Illinois Bulletin.* Champaign: University of Illinois Press, 22-26.
- Mahamid J., Pfeffer S., Schaffer M., Villa E., Danev R., Cuellar L.K., Forster F., Hyman A.A., Plitzko J.M. and Baumeister W. (2016). *Visualizing the molecular sociology at the HeLa cell nuclear periphery.* In: «Science», 351: 969-972. Doi: 10.1126/science.aad8857.
- Marion D. (2013). *An Introduction to biological NMR spectroscopy.* In: «Molecular & Cellular Proteomics», 12: 3006-3025. Doi: 10.1074/mcp.O113.030239.
- Maritan M., Autin L., Karr J., Covert M.W., Olson A.J. and Goodsell D.S. (2022). *Building structural models of a whole mycoplasma cell.* In: «J Mol Biol», 434: 167351. Doi: 10.1016/j.jmb.2021.167351.
- Morris G.M. and Lim-Wilby M. (2008). *Molecular docking.* In: «Methods Mol Biol», 443: 365-382. Doi: 10.1007/978-1-59745-177-2_19.
- Oikonomou C.M. and Jensen G.J. (2017). *Cellular electron cryotomography: toward structural biology in situ.* In: «Annu Rev Biochem», 86: 873-896. Doi: 10.1146/annurev-biochem-061516-044741.
- Regan L., Caballero D., Hinrichsen M.R., Virrueta A., Williams D.M. and O'Hern C.S. (2015). *Protein design: past, present, and future.* In: «Biopolymers», 104: 334-350. Doi: 10.1002/bip.22639.
- Strandberg B. (2009). *Chapter 1: building the ground for the first two protein structures: myoglobin and haemoglobin.* In: «J Mol Biol» 392: 2-10. Doi: 10.1016/j.jmb.2009.05.087.
- Thompson B. and Petric Howe N. (2024). *Alphafold 3.0: the AI protein predictor gets an upgrade.* In: «Nature». Doi: 10.1038/d41586-024-01385-x.
- Thorn A. (2022). *Artificial intelligence in the experimental determination and prediction of macromolecular structures.* In: «Curr Opin Struct Biol», 74: 102368. Doi: 10.1016/j.sbi.2022.102368.
- Tunyasuvunakool K., Adler J., Wu Z., Green T., Zielinski M., Zidek A., Bridgland A., Cowie A., Meyer C., Laydon A., Velankar S., Kleywegt G.J., Bateman A., Evans R., Pritzel A., Figurnov M., Ronneberger O., Bates R., Kohl S.A.A., Potapenko A., Ballard A.J., Romera-Paredes B., Nikolov S., Jain R., Clancy E., Reiman D., Petersen S., Senior A.W.,

- Kavukcuoglu K., Birney E., Kohli P., Jumper J. and Hassabis D. (2021). *Highly accurate protein structure prediction for the human proteome*. In: «Nature», 596: 590-596. Doi: 10.1038/s41586-021-03828-1.
- van den Hoek H., Klena N., Jordan M.A., Alvarez Viar G., Righetto R.D., Schaffer M., Erdmann P.S., Wan W., Geimer S., Plitzko J.M., Baumeister W., Pigino G., Hamel V., Guichard P. and Engel B.D. (2022). *In situ architecture of the ciliary base reveals the stepwise assembly of intraflagellar transport trains*. In: «Science», 377: 543-548. Doi: 10.1126/science.abm6704.
- Varadi M., Anyango S., Deshpande M., Nair S., Natassia C., Yordanova G., Yuan D., Stroe O., Wood G., Laydon A., Zidek A., Green T., Tunyasuvunakool K., Petersen S., Jumper J., Clancy E., Green R., Vora A., Lutfi M., Figurnov M., Cowie A., Hobbs N., Kohli P., Kleywegt G., Birney E., Hassabis D and Velankar S. (2022). *AlphaFold protein structure database: massively expanding the structural coverage of protein-sequence space with high-accuracy models*. In: «Nucleic Acids Res», 50: D439-D444. Doi: 10.1093/nar/gkab1061.
- Wohlwend J., Corso G., Passaro S., Reveiz M., Leidal K., Swiderski W., Portnoi T., Chinn I., Silterra J., Jaakkola T. and Barzilay R. (2024). *Boltz-1 democratizing biomolecular interaction modeling*. In: *bioRxiv*. Doi: 10.1101/2024.11.19.624167.
- Wu M. and Lander G.C. (2020). *How low can we go? Structure determination of small biological complexes using single-particle cryo-EM*. In: «Curr Opin Struct Biol», 64: 9-16. Doi: 10.1016/j.sbi.2020.05.007.
- Yan X. and Maier C.S. (2009). *Hydrogen/deuterium exchange mass spectrometry*. In: «Methods Mol Biol», 492: 255-271. Doi: 10.1007/978-1-59745-493-3_15.
- Yang Y., Arseni D., Zhang W., Huang M., Lövestam S., Schweighauser M., Kotecha A., Murzin A.G., Peak-Chew S.Y., Macdonald J., Lavenir I., Garringer H.J., Gelpi E., Newell K.L., Kovacs G.G., Vidal R., Ghetti B., Ryskeldi-Falcon B., Scheres S.H.W. and Goedert M. (2022). *Cryo-EM structures of amyloid- β 42 filaments from human brains*. In: «Science», 375: 167-172. Doi: doi:10.1126/science.abm7285.

Cibi, bevande, profumi e molto altro. Le sostanze organiche nei reperti archeologici

Silvia Bruni*

SUNTO – Tra i molteplici materiali che possono essere rinvenuti in uno scavo archeologico, i cosiddetti residui organici, ovverosia resti di materiali costituiti in prevalenza da composti del carbonio, rappresentano una classe di grande interesse per la ricostruzione delle conoscenze e delle usanze di una data popolazione, ma al tempo stesso una sfida per coloro che si occupano di analisi chimiche. Infatti, se grande è la varietà degli usi dei materiali in oggetto, potendo trattarsi di alimenti, balsami, adesivi e molto altro ancora, i residui stessi sono talora massivi, ma sovente presenti in tracce invisibili a occhio nudo, ad esempio assorbite nelle pareti di recipienti ceramici. Questo testo vuole offrire una rassegna delle principali classi di residui organici archeologici, mettendo in luce come le moderne tecniche di analisi chimica strumentale ne consentano l'identificazione con elevata sensibilità e specificità.

PAROLE CHIAVE – Residui organici archeologici; Analisi chimiche.

ABSTRACT – Among the numerous materials that can be found in an archaeological site, the so-called organic residues, i.e. remains of materials mainly made up of carbon compounds, represent a very interesting class for the reconstruction of the knowledge and uses of a given population. At the same time, nevertheless, they represent a challenge for those involved in chemical analysis. Indeed, if a large variety of materials are encountered, ranging from food to ointments or adhesives and more, the residues themselves can be massive, but more often present only as traces not visible to the naked eye, for example absorbed into the walls of ceramic vessels. The present text intends to offer a survey of the main classes of archaeological organic residues, highlighting how modern instrumental chemical analysis techniques allow their identification with notable sensitivity and specificity.

KEYWORDS – Archaeological organic residues; Chemical analysis.

* Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Chimica. E-mail: silvia.bruni@unimi.it. Relazione tenuta il 7 marzo 2024.

1. L'ANALISI CHIMICA DEI RESIDUI ORGANICI ARCHEOLOGICI

Lo studio dei cosiddetti “residui organici” in ambito archeologico sta assumendo importanza sempre crescente, tanto da aver portato gli specialisti del settore a coniare un apposito acronimo derivato dall'espressione anglo-sassone, ossia ORA (da *Organic Residue Analysis*), per indicare lo studio della composizione di questa particolare classe di materiali. Si tratta tuttavia di una classe estremamente ampia e i materiali che ne fanno parte sono sostanzialmente accomunati dall'essere costituiti da composti del carbonio, composti organici appunto, e dall'essere di origine naturale, sebbene in più casi derivanti dalla manipolazione di una materia prima per renderli più adeguati al loro utilizzo. Quest'ultimo risultava essere a propria volta il più variò, potendo trattarsi di cibi, bevande, unguenti, balsami, adesivi, e così via.

Una prima distinzione utile a orientarsi in questa molteplicità di materiali e delle sostanze che li costituiscono è rappresentata dalla loro origine, vegetale oppure animale e, a seguire, dal fatto che venissero impiegati come tali oppure fossero sottoposti a lavorazione. Nel primo gruppo troviamo bitumi, ambre, gomme e resine, che venivano utilizzati nella loro forma grezza, mentre peci, coloranti, oli e bevande fermentate richiedevano l'intervento umano per essere ricavati dalla fonte originale. Tra i materiali di origine animale, potevano essere usati direttamente grassi, cere (soprattutto cera d'api) e miele, mentre prodotti caseari e colle proteiche erano frutto di lavorazioni dedicate (Regert *et al.*, 2003).

Un quesito fondamentale per coloro che si occupano dell'analisi dei residui di questi materiali riguarda la maggiore o minore probabilità che le componenti che li costituiscono si siano conservate intatte sino ai nostri giorni, fornendo dei cosiddetti *biomarker* che ne rendono possibile l'identificazione. Tale probabilità è determinata innanzitutto dalla struttura molecolare delle diverse sostanze, per cui si osserva che in generale i materiali lipidici sono più facilmente conservati rispetto ai carboidrati e alle proteine, soprattutto grazie alla minore solubilità in acqua. D'altro canto, una matrice minerale o organica, quale ad esempio una ceramica, un residuo carbonizzato ma anche un pigmento, può concorrere alla stabilizzazione di sostanze altrimenti deteriorabili. Infine, ovviamente, le condizioni di seppellimento dei reperti, soprattutto in termini di umidità e di temperatura, possono a propria volta condizionare la conservazione dei residui organici archeologici (Evershed, 2008).

Occorre ricordare poi che anche le sostanze meglio preservate, quali quelle di natura lipidica, possono in realtà subire trasformazioni, in particolare proprio in ambienti di seppellimento umidi, a formare prodotti tuttavia

riconducibili ai composti originari: è il caso dell'idrolisi dei triacilgliceroli (i cosiddetti trigliceridi), ossia i costituenti dei grassi animali e degli oli vegetali, da cui derivano glicerolo e acidi grassi liberi.

La crescente importanza conosciuta dall'analisi dei residui organici in ambito archeologico negli ultimi decenni è stata determinata soprattutto dalla disponibilità delle tecniche tipiche dell'analisi chimica strumentale. In passato, infatti, l'identificazione di tali residui era affidata soprattutto a saggi di solubilità o di combustione e a test di tipo organolettico (per cui ad esempio una sostanza resinosa era riconoscibile in quanto brucia producendo un profumo caratteristico), che di rado risultavano sufficientemente specifici ai fini del riconoscimento. Oggi le tecniche più utilizzate sono senza dubbio la spettroscopia di assorbimento nell'infrarosso, applicabile però ai soli residui massivi e in grado di dare per lo più un'indicazione della classe di appartenenza del materiale, e le tecniche di analisi basate su separazioni cromatografiche che, consentendo appunto la separazione dei diversi composti costituenti un dato materiale e la loro successiva identificazione, permettono nella maggior parte dei casi di determinare in modo specifico la natura del materiale stesso. Tra queste ultime, la più utilizzata, e quella alla quale si farà ampio riferimento nei casi di studio menzionati nel seguito, è sicuramente la gaschromatografia accoppiata alla spettrometria di massa (GC-MS), adatta in special modo all'analisi di composti organici relativamente volatili o che possano essere resi tali mediante trattamento con opportuni reattivi. Questa tecnica, a differenza della spettroscopia infrarossa, permette di analizzare anche sostanze presenti solamente in tracce all'interno di matrici di altra natura, come accade frequentemente nello studio di recipienti ceramici, così da poter ad esempio formulare ipotesi sul contenuto originario di tali recipienti e sulla loro destinazione d'uso.

2. LE SOSTANZE LIPIDICHE DI ORIGINE ANIMALE E VEGETALE: DAI CIBI AI COMBUSTIBILI

Come detto sopra, sono innanzitutto le sostanze di natura lipidica quelle meglio conservate in ambito archeologico, di cui ritroviamo come *biomarker* soprattutto gli acidi grassi liberi, ossia acidi organici caratterizzati da lunghe catene di atomi di carbonio, totalmente sature oppure con uno o più doppi legami tra gli atomi di carbonio stessi. La distribuzione di tali acidi può fornire indicazioni sul materiale di partenza. Così, ad esempio, percentuali elevate degli acidi a 16 e 18 atomi di carbonio, rispettivamente acido palmitico e acido

stearico, sono associate a un grasso animale degradato, mentre la presenza di quantità minori di acido stearico e, possibilmente, l'osservazione di altri acidi a catena più corta, in particolare a 12 o 14 atomi di carbonio, sono considerate possibilmente indicative di oli vegetali (Dunne *et al.*, 2008). In uno studio su ottanta frammenti di recipienti ceramici risalenti al quinto millennio a.C. e provenienti dal riparo rupestre di Takarkori situato nel Fezzan sudoccidentale (Sahara libico), si sono rilevate quantità considerevoli di estratto lipidico (ottenute trattando una porzione del materiale ceramico ridotta in polvere con opportuni solventi organici quali cloroformio e metanolo), addirittura dell'ordine dei milligrammi per grammo di ceramica. Quantità così elevate si devono alle caratteristiche estremamente aride del sito archeologico, poiché in ambito europeo usualmente solo una ridotta percentuale di frammenti presenta un contenuto lipidico di entità significativa, peraltro generalmente inferiore di un ordine di grandezza rispetto a quello sopra citato. Degli ottanta campioni sahariani, circa un terzo presentava una distribuzione di acidi grassi riconducibile appunto a un grasso animale e l'analisi dei rapporti isotopici del carbonio, in particolare del valore $d^{13}\text{C}$ (ricavato dal rapporto tra gli isotopi di massa 13 e di massa 12 del carbonio) per gli acidi palmitico e stearico ha permesso di stabilire che si trattava di residui associati al latte (*ibidem*). Questo risultato è di grande interesse, poiché, sebbene l'arte rupestre sahariana mostri scene di allevamento del bestiame e in rari casi anche di mungitura, tuttavia mancava una precisa datazione di queste attività, che lo studio citato ha permesso di ottenere.

Altri due siti della medesima area geografica, quello di Fewet e quello di Aghram Nadharif, hanno restituito reperti particolari, sorta di ciotole in pietra vulcanica, all'interno delle cui porosità erano presenti residui che di nuovo è stato possibile analizzare dal punto di vista del contenuto lipidico, con l'intento di comprendere se quegli oggetti svolgessero la funzione di lucherne o magari di incensieri. Per i reperti di entrambi i siti l'analisi ha di nuovo condotto al riconoscimento di quantità apprezzabili di acidi grassi, suggerendo dunque che grassi o oli fossero usati come combustibili per l'iluminazione. Se però per il sito di Aghram Nadharif essi avevano la distribuzione caratteristica di un grasso animale (Bruni *et al.*, 2005a), per i reperti da Fewet la minor quantità relativa di acido stearico portava a propendere per un materiale di origine vegetale e l'abbondanza dell'acido a 12 atomi di carbonio indicava addirittura una possibile associazione con un olio da semi di dattero (Mori *et al.*, 2013). Questa correlazione, già dimostrata in letteratura per ceramiche nubiane (Copley *et al.*, 2001), è rafforzata nello studio sulle lampade di Fewet dal ritrovamento nel medesimo sito di resti di datteri carbonizzati (Mori *et al.*, 2013).

È poi di interesse ricordare che la cottura dei cibi può provocare trasformazioni degli acidi grassi e che i prodotti di tali trasformazioni possono a propria volta costituire dei preziosi *marker* di determinate attività associate all’alimentazione. È stato ad esempio evidenziato che dal riscaldamento a temperature superiori a 350 °C di un materiale lipidico in presenza di una matrice ceramica o argillosa si possono ottenere, per effetto di una condensazione tra molecole dei più abbondanti acidi palmitico e stearico, chetoni (ossia composti organici contenenti come gruppo funzionale un doppio legame carbonio-ossigeno) a 31, 33 e 35 atomi di carbonio (Evershed *et al.*, 1995). Il riconoscimento di questi composti nell’estratto lipidico di un recipiente ceramico è dunque considerato un indizio dell’uso di quel recipiente ai fini della cottura. È quindi di interesse il fatto di averli rilevati in un sedimento di colore scuro presente nel resto di un *tannur* ritrovato nel sito archeologico di Nora in Sardegna e risalente al II-I secolo a.C. (Bruni *et al.*, 2021a, pp. 619-622). Si tratta infatti di un forno di terracotta, la cui tipologia è documentata nei centri fenici e punici sardi e del bacino del Mediterraneo e che era tipicamente utilizzato per la cottura del pane mediante irraggiamento dell’energia termica (ivi, pp. 623-625). Nel caso in esame, si deve dunque ipotizzare che la superficie interna del forno fosse stata unta per la cottura, probabilmente anche di alimenti diversi dal pane (di cui non si sono ritrovati residui), e al contempo si possono però escludere altri utilizzi della struttura, quale ad esempio la lavorazione dei metalli, che non sarebbe stato possibile scartare sulla base delle sole evidenze archeologiche.

Prodotti particolari della trasformazione termica degli acidi grassi sono poi quelli che derivano dagli acidi polinsaturi (ossia con più doppi legami) presenti, tra l’altro, negli alimenti derivati dal pesce (ai quali si fa spesso riferimento proprio per il loro contenuto di questi composti, convenzionalmente detti “omega 3”). Dobbiamo a Richard Evershed della University of Bristol (Regno Unito), forse lo studioso che ha portato il maggiore contributo all’analisi chimica dei residui organici archeologici, l’identificazione di tali composti, detti acidi ω -(o-alchilfenil)alcanoici, negli estratti lipidici di recipienti ceramici archeologici dal Brasile e dal Sudafrica, utilizzati per la manipolazione di prodotti animali di origine marina. Venendo a un’area geografica più prossima, i medesimi composti sono stati identificati nel residuo carbonizzato presente in un recipiente in pietra ollare dalla necropoli di Arcegno nel Canton Ticino. La compresenza di carboni ha portato gli archeologi a ipotizzare che il pesce, in questo caso di acqua dolce, non fosse stato cotto nel recipiente, bensì ivi deposto come offerta dopo essere stato grigliato (Butti Ronchetti, 2012).

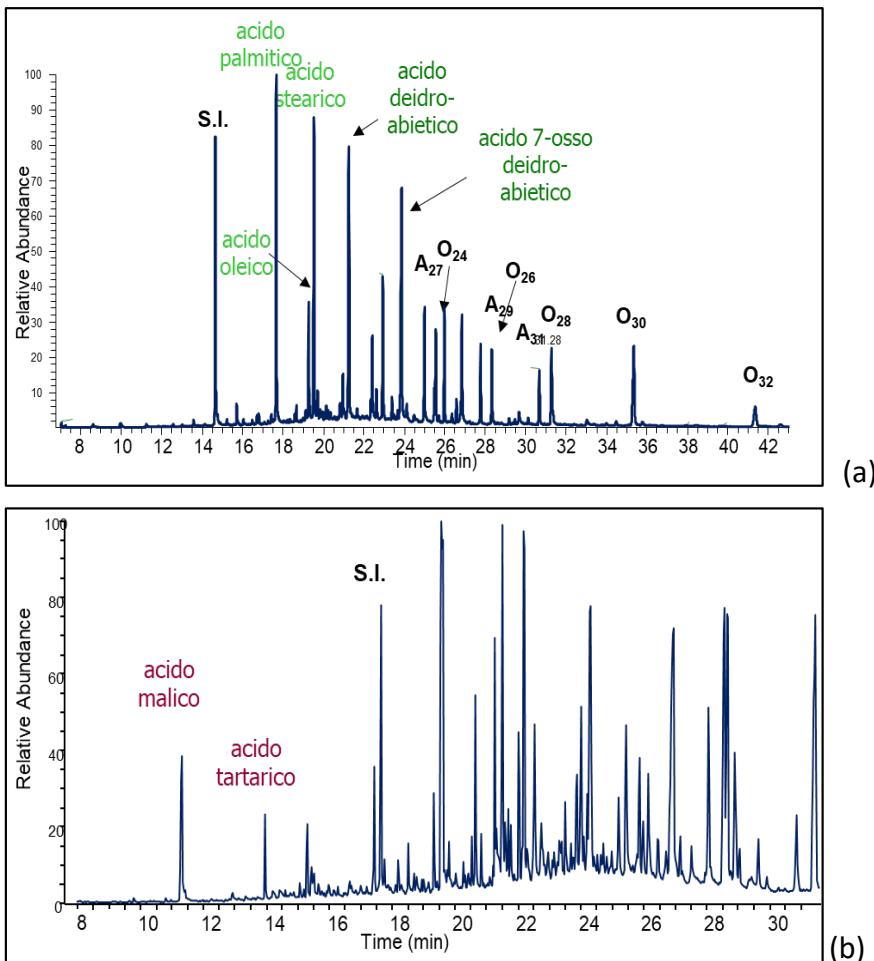


Fig. 1 – Esempi di cromatogrammi ottenuti dall'analisi mediante gascromatografia – spettrometria di massa degli estratti da recipienti ceramici archeologici: (a) estratto lipidico e (b) estratto dei marker di derivati della frutta dal fondo di un'anfora da trasporto fenicio-punica. Legenda: A_n = idrocarburi lineari saturi con n atomi di carbonio; O_n = alcoli a catena lineare con n atomi di carbonio.

3. I MARKER DELLE BEVANDE DERIVATE DALL'UVA

Sebbene la definizione del titolo alluda certamente alla ricerca di composti organici in tracce che permettano di ipotizzare che un recipiente sia stato destinato a contenere o trasportare vino, è importante sottolineare che tali *biomarker* consentono di risalire più correttamente appunto a derivati dell'uva, indipendentemente dal fatto che essi abbiano subito un processo di fermentazione. I composti in oggetto sono ancora acidi organici, in particolare acido tartarico, ma con molecole assai più piccole di quelle dei già citati acidi grassi, e soprattutto rese più polari dalla presenza di gruppi ossidrilici (ossia gruppi costituiti da un atomo di ossigeno e uno di idrogeno).

Queste caratteristiche rendono da un lato il composto in oggetto assai più solubile in acqua, e quindi più soggetto a dilavamento, soprattutto in ambienti di seppellimento umidi, ma d'altro canto favoriscono la sua interazione con il materiale silicatico che costituisce la ceramica, e dunque la possibilità di rinvenirlo nelle pareti dei recipienti di tale natura. L'acido tartarico, nell'uva come in altri frutti, è sovente accompagnato dall'acido malico (e anche citrico), ma in letteratura è stato evidenziato che è proprio nell'uva, e in pochissimi altri casi, che esso prevale, superando una percentuale della somma dei due acidi pari ad almeno il 35% (Drieu *et al.*, 2021). Tale percentuale può tuttavia risultare minore quando al vino siano state aggiunte altre sostanze, quali ad esempio miele (usanza non infrequente in ambito romano e non solo), che apportano appunto acido malico.

Un esempio interessante è offerto dagli estratti ottenuti con metanolo acidiificato (proprio al fine di liberare l'acido tartarico dai legami con la matrice silicatica della ceramica) rispettivamente dalla parete di un'anfora etrusca risalente ai primi decenni del VII secolo a.C. e dal fondo di un'anfora da trasporto fenicio-punica datata tra la fine del III e la metà del II secolo a.C., entrambe rinvenute nel sito archeologico della Civita di Tarquinia.¹ L'analisi gascromatografica dei due estratti ha permesso di riconoscere appunto acido tartarico e acido malico, nel primo caso in rapporto ampiamente superiore alla soglia indicata sopra e nel secondo (corrispondente, tra l'altro, a una datazione assai più recente) in rapporto leggermente inferiore, ma giustificabile, come detto, con la possibile aggiunta di miele (Fig. 1).

¹ Lo scavo è diretto dalla Professoressa Giovanna Bagnasco Gianni dell'Università degli Studi di Milano e le analisi chimiche sono state condotte da chi scrive nell'ambito del Centro di Ricerca Coordinata "Progetto Tarquinia" della stessa Università.

L'estratto lipidico di questo secondo campione ceramico ha a propria volta restituito all'analisi cromatografica (Fig. 1) segnali corrispondenti a composti di particolare interesse, caratteristici rispettivamente di una resina di Pinaceae o pece derivata dal legno di una pianta della medesima famiglia (gli acidi abietico e 7-ossodeidroabietico) e della cera d'api (gli idrocarburi saturi a numero dispari di atomi di carbonio e gli alcoli a catena lunga con numero pari di atomi di carbonio). Di entrambe queste classi di materiali organici di origine naturale si dirà più estesamente nei paragrafi che seguono.

4. IMPERMEABILIZZANTI E ADESIVI: LE PECI DA LEGNI O CORTECCE

Il materiale rinvenuto nel fondo dell'anfora sopra menzionata, destinata presumibilmente al trasporto di vino, era utilizzato comunemente come impermeabilizzante di questa tipologia di recipienti ed era ottenuto dalla pirolisi, ossia dal riscaldamento in assenza (o in presenza di una quantità limitata) di ossigeno, di legni resinosi quale appunto quello delle Pinaceae, presentando quindi analogie composizionali con le resine fresche. Anche la corteccia di betulla, trattata nel medesimo modo, è stata ampiamente utilizzata in ambito preistorico alle nostre latitudini come fonte di un materiale impiegato come adesivo. Si veda come esempio un consistente strato di questo materiale ritrovato su di un frammento ceramico dal sito terramaricolo di Castellaro del Vhò (Cremona), risalente all'Età del Bronzo (Bruni *et al.*, 2001). I composti chimici presenti nella pece dalla corteccia di betulla, benché differenti, sono anch'essi terpenoidi, appartenenti cioè alla medesima classe di quelli che caratterizzano la pece dal legno di Pinaceae. Di grande interesse è anche la documentazione archeologica delle strutture che venivano utilizzate per la produzione delle peci. Ad esempio, nel sito archeologico di Spineda,² frazione del comune di Riese Pio X (TV), nello strato corrispondente alla fase tardo-antica della frequentazione romana è stata ritrovata una buca il cui riempimento era costituito da residui massivi, misti in maggiore o minor misura a sedimento e che, se bruciati, risultavano emettere un gradevole profumo. Questa caratteristica organolettica, unitamente alla presenza di scorie, aveva portato a ipotizzare che si potesse essere in presenza di residui di resina o pece. Per la produzione di quest'ultima, il legno in pezzi veniva messo in

² Il sito è venuto alla luce durante i lavori della Superstrada Pedemontana Veneta ed è stato studiato dalla Soprintendenza Archeologia, Belle Arti e Paesaggio per l'area metropolitana di Venezia e le province di Belluno, Padova e Treviso, con il coordinamento del Dottor Matteo Frassine.

fornaci all'interno di buche, con il combustibile all'esterno, per permettere alla pece di fuoriuscire verso il fondo, dove poteva essere raccolta in un recipiente (Zakoscielna *et al.*, 1997). Le analisi chimiche hanno in effetti dimostrato che i residui contenevano i già citati diterpenoidi caratteristici della resina delle Pinaceae e i prodotti di alterazione termica di tali composti risultanti appunto dalla pirolisi di un legno resinoso (Bruni *et al.*, 2021b), andando a dimostrare che la buca, di per sé priva di altri reperti, costituiva in realtà una struttura destinata alla produzione della pece.

5. LE RESINE E I PROFUMI

Si è già detto nel precedente paragrafo dei composti chimici che caratterizzano i materiali resinosi di origine naturale, i cosiddetti terpenoidi, ma occorre precisare che spesso tali materiali erano ricercati e utilizzati per il loro profumo e che le componenti che impartivano a essi tale proprietà, essendo le più volatili, difficilmente possono essere rintracciate in ambito archeologico. Fortunatamente, però, sopravvivono come *biomarker* le molecole più grandi e che, per le loro caratteristiche strutturali, risultano anche meno volatili e meno solubili in acqua. Esse sono presenti tanto nelle resine fresche quanto nei resti archeologici degli stessi materiali, accompagnate al più da prodotti di ossidazione, e ciò ci consente di riconoscerli anche a secoli di distanza. È stato questo il caso, ad esempio, del materiale presente, insieme a un ricco corredo di sepoltura, attorno al capo e al bacino di uno scheletro femminile rinvenuto nella necropoli dell'Università Cattolica di Milano. Questa sepoltura, risalente al II-III secolo d.C., è stata definita il “Sarcofago della Signora”, proprio a indicare l'alto rango della defunta. Dopo il ritrovamento, si ipotizzò che il materiale potesse essere una resina dato, di nuovo, il profumo che emanava se bruciato. Sorprendentemente, però, lo studio della composizione chimica (Bruni *et al.*, 2005b) ha dimostrato che non si trattava di incenso, come inizialmente supposto, bensì di un'altra resina vegetale (occorre precisare che l'incenso è più esattamente una gommoresina) allora altrettanto pregiata, il cosiddetto mastice, essudata dalla *Pistacia lentiscus* e raccolta e commercializzata sin dall'antichità esclusivamente sull'isola greca di Chios. Scrive Plinio il Vecchio nel capitolo 36 del libro XII della sua *Naturalis Historia*: «Ci sono due tipi diversi di mastice... Comunque, il più apprezzato è il mastice bianco di Chios, che si vende a venti denari la libbra. Si dice che il mastice di Chios sia essudato dal lentisco sotto forma di una specie di gomma: come l'incenso, viene adulterato con resina», intendendo

con quest'ultima l'assai più comune resina di pino e dimostrando che purtroppo l'adulterazione dei prodotti naturali non è uso solo dei nostri giorni.

Come accennato più sopra, è raro invece trovare tracce dei cosiddetti monoterpeni, appunto le sostanze volatili a cui si devono molte profumazioni, sebbene chi scrive abbia avuto in passato l'occasione, nell'ambito di una serie di analisi rigorosamente non invasive, effettuate mediante prelievo con solventi, su unguentari corinzi ed etrusco-corinzi appartenenti al Museo Archeologico di Milano, di osservare ad esempio la presenza di timochinone. Si tratta appunto di un monoterpeno, caratteristico dei semi della *Nigella sativa*, o cumino nero, prodotto vegetale ampiamente usato nell'antichità per le sue proprietà fitoterapiche, oltre che alimentari.

6. LA CERA D'API, UN *MARKER* E UN MATERIALE DAI MOLTI UTILIZZI

Questo materiale ha già ricevuto menzione nel presente testo, poiché la sua impronta compositonale, ben riconoscibile, ha permesso di identificarlo, accanto ai *marker* della pece da legno di Pinaceae e di un derivato dell'uva, tra i residui organici in tracce presenti nel frammento di anfora, presumibilmente adibita al trasporto di vino, rinvenuta nello scavo della Civita di Tarquinia. È curioso come già in questo caso le tracce di cera d'api possano essere ascritte a due diverse origini. Certamente, infatti, essa può essere stata usata come additivo della pece per impermeabilizzare il fondo del recipiente, ma si ricorderà che la quantità di acido malico rilevata nelle analisi faceva supporre un vino addolcito ad esempio con miele.

Questa appunto potrebbe essere l'origine della cera d'api giunta sino a noi, quando altre componenti, quali ad esempio gli zuccheri, presentano, come già discusso, una minore probabilità di conservarsi. La cera d'api come *marker* dei prodotti legati alle api, dunque, e questa potrebbe essere l'interpretazione anche dei residui dello stesso materiale spesso rinvenuti nella ceramica di recipienti forati, aventi con grande probabilità la funzione di colini. L'ipotesi, documentata dalle fonti, è che siffatti recipienti fossero utilizzati per raccogliere il miele colato dai favi posti al loro interno, un procedimento che permetteva di ottenere un miele più fine rispetto a quello ricavato dalla semplice spremitura del favo e che fu descritto già da Columella (Crane, 1999). Recipienti con questa forma e che presentano residui di cera d'api sono documentati in diversi contesti archeologici, tra i quali si possono menzionare ad esempio ritrovamenti preistorici della costa orientale dell'Adriatico e del suo entroterra (Zlatunić, 2019).

La cera d'api, tuttavia, è stata utilizzata intenzionalmente per molti altri scopi. Tra questi ricordiamo ad esempio il suo impiego nelle scatole per sigilli di epoca romana, oggetti in bronzo all'interno dei quali venivano appunto posti i sigilli incapsulati in cera d'api e che presentavano degli occhielli attraverso i quali veniva fatto passare lo spago con cui venivano bloccati sui pacchi che contenevano i documenti. Per potere aprire il pacco, dunque, si doveva rompere il sigillo, e ciò consentiva di salvaguardare l'integrità dei documenti stessi (Clerici, 2018). Ancora, la cera d'api veniva mescolata con altri materiali per fungere da adesivo o legante, come nel caso di una fibbia con decoro *cloisonné* facente parte di una collezione di manufatti ostrogoti rinvenuti a Tortona (AL) per la maggior parte nel XIX secolo. In questo oggetto essa fu impiegata, in miscela con un materiale proteico (probabilmente albume d'uovo) e insieme a un inerte silicatico, per fissare le pietre e le paste vitree, costituendo una tipologia di legante utilizzata per manufatti analoghi tra il 520 e il 580 d.C. (Giostra *et al.*, 2008) (Fig. 2).

7. I LEGANTI NEI DIPINTI PREISTORICI

A chiusura di questa breve rassegna, ricordiamo che una classe speciale di residui organici archeologici è costituita dai leganti utilizzati nei dipinti su pietra, di cui apprezziamo le cromie, in genere ottenute con pochi pigmenti, ocre, nerofumo o, talora, ossidi di manganese, che tuttavia per essere applicati richiedevano appunto di essere miscelati con un legante.

Vale la pena di ricordare che proprio la mescolanza con i pigmenti, come detto all'inizio di questo testo, poteva stabilizzare sostanze organiche altrimenti facilmente deperibili, quali ad esempio quelle proteiche. Ed è in effetti una sostanza proteica, derivata dal latte, che si è potuto riconoscere grazie all'analisi chromatografica degli amminoacidi in un frammento di dipinto rupestre, risalente al periodo detto *Late Acacus*, ossia al 7590-6650 a.C., del già menzionato sito libico di Takarkori (Di Lernia *et al.*, 2016). Si tratta di un esempio assai eloquente delle potenzialità dei moderni metodi dell'analisi chimica strumentale nello studio dei residui organici archeologici, materiali spesso addirittura invisibili a occhio nudo ma non per questo meno importanti nella ricostruzione delle conoscenze e degli usi delle popolazioni antiche.

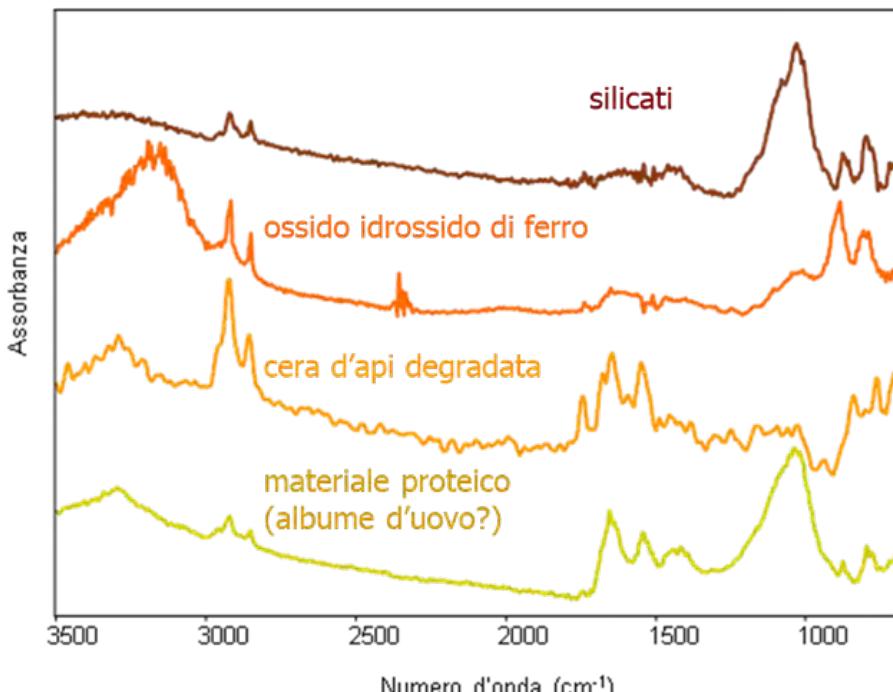


Fig. 2 – Spettri risultanti dall’analisi mediante spettroscopia infrarossa in modalità microscopica su grani diversi dal legante della fibbia ostrogota da Tortona (AL). Il materiale silicatico, la componente proteica e la cera d’api costituiscono il legante utilizzato per fissare le pietre e le paste vitree del decoro, mentre la goethite (ossido idrossido di ferro) è presente come prodotto di corrosione del metallo che costituiva la base della fibbia.

BIBLIOGRAFIA

- Bruni S., Cariati F., Guglielmi V. (2001). *Identificazione del residuo di adesivo presente su un campione ceramico*. In: Frontini P., a cura di, *Castellaro del Vhò Le campagne di scavo 1996-1999*. Milano: Comune, 311-312.
- Bruni S., Castiglioni E., Rottoli M., Sarti B. e Zara A. (2021a). *I resti archeobotanici: analisi botaniche e chimiche*. In: Bonetto J., Mantovani A., Zara A., a cura di, *Nora. Il tempio romano 2008-2014, vol. II.2, I materiali romani e gli altri reperti*. Roma: Edizioni Quasar, 611-625.
- Bruni S. and Guglielmi V. (2005a). *Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) analysis of residues from volcanic stone objects*. In: Liverani M., ed., *Aghram Nadharif. The Barkat oasis (Sha'abiya of Ghat, Libyan Sahara) in Garamantian times. The archaeology of Libyan Sahara*, vol. 2, Firenze: All'Insegna del Giglio, 293-294.
- Bruni S. e Guglielmi V. (2005b). *Le analisi chimiche*. In: Rossignani M.P., Sannazaro M., Legrottaglie G., a cura di, *La Signora del Sarcofago*. Milano: Vita e Pensiero, 131-136.
- Bruni S., Longoni M., Olivadese F. e Passaretti A. (2021b). *Le analisi chimiche dei frammenti scoriaceti*. In: Frassine M., a cura di, *Spineda. Il passato tra i ciottoli*. Padova: SAP Società Archeologica, 135-137.
- Butti Ronchetti F. (2012). *Pietra ollare per l'aldilà*. In: Lhemon M. et Serneels V., dir., *Les récipients en pierre ollaire dans l'antiquité. Actes de la Table Ronde (Bagnes, 19-20 septembre 2008)*. In: «Minaria Helvetica», 30: 94-104.
- Chierici S. (2018). *Scatole per sigilli da Albintimilium*. In: AA.VV., *Archeologia in Liguria*, n.s., vol. 4 (2014-2015). Genova: De Ferrari Editore, 234-236.
- Copley M.S., Rose P.J., Clapham A., Edwards D.N., Horton M.C. and Evershed R.P. (2001). *Detection of palm fruit lipids in archaeological pottery from Qasr Ibrim, Egyptian Nubia*. In: «P Roy Soc B-Biol Sci», 268: 593-597.
- Crane E. (1999). *The world history of beekeeping and honey hunting*. New York: Routledge, 483.
- Di Lernia S., Bruni S., Cislagli I., Cremaschi M., Gallinaro M., Gugliemi V., Mercuri A.M., Poggi G. and Zerboni A. (2016). *Colour in context. Pigments and other coloured residues from the Early-Middle Holocene site of Takarkori (SW Libya)*. In: «Archaeol Anthropol Sci», 8: 381-402.
- Drieu L., Orecchioni P., Capelli C., Meo A., Lundy J., Sacco V., Arcifa L., Molinari A., Carver M. and Craig O.E. (2021). *Chemical evidence for the persistence of wine production and trade in Early Medieval Islamic Sicily*. In: «PNAS», 118: e2017983118.
- Dunne J., Evershed R.P., Salque M., Cramp L., Bruni S., Ryan K., Biagetti S. and di Lernia S. (2012). *First dairying in green Saharan Africa in the fifth millennium BC*. In: «Nature», 486: 390-394.

- Evershed R.P. (2008). *Organic residue analysis in archaeology: the archaeological biomarker revolution*. In: «Archaeometry», 50: 895-924.
- Evershed R.P., Stott A.W., Raven A., Dudd S.N., Charters S. and Leyden A. (1995). *Formation of long-chain ketones in ancient pottery vessels by pyrolysis of acyl lipids*. In: «Tetrahedron Lett», 36: 8875-8878.
- Giostra G., Bruni S., Guglielmi V., Rottoli M. and Rettore E. (2008). *The Ostrogothic buckle with cloisonné decoration from Tortona (Italy)*. In: «Archäologisches Korrespondenzblatt», 38: 577-596.
- Mori L., Bruni S., Zerboni A., Ballerini A., Groppelli G. and Guglielmi V. (2013). *Vesicular basalt artefacts*. In: Mori L., ed., *Life and death of a rural village in Garamantian time*. Firenze: All’Insegna del Giglio, 109-118.
- Regert M., Garnier N., Decavallas O., Cren-Olivé C. and Rolando C. (2003). *Structural characterization of lipid constituents from natural substances preserved in archaeological environments*. In: «Meas Sci Technol», 14: 1620-1630.
- Zakoscielna A. und Gurba J. (1997). *Friih-mittelalterliche Holzteergruben in Lopiennik Dolny in der Woiwodschaft Chelm*. In: Brzeziński W. and Piotrowski W., eds., *Proceedings of the First international symposium on wood tar and pitch*. Warsaw: State Archaeological Museum, 73-80.
- Zlatunić R. (2019). *Prehistoric ceramic colanders and their use in the eastern Adriatic coast and its hinterland*. In: «Histria Archaeologica», 50: 25-85.

Alla ricerca di una bomba

Donato Firrao*

SUNTO – I metalli esposti a un’esplosione possono subire macro deformazioni geometrichi o anche solamente deformazioni della microstruttura cristallina, come bande di slittamento o geminazioni meccaniche, a seconda del metallo, della massa di esplosivo e della distanza da questa a cui si trovano. Il parametro al quale si fa riferimento è la cosiddetta distanza ridotta, r , definita come:

$$r = d m^{-1/3} [\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}]$$

m , massa esplodente [kg]

d , distanza fra centro dell’esplodente e il bersaglio [m]

Lo stesso valore di distanza ridotta e di effetti sul bersaglio metallico si possono avere con grosse masse e grandi distanze o con masse piccole e distanze limitate. La nostra attenzione si appunterà su quest’ultimo caso in cui altre azioni che causano macro-deformazioni geometriche, intervenute dopo lo scoppio, possono nascondere gli effetti della prima esplosione. Tipico è il caso in cui un velivolo che, dopo una piccola esplosione a bordo, precipita a terra o in mare destrutturandosi per l’urto in molti pezzi. La caduta dell’aereo di Enrico Mattei a Bascapè (PV) nel 1962 rientra nello scenario sopra descritto. Essa è stata studiata molti anni dopo l’evento.

PAROLE CHIAVE – Metallo; Distanza ridotta; Esplosione; Enrico Mattei.

ABSTRACT – Metals exposed to an explosion may undergo either geometrical macro-deformations or even only crystal microstructure deformations, as slip bands or mechanical twins, depending on the metal, on the explosive mass and on the mass to target distance. The

* Politecnico di Torino, Dipartimento di Scienza applicata e Tecnologia (www.polito.it/dip/disat). E-mail: donato.firrao@formerfaculty.polito.it. Relazione tenuta il 21 marzo 2024.

parameter used as the one controlling the phenomena is the so-called reduced distance, r , defined as below.

$$r = d \cdot m^{-1/3} [\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}]$$

m , explosive mass [kg]

d , distance from explosive mass center to target [m]

The same value of the reduced distance and the same effects on the metal target can be obtained with large masses and distances as well as small charges and limited distances. Attention will be devoted to the latter case, when actions causing geometric macro deformations may intervene after an explosion, thus hiding its effects. Typical is the case of an aircraft that, after the explosion of a small charge on board, plunges either on the sea or on ground, distributing several wrecks around. The fall of Enrico Mattei airplane at Bascapè (PV) in 1962 is an example of the above-described scenario. It was studied several years after the fall of the aircraft.

KEYWORDS – Metal; Reduced distance; Explosion; Enrico Mattei.

INTRODUZIONE

L'esplosione di una piccola carica vicino a una lamiera di metallo può generare su di essa diversi effetti macroscopici o microscopici a seconda della distanza relativa: possono avversi deformazioni plastiche generalizzate seguite da fratture con bordi allungati e arrotolati per lo scorrimento di gas caldi sulla superficie della lamiera prospiciente la carica (Fig. 1).

Lo stesso scorrimento di gas caldi può provocare la fusione completa della superficie del metallo o, all'aumentare della distanza, una fusione limitata parziale, localizzata prevalentemente ai bordi dei cristalli, dove la presenza di impurità abbassa il punto di fusione (Fig. 2). Inoltre, a distanze ancora maggiori, con l'abbassarsi della temperatura superficiale, lo scorrimento dei gas può portare anche solo alla formazione di ossidi superficiali. Se la temperatura non è sufficiente a portare alla fusione o all'ossidazione si possono ottenere vari gradi di ricristallizzazione del metallo.¹

Infine, se l'esplosione non causa nessuno degli effetti sopra descritti, le deformazioni plastiche possono essere concentrate in zone ristrette del reticolato cristallino, quali bande di slittamento (*slip bands*) o geminati meccanici

¹ Si ricordi che la temperatura di ricristallizzazione varia fra 1/2 e 1/3 della temperatura di fusione espressa in gradi K.

(*mechanical twinning*) (Firrao *et al.*, 2006). Esplicitando, si sta parlando di un'esplosione che non ha causato frattura o estese deformazioni generalizzate e neanche fusioni o ossidazioni superficiali, ma solo effetti microscopici a livello di deformazioni di alcune zone dei cristalli.

In questo caso, l'effetto dell'esplosione di una bomba con una carica limitata a bordo di un velivolo può essere celato da un altro evento che intervenga dopo l'esplosione come la caduta del velivolo stesso a terra o in mare e la sua conseguente destrutturazione in svariati pezzi.

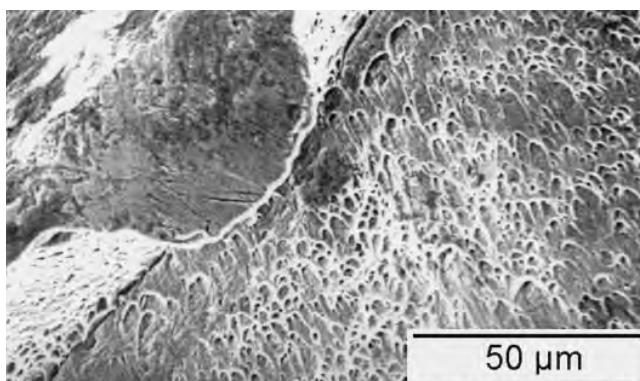


Fig. 1 – Bordo allungato e arrotolato in una frattura di lamiera di acciaio inox conseguente a un'esplosione. Foto dell'autore.

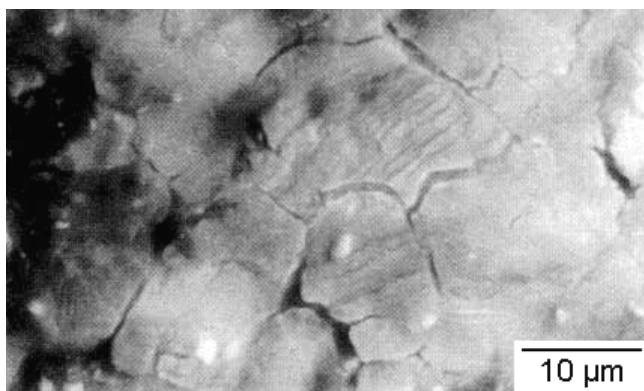


Fig. 2 – Fusione parziale della superficie di una lamiera di acciaio inox esposta a esplosione. Foto dell'autore.

1. PARAMETRI CHE CONTROLLANO GLI EFFETTI DI UN'ESPLOSIONE

Abbiamo visto nel capitolo precedente che l'aumento della distanza fra un *target* di metallo e una carica esplodente porta a effetti progressivamente meno accentuati in termini di deformazione. Ovviamente lo stesso avviene quando si riduce la massa della carica che esplode. Variando la distanza carica-bersaglio e la massa della carica si ottengono pressioni differenti al variare della distanza ridotta, r , così definita: $r = d \cdot m^{-1/3}$ [$\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$], dove m [kg] è la massa esplodente e d [m] è la distanza fra centro dell'esplodente e il bersaglio. Lo stesso valore di distanza ridotta e di effetti sul bersaglio metallico si può avere con grosse masse e grandi distanze o con masse piccole e distanze limitate. La nostra attenzione si appunterà su quest'ultimo caso in cui altre azioni che causano macro deformazioni geometriche, intervenute dopo lo scoppio, possono facilmente nascondere gli effetti della prima esplosione. Per il caso considerato, con valori bassi di r si ottengono situazioni in cui non si hanno deformazioni plastiche generalizzate, né fratture, né ossidazioni, ma solo deformazioni a livello di reticolo cristallino, come lo slittamento locale dei piani a massimo impaccamento nelle direzioni con la massima densità degli atomi. Altro fenomeno di deformazione plastica localizzata in zone limitate del reticolo è la geminazione meccanica, che corrisponde a un'inversione della sequenza di impaccamento dei piani cristallini e creazione di sequenze del tipo ABCABACBACBABC, dove il geminato è proprio la zona con sequenza di impilamento differente rispetto alla matrice. I metalli che presentano bassi valori dell'energia connessa con i difetti di impilamento sono quelli nei quali si ha più facilmente la formazione di geminati. Slittamento e geminazione sono meccanismi in concorrenza l'uno con l'altro. Senza entrare in considerazioni raffinate sulle tensioni critiche dei due tipi di difetti reticolari, deformazioni a bassa temperatura o con elevata velocità ($\text{d}\epsilon/\text{dt}$) portano a un movimento delle dislocazioni impedito e quindi a una maggiore possibilità di geminazione meccanica. Anche le dimensioni dei cristalli hanno un ruolo. Cristalli grandi portano anch'essi a un movimento delle dislocazioni meno facile e quindi a geminazioni piuttosto che slittamenti. Quindi, lo stesso materiale può portare a geminati con grani grossi e invece slittamenti con grani piccoli. In Fig. 3, si veda la situazione illustrata per il rame puro da Kestenbach e Meyers (1976), in cui, nel rame puro, all'aumentare della velocità di deformazione, la retta della variazione con le dimensioni dei cristalli della tensione necessaria per lo slittamento si innalza e sorpassa quella per la geminazione nel campo delle microstrutture grossolane.

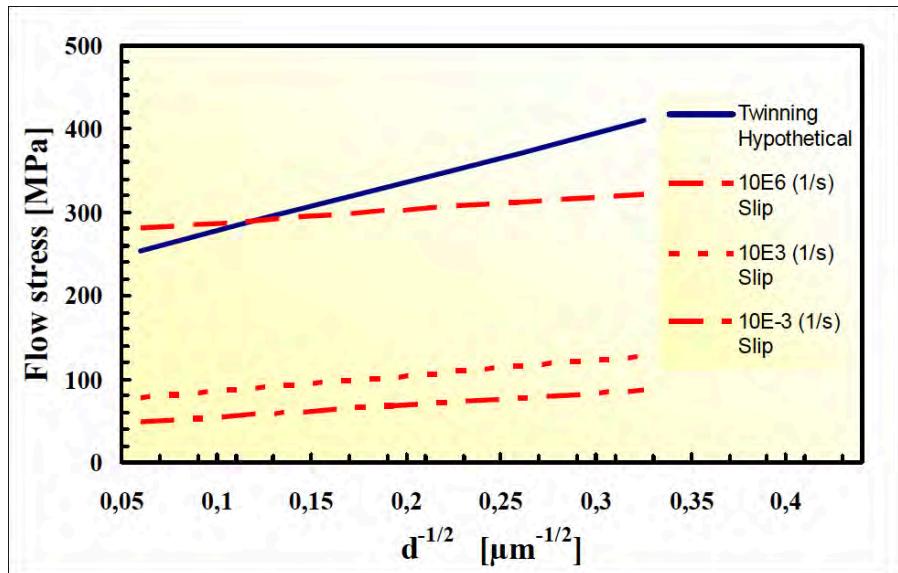


Fig. 3 – Variazione della tensione necessaria per lo slittamento con le dimensioni dei cristalli a velocità di deformazione crescenti, confrontata con quella necessaria per la geminazione. Immagine modificata dall'autore.

2. CASI REALI DI INCIDENTI AEREI

2.1. Il caso Mattei

Il 27 ottobre 1962 l'aereo che trasportava l'allora Presidente dell'ENI, Enrico Mattei, cadde in prossimità di Bascapè, in provincia di Pavia, verso le ore 19, causando la sua morte, oltre a quella del pilota Irnerio Bertuzzi e del giornalista americano, William McHale, che negli ultimi giorni si era accompagnato a Mattei per un'intervista e ritornava con lui a Milano a bordo del suo aereo, un Morane Saulnier 760 B, consegnato nuovo all'ENI nel novembre 1961 insieme a un altro esemplare (ISNAP e ISNAI). L'aereo era in prossimità dell'atterraggio, a 15 km dall'aeroporto di Milano-Linate. Alle 18.57.10 si ebbe l'ultimo contatto con il centro di controllo di Linate; dopo, nessuna comunicazione, solo la notizia che l'aereo era caduto e tutti i passeggeri erano morti.

Ipotizzando che la tragedia sia intervenuta dopo l'ultimo contatto con il controllo con l'aereo che arrivava da Catania e aveva appena completato una

manovra di correzione della rotta (*biscotto*) per abbassarsi di quota e allinearsi sul sentiero di discesa verso la pista, la caduta era avvenuta con una virata stretta, accompagnata da perdita veloce di altitudine, dapprima verso Est e continuando con una completa inversione di direzione fino a impattare il suolo con rotta Nord-Sud. Quali le cause? Due ipotesi si erano divise le spiegazioni per una tale traiettoria mortale: a) un errore del pilota; b) lo scoppio di una carica esplosiva a bordo.

Il Sostituto Procuratore di Pavia, Dottor Vincenzo Calia, aveva riaperto le indagini il 20 settembre 1994, dopo che nel giugno era arrivato alla Procura un breve verbale da Caltanissetta nel quale un “pentito” di mafia raccontava di aver saputo che nel 1962 Enrico Mattei era stato ucciso con una bomba piazzata sul suo aereo per un accordo fra Cosa Nostra e gli americani.

Egli, dopo aver svolto varie indagini e aver raccolto alcuni pezzi derivanti dall’incidente, affidò all’allora Capitano dei Carabinieri Giovanni Delogu e allo scrivente, Professor Donato Firrao, il quesito: «Esaminati i reperti D ed E C.R. 3150, dica il consulente se sugli stessi siano rilevabili tracce riconducibili a esplosione».

Il reperto C.R. 3150 era uno strumento (indicatore triplo), originariamente posizionato all’estremità sinistra del cruscotto dell’aereo sul quale viaggiava Mattei, con il suo contenitore e le viti in acciaio inossidabile austenitico che lo fissavano alla plancia (Fig. 4).



Fig. 4 – Indicatore triplo con il suo contenitore e le viti in acciaio inox e la sua posizione sul cruscotto. Foto dell’autore.

Sulle viti è stato condotto un accertamento sperimentale con l’aiuto del Professor Graziano Ubertalli del Politecnico di Torino, per verificare l’eventuale presenza di segni di esplosione, quali microgeminati meccanici. Questi sono stati individuati sulla superficie della testa di una vite (Fig. 5), meno fitti mentre si va verso l’estremità, e assenti sotto la superficie.

Inoltre un piccolo geminato meccanico è stato evidenziato sull'anello di Mattei, in oro a 18 carati, trovato ancora infilato in un dito della mano sinistra (Fig. 6).

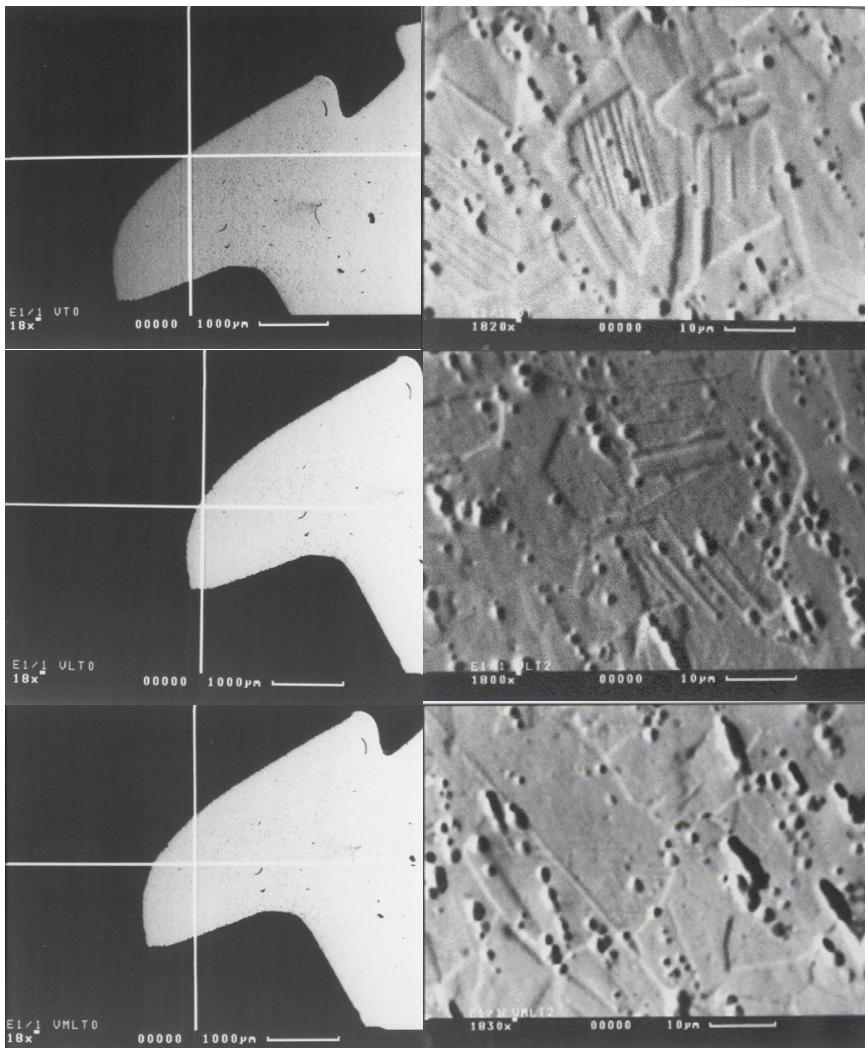


Fig. 5 – Microgeminati meccanici sulla superficie della testa di una vite dell'indicatore triplo. Nessun segno all'interno. Foto dell'autore.

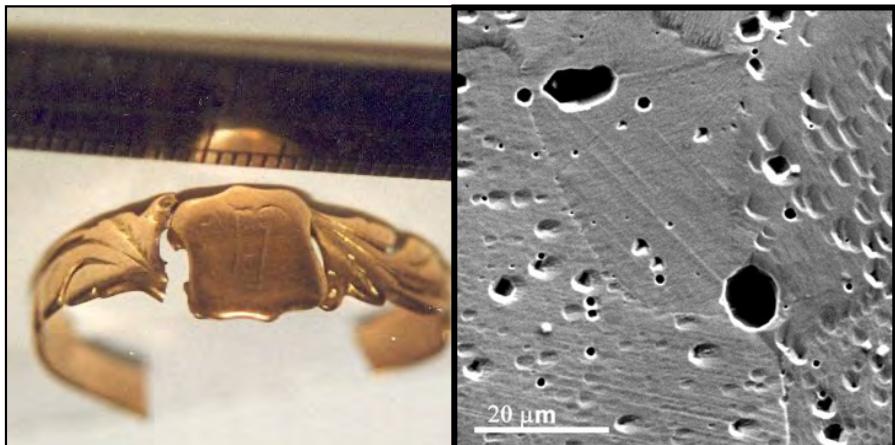


Fig. 6 – Microgeminato evidenziato su una sezione dell’anello di Mattei. Foto dell’autore.

Nessun geminato meccanico o altro segno di esplosione è stato rilevato su una vite prelevata dall’indicatore triplo dell’aereo gemello di quello di Mattei (ISNAI) e neanche su un anello con la stessa composizione di quello di Mattei, fabbricato appositamente da un esperto gioielliere.

Dal fatto che non tutti i cristalli della testa della vite sono occupati da microgeminati e che sono rari i microgeminati evidenziati sull’anello si evince da una parte che c’è stata un’esplosione e dall’altra che vite e anello si trovavano sul margine di sfere all’interno delle quali sono evidenti le conseguenze microstrutturali dell’esplosione di una carica posizionata al centro delle stesse. Inversamente, vite e anello, individuati dalla punta delle frecce rosse riportate in Fig. 7, sono il centro di sfere sulla cui periferia si trova la carica esplosiva. Tali sfere si intersecano lungo una circonferenza su cui si deve trovare la carica. La circonferenza passerà nella cabina di pilotaggio e dietro il cruscotto. Non potendosi ammettere che la carica esplosiva penzolasse in bella vista, essa doveva necessariamente trovarsi dietro il cruscotto. Un pezzo della manopola gialla evidente vicino alla posizione della mano sinistra di Mattei è stato ritrovato conficcato nella mano durante l’esame autoptico del Professor Carlo Torre, corroborando il risultato che ha portato a individuare un’esplosione come causa della caduta dell’aereo di Enrico Mattei.

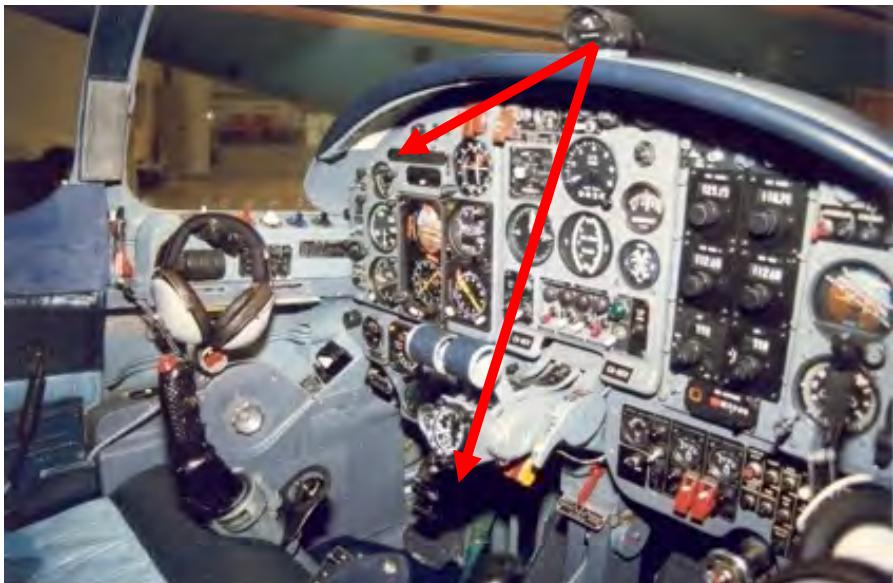


Fig. 7 – Cruscotto dell'aereo MS 760 B. Le punte delle frecce individuano la posizione dell'indicatore triplo e della mano sinistra di Mattei. Foto dell'autore.

NOTE CONCLUSIVE

Dopo molti anni dalla caduta dell'aereo Morane Saulnier 760 B, sul quale viaggiava Enrico Mattei, oltre al pilota Irnerio Bertuzzi e il giornalista americano William McHale, il caso è stato affrontato nel 1995 su basi scientifiche, su richiesta del Sostituto Procuratore di Pavia, Dottor Vincenzo Calia, che aveva riaperto le indagini nel 1994. Sulle viti in acciaio inossidabile austenitico che fissavano all'estrema sinistra del cruscotto uno strumento chiamato "indicatore triplo", sono stati evidenziati dall'analisi metallografica sulla superficie fenomeni di geminazione meccanica, tipici ed esclusivi degli effetti dell'esplosione di una piccola carica. Fenomeni analoghi sono stati riscontrati sull'anello d'oro di Mattei. Semplici ragionamenti geometrici hanno portato a stabilire che la carica esplosiva, di intensità limitata, era stata posizionata dietro il cruscotto, operando dall'esterno.

BIBLIOGRAFIA

- Firrao D., Matteis P., Scavino G., Ubertalli G., Ienco M.G., Pellati G., Piccardo P., Pinasco M.R., Stagno E., Montanari R., Tata M.E., Brandimarte G. and Petralia S. (2006). *Mechanical twins in 304 stainless steel after small charge explosions*. In: «Mater. Sci. Eng., A Struct. Mater. – Prop. Microstruct. Process.», 424(1): 23-32, ISSN: 0921-5093.
- Kestenbach H.J. and Meyers M.A. (1976). *The effect of grain size on the shock-loading response of 304-type stainless steel*. In: « Met. Trans. A», 7A: 1943-1950.

Sfide e prospettive dell’Università di Pavia

Francesco Svelto*

SUNTO – Il Rettore dell’Università di Pavia illustra le sfide che attendono un Ateneo storico e multidisciplinare come quello di Pavia, nel contesto della formazione universitaria superiore e le azioni introdotte in ambito di ricerca e di internazionalizzazione, con particolare riguardo all’offerta formativa e al profondo rinnovamento degli spazi per ricerca e didattica.

PAROLE CHIAVE – Università di Pavia; Formazione universitaria superiore; Ricerca; Internazionalizzazione.

ABSTRACT – The Rector of the University of Pavia outlines the challenges facing a historic and multidisciplinary university such as Pavia in the context of higher education and the measures taken in the areas of research and internationalization, with reference to the educational offer and the in-depth renovation of research and teaching facilities.

KEYWORDS – University of Pavia; Higher university education; Research; Internationalization.

Sono un ingegnere elettronico, professore ordinario presso l’Università di Pavia, dove mi sono laureato, e mi sono occupato di circuiti integrati, prevalentemente per le comunicazioni, ma anche per diagnostica medica. Ho fondato, insieme a miei studenti, una società *start-up* in California, che successivamente è stata venduta a Philips. Fino alla fine del 2019, ho guidato un Laboratorio congiunto tra Università di Pavia e STMicroelectronics. Sono *fellow* della Società internazionale di elettronica. Nel 2019 sono stato eletto Rettore dell’Università di Pavia e sarò in carica fino a fine 2025. Al mio

* Rettore dell’Università di Pavia (2019-2025), Dipartimento di Ingegneria industriale e dell’informazione. E-mail: francesco.svelto@unipv.it. Relazione tenuta l’11 aprile 2024.

osservatorio accademico pavese unisco anche quello nazionale, quale membro della giunta della Conferenza dei Rettori delle Università italiane: entrambi mi permettono di offrire una riflessione globale sulle sfide che attendono un'Università moderna e in particolare un'Università italiana.

Il sistema universitario italiano si è sviluppato con l'idea che la qualità dovesse essere mediamente elevata e diffusa. Viceversa, un impulso a creare Università di eccellenza non ha mai caratterizzato il nostro Paese. Anche le Scuole di Studi superiori, la Normale su tutte, sono riservate a pochissimi e l'impatto sulla realtà sociale che esse generano è conseguentemente limitato. Un dato che non è noto, ma ben spiega il concetto di qualità diffusa, riguarda la percentuale di Atenei che compaiono tra i migliori 1000 al mondo: per l'Italia è pari al 20%. Mentre è solo pari all'8,5% in USA e al 7,6% in Francia! Questo dato ci dice che un ragazzo italiano ha la possibilità di scegliere un Ateneo di qualità medio-alta molto più facilmente in Italia che in Francia o addirittura in USA. Questo spiega anche perché i nostri laureati sono sempre apprezzati all'estero.

In tutto ciò, c'è anche una ragione storica. Considerato che agli inizi del 1500 sul territorio italiano c'erano già ventuno Università, possiamo senz'altro pensare che un ruolo importante per lo sviluppo universitario italiano, anche dopo l'Unità, l'abbia avuto la storia pluricentenaria di molte di esse. Le riforme che si sono succedute dagli ultimi decenni dell'Ottocento in poi hanno comunque preso atto della situazione del sistema universitario, anche a livello di dislocazione su tutto il territorio nazionale, e l'hanno implicitamente sostenuta, attraverso una visione centralistica della formazione universitaria, giustificata dalla necessità di poter intervenire per un loro sostegno economico.

Anche le diverse riforme che si sono succedute dopo l'unità d'Italia e che hanno cercato di differenziare le Università hanno sortito ben poco effetto, visto che il sistema universitario italiano è sempre prevalentemente pubblico e la quasi esclusiva forma di finanziamento è sempre venuta dallo Stato. Con l'avvento dell'autonomia universitaria a fine anni '90, si è giustamente sviluppato un sistema di valutazione dei diversi Atenei. Coerentemente con l'idea di un sistema universitario con qualità diffusa, il finanziamento che lo Stato eroga a una Università dipende oggi in prima approssimazione dal numero di studenti iscritti.

Tale metodo ha il pregio di essere uno stimolo, ma, al tempo stesso, rende il sistema soggetto ai cambiamenti del contesto e del territorio.

Se, negli ultimi anni, abbiamo assistito a un numero crescente di studenti che dal Sud si iscrivevano a Università del Nord Italia, in anni recentissimi

vediamo crescere il numero di studenti italiani iscritti presso Università del Nord che preferiscono concludere il percorso di studi all'estero, oppure lasciare il Paese, una volta conseguita la laurea, per un lavoro più remunerativo. Il risultato è che l'Italia è un Paese con tasso di emigrazione di giovani laureati colti, talentuosi e ambiziosi sempre più alto. Aggiungiamo a questo due dati preoccupanti: il numero di laureati in Italia, rapportato alla popolazione, è il più basso d'Europa. E la natalità è andata diminuendo drasticamente dalla fine della prima decade del 2000. La combinazione di questi fenomeni desta grande preoccupazione in ottica futura, visto soprattutto che i nuovi profili richiesti dal mondo del lavoro sempre più dovranno saper gestire informazioni complesse, pensare in maniera autonoma, con creatività ed efficacia comunicativa.

È evidente la necessità di un ruolo nuovo dell'Università, rispetto al modello humboldtiano di ricerca e formazione accademica. L'Università oggi deve essere una istituzione in sempre più forte relazione con il territorio. In cui la ricerca diventa innovazione e la formazione mette gli studenti al centro e in relazione con la società. In questo scorso di secolo, sempre più si sente parlare di terza missione dell'Università e, a volte, più o meno provocatoriamente, qualcuno dice che la terza missione è in realtà la prima missione di ogni Università. Intendendo con queste parole che l'Università è il motore di sviluppo di un territorio, al centro dei processi di innovazione. Ed è proprio questo aspetto, a mio avviso, che caratterizza le Università di successo nel mondo.

Quali sono, quindi, le sfide e le prospettive dell'Università e in particolare dell'Università di Pavia? Pavia è una città universitaria a misura di studente, con un Ateneo storico, multidisciplinare fin dalla sua fondazione. La principale sfida universitaria si realizza oggi attraverso la permeabilità tra Università ed enti di ricerca, anche attraverso l'attrazione di imprese, per trasformare la ricerca in innovazione.

Pavia è anche una città universitaria inclusiva e internazionale, che partecipa a importanti reti europee, e che è capace di produrre ricerca in sintonia con le sfide emergenti della società, nel solco delle azioni del PNRR. Tra le sfide dell'Università di oggi c'è anche il rinnovamento dei luoghi e degli spazi per formazione e ricerca, allo stato dell'arte, avendo come punto di riferimento l'offerta accademica internazionale.

Come Rettore, cerco costantemente il dialogo con istituzioni, enti e fondazioni regionali, affinché Pavia possa presentarsi come un interlocutore forte delle sue competenze, capace di proporre progettualità importanti.

In questa direzione si muove l'Università di Pavia, non solo sviluppando nuove collaborazioni con le imprese e favorendo la nascita di *start-up*, ma

anche immaginando, insieme all’Ente regionale e all’Amministrazione comunale, nuovi insediamenti che possano trarre particolare vantaggio dalla presenza dell’Università di Pavia e degli altri importanti centri di conoscenza operanti sul territorio: la Scuola Universitaria Superiore IUSS, tre IRCCS, il CNR, l’INFN-Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, il CNAO-Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica e altre significative realtà dedicate alla ricerca di base e applicata.

A questo fine, abbiamo avviato, su terreni universitari, la realizzazione di un “Parco Cardano per l’innovazione sostenibile”, pensato per accogliere aziende e ospitare progetti di ricerca in collaborazione tra istituzioni pubbliche e operatori privati. Insieme agli enti di ricerca, abbiamo individuato i filoni scientifici capaci di stimolare l’interesse di imprese innovative e una loro collocazione presso il nascente Parco. Questi temi sono microelettronica, farmaceutica e nutrizione. *partner* dell’iniziativa sarà Arexpo S.p.A. All’interno del Parco Cardano, nascerà presto un Centro di formazione e ricerca, di 2400 mq, finanziato con dodici milioni di euro da Regione Lombardia. L’infrastruttura per le imprese private si svilupperà su 10-15000 mq, quasi interamente prenotati.

Un punto cruciale per una città universitaria come Pavia è quello di essere sempre più internazionale. Questo vuol dire promuovere e proporre un numero crescente di corsi di laurea in lingua inglese. Oggi a Pavia ne proponiamo 22; prevalentemente si tratta di lauree magistrali, ma stiamo iniziando anche a livello di corsi di laurea triennale, per accogliere le richieste crescenti di studenti non italiani. La percentuale dei nostri iscritti stranieri si attesta oggi all’11% (anno 2023/2024), in forte incremento rispetto al passato, se pensiamo che nell’anno accademico 2018-2019, tale percentuale era pari al 6%.

Anche gli accordi per doppie lauree sono aumentati. Dal 2018-2019 ne abbiamo aggiunti 11, con Università europee e nordamericane.

Tra le novità davvero significative, c’è l’avvio di un corso di laurea interateneo in Intelligenza artificiale. Progettato e gestito con le Università di Milano Statale e Milano Bicocca su una tematica oggi di importanza centrale, il corso di laurea in *Artificial intelligence* indica come la collaborazione tra Atenei italiani, soprattutto se tra loro vicini, può portare sicuri vantaggi soprattutto in termini di centralità internazionale. L’ampio numero di docenti, assicurato dalla partecipazione di tre Atenei, aumenta inoltre le opportunità per i nostri studenti. Si realizza così un’offerta didattica migliore, in grado di attrarre studenti a livello europeo.

È una prospettiva interessante, soprattutto quando si tratta di discipline emergenti, dallo sviluppo estremamente rapido.

Risultano estremamente positive anche le alleanze europee. Insieme all'Università di Coimbra, di Iași, di Jena, di Poitiers, di Salamanca e di Turku, l'Università di Pavia ha istituito il Campus Europeo delle Città-Università (EC2U), un'alleanza multiculturale e multilingue con l'ambizione di sviluppare uno spazio innovativo di educazione e ricerca. Finanziata dalla Commissione europea, per il triennio 2020-2023, l'alleanza ha avuto una conferma e un rinnovamento del finanziamento per ulteriori 6 anni, fino al 31 ottobre 2029. Nel nuovo sessennio, EC2U 2.0 accoglierà anche l'Università di Linz e, come *partner* associato, anche l'Università ucraina di Leopoli.

EC2U è un'alleanza che riunisce Università storiche e multidisciplinari che condividono una forte vocazione internazionale e allo stesso tempo un significativo radicamento sul territorio, fattore che le rende Università-città. Tra i *partner* associati figurano infatti le sette municipalità, oltre ad altri attori socioeconomici del territorio (poli tecnologici, associazioni studentesche, Camere di commercio) e con la seconda fase del progetto anche gli ospedali. La partecipazione a EC2U garantisce all'Ateneo pavese un ruolo rilevante nello scenario futuro della ricerca internazionale e della formazione. La mobilità degli studenti è un elemento di grande attenzione.

Allo scopo di favorire in ogni modo le opportunità degli studenti, la digitalizzazione delle mobilità rappresenta una tappa fondamentale e l'Università di Pavia ha ricevuto quest'anno la certificazione *Erasmus Without Paper (EWP) champions* dalla Comunità europea, essendo tra i primi Atenei italiani ed europei ad avere implementato il nuovo sistema EWP per la gestione dematerializzata di tutti i processi Erasmus.

La nostra partecipazione a EC2U è anche un importante volano per uno degli obiettivi strategici dell'Ateneo, cioè l'attivazione di corsi internazionali. In questo quadro, l'Università di Pavia ha deciso di rappresentare tutta l'alleanza EC2U nel progetto ED-AFFICHE, finanziato sempre dalla comunità Europea allo scopo di definire e rilasciare un *European degree label* per corsi di laurea congiunti. In questo progetto il nostro Ateneo è consorziato con Università rappresentanti di altre cinque alleanze: KU Leuven (Una Europa), KTH Royal Institute of Technology (Unite!), Catholic University of Valencia (EU-CONEXUS), Charles University (4EU+), University of Barcelona (CHARM-EU). ED-AFFICHE è così rappresentativo di 51 Atenei appartenenti a 22 Paesi europei, con i relativi Ministeri e agenzie di accreditamento.

Ha come scopo ultimo quello di fornire alla Comunità europea raccomandazioni per la realizzazione di percorsi di studio congiunti tra più Università.

Come dicevo, è importante focalizzare l'attenzione sulle grandi sfide che la società propone, su tematiche di innovazione tecnologica, sociale, culturale. Sicuramente, in questi ultimi anni, il PNRR ha costituito la stella polare per attività di ricerca di impatto. I progetti del PNRR hanno superato metà percorso e ci hanno permesso di proporre progettualità in contesti ampi, di tipo Europeo. Contesti in cui il nostro Paese continua a fare un po' di fatica.

L'Università di Pavia partecipa a tre centri nazionali: “*High performance computing*”, “*RNA a terapia genica*” e “*Biodiversità e salute*”.

Nell'ambito dei partenariati estesi, che abbracciano 14 tematiche di grande rilevanza internazionale, abbiamo l'onore e la responsabilità di essere guida per la tematica delle “malattie infettive emergenti”. L'obiettivo è quello di rispondere in modo tempestivo alle necessità determinate dalle emergenze infettivologiche in ottica “*One Health*”. Sono direttamente coinvolti 40 enti nazionali.

L'Università di Pavia svilupperà il suo impegno complessivo, nei progetti del PNRR appena descritti, attraverso il lavoro di circa 200 ricercatori strutturati e riceverà circa 72 milioni di euro. Un aspetto molto rilevante dell'iniziativa nazionale è l'accento posto alla presenza attiva di ricercatrici e ricercatori giovani: prevediamo di poterne coinvolgere complessivamente 55, a tempo determinato.

Non possiamo non vedere nella qualità dei luoghi e degli spazi della formazione e della ricerca che gli Atenei offrono un ulteriore elemento di attrattività internazionale. E questo è un tasto un po' dolente in Italia dove tanti Atenei sono pluriscolari e si trovano a fronteggiare costi di ristrutturazione, rinnovamento e mantenimento davvero proibitivi.

Diversi palazzi sono di pregio e motivo di legittimo orgoglio. Altri sono invece strutture semplicemente vecchie e ormai inadeguate per ospitare attività didattiche o di ricerca.

È necessario intervenire estesamente e, in alcuni casi, ricostruire da zero, con soluzioni rispettose dell'ambiente, oltre che economicamente sostenibili. Molto in questo senso si è fatto negli ultimi anni e un buon sostegno economico dallo Stato per edilizia universitaria è arrivato. Così come per le residenze pubbliche per studentesse e studenti.

Solo a titolo di esempio, i più recenti interventi di recupero effettuati dall'Università di Pavia riguardano alcuni edifici storici dell'Ateneo come

Palazzo San Tommaso, Palazzo Botta, Palazzo San Felice, la Biblioteca di Storia dell’arte, ma anche l’area medico-scientifica. Mi riferisco in particolare al recupero del Campus della Salute e dell’ex Mondino, appena avviato, ma anche alle nuove edificazioni di Scienze del farmaco, primo tassello di rigenerazione urbana dell’intera area degli Istituti universitari.

CONCLUSIONI

In questa relazione ho inteso sottolineare la visione strategica che le Università statali sono chiamate a sviluppare nel contesto della formazione superiore e in un quadro sempre più globale.

I progetti dell’Università di Pavia, che ho condiviso, dalla nuova offerta formativa all’internazionalizzazione, dalle sinergie con gli altri Atenei agli interventi in edilizia si sviluppano in un arco temporale molto breve e dimostrano una ricerca di opportunità e un dinamismo che forse sfugge a chi non vive l’Università da vicino. Io credo invece che l’Università vada valorizzata perché continua a offrire qualità ed è uno snodo essenziale per le nuove generazioni, alle quali dobbiamo offrire le migliori opportunità possibili. Le stesse che noi abbiamo avuto.

BIBLIOGRAFIA

- Cucinella M. (2022). *L’Università di domani deve sorgere a partire dal dialogo a lungo perduto tra gli edifici accademici, il territorio e la comunità*. In: AA.VV., *L’Università di Pavia e la città. Progettare e rigenerare spazi per la conoscenza*. Rozzano: Editoriale Domus, 4.
- Greco A. (2022). *Il patrimonio edilizio dell’ateneo permea il tessuto pavese dal centro alla periferia. Ed è oggi il volano della rigenerazione urbana*. In: AA.VV., *L’Università di Pavia e la città. Progettare e rigenerare spazi per la conoscenza*. Rozzano: Editoriale Domus, 5-7.
- Mantovani D, a cura di (2012-2024). Almum Studium Papiense. *Storia dell’Università di Pavia*. Milano: Cisalpino-Mondazzi editoriale, 4 voll.
- Svelto F. (2022). *Inclusione, didattica innovativa e coinvolgimento di istituzioni e imprese. Queste le basi per il futuro dell’Università di Pavia*. In: AA.VV., *L’Università di Pavia e la città. Progettare e rigenerare spazi per la conoscenza*. Rozzano: Editoriale Domus, 2.

Joseph Vallot e Pierre Janssen. Un'avventura scientifica e alpinistica tra il 1890 e il 1906 sul Monte Bianco

Gian Sacchi Landriani*

SUNTO – La vicenda descritta ha come protagonista il Sig. von Vlady, capotecnico della ditta milanese Filotecnica sita in Piazza Ellittica, produttrice di strumenti ottici di precisione. Questo personaggio è stato assunto come punto di raccordo per narrare la contemporaneità di due importanti figure nel decennio tra il XIX secolo e il successivo in ambito scientifico e alpinistico: il meteorologo Joseph Vallot (Société Botanique e Société Géologique de France) e l'astronomo Pierre Janssen (Académie de Sciences e Directeur de l'Observatoire de Meudon). Nella lettura di questa nota vengono ricordate le grandi difficoltà all'epoca di installazione di due rifugi di osservazione sul Monte Bianco.

PAROLE CHIAVE – Sig. von Vlady; Filotecnica; Joseph Vallot; Pierre Janssen; Monte Bianco.

ABSTRACT – The story described has as its protagonist Mr. von Vlady, chief engineer of the Milan company Filotecnica located in Piazza Ellittica, producer of precision optical instruments. This character was taken as a point of connection to narrate the contemporaneity of two important figures in the decade between the 19th century and the following in the scientific and mountaineering fields: the meteorologist Joseph Vallot (Société botanique and Société géologique de France) and the astronomer Pierre Janssen (Académie de sciences and Director of Observatoire de Meudon). When reading this note, we are reminded of the great difficulties at the time of installing two observation shelters on Mont Blanc.

KEYWORDS – Mr. von Vlady; Filotecnica; Joseph Vallot; Pierre Janssen; Mont Blanc.

* Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere (Membro effettivo). Professore emerito di Scienza delle costruzioni presso il Politecnico di Milano. E-mail: giansacchi.landriani@gmail.com. Relazione tenuta il 6 giugno 2024.

INTRODUZIONE

Alla fine del XIX secolo la notorietà dei due protagonisti si accese per la progettazione delle loro imprese sulla “più alta cima d’Europa”. Notorietà che si protrasse durante il perdurare dell’attività e per alcuni anni successivi.

Nel secolo seguente, aspro e complesso, la notorietà si attenuò per riaccendersi nella seconda metà del ’900 (pressappoco gli anni Ottanta), soprattutto grazie all’opera dell’astronomo Giovanni Bignami.

Il materiale storico, di ampia ma talvolta disordinata bibliografia, provoca alcune difficoltà nella stesura essenziale, come nel presente scritto. È sorta la necessità di colmare alcuni vuoti con affermazioni attendibili, ma prive di solide basi. Ad esempio, si è ritenuto ragionevole affermare che la storica ditta Salmoiraghi, sita in piazza Ellittica di Milano, fosse intervenuta nella realizzazione di uno strumento meteorologico in collaborazione con la tedesca Richard, sicuramente presente nella realizzazione del detto strumento. Sembrò opportuno affermare che l’attività per conto della Salmoiraghi fosse avvenuta mediante la Filotecnica, società realmente esistita e di pertinente produzione. Inoltre, si è supposto che il capo tecnico della Filotecnica fosse Vladimiro von Jourawshy e si trattasse di una figura professionale realmente esistita, ma di origine non chiaramente nota. Era stato apprezzato dirigente di una grande casa editrice di Losanna.

Nella presente nota è stato chiamato von Vlady, suo soprannome abituale di lavoro, quale narratore che, ad avventure compiute da almeno un ventennio, ricordi eventi da lui stesso vissuti.

Nella lettura di questa nota vanno ricordate le grandi difficoltà all’epoca, un decennio tra il XIX secolo e il successivo, di installazione ad alta quota, da Chamonix alla vetta del Bianco, di due rifugi, la cui realizzazione abbia richiesto trasporti a spalla di molti portatori.

Gli strumenti interni del rifugio di vetta erano costituiti da un meteorografo a lunga durata, cioè di almeno otto mesi senza l’assistenza di un tecnico. L’avventura complessa, che si concluse con amaro insuccesso e grande dolore dello stesso von Vlady, vide realizzato alla Filotecnica un siderostato polare di concezione e realizzazione complessa, in funzione del ridotto spazio all’interno del rifugio in vetta.

1. AVVENTURA “*FIN-DE-SIÈCLE*” SUL MONTE BIANCO

Il capotecnico Signor von Vladyl¹ – della ditta milanese Filotecnica sita in Piazza Ellittica, rivenditrice di strumenti ottici di precisione – aveva riferito notizie di interesse scientifico e industriale provenienti da Parigi.

La prestigiosa «*Revue des Sciences*», diretta da Gaston Tissandier, nel 1890 dava risalto all’intenzione di Janssen, direttore dell’Observatoire de Meudon, di indagare sull’esistenza o meno dell’ossigeno atomico sul sole. Era noto che Pierre Janssen aveva già intrapreso a questo scopo osservazioni di fotografia spettrale dall’Etna, da una stazione pirenaica e da altre.

Si diceva che Pierre Janssen avesse manifestato all’Académie des Sciences (una delle cinque Accademie dell’Institut de France nella Cupole de Quai Conti) il proposito di effettuare osservazioni ad altezze ancora maggiori, onde valutare l’influenza dell’atmosfera terrestre sull’immagine delle bande dell’ossigeno, e quindi di stimarne l’eventuale presenza sul Sole. Quale sito migliore, a tal fine, della vetta del Mont Blanc, la più elevata sommità europea raggiunta dall’uomo?

L’Istituto Lombardo di Milano – riteneva in conclusione von Vladyl – avrebbe dovuto stimolare un’adeguata divulgazione, incoraggiare la fabbricazione e la fornitura di strumenti.

Il Presidente dell’Istituto Lombardo era perplesso. Molte imprese erano state realizzate negli anni appena trascorsi: il canale di Suez, il Traforo del Gottardo. Altre imminenti: Panama, la Torre Eiffel per l’esposizione dell’Ottantanove, il superamento del Sempione.

L’affare dell’ossigeno sul Sole consisteva in un proposito manifestato dall’eminente Pierre Janssen, in una sede prestigiosa, frequentata da menti acute ma spesso chimeriche.²

¹ Nome di fantasia per la figura del capotecnico della Filotecnica che era in corrispondenza produttiva con la tedesca Richard.

² Era opportuno evitare pretesti a polemiche nell’ambito cittadino, tanto impregnato di interessi utilitaristici, invece della questione dell’ossigeno sul sole. Il Presidente non nascondeva la propria titubanza. «Da una parte i fisici e gli astronomi con la loro spocchia» – argomentava – «dall’altra i politici con le loro manovre mascherate da sublimi ideali umanitari, e in mezzo a noi, gli ingegneri, realistici, concreti e inascoltati. Già mi immagino la stampa scendere in campo con tutto il pressapochismo dei giornalisti, pur di farci apparire come sordi a ogni reale progresso. Susciteremmo un vespaio, un pretesto per far blaterare quelli dell’Umanitaria, e per far intervenire, oltre al Sindaco, anche l’Arcivescovo, capace di ritirar fuori la questione galileiana». Il Segretario dell’Istituto Lombardo assentiva e il Presidente, confortato, insisteva.

Aldina Jourawsky, moglie di von Vlady, era una delle prime laureate in ingegneria dell'Istituto Tecnico Superiore, collega di studi del Presidente dell'Istituto Lombardo. Aldina condivideva, con cautela, l'idea di cercare se ci fosse ossigeno sul Sole. Cautela che derivava dal fatto che era stata presentata in un ambiente autorevole come l'Académie des Sciences di Parigi e ripresa da un periodico prestigioso come «La Nature», diretta da Gaston Tissandier. Il Presidente fu infine disposto a nuovi eventi dell'attività dell'Istituto Lombardo. Si abbonò al periodico «La Nature» per stabilire un contatto con l'Académie des Sciences.

2. COMUNICAZIONE DI JANSSEN ALL'INSTITUT DE FRANCE (1892)

Janssen, in occasione della riunione plenaria dell'Institut de France, ovvero in presenza delle cinque Accademie riunite, aveva fatto una comunicazione:

Anche se il sole è costituito in modo da assolvere ancora per moltissimi secoli le sue funzioni di dispensatore di calore e di luce ai mondi che incatena attorno a sé, la scienza prevede nondimeno che tale potere irraggiante cominci a declinare. Ora, se gli involucri gassosi ricchi di idrogeno che avvolgono il globo incandescente contenessero anche ossigeno, giungerebbe necessariamente il momento in cui la combinazione dei due gas avrebbe luogo, ed enormi quantità di vapore acqueo apparirebbero nell'atmosfera solare. Ma noi sappiamo che il vapore d'acqua è fra i fluidi elastici quello dotato del più energico potere d'assorbimento del calore raggiante.

Una tale atmosfera acquosa formerebbe dunque [...] uno schermo [capace di diminuire in proporzione] enorme il potere già declinante dell'irraggiamento solare. Sulla superficie della terra ci si accorgerebbe rapidamente del terribile fenomeno: le temperature cadrebbero [ovunque], il clima dei poli avanzerebbe verso l'Equatore, e le condizioni della vegetazione e della vita sarebbero *bouleversées*.

[Come giungere a tanta conoscenza?] Se potessimo trasportarci ai limiti dell'atmosfera, [là dove confina col vuoto degli spazi celesti,] la soluzione del quesito sarebbe semplice. Si osserverebbe in uno spettroscopio un raggio solare e si otterebbe immediata risposta. Ma quando, nelle condizioni oggi possibili, vogliamo analizzare un raggio solare, siamo costretti a constatare che il raggio in esame ha necessariamente attraversato l'atmosfera terrestre e che quindi porta l'impronta delle azioni subite lungo il percorso. Come separare l'azione dell'atmosfera terrestre dall'azione ipotetica dell'atmosfera solare? Appare quindi evidente il ruolo delle alte stazioni (Janssen, 1892).

Aldina Jourawsky trasmise al Presidente la copia di un messaggero librario di Losanna, che riportava dettagliate informazioni circa l'importante comunicazione del Direttore di Meudon. Il ricevente si trovava obbligato nei riguardi dell'amica per questo, che gli avrebbe consentito di assumere le posizioni sostenute dal von Vlady con maggior autorevolezza.

3. COMITATO PROMOTORE DELL'IMPRESA

Chamonix, il ben noto villaggio dell'Alta Savoia ai piedi del Mont Blanc, era, dai tempi gloriosi di Horace-Bénédict de Saussure, luogo spesso frequentato da insigni uomini di scienza e di lettere.

Fra questi un curioso personaggio: Joseph Vallot, naturalista che definiva quelle alte regioni «una inesauribile miniera di informazioni dalla geologia, alla meteorologia, alla medicina».

Durante l'estate precedente aveva compiuto un'ardita spedizione con alcune guide e portatori. Partito da Chamonix e, senza concedersi lunghe soste, aveva percorso la Montagne de la Côte, aveva attraversato l'accidentato Glacier des Bossons, aveva costeggiato i roccioni nerastri dei Grands Mulets, aveva scalato le rampe nevose del Petit e del Grand Plateau, e aveva valicato la contorta rimaye del Dome du Gouter. Finalmente era giunto ai Rochers Foudroyés, 4350 metri di quota, qualificandolo quale sito ideale per erigere una meteo stazione.

Non soltanto Vallot era riuscito con la sua impresa a meglio delineare i contorni d'una visione scientifica, ma aveva indicato la possibilità di percorrere agevolmente il territorio del Mont Blanc.

Meno irragionevole di quanto non fosse apparsa alla sua enunciazione in seno all'Académie, sembrò allora l'idea dell'astronomo di Meudon, Janssen, di costruire un osservatorio sulla vetta del monte a 4810 metri d'altitudine.

Il Presidente ricevette un plico francese con allegate due curiose fotografie. La prima raffigurava Joseph Vallot, in tenuta da alpinista, munito di un *alpenstock* che fieramente teneva con la mano destra, mentre la sinistra era col pollice appoggiata alla fibbia della cintura. Il portamento eretto e spavaldo, la figura asciutta, gli conferivano l'immagine dello sportivo, ma anche del conquistatore, dell'uomo che sapeva reggere il confronto con i grandi esploratori del momento. Si intuiva un carattere audace e ambizioso, la cui propensione fosse il desiderio di destare meraviglia.

La seconda fotografia, scattata, secondo un'annotazione a matita, da Whymper, il conquistatore del Cervino, raffigurava un anziano signore

avvolto in un pastrano di foggia cittadina, con cappello a lobbia, seduto su una portantina sorretta da quattro montanari. Sempre l'annotazione a matita informava trattarsi dell'astronomo Pierre Janssen diretto ai Grands Mulets, tappa d'obbligo per la salita al Mont Blanc.

Un siffatto mezzo di trasporto era dovuto all'età non più giovanile del protagonista e al fatto ch'egli fosse claudicante. L'atteggiamento del personaggio e la situazione descritta evocavano la fatica dei portatori e inducevano a immaginare nell'uomo un carattere caparbio, superbo e dotato di una volontà capace di ridurre a servigi durissimi coloro che si fossero messi a sua disposizione. Le analoghe mire scientifiche dei due e la profonda differenza di prestanza fisica facevano pensare a una rivalità accanita motivata, in Vallot, dal maggior prestigio accademico di Janssen e, in quest'ultimo, dalla baldanza del primo.³

Il Presidente, giuntegli notizie in merito ai progetti del Directeur de Meudon, chiese se mai negli ambienti mondani di Saint Gervais si fosse inteso parlare delle esplorazioni scientifiche audacemente condotte da Vallot sul Mont Blanc. Seppe del gran parlare che si faceva delle spedizioni, e di come in almeno due occasioni si fossero visti gruppi di guide, con corde e *alpenstock*, e di portatori, con i loro pesanti gravami, avviati a Bionassay e diretti, probabilmente seguendo i sentieri del Désert de la Pierre Ronde, verso l'Aiguille de Goûter. Vallot non era con loro poiché, si diceva, aveva preso la via dei Grands Mulets, più a Nord.

³ S'annunciava quindi una lotta serrata per contendersi un primato in verità sfuggente, ma che essenzialmente risiedeva nell'ideale possesso di quello sterminato e straordinario territorio di picchi rocciosi e di ghiacciai ai quali erano stati dati da valligiani e viaggiatori nomi ricchi del fascino di leggende e conquiste. Il Presidente rimase stupefatto dal maestoso scenario d'azione che s'apriva alla sua mente, anche se continuava a coltivare l'idea dell'oziosità di una siffatta contesa tra sapienti. Gli pareva che energie fisiche e intellettuali, e anche economiche, proficuamente consacrabili a scopi concreti più utili al progresso, corressero il rischio di andare sprecate per i bizzarri puntigli di Vallot, che voleva in modo singolarmente costoso prevedere le variazioni meteorologiche, e di Janssen che addirittura voleva accettare la presenza o l'assenza dell'ossigeno sul sole.

4. IL PRESIDENTE VISITA MEUDON

Piovigginava. Gare d'Orsay di buon mattino, affollata, rumorosa, sotto l'imponente arcata metallica, giornali e *croissants*. La piccola stazione di Meudon era deserta.

L'*observatoire* si trova sugli spalti d'una antica fortezza, costituito da numerosi padiglioni disposti su una grande spianata, dalla quale si godeva uno splendido e brumoso panorama di Parigi. Alcune piccole specole, con le cupolette metalliche lucenti per la pioggia, erano disposte sul prato. Le immaginò abitate, nelle notti serene, da dottori di stelle, magici eredi di Galileo e di Newton.

Monsieur Brun, l'addetto al quale era stato indirizzato, era un personaggio asciutto. Ascoltò il faticoso presentarsi del Presidente. Quando emersero i nomi di Janssen e di Vallot, Monsieur Brun affermò che quanto stava per dire sarebbe apparso sulla «Nature» a cura di Gaston Tissandier. Si sapesse comunque che Janssen intendeva recarsi a Chamonix, da cui avrebbe iniziato a tempo debito l'ascensione ai Roches Foudroyés, per presenziare alla cerimonia d'inaugurazione della Meteo Stazione Vallot. Di là, se le condizioni meteorologiche fossero state clementi, avrebbe proseguito sino alla vetta del Mont Blanc per indagare se il luogo fosse favorevole a osservazioni astronomiche.

Il Presidente deliberò che fosse von Vlady, i cui interessi industriali in materia erano noti, ad assumersi l'onere di recarsi sul posto.

Passò l'estate del 1891 e nessun messaggio pervenne da Parigi. Solo a settembre arrivò un biglietto di Monsieur Brun, in cui si spiegavano le ragioni tecniche che avevano impedito il completamento della meteo stazione Vallot.

Von Vlady provò un certo sollievo per gli allenamenti ai quali s'era sottoposto.⁴ Con la primavera si delinearono le prospettive d'azione. L'affare Janssen si avviava verso una realizzazione più prossima del previsto. Dalla «Nature» di Gaston Tissandier s'era appreso che il Directeur de Meudon aveva fondato una società per l'erigersi d'un osservatorio sulla vetta del Mont Blanc e che di essa facevano parte i più bei nomi della finanza parigina.

⁴ L'ascensione della Pyramide Vincent, la traversata per cresta del Lyskam dal colle del Lys alla Lambronecca. Aveva incontrato i fratelli Gugliermina forti alpinisti della Valsesia, Mummery e persino Wymper.

Si diceva che Eiffel fosse stato interpellato per la progettazione della inconsueta costruzione. Si diceva anche che al padiglione giavanese dell'Esposizione universale avrebbe avuto luogo un pranzo, offerto dal barone Bischoffstein, gran mecenate del nuovo osservatorio di Nizza.

Si diceva che il barone Bischoffstein fosse riuscito ad avere tra i convitati il grande Charcot, il medico igienista Proust, Haléry dell'Académie française e un paio d'alti ufficiali.

5. UNA PARTECIPAZIONE ALL'INAUGURAZIONE DELLA METEO STAZIONE VALLOT

Nell'agosto del 1892, presumibilmente il 10, avrebbe avuto luogo l'inaugurazione della meteo stazione Vallot. Trovarsi a Chamonix non dopo il giorno 7, all'Hôtel Union, con equipaggiamento completo.

Primo giorno, partenza a ora antelucana dal Prieuré per raggiungere in nove ore di marcia, attraverso il Glacier des Pèlerins e il terribile Glacier des Bossons, la capanna dei Grands Mulets sita su un roccione a 3051 metri. Ogni viaggiatore doveva avere con sé un portatore per viveri e quanto poteva rendersi necessario. Ogni tre viaggiatori era prevista una guida della famosa Société des guides, incaricata nel condurre la spedizione.

Il secondo giorno, dopo una notte da prevedersi insonne, sveglia alle due. Almeno altre otto ore di marcia per raggiungere, attraverso il Petit Plateau e il Grand Plateau, i Rochers Foudroyés dove a 4300 metri d'altitudine s'ergeva la meteo stazione Vallot. Alla cerimonia inaugurale sarebbe seguita la cena ufficiale. Discesa prevista per l'indomani.

Il Presidente fu costretto a riconoscere l'impresa eccessiva per le sue forze, von Vlady fu lusingato dell'incarico dell'ascensione. Ormai la quota 4000 non lo spaventava ed era sicuro di poter affrontare marce prolungate.

Partì dalla stazione di Milano alla volta di Domodossola.

Sventolar di fazzoletti, il disperdersi del treno nella nube di vapore, il confondersi delle voci nei fischi, negli sferragliamenti, nello sbattere delle portiere. A Domodossola una gran confusione, un corri corri per accaparrarsi

i posti migliori sulla diligenza del Sempione.⁵ Suonar di cornetti e poi via veloci con accelerazioni dovute a un possente tiro a cinque. Sosta alla dogana di Iselle, passaggio da Gondo e dall'orrido, dove la temperatura era assai più bassa e induceva le signore a ricorrere a pesanti pellicce.

Finalmente da Briga a Martigny, quindi al passo della Forclaz e infine a Chamonix: Hôtel Union.

Una passeggiata a Chamonix. Un corrispondente de «La gazette de Lausanne» riferì che Janssen era già al rifugio dei Grands Mulets, con il suo esercito di portatori e di guide, e li avrebbe preceduti di un giorno ai Rochers Foudroyés. Naturalmente Vallot era da una settimana alla sua meteo stazione per ricevere gli ospiti.

François Balmat, della celebre stirpe, avrebbe guidato la spedizione alla meteo stazione Vallot, ed era disponibile a ripetersi in più lingue pur di farsi intendere bene. Con stupore di von Vlady, la comitiva era composta da solo tre persone: oltre a lui stesso, due francesi, probabilmente corrispondenti di giornali locali.

Il tratto iniziale, circa tre ore di salita alla Montagne de la Côte, fra sentieri e ghaiioni, fino alla Gite à Balmat, avrebbe costituito una prova della resistenza dei viaggiatori. I riconosciuti idonei all'impresa avrebbero fatto una breve sosta alla Jonction, lo sperone di roccia incuneato fra i ghiacciai di Bossons e di Taconnaz, per *casser la croute*. Si sarebbero calzati gli scarponi chiodati per camminare agevolmente sul ghiaccio, e sarebbero state formate le cordate secondo l'ordine prestabilito.

⁵ Bauli, cappelliere, valigie a soffietto, fagotti e zaini in apparente disordine, davanti all'ufficio della stazione di posta. Von Vlady, preparato dall'alpinismo, scelse un posto all'aperto, a ridosso del mantice posteriore, anche se il tempo non prometteva granché. Nuvole chiare e rigonfie sembravano giungere proprio da Gondo, il che induceva a supporre che lassù, non lontano dai grandi Ghiacciai della Weissmies, il vento soffiasse gagliardo e qualche spruzzata di neve potesse raggiungere il convoglio. Il tratto percorso dalla diligenza copriva ormai la sola distanza tra Briga e Domodossola. In un futuro non lontano (l'Istituto Lombardo seguiva attentamente i comunicati dallo speciale ufficio stampa italo-svizzero) sarebbe stato realizzato un grande attraversamento ferroviario. Si ripeteva ormai con insistenza che un imponente traforo avrebbe interessato la montagna, da Iselle a Briga, per una ventina di chilometri. La drammatica esperienza del Gottardo, con i suoi quindici chilometri e i suoi ottocento morti, faceva pensare con apprensione alle enormi difficoltà che si sarebbero prospettate. Si favoleggiava un impegno di manodopera che prevedesse alcune migliaia di minatori, e il nascente di veri e propri villaggi agli imbocchi per ospitare le famiglie, con un ospedale, una scuola. Lavori per almeno cinque anni, gran quantità d'esplosivo, misurazioni ottiche. Per ora si percorreva la strada del '60, che modificava con alcune gallerie il tracciato napoleonico, a sua volta vicino o sovrapposto a quello, storico, dello Stockalper.

6. LA SALITA AL SITO DELLA METEO STAZIONE

Si incamminarono sotto un grande cielo stellato. La freschezza dell'aria rendeva piacevole la marcia lungo il sentiero in una fitta abetaia. La pendenza consentiva una sporadica conversazione, alla quale guide e portatori non si assocavano, anche al fine di suggerire il massimo risparmio di energie.

Marciarono per quasi tre ore. Superati i 2000 metri di quota, gli abeti si fecero radi nel volgere di poco e ai viaggiatori s'offrì un terreno accidentato fra erbe stentate e aguzzo pietrame. Videro, nei lucori dell'aurora, i terribili ghiacciai di Taconnaz dei Bossons procedendo sull'enorme sperone della Montagne de la Côte.

Von Vlady fu tentato d'abbandonare l'impresa. Rimandò la decisione poiché si sentiva in forma con un respiro valido e profondo, benché le guide avessero imposto un passo deciso. Giunsero in vista di alcuni massi accatastati in modo da formare una piccola grotta e da apparire paurosa, per via del freddo, del grigiore, della solitudine. Ancor oggi il luogo è chiamato Gite à Balmat perché avrebbe consentito un provvidenziale bivacco ai primi avventurosi salitori del Mont Blanc.

La capanna dei Grands Mulets, seminascosta fra gli anfratti d'un enorme roccione emergente dal ghiaccio, si palesò come una poco confortevole baracca di legno. La notte, benché un limpido tramonto avesse ben disposto gli animi, fu disagiata. Il piccolo spazio all'interno dove erano stipati era caldo e umido, in contrasto con l'aria secca e gelida dell'esterno.

Finalmente la sveglia della guida pose fine al tormento e, rifocillatisi con caffè, uova, pane e zucchero, ripresero il cammino. Il ghiacciaio era più innevato di quello del giorno precedente e i crepacci più radi. La neve profonda appesantiva il passo e von Vlady visse momenti di forte apprensione per via del respiro fattosi a volte affannoso. Col passare delle ore si rinfrancò. Ora avevano raggiunto il Grand Plateau. Si distingueva bene la meteo stazione Vallot costruita fra le rocce in prossimità del Dome de Goûter. Sentì d'aver vinto la partita ed era pronto per un ultimo vigoroso impegno.

Affrontò con orgoglio l'ultima rampa nevosa, la cui pendenza era tale da richiedere forza e perizia nell'uso dell'*alpenstock*.

In occasione dell'ultimo alt, ormai prossimi alla meteo stazione, von Vlady s'accorse che ad attenderli c'erano molte persone. Dunque, la cerimonia non poteva essere di poco conto.

7. VALLOT E IL SUO SALON CHINOIS

Nella folla si distinguevano Vallot snello e aitante come nella fotografia, e il Professor Janssen in soprabito cittadino e cappello a lobbia. Leggermente claudicante e pesante nei movimenti, appariva animato da forti interessi. Si presume che i due parlassero ad alta voce fra loro, credendosi al centro d'ogni attenzione e lasciando che i loro discorsi ricadessero sugli astanti, ai quali sembravano volessero concedere un debole diritto a interloquire.

Accolsero con chiassosa cordialità le guide; si complimentarono, dicendo un «bravo! bravo!» con i portatori. Grandi chiacchieire sul tempo e la sua probabile evoluzione.

Von Vladys ricordava che i presenti erano soggiogati dalla prestanza di Vallot e dal suo capriccioso indicare autorevolmente precise disposizioni: «Scrutare verso Nord e compiacersi dello spettacolo offerto dalle Grandes Jaurasses, dal Talèfre, dalla Verte». Poi a un cenno: «Voltarsi ed esprimere meraviglia alla vista delle cime di Trélatete, alla dorsale dei Dômes de Miage, all'Aiguille de Bionnassay, tanto prossima e, vista da qui, tanto modesta». E poi l'imperioso consiglio: «Ammirare, verso Est, le cime del Grand Combin e del Cervino».

Non ci volle molto a supporre che quell'uditario fosse diviso in due gruppi, ciascuno dei quali partigiano d'uno dei due eminenti personaggi, la cui rivalità non poteva nascondersi sotto apparente cordialità. Per il momento la supremazia era tenuta da Vallot, con la sua meteo stazione. L'altro, Janssen, era però intenzionato a strappargli il primato con la realizzazione del suo osservatorio, ancora più su, proprio sulla vetta.

Von Vladys diceva d'essere indotto a supporre che i due personaggi godessero di alto prestigio se erano in grado di promuovere tanto importanti iniziative in forza di pretesti puramente scientifici. La vera battaglia non si combatteva lì, ma a Parigi, fra autorevoli consorterie e movimenti politici, fra la sfrontata potenza del denaro e la capziosa ambizione dell'Accademia.

Von Vladys cercava un'immagine per presentarsi quale costruttore con Richard di strumenti scientifici. In una sbiadita fotografia degli invitati appariva un tizio singolarmente addobbato. Indossava un completo di pelliccia, certamente molto costoso, costituito da un paio di pantaloni, una giubba e un cappuccio che lasciava appena intravedere il viso. Doveva far parte del gruppo Janssen, poiché assentiva sistematicamente alle affermazioni e anche alle più semplici battute del professore. Se dissentiva da quelle di Vallot non era facile capire per via del cappuccio di pelo.

La cerimonia di inaugurazione, fra lo stupore dei presenti, ebbe luogo nel *salon chinois*, di cui si conserva un’immagine. Von Vlady disse di essersi accontentato di rimanere sulla soglia, tirando il collo per poter vedere.⁶ A cerimonia conclusa i corrispondenti della stampa circondarono, taccuini alla mano, Vallot e Janssen per ottenere interviste preziose. Von Vlady segnalò la propria presenza quale rappresentante dell’Istituto Lombardo di Milano.

Una decina di gradi sotto lo zero e gli enormi ghiacciai circondavano i Rochers Foudroyés, sui quali era annidata la costruzione di Vallot. Cielo stellato e gran calma di vento.

8. JANSSEN VIENE PORTATO IN VETTA

All’alba dell’indomani von Vlady uscì sul terrazzo innevato e constatò che una carovana imponente era pronta a partire. Arrivò Janssen, abbigliato come il giorno precedente con cappotto e lobbia, sedette sulla portantina che quattro portatori sollevarono per reggere a spalla. Accanto ai quattro erano pronti altri che, dopo un tratto non lungo, li avrebbero sostituiti. Senza un cenno di saluto agli astanti, la carovana si mosse verso l’Aréte des Bosses, la via alla sommità del Mont Blanc. In tutto erano forse una trentina di persone. Von Vlady domandò al corrispondente della «Gazette de Lausanne» chi fosse l’uomo in pelliccia e gli fu risposto che si trattava di un tecnico della Maison Eiffel.

Janssen aveva raggiunto la vetta senza mettere piede a terra, come fieramente aveva riferito all’Académie des Sciences. Vi aveva sostato tre giorni facendo osservazioni astronomiche. Aveva affermato che quel luogo era predestinato a essere scelto per la sua impresa.

Alla Société, da lui stesso presieduta, i finanziamenti non mancavano. Gustave Eiffel, il grande progettista e costruttore, aveva accettato di erigere

⁶ Vallot fece un discorsetto molto brillante per la realizzazione della sua impresa. Un pensiero riconoscente a quanti, e qui fece il nome di alcuni personaggi parigini e alcune società farmacologiche e geografiche, avevano sostenuto impegni finanziari. Finalmente un particolare benvenuto e un augurio a Janssen, il quale prese la parola con un tono molto più serio. Era evidente la sua condizione di sfidato che si apprestava a una riscossa. Disse che, quanto prima, sarebbe sorto il suo osservatorio e che quindi avrebbe svolto una funzione complementare a quella promossa dal *cher collègue*, essendo chiaro che ambedue erano incamminati verso le auliche mete della scienza.

l’edificio e aveva previsto sondaggi ad alta quota per individuare su quali rocce, sottostanti la neve della calotta sommitale, avrebbe potuto eseguire le opere di fondazione. Venne costruita una capanna presso i Rochers Rouges. A quota 4795 (quindi soltanto pochi metri inferiore alla sommitale) venne scavata una galleria orizzontale. Si raggiunsero le vicinanze della verticale della vetta senza incontrare alcuna formazione rocciosa. Schizzi, disegni, testimonianze di guide circa l’aspetto della calotta negli anni passati, furono la documentazione sottoposta all’incaricato delle operazioni, il barone Imfeld, l’uomo in pelliccia.

L’imbocco della galleria, di dimensioni tali da consentire il passaggio d’una sola persona, fu protetto da una piccola costruzione in legno, nella quale potevano trovare posto gli attrezzi e sostare quattro uomini. Per procedere il più rapidamente possibile si rinunciò a qualunque opera di punteggiatura, fidando nella resistenza della neve molto compatta e nella bassa temperatura che ne avrebbe impedito il rammollimento. Tutto procedette senza alcun incidente, a testimonianza di somma maestria nel concepire e realizzare tanto singolare intervento.

Si continuò per una ventina di metri, ma senza incontrare rocce, anzi ci si arrestò dopo aver abbattuto un diaframma di ghiaccio che precipitò in un enorme crepaccio invisibile dall’esterno.

I lavori furono sospesi. Imfeld discese a Chamonix, si mise in contatto telegrafico con Gustave Eiffel, il quale decretò impossibile la costruzione, che, nelle sue intenzioni, avrebbe dovuto sopportare una cupola a sostegno idraulico (patente n°145953).

9. IL RIFIUTO DI EIFFEL

Grande sconcerto di Janssen per il repentino voltaggio del notissimo ingegnere. Janssen decise di continuare autonomamente gli scavi, che lo fecero avanzare, per un’altra ventina di metri. Neve e soltanto neve. Non una roccia sulla quale fondare il suo edificio.

Il Directeur de Meudon prese una decisione vista con titubanza da molti. Decise che il suo *observatoire astronomique*, destinato a fornirgli il mezzo per indagare se sul sole ci fosse ossigeno, fosse costruito sulla neve. La Société da lui presieduta diede il consenso, senza il ritiro dei finanziamenti originariamente previsti, a dar corso alla nuova impresa.

Tramontata la stella di Eiffel, l’incarico venne affidato a Vaudremère, architetto de la ville de Paris. Questi previde un edificio i cui componenti

sarebbero stati fabbricati a Parigi, quindi trasportati a Chamonix per ferrovia e finalmente issati pezzo per pezzo fino alla vetta del Mont Blanc, dove sarebbe avvenuto il montaggio.

Si fabbricò un modello, se ne discusse, si apportarono le indispensabili modifiche, assemblandolo quale prova generale sul Piazzale dell'Observatoire de Meudon. Convocazione della stampa, vigorosa campagna d'appoggio sostenuta dalla «Nature» di Gaston Tissandier, grandi elogi da parte dell'Académie. La Paris Lyon Méditerranée (PLM) si dichiarò pronta a realizzare il convoglio ferroviario. Venne concepito un nuovo mezzo di trasporto, uno slittone dotato d'un particolare argano per superare le grandi penedenze nevose. A opera non ancora ultimata, ma già se ne prevedeva il successo, venne bandita una lista di molti strumenti scientifici, che, destinati al nuovo osservatorio, la Société intendeva acquisire.

10. LA GARA PER GLI STRUMENTI SCIENTIFICI

Von Vlady, d'accordo con la ditta Richard, decise di presentare un'offerta per il *météorographe à longue marche*, destinato a misurazioni molteplici, e tale da poter funzionare per lunghi periodi, fino a otto mesi, senza assistenza. Una sorta di orologio a lunghissima carica. Per di più leggero e smontabile, in modo da poter essere portato facilmente lassù.

Si prevedeva che la carica dello strumento fosse dotata di un complicato sistema di pesi, ciascuno dei quali non poteva disporre che di una corsa limitata. Poco prima che toccasse il suolo ed esaurisse pertanto la sua efficacia, avrebbe, con le sue ultime risorse, fatto scattare un nottolino atto a permettere la lenta corsa del peso susseguente.

Si ritiene che il progetto di meteorografo di von Vlady-Richard avesse vinto la gara, ma la notizia non è stata riferita.

Vacanze a Saint Gervais les Bains. Nella stazione termale ai piedi del Mont Blanc la stagione era in pieno svolgimento, mentre sulle pendici innevate del massiccio era in atto l'andrivieni di scienziati, di guide e portatori, di tecnici e di giornalisti. Sole occhieggiante tra gli abeti e le antiche sequoie, profumo di resina, aria fresca e secca.

Una settimana dopo l'arrivo giunsero da Milano il Presidente e la moglie Clotilde, con Aldina e il marito von Vlady. Non s'era ancora spenta la meraviglia suscitata dall'inaugurazione della Meteo Stazione Vallot, e già si delineava il successo dell'iniziativa di Janssen.

Un esercito di portatori, ottocento trasporti per non poche tonnellate di materiale. Si trattava degli elementi, travi, bulloneria e infissi, per una costruzione di cinque metri per dieci di base. Alta sette metri, sarebbe stata in buona parte affondata nella neve, solidamente ancorata a quell’infido mezzo di sostegno. Si prevedeva che gli spostamenti potessero essere controllati da un sistema di martinetti posti alla base. La fine, con sbandamenti tali da rendere impossibile ogni rilevazione astronomica, sarebbe sopraggiunta non prima d’una ventina d’anni.

L’Académie des Sciences seguiva l’impresa e messaggi telegrafici nevano in contatto continuo Parigi con il cantiere dell’Alta Savoia. La «Nature» di Gaston Tissandier, il «Génie civil» di Max de Nausonty, l’«Annuaire du Club alpin français» di Charles Durier inviavano corrispondenti e pretendevano articoli. Vallot, Vaudremère, Whymper, Bischoffsheim, diedero vita a uno scambio epistolare intenso, animando una polemica che ebbe l’aria di un giro di scommesse sulla riuscita dell’impresa.

Una lettera del von Vlady pregava il Presidente di recarsi a Chamonix per contattare gli uffici della Société. Il Presidente s’adoperò per concordare argomenti da trattare e definire il calendario.

11. LA TRAGEDIA DELLA VALANGA A LA FAYET

La notte di quell’11 luglio 1892 era tiepida e calma, resa quasi irreale e preziosa da una grande luna che illividiva il paesaggio.

Verso l’una il Presidente e sua moglie Clotilde si destarono di soprassalto. Avevano percepito una sorta di malessere improvviso. Pareva essersi trattato d’un rumore sordo e attutito dalla lontananza, accompagnato da un mutamento sensibile della temperatura. A tutta prima paventarono il terremoto, ma nulla sembrava avere subito scosse.

La sinistra impressione era stata percepita anche da altri, poiché udirono un parlottare fra più persone, uno sbattere d’usci, la voce del *concierge* e poi del direttore che cercavano di rassicurare. Anche il Presidente era uscito e s’era imbattuto in un piccolo gruppo di ospiti angosciati. Anche von Vlady era lì, stralunato, in vestaglia e pantofole, gli occhiali sghimbesci e i radi capelli in disordine.

La calma più assoluta era tuttavia tornata e tutti furono quasi convinti dal Direttore che si fosse trattato d’un evento non del tutto inconsueto, per esempio d’una valanga staccatasi dai seracchi del Glacier des Bossons.

Dopo un paio d'ore furono nuovamente destati, questa volta dalla grande animazione che aveva invaso le strade. S'affacciarono, videro capannelli di persone parlare concitatamente, lanterne, fiaccole, alcuni gruppi che s'avviano verso valle, in direzione di La Fayet, la via che conduce a Saint Gervais. Qualcosa di grave doveva essere accaduto, le cui conseguenze però non tocavano direttamente Chamonix, poiché le persone apparivano in preda a grande sgomento. Anche l'Hôtel Union s'animò, ormai tutti scendevano nell'atrio e le voci non si preoccupavano d'arrecare disturbo a eventuali dormienti. Anche il Presidente e Aldina scesero.

Un valligiano parlava al direttore. Era sconvolto e tanto concitato da poter essere udito da tutti: «Il y a eu un désastre inouï: Tout ravagé! Tout ravagé!». Monotonamente ripeteva, senza saper andare oltre tanto era il terrore. Gli astanti erano presi dall'angoscia di non capire cosa si fosse prodotto. Vocavano nel pretendere spiegazioni che nessuno era in grado di fornire.

Né il personale dell'hotel sapeva, in quel momento, confortare o soccorrere. Il direttore s'allontanò per chiedere informazioni.

Von Vlady aveva raggiunto il centro di reclutamento dei volontari ed era stato inquadrato in un gruppo agli ordini d'un sergente dei *chasseurs*. Superarono lo sbarramento e s'inoltrarono nel territorio sconvolto. Un enorme torrente di fango aveva lasciato un letto mostruoso, disseminato di pietre, di tronchi d'albero, di relitti d'ogni sorta, di carogne d'animali. Alcune vittime erano sparse nel triste territorio, disposte in attitudini tali da suggerire la petrificazione di un disperato tentativo di fuga.

Marcirono sino a raggiungere quanto rimaneva della elegante stazione termale. Il Pont du Diable, situato a una cinquantina di metri sopra il piazzale dello stabilimento, era stato raggiunto dall'onda d'acqua e di fango, che con tanto battente s'era scagliata nel piazzale dei porticati. Non rimaneva più traccia del Pavillon de la Source. Una parte dell'edificio del personale e l'ala trasversale dell'hotel erano state distrutte. Più d'un metro di fango ricopriva il viale centrale, tanto che le alte basi delle colonne ne risultavano sommerse.

La squadra di von Vlady fu immediatamente destinata alla ricerca di eventuali sopravvissuti. Al sopraggiungere della notte, quando venne sospeso il lavoro, erano stati allineati sotto il porticato trentasei cadaveri.

I primi accertamenti sommari portavano ad annoverare, tra il villaggio di Bionnay, la stazione termale e il paese di Le Fayet, non meno di centocinquanta vittime. Von Vlady aveva lavorato alacremente, distinguendosi fra quelli più lucidamente solerti ed encomiabili, non sconvolto da

commozione, ma freddamente determinato a fare tutto quanto le sue forze gli avrebbero concesso.

Da Martigny, unica via d'accesso rimasta aperta per Chamonix, affluirono molti, giornalisti, malavitosi attratti dal miraggio di facili ruberie, parenti e amici angosciati.

Trascorsero alcuni giorni prima che tutto prendesse un assetto tale da far ritenere al Presidente e sua moglie superflua la loro presenza a Chamonix.

12. LA SALITA IN VETTA DEGLI STRUMENTI

Von Vlady dedicava gran parte del suo tempo alla realizzazione del meteorografo, e affidava molti affari correnti a fidati commessi del negozio di Piazza Ellittica. Giornate intere erano spese per mettere a punto il sistema di pesi, il cui automatismo per assicurare conveniente durata al funzionamento non era ancora affidabile. L'esigenza che si trattasse d'una struttura leggera, facilmente smontabile e rimontabile in sito, e suscettibile di piccole deformazioni, era stata rispettata.

Il meteorografo consisteva d'un supporto, la cui rigidezza era ottenuta mediante una sapiente disposizione a crociere multiple di leggeri profilati metallici, sul quale erano disposti due robusti prismi in acciaio, atti a sorreggere l'orologio e gli altri strumenti.

Von Vlady si era valso di un orologio Richard, garantito per robustezza e precisione, da disporsi a una estremità del piano d'appoggio.

La successione delle colonnine dei contrappesi per regolare il trascinamento della carta era stata ordinata in modo che la compattezza non s'opponesse alla ispezionabilità. Le disposizioni per il mercurio e dell'igrometro avevano richiesto uno studio accurato. In conclusione, erano stati fissati a una tavoletta verticale sistemata all'estremità del bancale opposta a quella dell'orologio. Un regolare funzionamento era assicurato per non più d'una ventina di ore. Finalmente un collaudo prolungato e severo aveva convinto von Vlady che tutto procedeva per il meglio: l'imballaggio, consistente in quattro casse munite di bretelle che avrebbero consentito un agevole trasporto a spalla sugli impervi pendii del Mont Blanc.

Scambio di lettere con Meudon per mettere a punto i dettagli della consegna, e la definizione dell'appuntamento a Chamonix per le operazioni di trasporto e di montaggio.

13. UNA TRAGICA PAUSA

Era scoppiato, nel 1893, l'affare delle saline di Aigues-Mortes, che vedeva tristemente coinvolti numerosi braccianti italiani.⁷ Tutto questo aveva inasprito i controlli doganali.

Le casse contenenti il meteorografo erano piene di scritte e di etichette: «Premiata ditta Filotechnica, Piazza Ellittica – Milano, Italia». Il percorso era stato scelto fra i più lunghi, poiché prevedeva il transito per Lione, ma assicurava il minor numero di trasbordi e soprattutto evitava tratti in diligenza, giudicati pericolosi.

Il tempo sembrava avviarsi a un miglioramento. Il Professor Janssen aveva annunciato una sua escursione durante l'estate, il che avrebbe costituito avvenimento di grande richiamo per i cronisti di molti giornali svizzeri e francesi. S'attendevano da Parigi notizie telegrafiche: smentite, precisazioni, conferme e disposizioni.

⁷ Molti emigranti erano stati assaliti da operai francesi che s'erano visti defraudati della vitale risorsa di sussistenza offerta dal lavoro sul sale. «Via gli italiani da qui, dove non mancano braccia!». E dai tafferugli s'era passati a scontri violenti, vere e proprie forme di linciaggio ai danni degli italiani, tra i quali s'erano contati ben trenta morti e centosessanta feriti. Qualcuno reagì con violenza alle provocazioni, tanto da indurre la Gendarmeria a effettuare alcuni arresti che ebbero il risultato di farla apparire favorevole ad atteggiamenti xenofobi. L'opinione pubblica italiana si infiammò e numerose manifestazioni antifrancesi ebbero luogo in molte città, compresa Milano, ove s'ebbero imponenti cortei e comizi. Von Vlady, costretto, per assecondare il risentimento della sua governante, a manifestare acredine verso i «transalpini» e d'altra parte preoccupato che non si alienassero i rapporti con il paese straniero in attesa del magnifico strumento di sua realizzazione. Il Presidente era per sua naturale inclinazione partecipe al dramma di quegli sciagurati, e genuinamente preoccupato degli irrisolti problemi sociali che quegli avvenimenti avevano tragicamente evidenziato. Per lui rappresentava, quella fornitura, prestigio e promettente apertura verso l'esportazione dei suoi prodotti d'alta precisione. Dunque, asseriva, si trattava alla fin fine di un'impresa il cui successo poteva risolversi in benefici anche per i suoi dipendenti. Il Presidente si doleva nel constatare, e qui si sentiva concorde con le ragioni della retorica progressista, che le due fazioni di Aigues-Mortes ferocemente avverse avessero in comune una tragica miseria. Dopo un tempo non lungo, la questione trovò una soluzione, concordata tra i due Stati, mediante negoziati svoltisi da Ambasciate e Consolati.

14. I PROBLEMI DEGLI STRUMENTI INTERNI

All'alba partirono. Il meteorografo, diviso nelle quattro casse, era stato affidato a portatori robusti e veloci, il cui passo non sembrava influenzato dal peso del carico.

Si trattava d'una carovana, composta da almeno una trentina di persone, destinata ad assicurare abbondanti rifornimenti, in materiale e viveri. Fu seguito il già noto percorso della Montagne de la Côte, fino alla capanna dei Grands Mulets. La sgradevole sosta per la notte, e, nel giorno successivo, la ripresa della marcia sui pendii nevosi, ormai solcati da una traccia profonda lasciata dall'andirivieni di operai e di guide.

Una debole raffica spazzò la nebbia e lasciò intravedere, un'ora di marcia al massimo, la mirabolante costruzione. Una piramide tronca sormontata da una piccola torretta, un pennone e il tricolore francese. Due uomini erano in attesa e salutarono con un grido e con l'agitare d'una sciarpa.

L'osservatorio era sito proprio sulla calotta sommitale, in modo da poter osservare l'intero orizzonte. Una scarsa visibilità era concessa dall'atmosfera ovattata, in assenza di vento e con temperatura sopportabile. Non si poteva percepire appieno la singolarità del luogo sovrastante ogni altra cima del gruppo e neppure avvertire il senso di vertigine che avrebbe colto il viaggiatore in grado d'osservare l'insinuarsi delle lingue glaciali in profondi valloni.

Von Vlady riteneva che, raggiunta la massima vetta d'Europa, sarebbe stato assalito da una forte emozione.

Rimesso il tavolo si disposero alla meglio, distesi l'uno accanto all'altro sul pavimento, per passare la notte. Il russare d'alcuni, l'agitarsi di altri, il parlare di quelli che non dormivano, costituivano disturbi anche al semplice riposo. Ma von Vlady non osò protestare, prima di tutto perché non sapeva esprimersi chiaramente, poi perché non sapeva a chi rivolgersi e finalmente perché era afferrato dall'ingiustificato timore d'essere estromesso dalla rude comunità e condannato a subire il gelo notturno.

Le prime luci dell'alba mostraron una giornata dall'aria ancora immota e lattiginosa. In un bassissimo scantinato, al quale s'accedeva tramite una botola, era stato stivato gran parte del materiale. Un ultimo giro di caffè. Uno scorbutico mutismo contrastava con il gran vociare della sera precedente. Von Vlady s'era, nonostante la terribile notte, un po' rinfrancato. L'aria fredda contribuiva a fargli riacquistare benessere. Gli uomini si lasciarono le gambe con le ghette, calzarono scarponi chiodati, si legarono a gruppi di quattro e si avviarono, gesticolando un saluto, alleggeriti dai carichi, verso

valle. Restarono, col von Vlady, due carpentieri, per il completamento della costruzione, e un montatore, il cui compito era di collaborare all’assemblaggio del meteorografo.

I diversi elementi erano intatti e disposti in bell’ordine. Il montatore, con scombinate notizie e inutili domande, infastidiva non poco von Vlady, la cui attenzione era presa dall’impegno di avviare il suo strumento. Seppe che il Professor Janssen era in arrivo, e che lo si attendeva a Chamonix e che avrebbe raggiunto l’osservatorio quanto prima. Avrebbe compiuto l’ascensione valendosi dello slittone a verricello, sul quale sarebbero stati caricati anche i bagagli.

Bisognava essere rapidi e precisi nel montare il meteorografo, onde ben impressionare tanto committente, che ne avrebbe parlato a Parigi, e il nome della premiata ditta di Filotecnica di Piazza Ellittica, Milano, Italia, avrebbe ottenuto successi commerciali e industriali.

Il basamento venne montato. Ecco finalmente la collocazione dell’orologio Richard, la sistemazione del pendolo, la disposizione dei pesi. Era giunta la sera, l’ora del pasto, che venne consumato nell’angolo della stufa a petrolio, dov’era stata allestita una mensa. Conversazione fitta dei tre savoiardi, dalla quale emerse la preoccupazione per l’imminente arrivo dell’Accademico. Uno dei carpentieri, afferrato il binocolo, uscì per approfittare dell’ultima luce e assicurarsi che la pista di salita fosse sgombra. Rientrò tranquillizzante. Nulla fino all’indomani.

Distesero quattro materassi sul plancito e si prepararono al sonno. Nella poca luce concessa dall’ultima lampada, von Vlady diede un’occhiata al congegno. Il risveglio lo colse all’alba d’una giornata stupenda. Mangiò, si sentì il von Vlady dei tempi migliori. Vide ghiacciai, montagne, picchi rocciosi, lo svanire in una bruma azzurrina del susseguirsi dei monti che da lassù sembravano insignificanti collinette. Prese il binocolo, scrutò verso valle e vide villaggi, Chamonix, la vallata verso Ginevra, il versante italiano, il bacino del Gigante, un villaggio, forse Pré Saint Didier, e all’orizzonte, in direzione Sud est, una sorta di spillo, la Madonnina. «Può essere?» chiese al capo carpentiere. «Mais naturellement, c’est bien possible! Durant les journées très claires, mais attention n’est pas la saison, d’ici on peut voir même la mer. On est bien au bout du monde!». Affermazione che al von Vlady parve poco plausibile.

Scrutò attentamente il versante francese, vide nettamente la traccia nella neve e constatò che appariva deserta. L’arrivo di Janssen non poteva dunque essere imminente. Sollecitò il montatore e riprese la sua opera. Installò barometro, termometro, anemometro e igrometro, dispose i contrappesi per il trascinamento della carta, collocò i rotoli di registrazione sui sostegni a rullini.

Sistemazione delle lancette del Richard sull'ora indicata dal Longines, bene il barometro (tener conto del tempo bello e dell'alta quota), umidità quaranta per cento (gran secco, perfetto), vento sette chilometri all'ora (benissimo, si coglievano anche le bave sottili e le leggerissime brezze quasi impercettibili), temperatura quattro gradi centigradi. A Milano sarebbe stato un freddo birbone, e qui no, *au bout du monde* si stava in giacchetta.

15. L'ATTESA DEL PROFESSOR JANSSEN

Da due giorni il meteorografo funzionava con regolarità; ogni raffronto con il Longines di precisione era positivo; la carta si muoveva senza il minimo inceppamento. Forse un lieve scarto, qualche secondo ogni dodici ore, del Richard. Si trattava d'un ritardo contenuto nei limiti di tolleranza previsti. Il Longines era pur sempre un orologio da tasca, quindi meno preciso del Richard, con pendolo e pesi. Von Vlady si sentiva in forma. Una leggera nausea al risveglio era lo scotto all'assuefazione all'alta quota. Adesso c'era il tempo per scambiare qualche parola coi carpentieri e con il montatore. Non bisognava trascurare alcunché, perché il Professor Janssen era in arrivo. Una parete divisoria era stata approntata. Nel nuovo locale stavano quattro cucette. Riordinata la dispensa, a punto il sistema di riscaldamento con la stufa a petrolio, perfettamente sistemate le finestrelle, con robuste ante esterne di legno. A regolari intervalli s'osservava con il binocolo la pista di salita.

La mattinata era stata, per la terza volta consecutiva, stupenda. Questa volta però l'orizzonte, a Occidente, era venato da una leggera striatura di nuvole bianche. Un nulla in confronto a tutto quel cielo sereno. Il barometro aveva avuto una piccola, ma brusca, caduta. Von Vlady se ne compiacque: era tanto sensibile da avvertire una nubecola. La vetta della sottostante *Aiguille de Bionassay* fumava un pochino, ma il carpentiere disse trattarsi d'un giro di brisa di poco conto. A mezzogiorno videro una cordata di tre persone, che, cariche (era impensabile che si perdesse una qualsiasi occasione per portare materiale all'osservatorio) stavano salendo. Avevano raggiunto i *Rochers Rouges* e quindi non avevano ormai da superare che il pendio del *Mur de la Côte*, un'ora di marcia, per giungere in vetta. Quei viaggiatori, si preoccupò von Vlady, avrebbero apprezzato il meteorografo in funzione. Entrò per una rapida ispezione. Tutto a posto.

Andava da due giorni e sembrava essere in grado di funzionare per gli otto mesi previsti dal contratto, fino a quando cioè i pesi avessero raggiunto il fondo corsa. Le tracce lasciate dai pennini sui nastri di carta erano nitide e

regolari. La traccia del barometro, dopo quel saltino, era in continua discesa. Quella del termometro ondeggiava dai massimi, corrispondenti alle due del pomeriggio, ai minimi, delle sei del mattino.

Arrivarono i tre, erano portatori dell'Observatoire de Meudon e dell'Academie des Sciences. Portavano i pochi viveri necessari alla propria sussistenza e una cassetta di legno, con il marchio a fuoco OMB-J. «Il contient des instruments précieux et ne peut être ouvert qu'en présence du professeur». La posero con estrema cautela sotto la cuccetta che sarebbe stata destinata al Professore.

Erano di poche parole come a voler scoprire eventuali magagne. «Hier, la presse est arrivée à Chamonix, alarmée par les rumeurs selon lesquelles l'arrivée de Janssen était imminente. Je suis sûr que le Professeur est déjà à Chamonix et se prépare à entreprendre l'ascension. Par contre aux Grands Mulets le traîneau est prêt au transport».

Domande insistenti avevano suscitato soltanto scarne risposte. Si poté soltanto arguire che gli esperimenti non si sarebbero limitati a quelli inerenti alla presenza dell'ossigeno sul sole, ma estesi allo studio della configurazione di certe macchie solari di grande importanza.

Di più non si sapeva e si trattava in ogni caso di esperienze segrete a proposito delle quali il Professore avrebbe riferito soltanto a eminenti personaggi della capitale.

16. UN'IMPROVVISA TORMENTA

Nel pomeriggio il vento si irrobustì. L'anemometro segnava ormai trenta chilometri orari, con punte anche più alte. Von Vlady contemplava l'astina verticale che raggiungeva il soffitto e, sostenuta da un cuscinetto conico a rulli Zwickau K, trasmetteva il moto del rotore esterno.

La neve ormai mulinava. Il vento fischiava sugli stralli che assicuravano il tetto, e squassava l'intera struttura. Non potevano far altro che starsene dentro asserragliati. I montanari sembravano tranquilli, ma von Vlady cominciò a temere che l'uragano assumesse tanta violenza da sradicare l'intera costruzione, che pure era installata in almeno quattro metri di neve. Il meteorografo avrebbe potuto soffrirne.

La notte fu un inferno, l'anemometro ormai segnalava raffiche che superavano abbondantemente i cento all'ora, tutto intorno cigolava spaventosamente, una pentola ch'era stata dimenticata all'esterno venne sbattuta con grande violenza contro una parete, producendo un botto che parve

un'esplosione. S'era nel pieno della tormenta, il meteorografo si dava da fare, ma von Vlady stava malissimo. Vomito, mal di ventre, un paio di svenimenti. I presenti sentenziarono che si trattava d'un normalissimo mal di montagna, e lo lasciarono disteso nella cuccetta, con accanto una tazza di tè.

La tormenta si placò del tutto solo verso le sette del mattino. Tutti dormivano, tanto non sarebbe successo niente sino all'indomani. Von Vlady era ancora nauseabondo e debolissimo. Nel tentativo di alzarsi sbatté la testa contro il traverso della cuccetta. Una botta modesta, ma lui pianse e si ridistese. Lo destarono verso le otto, preoccupati dal pallore. Il carpentiere ebbe un moto di sollievo quando lo vide aprire gli occhi.

Gli diede dell'altro tè, che von Vlady puntualmente vomitò. L'altro scosse la testa: «Il faut le descendre», disse rivolto a uno dei portatori. Lo trascinarono nella stanza accanto, dove il meteorografo continuava il suo ticchettio trascinando con regolarità anche il nastro dell'anemometro. Lo vestirono e coprirono bene, gli calzarono ghette e scarponi chiodati, gli infilarono guanti e berretto di lana. Non avrebbe voluto partire e lasciare il suo strumento, ma non aveva le forze necessarie per reagire alla determinazione di quelli che stavano armeggiando sulla sua persona. Si limitò a indicare al montatore il meteorografo quasi a raccomandargli un'accurata attenzione, senza riuscire a trasmettere il suo timore nel buon funzionamento a lungo termine.

Il freddo, quando furono all'esterno, gli consentì d'acquistare il vigore necessario per reggersi, seppure con fatica. L'aria era immota e lattiginosa come il giorno del loro arrivo. Si formò la cordata con i tre portatori e von Vlady venne legato cortissimo, non più d'un metro dai compagni. Colui che fungeva da guida e il suo secondo si trovavano alle sue spalle, a monte, pronti a impedire che una caduta trascinasse tutti quanti giù per il pendio.

17. VON VLADY È VITTIMA DEL MAL DI MONTAGNA

Partirono. Von Vlady si reggeva a mala pena, ogni tanto sostenuto e trattenuto dal cadere da quello vicino. Era confuso. Non riusciva a comunicare neppure a sé stesso la disperazione di quell'avilente abbandono. La nebbia era densa e l'osservatorio scomparve subito alla vista. La tempesta, che aveva soffiato da Ovest, fortunatamente non aveva cancellato del tutto la traccia, che era stata contrassegnata da paline a strisce bianche e rosse. Comunque i portatori conoscevano bene quei luoghi e molti segni, una piccola roccia affiorante, una cornice di neve, un'improvvisa aspra pendenza, potevano concorrere a identificare la localizzazione.

Camminarono per un tempo che von Vlady non riuscì a stimare. Però man mano, col perder quota, il controllo dell'equilibrio sembrava, sia pur lentamente, ripristinarsi.

Raggiunto il Petit Plateau, s'imbatterono in una carovana che stava salendo. Tre uomini erano in testa. Sostarono per avere notizie degli effetti della tempesta. Guardarono con un sorriso di condiscendenza il misero von Vlady. Dissero che lo slittone con il Professore seguiva a pochi minuti.

Apparve lo strano mezzo di trasporto. Una decina d'uomini per parte era impegnata nella disumana fatica di spingerlo verso monte. Seguiva un drappello pronto a dare man forte e assicurare il necessario avvicendamento. Seduto sullo slittone, contornato da un cumulo di bagagli, stava l'Accademico Professor Janssen, soprabito pesante, cappello a lobbia, sguardo indifferente, grossi baffi spruzzati di brina. Diede un'occhiata al von Vlady. «Qui est ce bonhomme?» chiese con modesto interesse. «C'est le technicien italien» gli fu risposto. Continuò a guardare senza curiosità von Vlady, che avrebbe voluto spiegargli in ogni dettaglio il funzionamento del meteorografo, la sensibilità degli strumenti e la delicata messa a punto. Ma era stravolto e troppo debole. Il Professore mormorò: «Bon courage!». Poi con voce più forte, guardando davanti a sé, ordinò alla sua ciurma: «Allons-y!» ed ebbe un piccolo sussulto quando gli uomini ripresero lo sforzo. Si separarono, e von Vlady camminava come un automa.

Quando raggiunsero i Grands Mulets von Vlady era prostrato. Riuscirono a fargli mandare giù del caffè e poi lo adagiarono su un malridotto pagliericcio. Giacque in stato di incoscienza per forse trentasei ore. Riemerse dal profondissimo sonno ch'era l'alba del secondo giorno. Stava un po' meglio e riuscì a rifocillarsi quel tanto ch'era necessario per continuare la faticosa marcia di discesa. Raggiunsero la Gite à Balmat, percorsero in discesa la Montagne de la Côte, e, a sera, raggiunsero le prime case. Una carrozza, il trasporto all'Hôtel Union, la chiamata del medico. Un'accurata visita. Nulla di grave, ma attenzione, riposo assoluto per quattro giorni, nutrirsi il più possibile, bere moltissime bevande zuccherate. Riprese completa coscienza di sé all'indomani, e realizzò con dolore, soltanto allora, che il medico gli impediva di abbandonare il letto. Era comunque determinato a rimanere a Chamonix tutto il tempo necessario ad assicurarsi che il meteorografo si mantenesse nelle migliori condizioni di funzionamento. Avrebbe voluto scrivere a Milano, ma avrebbe dovuto possedere la forza, che ancora gli mancava, di coordinare le idee. Ogni tanto si assopiva, pensava alla sua casa milanese, come a un rassicurante approdo dopo una terribile burrasca.

18. IL TRISTE SCONCERTO DELL'AFFLITTO VON VLADY

Von Vlady attendeva che qualche notizia proveniente dall'*observatoire* lo raggiungesse e che fosse tanto rassicurante da toglierlo dal penoso senso di disfatta che lo pervadeva.

Finalmente venne a sapere, dal direttore dell'hotel, che Janssen era ridisceso a Chamonix il giorno avanti e che sarebbe partito con il treno del tardo pomeriggio. Che durante la mattinata s'era visto anche Vallot, e che i due s'erano intrattenuti a lungo nella sala del telegрафo della stazione PLM.

Qualcuno aveva asserito d'essere a conoscenza d'uno scambio di messaggi tra Parigi e Chamonix, quasi una consultazione in vista di eventuali gravi decisioni. Poi i due s'erano salutati e Vallot era ripartito con due sue guide fidate verso la meteo stazione dei Rochers Foudroyés.

Von Vlady si rammaricò d'aver ricevuto notizie tanto rilevanti in modo fortuito e non esitò ad alzarsi, vestirsi, a correre alla stazione della PLM dove l'Accademico doveva già essere arrivato, se s'era attenuto al programma riferito. Infatti, sul marciapiede, già il piede sul predellino del vagone, era Janssen attorniato da un gruppo di giornalisti che lo assediavano vociando. Emergeva la magra figura di Monsieur Brun, che si sbracciava nell'intento di imporre una certa disciplina. Il fischio del capostazione, lo sbuffare della vaporiera e Janssen montò sul vagone, sbattendo alle sue spalle la porta, ma riaffacciandosi immediatamente per cogliere a volo le ultime domande e per dare saettanti risposte, sicuro di leggerle all'indomani sui più importanti quotidiani. Von Vlady riuscì a giungere tanto prossimo da lanciare, agitando la mano, un cenno di saluto, quasi a cercare un'impossibile fugace complicità. Questi rispose con un gesto distratto, non diverso da quelli rivolti agli anonimi giornalisti. Von Vlady rimase con il braccio alzato, sconsolato e dimen-tico di sé e dei suoi malanni.

Protagonista era ora diventato Monsieur Brun che si faceva guida del gruppo di cronisti, dispensando notizie con l'abituale malagrazia. I rilevamenti avevano dato ragione a Janssen. La campagna di osservazioni spettrali era appena iniziata, ma le misure effettuate consentivano già di togliere ogni dubbio in merito alla questione di ossigeno sul sole. Von Vlady saltellava intorno al gruppo in marcia senza riuscire a penetrarvi per raggiungere Monsieur Brun. Finalmente riuscì a gridare: «Il meteorografo? Funziona sempre a dovere?». Monsieur Brun rimase perplesso, come chi cerchi di raccogliere le idee, e commentò: «Il me semble bien qu'il se soit arrêté. Peut-être que

c'était à cause d'une rotation de l'un pour cent de la structure dans son ensemble. Tassement attendu». Von Vlady non si trattenne: «Ma abbiamo a che fare con uno strumento di precisione! È munito di viti calanti e di bolla per correggere le perdite di orizzontalità. Posso tentare di tornare in vetta per riattivarlo». Monsieur Brun parve veramente indispettito.

Sembrava che tutto l'affare dell'ossigeno sul sole e degli strumenti che per quell'indagine erano stati approntati non gli interessasse in quel momento e che invece fosse assillato da qualcosa d'altro di assai più preoccupante, che il terribile Janssen aveva scoperto. «Je regrette» – ribatté – «le programme des activités est des maintenant parfaitement définis. Des missions extraordinaires d'une telle nature ne sont plus possibles». Rise con l'aria di chi volesse tagliar corto. «Au revoir, Monsieur von Vliè».

Von Vlady stava toccando il fondo delle sue risorse. Tornò a sentirsi poco bene, avvertì con angoscia il senso di vergogna che lo avrebbe assalito al suo rientro a Milano.

19. OSSERVAZIONI GENERALI SUL VALORE DELL'IMPRESA

L'anno successivo alla morte di Janssen, nel 1908 Vallot fu invitato ad assumere la direzione dei due osservatori riuniti nella Société des observatoires du Mont Blanc. Nel 1909 la situazione dell'osservatorio Janssen apparve ormai disastrosa e la Société decide di abbandonarlo e demolirlo. Fu conservata la torretta, ora nel Musée alpin di Chamonix.

Janssen era considerato un autorevole astronomo, ma soprattutto un ingegnoso creatore di mezzi tecnici e si era particolarmente dedicato all'osservazione del sole. Molto significativa rimane l'intuizione di sfruttare lo specchio come il rifrattore solare.

Janssen aveva avuto conferma, tramite strumenti anche relativamente semplici, che la percentuale di ossigeno molecolare nell'atmosfera solare diminuisse con l'aumentare della quota di osservazione terrestre e pertanto che l'ossigeno atomico tendesse ad azzerarsi. La necessità di fare rilevamenti ad alta quota portò Janssen a essere un dei primi utilizzatori dei sistemi siderostatici, anche per via degli spazi generalmente ristretti delle strutture di osservazione.

La vicenda dell'osservatorio Janssen fu considerata, all'inizio del secolo, un insuccesso. Ripensata oggi, in prospettiva storica, può essere invece intesa come un'operazione mirata, che consentì di ottenere, nell'arco di un

decennio, risultati originali allora non conseguibili se non che in vetta al Monte Bianco grazie all'atmosfera rarefatta e pura.

«En ce sens l'opération Mont Blanc fut un succès» (cit. Malherbe).

Dal punto di vista tecnico tutta la vicenda può indurre oggi a uno sconcerto venato di bonomia, ma allora impegnò personaggi eminenti, quali, oltre all'ideatore e realizzatore Janssen, Bischoffsheim, Eiffel, Vaudremer, Vallot, che, visti nel quadro di una cultura permeata d'incrollabile fede nel progresso, al quale diedero un indubbio energico contributo, appaiono uniti tra loro nel solco illuminista di H.B. Saussure e non disgiunti da altri illustri viaggiatori, ai quali dobbiamo curiose e acute cronache di numerose visite al Monte Bianco, che Ruskin definì una delle «Cattedrali della Terra».

RINGRAZIAMENTI

L'autore tiene a ricordare in particolare Giovanni Bignami (1944-2017), importante astrofisico e divulgatore scientifico, per il suo interesse a questi argomenti quando nessun'altro sembrava ricordare queste vicende.

Le persone che tiene a ringraziare sono:

Jean-Marie Malherb, astronomo dell'osservatorio di Parigi, per i suoi ampi articoli del secolo scorso su tutta la vicenda che ruota attorno agli osservatori del Monte Bianco.

Silvia Tunesi, diplomata all'Accademia di Belle Arti di Brera, per la collaborazione della stesura di queste note.

Elio Antonello, dell'osservatorio astronomico di Brera, per aver arricchito le nostre indagini bibliografiche.

Antonio Giorgilli, fisico e matematico dell'Università Statale di Milano, per aver interpretato e chiarito alcuni aspetti delle strumentazioni tecniche di osservazione.

Mario Carpino, astronomo presso l'osservatorio astronomico di Brera, per comunicazioni pazienti e chiarificatorie su tecniche di osservazione astronomica.

BIBLIOGRAFIA

- Bignami G. (1978). *La scienza “fin-de-siècle” in alta quota. Gli osservatori del M. Bianco.* In: «Rivista del Club Alpino Italiano».
- Id. (2012). *L'esplorazione dello spazio* (Lezione tenuta nel 1998 presso l'Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere di Milano). Milano: Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere.
- Janssen P.J.C. (1892). *Note sur observatoire au Mont Blanc*. In: «Comptes Rendus Acc. Sc. Paris», XII.
- Malherbe J.M. (1987). *Les observatoires du Mont-Blanc en 1900*. In: «L'Astronomie», 101: 115-133.
- Id. (2022). *Jules Janssen, The birth of solar physics, the foundation of Meudon Observatory and the Mont Blanc adventure (1875-1895)*. Paris: Observatoire de Paris-Université Paris Sciences et Lettres (PSL), HAL-03961607.
- Milochau G. (1906). *La grande Lunette de l'Observatoire du Mont-Blanc*. In: «La Nature».
- Sacchi Landriani G. (1988). *L'osservatorio Janssen al Monte Bianco e i contributi di Eiffel e Vaudremer alla sua realizzazione* (Conférence présentée à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris). Milano: Politecnico.
- Id. (2005). *La vetrina di Piazza Ellittica*. Milano: Melusine.

Cos’è la diffusione anomala (e perché è così consueta)

Serena Dipierro, Enrico Valdinoci*

SUNTO – In questa nota esploreremo il concetto di diffusione e vedremo come la sua interpretazione sia cambiata nel tempo. Scopriremo perché la diffusione è un’idea così utile e universale, che funziona sempre... tranne quando non funziona! In quei casi, ci viene in aiuto la “diffusione anomala”, che offre una chiave di lettura diversa e complementare.

PAROLE CHIAVE – Diffusione; Equazione del calore; Laplaciano frazionario.

ABSTRACT – In this note, we will explore the concept of diffusion and see how its interpretation has changed over time. We will discover why diffusion is such a useful and universal idea, one that always works... except when it doesn’t! In those cases, “anomalous diffusion” comes to the rescue, offering a different and complementary perspective.

KEYWORDS – Diffusion; Heat equation; Fractional Laplacian.

PARTE PRIMA – DIFFUSIONE

1. IPSE DIXIT

Secondo Aristotele, tutti gli enti terrestri si muovono verso il “luogo naturale” di appartenenza: la pietra affonda nell’acqua, ma una bolla d’aria sale verso l’alto.

Dispiace dirlo, però Aristotele, qualche volta, aveva torto. Se versiamo pò di latte nel caffè, le particelle tendono ad andare da una zona ad alta concentrazione verso una zona a bassa concentrazione e non sembrano avere nessun luogo naturale da raggiungere (cfr. Fig. 1).

*University of Western Australia, Department of Mathematics and Statistics, 35 Stirling Highway, WA6009 Crawley, Australia. E-mail: serena.dipierro@uwa.edu.au, enrico.valdinoci@uwa.edu.au. Relazione tenuta il 20 giugno 2024.

A parziale discolpa di Aristotele, qualcuno ci ha fatto notare che ai suoi tempi il caffè non esisteva, ma insomma questo fenomeno di “diffusione” in cui il trasporto di materia è determinato da una differenza di concentrazione, e non dalla presunta esistenza di un luogo naturale cui le particelle dovrebbero tendere, poteva essere osservato in altri fenomeni comuni all’epoca, tra cui ad esempio quello di mescolare acqua e vino in un cratero, come era d’uso nei banchetti (il consumo di vino puro era considerato un atteggiamento proprio dei barbari, consentito solo alle divinità; e comunque senza le moderne metodologie di conservazione era possibile al tempo che il vino diventasse di frequente aceto).

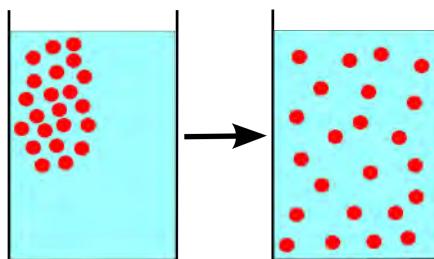


Fig. 1 – Diffusione in un liquido. Immagine di JrPol, Wikipedia, Creative Commons Attribution 3.0 Unported license.

2. DAI DIAMANTI NON NASCE NIENTE...

...dagli errori (in buona fede) nasce, a volte, una teoria scientifica unificante. Questo è il caso della teoria della diffusione, fondata sull’osservazione che la tendenza a “diffondersi” da regioni “congestionate” verso regioni “libere” è comune ai fenomeni più disparati, come l’ossigeno e l’anidride carbonica nei capillari attorno gli alveoli, un prodotto sul mercato, un’idea in una comunità, l’energia di un sistema fisico, il calore di un corpo, gli animali nell’ambiente naturale, eccetera.

Per cui il concetto di diffusione, con le sue tante sfaccettature, è ormai un pilastro portante in matematica, statistica, fisica, biologia, finanza, scienze sociali, ecc., e, in un certo senso, può essere visto come un tassello di un’autentica “teoria del tutto” che cerchi di spiegare fenomeni diversi alla luce dello stesso modello fondamentale.

3. MA COME RENDERE IL CONCETTO DI DIFFUSIONE QUANTITATIVO?

Questa è una domanda basilare, perché con la sola analisi qualitativa potremmo solo dire che le cose “si mischiano”, invece vogliamo capire come/quanto, poter fare predizioni, usare la diffusione per comprendere la realtà circostante, ecc.

3.1. Approccio numero 1: teoria di media

Per modellizzare quantitativamente la diffusione, possiamo assumere che la concentrazione $u(x, t)$ di particelle (in un punto x dello spazio, ad un istante di tempo t) vari in ragione delle concentrazioni nelle vicinanze. Ad esempio, possiamo pensare che la concentrazione ad un istante di tempo successivo, diciamo $t + \tau$, corrisponda alla concentrazione al tempo t aumentata di una quantità proporzionale (secondo una costante positiva c_0) al “*surplus*” di particelle contenuto in una piccola regione attorno al punto x .

In matematica, se $B_\rho(x)$ denota la palla di raggio ρ centrata in x , questa descrizione corrisponde all’equazione

$$u(x, t + \tau) = u(x, t) + c_0 \int_{B_\rho(x)} (u(y, t) - u(x, t)) dy. \quad (1)$$

I parametri τ e ρ in un’equazione di questo tipo sono pensati come incrementi “infinitesimali”, nel tempo e nello spazio rispettivamente. Al fine di rendere questa equazione “sensata” bisogna scegliere questi parametri opportunamente: per esempio, la scelta $\tau = \rho^{d+2}$ conduce alla relazione

$$\partial_t u = c \Delta u, \quad (2)$$

chiamata equazione del calore.¹ Qui sopra, il simbolo ∂_t denota la derivata rispetto al tempo e Δ è l’operatore di Laplace, ovvero la somma delle derivate parziali seconde pure rispetto alle coordinate spaziali:

$$\Delta u = \frac{\partial^2 u}{\partial x_1^2} + \cdots + \frac{\partial^2 u}{\partial x_d^2}.$$

¹In questa notazione, d denota il numero di dimensioni ($d = 3$ nello spazio usuale, ma l’approccio proposto varrebbe in qualsiasi dimensione). L’Appendice A fornisce ulteriori dettagli su come ottenere l’equazione del calore (2) dal modello proposto in (1). La costante c che compare nella (2) è proporzionale alla costante c_0 della (1) ed è chiamata coefficiente di diffusione.

3.2. Approccio numero 2: teoria statistica

Oltre ad aver esplorato l’Australia (all’epoca Nuova Olanda, catalogando oltre 4000 nuove specie vegetali) e aver individuato il nucleo cellulare, Robert Brown è famoso per la scoperta del moto browniano, avendo osservato al microscopio granuli di polline in acqua muoversi in modo continuo e frenetico. Brown non diede una spiegazione precisa per questo fenomeno (che in effetti era stato precedentemente notato anche dal botanico Jan Ingenhousz). Il chimico Leon Gouy ipotizzò per primo che il moto browniano fosse causato dall’agitazione termica degli atomi, ma, come vedremo, per una spiegazione fisica esaustiva ci sarà bisogno del genio di Albert Einstein nel suo momento di forma migliore.

Per comprendere il legame tra il moto browniano e il concetto di diffusione, possiamo considerare la densità di probabilità $u(x, t)$ di trovare una particella nel punto x all’istante di tempo t . Seguendo un moto browniano, una particella seleziona una direzione casuale e si sposta, in un’unità di tempo τ , di un passo lungo h in quella direzione, e poi ripete la stessa procedura per le successive unità di tempo.

In matematica, questo corrisponde a dire che la densità di probabilità $u(x, t + \tau)$ di trovare una particella nel punto x all’istante di tempo $t + \tau$ concide con la sovrapposizione delle probabilità $u(x + h\omega, t)$ di trovare la particella al tempo t nel punto $x + h\omega$, per una qualche direzione ω , moltiplicate per la probabilità di saltare dal punto $x + h\omega$ al punto x nell’unità di tempo (e questa probabilità è la stessa per tutte le possibili direzioni).

Ovvero,

$$u(x, t + \tau) = \int_{\partial B_1} u(x + h\omega, t) d\omega, \quad (3)$$

dove ∂B_1 denota la superficie sferica (cioè l’insieme di tutte le possibili direzioni, che di fatto possono essere rappresentate come vettori di lunghezza unitaria) e la notazione $\int_{\partial B_1}$ è la media su questa superficie sferica (cioè l’integrale su questa superficie, diviso l’area della superficie stessa, che corrisponde alla probabilità di salto).

Sottraendo $u(x, t)$ ad ambo i membri della (3) e dividendo per $\tau = c_0 h^2 \rightarrow 0$, si ottiene di nuovo l’equazione del calore (2).² Questo è interessante in quanto rivela che la diffusione (in quanto trasporto di massa dovuto a differenze di concentrazione) ha anche un fondamento statistico e la combinazione di queste due interpretazioni portò a uno dei più grandi successi della teoria della diffusione, cioè al calcolo del Numero di Avogadro.

²L’Appendice B contiene ulteriori dettagli su come ottenere l’equazione del calore da (3).

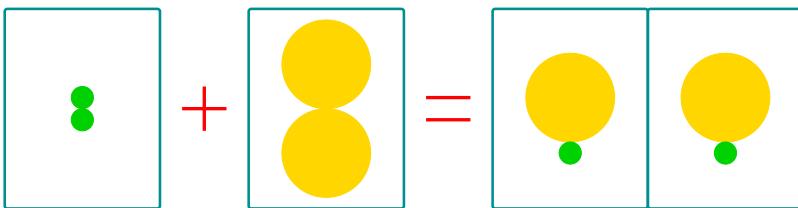


Fig. 2 – Formare l'acido cloridrico, rispettando la Legge di Avogadro. Immagine prodotta dagli autori.

4. COME SI SUOL DIRE, *DURA LEX, SED LEX*

Secondo la Legge di Avogadro, il volume di un gas ideale ad una data pressione e temperatura è proporzionale al numero di particelle (atomi o molecole), indipendentemente dal gas.

La Legge di Avogadro è molto sorprendente, almeno per due motivi. Il primo motivo ha a che fare con la sua interpretazione della struttura della materia, il secondo con la sua impressionante “universalità”. Per capire l'impatto sulla struttura della materia, vale la pena ricordare un esperimento che aveva effettuato Gay-Lussac, il quale, facendo reagire idrogeno H e cloro Cl, ottenne cloruro di idrogeno HCl. E fin qui nulla di strano, chiunque crederebbe che con un po' di H e Cl si possa fare un po' di HCl. La cosa strana, però, era che, all'epoca, ci si aspettava che un certo numero di atomi di idrogeno, contenuti in un dato volume, interagissero con un certo numero di atomi di cloro, contenuti in un volume equivalente, producendo lo stesso volume di cloruro di idrogeno, invece quel che si otteneva era un volume doppio di cloruro di idrogeno.

Allo stesso modo, con due litri di idrogeno e un litro di ossigeno si ottengono due litri di vapore acqueo (non un litro, non tre litri).

La legge di Avogadro spiega questi fenomeni: mostra che i volumi di gas non possono essere semplicemente pensati come scatolette o cubetti, e suggerisce che alcuni gas siano costituiti non da atomi singoli, ma da molecole (biatomiche nel caso dell'idrogeno H₂, del cloro Cl₂, dell'ossigeno O₂, ecc.). Per ogni coppia di molecole H₂ e Cl₂ si formano due molecole di HCl (si veda Fig. 2), e per due molecole di H₂ e una di O₂ si formano due molecole di H₂O (si veda Fig. 3).

La seconda proprietà sorprendente della Legge di Avogadro riguarda il suo carattere universale: la legge è valida per tutti i gas (ideali), indipendentemente dal tipo di gas e dalla grandezza o peso delle sue molecole.

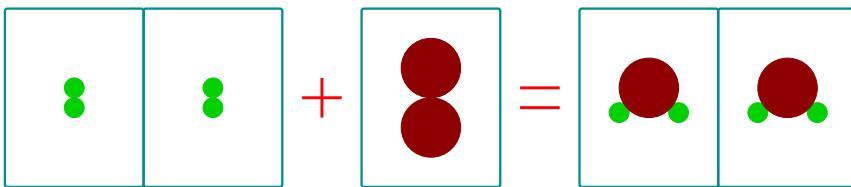


Fig. 3 – Formare l’acqua, rispettando la Legge di Avogadro. Immagine prodotta dagli autori.

In un certo senso, tuttavia, la profondità della Legge di Avogadro delinea il confine della sua capacità: la Legge di Avogadro stabilisce una relazione di proporzionalità universale, dicendoci che il numero di particelle di un gas è *proporzionale* al suo volume, ma non ci dice *quante particelle* di gas ci sono in un dato volume. La Legge di Avogadro ci dice che la quantità di sostanza (ad esempio, misurata in “mole”) è proporzionale al volume, ma non ci dice quante molecole corrispondono a questa quantità di sostanza.

Per sapere questa informazione, dovremmo conoscere il numero di molecole contenute in una mole, che è chiamato Numero di Avogadro (qui denotato come N_A), ma questa sembra un’impresa titanica, perché ci aspettiamo sia un numero grandissimo, e mica possiamo perdere tempo a contare molecole una ad una...

5. UNA GRANDE MENTE

Una vecchia pubblicità sosteneva che «per dipingere una parete grande, non ci vuole un pennello grande, ma un grande pennello». Per cui, per contare un numero grande di particelle, ci vuole una grande mente, quella di Albert Einstein.

Einstein si era iscritto all’ETH di Zurigo nel 1896 (l’anno prima era stato bocciato all’esame di ammissione per un’insufficienza nel test di francese) e laureato nel 1900, classificandosi quarto su cinque promossi. A differenza degli altri laureati, non ottenne un posto come assistente universitario e accettò un lavoro all’ufficio brevetti di Berna. In questo frangente, nell’*annus mirabilis* 1905 Einstein scrive quattro lavori che cambieranno la storia della scienza, uno sull’effetto fotoelettrico (che lo condurrà al Premio Nobel nel 1921), uno sulla relatività ristretta e uno sull’equivalenza di massa ed energia, contenente la famosa formula $E = mc^2$.

Questi sono tre. E il quarto? Il quarto forse è il meno famoso, e ha anche un titolo non proprio “accattivante” (Einstein, 1905), ma questo è quello che fa al caso nostro, perché in questo lavoro Einstein fornì una spiegazione fisica esauriente del moto browniano, legandolo all’agitazione termica delle molecole d’acqua che urtano i granelli in sospensione, e calcolò il Numero di Avogadro.

O meglio, non calcolò il suo valore numerico, su quello torneremo in seguito, dimostrò invece una formula matematica che permetteva di calcolarlo a partire da quantità macroscopiche esplicitamente verificabili, dando così anche una fondazione definitiva della teoria della diffusione.

La formula di Einstein è

$$N_A = \frac{RTt}{3\pi\mu a X^2(t)}, \quad (4)$$

dove a è il raggio delle particelle, μ la viscosità del fluido, R la costante dei gas, T la temperatura e $X^2(t)$ la distanza quadratica media delle particelle al tempo t .

L’idea di Einstein per ottenere (4) è profonda ed elegante, ma in fondo abbastanza semplice (e quindi davvero geniale), tanto semplice da poter essere raccontata (forse un po’ maldestramente) in queste poche pagine. Si tratta di usare due ingredienti per scrivere una quantità in due modi diversi, uguagliare e semplificare (i vecchi trucchi dell’algebra tornano utili a volte, ma serve un guizzo). I due ingredienti usati sono il concetto di attrito viscoso su una pallina in movimento in un fluido (che era stato quantificato da George Gabriel Stokes, baronetto per meriti scientifici, corrispondente a una forza $F = 6\pi\mu av$, dove v rappresenta la velocità del fluido) e la forza di pressione osmotica (determinata da Jacobus Henricus van ’t Hoff Jr., primo Premio Nobel in Chimica, che può essere vista come una riformulazione della Legge dei gas perfetti $pV = nRT$, dove p è la pressione, V è il volume, e n il numero di moli).

In questo modo, denotando con u la densità delle particelle in moto attraverso il fluido, da una parte si osserva che

$$\begin{aligned} F &= \frac{\partial_x p}{u} && \text{perché la forza su una particella corrisponde alla variazione di pressione per unità di massa} \\ &= \frac{1}{u} \partial_x \frac{nRT}{V} && \text{avendo usato la legge di pressione osmotica} \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{u} \partial_x \frac{NRT}{NAV}$$

perché, per definizione di Numero di Avogadro,
il numero di particelle N è uguale
al numero di moli n
per il Numero di Avogadro N_A

$$= \frac{1}{u} \partial_x \frac{uRT}{NA}$$

perché, per definizione, la densità u di particelle,
è il numero di particelle N
diviso il volume occupato V

$$= \frac{RT}{NA} \frac{\partial_x u}{u}$$

perché R e N_A sono costanti
e la temperatura T è mantenuta
costante durante il processo. (5)

D'altra parte, il flusso ϕ di particelle attraverso una sezione S del condotto è dato dal numero di particelle dN che passano nell'unità di tempo dt . Considerando un volume infinitesimale del condotto $dV = S dx$, possiamo scrivere questo flusso come

$$\phi = \frac{dN}{dt} = \frac{u dV}{dt} = \frac{uS dx}{dt} = uSv. \quad (6)$$

Il flusso ϕ di particelle tuttavia è anche la variazione del numero totale di particelle situate nel condotto prima della sezione considerata, che pensiamo situata lungo la coordinata x . Il numero totale di queste particelle prima di x corrisponde al totale della densità di particelle per il volume del condotto prima di x , ovvero (considerando un modello di tubo orizzontale “infinitamente lungo”)

$$S \int_{-\infty}^x u$$

e il corrispondente flusso è quindi

$$\phi = \partial_t \left(S \int_{-\infty}^x u \right) = S \int_{-\infty}^x \partial_t u = cS \int_{-\infty}^x \partial_{xx} u, \quad (7)$$

dove abbiamo usato l'equazione di diffusione (2) per descrivere il moto browniano delle particelle nel fluido.

Confrontando (6) e (7) vediamo che

$$uv = \frac{\phi}{S} = c \int_{-\infty}^x \partial_{xx} u. \quad (8)$$

Otteniamo quindi

$$\begin{aligned}
 F &= 6\pi\mu av && \text{per la Legge di Stokes} \\
 &= \frac{6\pi\mu auv}{u} && \text{avendo moltiplicato e diviso per } u \\
 &= \frac{6\pi\mu ac}{u} \int_{-\infty}^x \partial_{xx} u && \text{avendo usato la (8)} \\
 &= \frac{6\pi\mu ac}{u} \partial_x u && \text{perché un integrale "cancella" una derivata.}
 \end{aligned}$$

Confrontando questa relazione con la (5), abbiamo che

$$\frac{RT}{N_A} \frac{\partial_x u}{u} = F = \frac{6\pi\mu ac}{u} \partial_x u$$

e quindi, risolvendo in N_A e semplificando,

$$N_A = \frac{RT}{6\pi\mu ac}. \quad (9)$$

Questa è (quasi) la formula desiderata! La buona notizia è che abbiamo trovato in questo modo una relazione esplicita per il Numero di Avogadro. La cattiva notizia è che questa formula coinvolge ancora una quantità "ignota" e forse non direttamente misurabile, cioè il coefficiente di diffusione c . Ma poco male, possiamo ricavare questo coefficiente misurando la distanza percorsa, in media, da una particella. Infatti, si può controllare che una soluzione dell'equazione di diffusione (2) (in una variabile x , corrispondente all'elongazione nel tubo) è data dalla Gaussiana³

$$G(x, t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi ct}} \exp\left(-\frac{|x|^2}{4ct}\right). \quad (10)$$

³Torneremo sulla Gaussiana nella Sezione 7. A livello notazionale, per gli amanti della teoria della probabilità, è utile osservare che la Gaussiana (a media nulla) in termini probabilistici è a volte scritta come

$$\mathcal{N}_\sigma(x) := \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{|x|^2}{2\sigma^2}\right),$$

dove la quantità $\sigma > 0$ è chiamata "varianza" e descrive lo scarto quadratico dalla media aritmetica, in quanto

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x^2 \mathcal{N}_\sigma(x) dx = \sigma^2.$$

Si noti l'analogia con (11).

Questa soluzione descrive, in media, la densità di probabilità di una particella soggetta a moto browniano che comincia la sua traiettoria casuale nell'origine delle coordinate. La distanza quadratica media delle particelle al tempo t è quindi data dalla quantità

$$\begin{aligned}
 X^2(t) &= \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 G(x, t) dx \\
 &= \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x^2}{\sqrt{4\pi ct}} \exp\left(-\frac{|x|^2}{4ct}\right) dx \\
 &= \frac{4ct}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} y^2 \exp(-|y|^2) dy \\
 &= 2ct.
 \end{aligned} \tag{11}$$

Inserendo questa relazione in (9) si ottiene (4).

6. COME VINCERE IL NOBEL

La grandezza della relazione in (4) è che riduce il calcolo del Numero di Avogadro alla misurazione di quantità macroscopiche. Questa misurazione, soprattutto all'inizio del Ventesimo secolo, era comunque abbastanza delicata, richiedendo la preparazione accurata di sferette identiche e di raggio noto. La prima verifica della relazione di Einstein arrivò nel 1908 e venne effettuata da Jean Baptiste Perrin, che per questo fu insignito⁴ nel 1926 del Premio Nobel. Per una presentazione dettagliata dell'esperimento di Perrin e del suo legame con la teoria fondata da Einstein si veda Newburgh *et al.* (2006) e Cossetto (2012).

⁴Nel discorso di premiazione, disponibile su <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1926/ceremony-speech/>, consultato il 18 settembre 2025, si riconosce il contributo di Einstein al lavoro di Perrin: «The object of the researches of Professor Jean Perrin which have gained for him the Nobel Prize in Physics for 1926 was to put a definite end to the long struggle regarding the real existence of molecules. [...] His measurements on the Brownian movement showed that Einstein's theory was in perfect agreement with reality. Through these measurements a new determination of Avogadro's number was obtained».

PARTE SECONDA – DIFFUSIONE ANOMALA

7. UN CAMBIAMENTO DI PARADIGMA?

Il Numero di Avogadro ha 24 cifre. E azzeccare un numero di 24 cifre non succede mica per caso. Per cui, all'inizio del Novecento, possiamo pensare che la diffusione sia diventata un "paradigma" consolidato. Una delle cose belle della scienza, però, consiste nella sua capacità di andare oltre le certezze, di mettersi sempre in discussione, di provare sempre qualcosa di nuovo. A un'analisi più approfondita, sembra che la diffusione standard abbia qualche problema a descrivere accuratamente i fenomeni più complessi in natura.

Un esempio interessante di possibili discrepanze tra il modello di diffusione classico e misurazioni concrete si osserva nei mercati finanziari, come puntualizzato in Tintner (1940) e Mandelbrot (1967). Raccogliendo le oscillazioni (ad esempio mensili) di un prodotto (ad esempio la lana) ci possiamo aspettare che (in assenza di altri fenomeni) la media di queste oscillazioni sia nulla e che la maggior parte di queste oscillazioni sia "piccola" (la lana tra un mese costerà forse un po' di più, forse un po' di meno di quel che costa oggi). Potremmo quindi disegnare un istogramma in cui sull'asse orizzontale si pone la variazione di prezzo (che può essere positiva o negativa, e "discretizzata" in intervalli di prezzo, ad esempio \$2.50) e in verticale il numero di casi in cui tale variazione viene realizzata (all'interno della discretizzazione scelta). L'istogramma della Fig. 5 a pagina 167 di Tintner (1940) conferma la nostra intuizione che questa distribuzione di prezzi sia in effetti circa a media nulla e che la maggior parte dei valori "alti" corrispondano a variazioni piccole (c'è un picco nello zero delle variazioni).

Se crediamo al paradigma della diffusione classica, dobbiamo assumere che questo istogramma rappresenta una discretizzazione della Gaussiana (10). Per trovare la Gaussiana che approssima meglio l'istogramma, potremmo pensare di calcolare la varianza dei dati raccolti e scegliere quindi la Gaussiana corrispondente alla varianza trovata (secondo la terminologia discussa nella nota 3). Il risultato è quello descritto in Tintner (1940): la Gaussiana selezionata non è per nulla soddisfacente, è troppo "schiacciata" e manca completamente i valori più alti della distribuzione, correspondenti proprio alle piccole oscillazioni di prezzo che sappiamo rappresentare il caso più frequente!

Così non va bene. Ma cos'è andato storto? Per svelare il mistero, supponiamo per un attimo che la varianza σ dei dati raccolti sia molto grande. Questo (ricordando la notazione nella nota 3) produrrebbe una Gaussiana molto

schiacciata, proprio come succede in Tintner (1940). Ciò suggerirebbe che la variazione dei prezzi rappresentata in Tintner (1940) potrebbe avere sostanzialmente variazione “infinita” (nell’astrazione matematica di poter raccogliere infiniti dati), per cui l’approssimazione ottenuta con la Gaussiana risulta insoddisfacente, perché troppo schiacciata, e raccogliere ulteriori dati non risolverebbe la questione.

Ma è veramente possibile che una varianza sia infinita? Questa è una domanda spinosa, che ha prodotto vari disaccordi tra scienziati di valore; si veda ad esempio Mandelbrot (1961) e le referenze ivi citate. Diciamocelo, chi lascia la strada vecchia per la nuova, ecc.: abbandonare la diffusione classica, che tanti successi ha riscosso, rischia di essere un salto nel buio:

la diffusione classica ha una chiara
interpretazione in termini statistici
(come descritto nella Sezione 3.2) (12)

e

la Gaussiana è una distribuzione “stabile”
(cioè la somma di variabili aleatorie
indipendenti con distribuzioni Gaussiane
ha essa stessa una distribuzione Gaussiana), (13)

per cui nessuna mente razionale abbandonerebbe il paradigma della diffusione classica a meno che queste due proprietà non vengano preservate anche in caso di varianze infinite!

8. UN PARADIGMA ALTERNATIVO

In realtà la maggior parte delle volte la scienza rivoluzionaria non cambia un paradigma: nuove idee, nuove spiegazioni, nuovi paradigmi emergono e coesistono con le strutture precedenti, per comprendere sfaccettature diverse della complessità del mondo che ci circonda. Quindi, anche in questo caso, l’obiettivo non è “affondare” il paradigma della diffusione classica, quanto quello di fondare un’alternativa coerente, che possa trattare anche fenomeni diversi.

Per questo scopo comunque è necessario capire se (12) e (13) rimangono valide, in qualche senso, in un nuovo paradigma che comprenda anche distribuzioni con infinita varianza e possa rendere giustizia al dilemma offerto da Tintner, 1940. Anzitutto, situazioni di questo tipo furono considerate da Benoît Mandelbrot (il famoso matematico noto per i suoi lavori sulla geometria

frattale) alla luce della teoria delle distribuzioni “ α -stabili” introdotta da Paul Lévy (Lévy, 1925; Mandelbrot, 1967). In poche parole, l’idea di Lévy era che la proprietà (13) non fosse esclusiva delle Gaussiane: in sostanza, la (13) segue dal fatto che la funzione caratteristica di una variabile aleatoria Gaussiana è anch’essa Gaussiana, e che il prodotto di Gaussiane è anch’essa Gaussiana, ma una situazione similmente “stabile” si produrrebbe se le funzioni caratteristiche delle variabili aleatorie in questione non fossero Gaussiane, ma oggetti del tipo $\exp(-|\xi|^\alpha)$, dove il parametro α varia tra 0 e 2 (con il caso della diffusione classica riprodotto quando $\alpha = 2$).

Con questa formulazione, è possibile riprodurre la “stabilità” osservata nella (13) (tuttavia, la varianza corrispondente ai casi $\alpha \in (0, 2)$ è infinita): si veda l’Appendice C per ulteriori dettagli.

Grazie al lavoro di Lévy è anche possibile dare una solida interpretazione statistica a una variante⁵ “anomala” e “nonlocale” dell’equazione di diffusione (2), che si può scrivere come

$$\partial_t u = -(-\Delta)^{\alpha/2} u, \quad (14)$$

dove $(-\Delta)^{\alpha/2}$ rappresenta l’operatore di Laplace frazionario, con $\alpha \in (0, 2)$. Si veda l’Appendice D per ulteriori dettagli.

9. L’ANOMALO È LA NORMA

La diffusione anomala non è stata riscontrata solo nei modelli finanziari descritti in Tintner, 1940. Anzi, è apparsa in varie occasioni in modelli di matematica biologica, anche per descrivere (tra varie controversie) il modo con cui varie specie animali si muovono nell’ambiente (Hapca *et al.*, 2009; Seuront *et al.*, 2014; Harasti *et al.*, 2015; Mann *et al.*, 2015; Broadbridge *et al.*, 2022), in modelli di trasmissione neurale (Lamanna *et al.*, 2024), nei nanotubi di carbonio (Wang e Chen, 2022), vortici ottici (Gong *et al.*, 2024), ecc., e l’interpretazione stessa dei dati sperimentali legati a meccanismi di diffusione anomala è spesso alquanto complessa e richiede a volte l’uso di intelligenza artificiale (Muñoz-Gil *et al.*, 2021).

⁵In queste poche pagine ci occuperemo, e solo in maniera superficiale, di un tipo di diffusione anomala, corrispondente a un’equazione nonlocale nelle variabili spaziali. Altre diffusioni anomale emergono naturalmente in molti altri contesti, ad esempio in presenza di operatori di diffusione nonlineari, equazioni di mezzi porosi, ecc., si veda ad esempio (Vázquez, 2007; Daskalopoulos e Kenig, 2007) e le referenze ivi contenute per maggiori informazioni su altri tipi di diffusione anomala.

Una pittoresca visualizzazione dei possibili “lunghi salti” legati al concetto di diffusione anomala potrebbe essere offerta dal sito “Where's George?” <https://www.wheresgeorge.com/>. George in questo caso sarebbe George Washington, che campeggia sulla banconota da un dollaro americano. Il sito traccia la circolazione geografica di alcune banconote e, secondo Brockmann *et al.* (2006) «the distribution of travelling distances decays as a power law, indicating that trajectories of bank notes are reminiscent of scalefree random walks known as Lévy flights».⁶

10. L'IMPORTANZA DI ESSERE ANOMALO: TUTTE LE FUNZIONI SONO α -ARMONICHE

Ma la diffusione anomala è poi così anomala? Non è che alla fine, al di là di qualche dettaglio tecnico, il mondo “anomalo” finisce per essere una qualche copia di quello classico, con qualche piccola deformazione che interessa al massimo qualche matematico con troppo tempo a disposizione?

Dunque, anzitutto, la diffusione anomala presenta delle differenze strutturali profonde e significative, si veda ad esempio la Sezione 2 in Abatangelo e Valdinoci (2019) per una lista di dieci differenze tra l'operatore classico di Laplace e la sua versione nonlocale in (14).

Una delle differenze più significative, a nostro avviso, consiste nel fatto che «tutte le funzioni sono localmente α -armoniche, a meno di un piccolo errore», come mostrato in Dipierro *et al.* (2017).

Per capire questo enunciato, consideriamo anzitutto il caso classico. Una funzione “armonica” (cioè con Laplaciano nullo) è davvero molto speciale. In particolare, non può avere massimi o minimi locali: ad esempio, un paraboloida non può essere armonico, perché il suo Laplaciano è una costante (non nulla), e in una dimensione le funzioni armoniche sono solo rette (o, localmente, porzioni di rette).

Il caso dell' α -Laplaciano è invece completamente diverso. A meno di un piccolo errore, ogni funzione può essere localmente α -armonica. In particolare, funzioni α -armoniche possono sviluppare massimi e minimi locali, funzioni α -armoniche possono essere localmente molto simili a paraboloidi, o a quello che vogliamo noi. Più precisamente, data una qualsiasi regione dello

⁶Ad esempio, secondo Where's George? Bill tracking report, la banconota da un dollaro «Serial# L6031—5A Series: 2001 [...] has traveled at least 27,775 Miles in 8 Yrs, 242 Days, 16 Hrs, 49 Mins at an average of 8.8 Miles per day. The bill is now 1,528 Miles from its starting location» (<https://wg4.us/b:ovulyvTrS>, consultato il 18 settembre 2025).

spazio, una qualsiasi funzione e un qualsiasi errore fissato, possiamo trovare una funzione α -armonica nella regione assegnata che dista, in questa regione, dalla funzione data meno dell'errore assegnato.

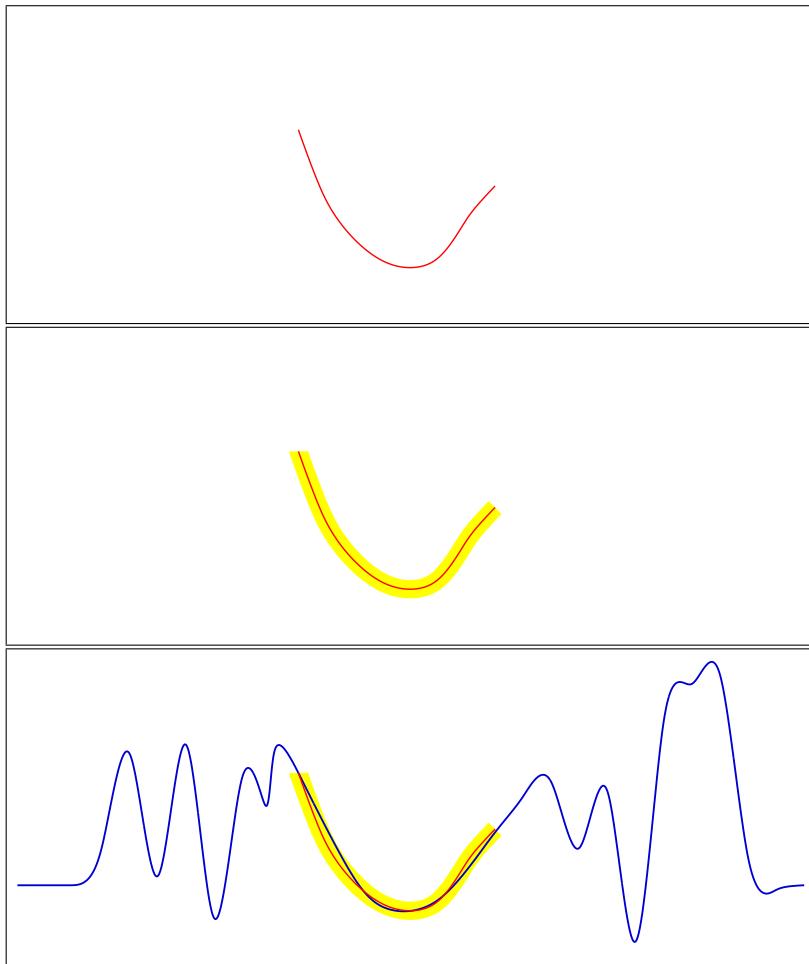


Fig. 4 – La funzione data u_0 (in rosso), un ε -intorno della funzione data (in giallo), la funzione α -armonica u_ε . Immagine prodotta dagli autori.

O se preferite, data una funzione qualsiasi in una regione qualsiasi, a meno di “aggiustarla” arbitrariamente poco in questa regione e “completarla” opportunamente fuori da questa regione, possiamo sempre ottenere una funzione α -armonica, si veda Fig. 4.

In matematiche:

Teorema 1 *Dato $\alpha \in (0, 2)$, data una palla $B \subset \mathbb{R}^d$, data una funzione $u_0 \in C^2(\overline{B})$ e dato $\varepsilon > 0$, esiste una funzione $u_\varepsilon \in C^2(\overline{B}) \cap C_c(\mathbb{R}^d)$ tale che*

$$\begin{cases} (-\Delta)^{\alpha/2} u_\varepsilon = 0 \text{ in } B, \\ \|u - u_\varepsilon\|_{C^2(\overline{B})} \leq \varepsilon. \end{cases}$$

Saremo di parte, ma secondo noi il Teorema 1 è proprio un bel teorema. E come tutti i bei teoremi ha anche delle belle applicazioni. Per esempio, una delle sue conseguenze è che una popolazione che utilizza una strategia di insediamento nonlocale può utilizzare al meglio le risorse ambientali in una regione strategica assegnata, riducendo all'osso gli sprechi, cosa che invece non è possibile a popolazioni che utilizzano il paradigma diffusivo classico.

Per descrivere meglio questo risultato, ricordiamo l'equazione logistica della dinamica delle popolazioni. In questo contesto, possiamo pensare di avere una densità di popolazione $u(x, t)$ che evolve in base alle seguenti considerazioni:

- se la densità di popolazione è bassa, il tasso di incremento della popolazione è proporzionale alla risorsa ambientale $\rho(x)$;
- se la densità di popolazione è troppo alta, si innescano meccanismi di competizione, che impediscono crescite smisurate della popolazione stessa;
- la popolazione si sposta nell'ambiente rispetto a un'operatore di diffusione \mathcal{L} .

In matematiche, questo si può tradurre nell'equazione

$$\partial_t u = \mathcal{L}u + (\rho - u)u \quad \text{in } B, \tag{15}$$

dove la palla B è la regione strategica che stiamo considerando.

In una condizione di equilibrio, la soluzione u è stazionaria (cioè indipendente dal tempo) e la (15) si riduce a

$$-\mathcal{L}u = (\rho - u)u \quad \text{in } B, \tag{16}$$

con $u = u(x)$.

Ora, una delle conseguenze del Teorema 1 è che la situazione è molto diversa se la diffusione della popolazione è classica (con \mathcal{L} uguale all'operatore di Laplace) o nonlocale (in cui \mathcal{L} è uguale a $-(-\Delta)^{\alpha/2}$ con $\alpha \in (0, 2)$). Infatti, la popolazione nonlocale può utilizzare ottimamente quasi tutta la risorsa, mentre quella classica, in generale, no. Più precisamente, nel caso in cui $\mathcal{L} = -(-\Delta)^{\alpha/2}$ con $\alpha \in (0, 2)$, data $\rho \in C^2(\mathbb{R}^d)$ con $\rho = 0$ fuori da B , e dato $\varepsilon > 0$ piccolo a piacere, esiste una risorsa ρ_ε vicina a quella data (nel senso che $\|\rho - \rho_\varepsilon\|_{L^\infty(\overline{B})} \leq \varepsilon$) e una soluzione u_ε della corrispondente equazione logistica nonlocale

$$(-\Delta)^{\alpha/2}u_\varepsilon = (\rho_\varepsilon - u_\varepsilon)u_\varepsilon \quad \text{in } B, \quad (17)$$

con $u_\varepsilon = 0$ su ∂B e in grado di consumare tutta la risorsa senza sprechi (cioè $u_\varepsilon \geq \rho_\varepsilon$ in B ; si veda l'Appendice E per una dimostrazione di questo fatto).

Questa proprietà è tipica esclusivamente della diffusione nonlocale e un risultato del genere non è vero nel caso della diffusione classica, si veda l'Appendice F.

Varie applicazioni di questo tipo della teoria della diffusione nonlocale a modelli di biologia sono state proposte in Caffarelli *et al.* (2017).

APPENDICI

A. DALLA (1) ALL'EQUAZIONE DEL CALORE

Per vedere come la (1) produca la (2), possiamo assumere, a meno di traslazioni spaziali, che $x = 0$, dividere per $\tau = \rho^{d+2}$ e prendere il limite per $\tau \rightarrow 0$. Effettuiamo il calcolo nel caso unidimensionale $d = 1$ (il caso multidimensionale non è molto più difficile, ma richiede la cancellazione di alcuni termini per motivi di “simmetria”).

In questo modo, dalla (1) si ottiene, almeno formalmente,

$$\begin{aligned} \partial_t u(0, t) &= \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{u(0, t + \tau) - u(0, t)}{\tau} \\ &= \lim_{\rho \rightarrow 0} \frac{c_0}{\rho^3} \int_{-\rho}^{\rho} (u(y, t) - u(0, t)) dy. \end{aligned}$$

Ora, uno sviluppo di Taylor del tipo

$$u(y, t) = u(0, t) + \partial_x u(0, t) y + \frac{1}{2} \partial_x^2 u(0, t) y^2 + O(|y|^3)$$

conduce a

$$\partial_t u(0, t) = \lim_{\rho \rightarrow 0} \frac{c_0}{\rho^3} \int_{-\rho}^{\rho} \left(\partial_x u(0, t) y + \frac{1}{2} \partial_x^2 u(0, t) y^2 + O(|y|^3) \right) dy.$$

La funzione che associa a y la quantità $\partial_x u(0, t) y$ è dispari (cambiando il segno di y , cambiamo il segno di questa quantità), per cui il suo contributo sull'intervallo simmetrico è, in media, nullo, infatti

$$\int_{-\rho}^{\rho} \partial_x u(0, t) y dy = \partial_x u(0, t) \left(\frac{\rho^2}{2} - \frac{(-\rho)^2}{2} \right) = 0.$$

Inoltre, se y appartiene all'intervallo $(-\rho, \rho)$, abbiamo che $|y|^3 \leq \rho^3$ e quindi

$$\int_{-\rho}^{\rho} O(|y|^3) dy = O(\rho^4).$$

Da queste considerazioni, vediamo che

$$\begin{aligned} \partial_t u(0, t) &= \lim_{\rho \rightarrow 0} \frac{c_0}{2\rho^3} \int_{-\rho}^{\rho} \partial_x^2 u(0, t) y^2 dy + O(\rho) \\ &= \lim_{\rho \rightarrow 0} \frac{c_0}{2\rho^3} \int_{-\rho}^{\rho} \partial_x^2 u(0, t) y^2 dy \\ &= \frac{c_0}{3} \partial_x^2 u(0, t), \end{aligned}$$

che corrisponde alla (2) con, in questo caso, $c := \frac{c_0}{3}$.

B. DALLA (3) ALL'EQUAZIONE DEL CALORE

Come nell'Appendice A, effettuiamo il calcolo nel caso unidimensionale $d = 1$ (il caso multidimensionale non è molto più difficile, ma richiede la cancellazione di alcuni termini per motivi di "simmetria").

In questo caso, la palla unitaria unidimensionale è il segmento $(-1, 1)$, il cui bordo sono i due punti -1 e $+1$, quindi il membro di destra della (3) diventa

$$\frac{u(x+h, t) + u(x-h, t)}{2}.$$

Allora, sottraendo $u(x, t)$ ad ambo i membri della (3), dividendo per $\tau = h^2$ e prendendo il limite abbiamo che

$$\begin{aligned}\partial_t u(x, t) &= \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{u(x, t + \tau) - u(x, t)}{\tau} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{u(x + h, t) + u(x - h, t) - 2u(x, t)}{2h^2} \\ &= \frac{1}{4} \partial_x^2 u(x, t),\end{aligned}$$

che corrisponde alla (2) con, in questo caso, $c := \frac{1}{4}$.

C. DISTRIBUZIONI STABILI E (13)

Consideriamo due variabili aleatorie X e \bar{X} . Assumiamo che siano indipendenti e che

X e \bar{X} abbiano funzioni caratteristiche uguali rispettivamente a $\exp(-|\kappa\xi|^\alpha)$ e $\exp(-|\bar{\kappa}\xi|^\alpha)$, (18)

con $\kappa, \bar{\kappa} > 0$ e $\alpha \in (0, 2]$. Consideriamo anche la somma $X_\star = X + \bar{X}$ di queste variabili aleatorie.

Mostriamo che

X_\star ha funzione caratteristica uguale a
 $\exp(-|\kappa_\star\xi|^\alpha)$, con $\kappa_\star = (\kappa^\alpha + \bar{\kappa}^\alpha)^{1/\alpha}$. (19)

Questa affermazione costituisce un valido analogo della “stabilità” introdotta in (13) per la diffusione classica (corrispondente a $\alpha = 2$) nel caso di distribuzioni con varianza infinita (corrispondente a $\alpha \in (0, 2)$).

Per convincerci della (19), osserviamo che (denotando la funzione caratteristica nello spazio di probabilità con la lettera \mathcal{C}),

$$\begin{aligned}\mathcal{C}_{X_\star}(\xi) &:= \int e^{2\pi i \xi X_\star} d\mathbb{P} = \int e^{2\pi i \xi(X + \bar{X})} d\mathbb{P} \\ &= \int e^{2\pi i \xi X} e^{\pi i \xi \bar{X}} d\mathbb{P} = \int e^{2\pi i \xi X} d\mathbb{P} \int e^{2\pi i \xi \bar{X}} d\mathbb{P},\end{aligned}$$

in cui l’ultima uguaglianza è dovuta all’indipendenza delle variabili aleatorie X e \bar{X} .

Quindi, usando (18),

$$\begin{aligned}\mathcal{C}_{X_*}(\xi) &= \int e^{2\pi i \xi X} d\mathbb{P} \int e^{2\pi i \bar{X}} d\mathbb{P} = \mathcal{C}_X(\xi) \mathcal{C}_{\bar{X}}(\xi) \\ &= \exp(-|\kappa \xi|^\alpha) \exp(-|\bar{\kappa} \xi|^\alpha) = \exp(-(|\kappa|^\alpha + |\bar{\kappa}|^\alpha)|\xi|^\alpha),\end{aligned}$$

che conduce alla (19).

D. INTERPRETAZIONE STATISTICA DELL'EQUAZIONE NONLOCALE DEL CALORE

Questa è una variante “a lungo raggio” dell’Appendice B. Consideriamo la densità di probabilità $u(x, t)$ di trovare una particella nel punto x al tempo t e scriviamo che $u(x, t + \tau)$ corrisponde alla media delle densità di probabilità $u(x \pm hr, t)$ di trovare una particella in un punto $x \pm hr$ al tempo t moltiplicate per la densità di probabilità $\mathbb{P}(r)$ corrispondente a un salto di lunghezza r (dove τ e h sono piccoli incrementi temporali e spaziali, rispettivamente):

$$u(x, t + \tau) = \frac{1}{2} \int_0^{+\infty} (u(x + hr, t) + u(x - hr, t)) \mathbb{P}(r) dr.$$

Sottraendo $u(x, t)$ ad ambo i membri, dividendo per $\tau = h^\alpha$ e passando formalmente al limite, otteniamo

$$\begin{aligned}&\partial_t u(x, t) \\ &= \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{u(x, t + \tau) - u(x, t)}{\tau} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{2h^\alpha} \int_0^{+\infty} (u(x + hr, t) + u(x - hr, t) - 2u(x, t)) \mathbb{P}(r) dr \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{2h^{\alpha+1}} \int_0^{+\infty} (u(x + y, t) + u(x - y, t) - 2u(x, t)) \mathbb{P}\left(\frac{y}{h}\right) dy.\end{aligned}\tag{20}$$

In questo caso, la probabilità di salto della particella è determinata da una distribuzione α -stabile come quelle descritte nell’Appendice C, con $\alpha \in (0, 2)$.

Supponiamo quindi che la corrispondente funzione caratteristica sia

$$\exp(-|\kappa \xi|^\alpha),$$

con $\kappa > 0$.

Allora,

$$\begin{aligned}\mathbb{P}(X \in [r, r + \rho]) &= \mathbb{P}\left(\frac{X - r}{\rho} - \frac{1}{2} \in \left[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right]\right) \\ &= \int \chi_{[-1/2, 1/2]}\left(\frac{X - r}{\rho} - \frac{1}{2}\right) d\mathbb{P}. \quad (21)\end{aligned}$$

Osserviamo ora che per una funzione (liscia e a decrescenza rapida) φ possiamo considerare la Trasformata di Fourier e ottenere che

$$\begin{aligned}\int \varphi\left(\frac{X - r}{\rho} - \frac{1}{2}\right) d\mathbb{P} &= \int \left(\int_{-\infty}^{+\infty} \widehat{\varphi}(\xi) e^{2\pi i \left(\frac{X-r}{\rho} - \frac{1}{2}\right) \xi} d\xi \right) d\mathbb{P} \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \widehat{\varphi}(\xi) \left(\int e^{2\pi i \frac{\xi}{\rho} X} d\mathbb{P} \right) e^{-2\pi i \left(\frac{r}{\rho} + \frac{1}{2}\right) \xi} d\xi \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \widehat{\varphi}(\xi) \mathcal{C}_X\left(\frac{\xi}{\rho}\right) e^{-2\pi i \left(\frac{r}{\rho} + \frac{1}{2}\right) \xi} d\xi \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \widehat{\varphi}(\xi) \exp\left(-\frac{\kappa^\alpha |\xi|^\alpha}{\rho^\alpha}\right) e^{-2\pi i \left(\frac{r}{\rho} + \frac{1}{2}\right) \xi} d\xi \\ &= \rho \int_{-\infty}^{+\infty} \widehat{\varphi}(\rho\eta) \exp(-\kappa^\alpha |\eta|^\alpha) e^{-2\pi i (r + \frac{\rho}{2})\eta} d\eta \\ &= \rho \int_{-\infty}^{+\infty} \widehat{\varphi}(0) \exp(-\kappa^\alpha |\eta|^\alpha) e^{-2\pi i r\eta} d\eta + o(\rho) \\ &= \rho \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(x) dx \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-2\pi i \eta r) \exp(-\kappa^\alpha |\eta|^\alpha) d\eta + o(\rho).\end{aligned}$$

Applicando, con un po' di flessibilità analitica, questa osservazione con

$$\varphi := \chi_{[-1/2, 1/2]},$$

si ottiene da (21) che

$$\mathbb{P}(X \in [r, r + \rho]) = \rho \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-2\pi i \eta r) \exp(-\kappa^\alpha |\eta|^\alpha) d\eta + o(\rho).$$

Possiamo allora determinare la corrispondente densità di probabilità

$$\mathbb{P}(r) = \left. \frac{d}{d\rho} (\mathbb{P}(X \in [r, r + \rho])) \right|_{\rho=0}$$

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-2\pi i \eta r) \exp(-\kappa^\alpha |\eta|^\alpha) d\eta,$$

che è la Trasformata di Fourier della funzione caratteristica.

Notiamo che, integrando per parti e cambiando variabile $\mu := \frac{\eta y}{h}$,

$$\begin{aligned} \mathbb{P}\left(\frac{y}{h}\right) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{2\pi i \eta y}{h}\right) \exp(-\kappa^\alpha |\eta|^\alpha) d\eta \\ &= 2 \int_0^{+\infty} \cos\left(\frac{2\pi \eta y}{h}\right) \exp(-\kappa^\alpha \eta^\alpha) d\eta \\ &= \frac{h}{\pi y} \int_0^{+\infty} \frac{d}{d\eta} \left[\sin\left(\frac{2\pi \eta y}{h}\right) \right] \exp(-\kappa^\alpha \eta^\alpha) d\eta \\ &= \frac{\alpha \kappa^\alpha h}{\pi y^{1+\alpha}} \int_0^{+\infty} \eta^{\alpha-1} \sin\left(\frac{2\pi \eta y}{h}\right) \exp(-\kappa^\alpha \eta^\alpha) d\eta \\ &= \frac{\alpha \kappa^\alpha h^{1+\alpha}}{\pi y^{1+\alpha}} \int_0^{+\infty} \mu^{\alpha-1} \sin(2\pi \mu) \exp\left(-\frac{\kappa^\alpha h^\alpha \mu^\alpha}{y^\alpha}\right) d\mu. \quad (22) \end{aligned}$$

Quando $h \rightarrow 0$, abbiamo anche (si veda Exercise 2.2.33 in Dipierro e Valdinoci, 2026)

$$\mathbb{P}\left(\frac{y}{h}\right) = \frac{c^* h^{1+\alpha}}{y^{1+\alpha}} (1 + o(1)),$$

per un qualche $c^* \in \mathbb{R}$ dipendente da α e κ (e sappiamo che $c^* > 0$, visto che il termine di partenza è positivo).

Possiamo allora utilizzare questa informazione nella (20) e ottenere che

$$\partial_t u(x, t) = \frac{c^*}{2} \int_0^{+\infty} \frac{u(x+y, t) + u(x-y, t) - 2u(x, t)}{y^{1+\alpha}} dy.$$

E. LA DIFFUSIONE NONLOCALE PUÒ USARE AL MEGLIO LE RISORSE AMBIENTALI

Sia \mathcal{B} una palla concentrica a B e di raggio doppio. Tramite il Teorema 1, troviamo una funzione $\tilde{\rho}_\varepsilon \in C^2(\overline{\mathcal{B}}) \cap C_c(\mathbb{R}^d)$ tale che

$$\begin{cases} (-\Delta)^{\alpha/2} \tilde{\rho}_\varepsilon = 0 & \text{in } \mathcal{B}, \\ \|\rho - \tilde{\rho}_\varepsilon\|_{C^2(\overline{\mathcal{B}})} \leq \frac{\varepsilon}{2}. \end{cases}$$

Sia anche v_ε la funzione α -armonica in B con $v_\varepsilon = \tilde{\rho}_\varepsilon$ in $\mathcal{B} \setminus B$ e $v_\varepsilon = 0$ in $\mathbb{R}^d \setminus \mathcal{B}$.

Notiamo che

$$\sup_{\mathbb{R}^d \setminus B} |v_\varepsilon| = \sup_{\mathcal{B} \setminus B} |\tilde{\rho}_\varepsilon| \leq \sup_{\mathcal{B} \setminus B} |\rho| + \frac{\varepsilon}{2} = \frac{\varepsilon}{2},$$

e quindi, per il principio di massimo (si veda ad esempio Theorem 3.3.2 in Bucur e Valdinoci, 2016),

$$\sup_{\mathbb{R}^d} |v_\varepsilon| \leq \frac{\varepsilon}{2}.$$

Sia dunque

$$u_\varepsilon := \rho_\varepsilon := \tilde{\rho}_\varepsilon - v_\varepsilon.$$

Abbiamo che, in B ,

$$(-\Delta)^{\alpha/2} u_\varepsilon = (-\Delta)^{\alpha/2} \tilde{\rho}_\varepsilon - (-\Delta)^{\alpha/2} v_\varepsilon = 0 = (\rho_\varepsilon - u_\varepsilon) u_\varepsilon.$$

Inoltre, v_ε è continua su \mathcal{B} (si veda Ros-Oton e Serra, 2014). Quindi, su ∂B ,

$$u_\varepsilon = \tilde{\rho}_\varepsilon - v_\varepsilon = 0.$$

Infine,

$$\begin{aligned} \|\rho - \rho_\varepsilon\|_{L^\infty(\overline{B})} &= \|\rho - \tilde{\rho}_\varepsilon + v_\varepsilon\|_{L^\infty(\overline{B})} \\ &\leq \|\rho - \tilde{\rho}_\varepsilon\|_{L^\infty(\overline{B})} + \|v_\varepsilon\|_{L^\infty(\overline{B})} \leq \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon. \end{aligned}$$

F. LA DIFFUSIONE CLASSICA PUÒ “SPRECARE” LE RISORSE AMBIENTALI

La proprietà descritta dopo la (17) è squisitamente nonlocale e non è verificata in genere nel caso di diffusione standard. Per convincerci di questo fatto, consideriamo il caso unidimensionale, in cui $B = (-1, 1)$ e prendiamo una funzione $\rho \in C_c^\infty((-1, 1))$ tale che $\rho(0) = 1$.

Supponiamo di aver trovato una nuova distribuzione di risorsa ρ_ε tale che $\|\rho - \rho_\varepsilon\|_{L^\infty((-1, 1))} \leq \varepsilon$ e una soluzione della corrispondente equazione logistica classica

$$-u_\varepsilon'' = (\rho_\varepsilon - u_\varepsilon) u_\varepsilon \quad \text{in } (-1, 1)$$

con

$$u_\varepsilon(-1) = u_\varepsilon(1) = 0 \quad (23)$$

e $u_\varepsilon \geq \rho_\varepsilon$ in $(-1, 1)$ (assumendo ε piccolo a piacere).

Allora, in $(-1, 1)$, abbiamo che $u''_\varepsilon = (u_\varepsilon - \rho_\varepsilon)u_\varepsilon \geq 0$, cioè u_ε è convessa e quindi, da (23), abbiamo che $u_\varepsilon(0) \leq 0$.

Da queste considerazioni, segue che

$$0 = u_\varepsilon(0) \geq \rho_\varepsilon(0) \geq \rho(0) - \varepsilon = 1 - \varepsilon,$$

che produce una contraddizione quando $\varepsilon < 1$.

BIBLIOGRAFIA

- Abatangelo N. and Valdinoci E. (2019). *Getting acquainted with the fractional Laplacian*. In: Abatangelo N. and Valdinoci E., ed. by Dipierro S., *Contemporary research in elliptic PDEs and related topics. Based on lectures given during the INdAM intensive period, University of Bari, Bari, Italy, April 10-June 9, 2017*, Cham: Springer, 1-105.
- Broadbridge P., Hutchinson A.J., Li X., and Mann B.Q. (2022). *Stratified mobility/fishery models with harvesting outside of no-take areas*. In: «Appl. Math. Modelling», 105: 29-49.
- Brockmann D., Hufnagel L. and Geisel T. (2006). *The scaling laws of human travel*. In: «Nature», 439: 462-465.
- Bucur C. and Valdinoci E. (2016). *Nonlocal diffusion and applications*. In: Bucur C. and Valdinoci E., *Lect. Notes Unione Mat. Ital.*, vol. 20. Cham-Bologna: Springer-UMI.
- Caffarelli L., Dipierro S. and Valdinoci E. (2017). *A logistic equation with nonlocal interactions*. In: «Kinet. Relat. Models», 10(1): 141-170.
- Cossetto T. (2012). *Moto browniano e ipotesi atomica*. Testo disponibile all'url: <https://www.bo.infn.it/~apesci/Cossetto.pdf> [consultato il 18 settembre 2025].
- Daskalopoulos P. and Kenig C.E. (2007). *Degenerate diffusions. Initial value problems and local regularity theory*. In: Daskalopoulos P. and Kenig C.E., *EMS Tracts Math*, vol. 1. Zürich: European Mathematical Society (EMS).
- Dipierro S., Savin O. and Valdinoci E. (2017). *All functions are locally s-harmonic up to a small error*. In: «J. Eur. Math. Soc.», 19(4): 957-966.
- Dipierro S. and Valdinoci E. (cds). *A primer on Fourier Transform*.
- Einstein A. (1905). *Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen*. In: «Ann. der Phys.», (4)17: 549-560.
- Gong J., Li Q., Zeng S. and Wang J. (2024). *Non-gaussian anomalous diffusion of optical vortices*. In: «Phys. Rev. E.», 109: 024111.
- Hapca S., Crawford J.W. and Young I.M. (2009). *Anomalous diffusion of heterogeneous populations characterized by normal diffusion at the individual level*. In: «J. R. Soc. Interface», 6(30): 111-122.
- Harasti D., Lee K.A., Gallen C., Hughes J.M. and Stewart J. (2015). *Movements, home range and site fidelity of snapper (*Chrysophrys auratus*) within a temperate marine protected area*. In: «PLoS ONE», 10(11): e0142454.
- Lamanna J., Gloria G., Villa A. and Malgaroli A. (2024). *Anomalous diffusion of synaptic vesicles and its influences on spontaneous and evoked neurotransmission*. In: «J. Physiol.», 602(12): 2873-2898.
- Lévy P. (1925). *Calcul des probabilités*. Paris: Gauthier-Villars.
- Mandelbrot B. (1961). Post scriptum to "Final note". In: «Inf. Control.», 4: 300-304.
- Id. (1967). *The variation of some other speculative prices*. In: «J. Business», 40(4): 393-413.

- Mann B.Q., Cowley P.D. and Fennessy S.T. (2015). *Movement patterns of surf-zone fish species in a subtropical marine protected area on the east coast of South Africa*. In: «African J. Marine Sci.», 37(1): 99-114.
- Muñoz-Gil G., Corominas G.G. and Lewenstein M. (2021). *Unsupervised learning of anomalous diffusion data: an anomaly detection approach*. In: «J. Phys. A, Math. Theor.», 54(50): 19, Id/No 504001.
- Newburgh R., Peidle J. and Rueckner W. (2006). *Einstein, Perrin, and the reality of atoms: 1905 revisited*. In: «Amer. J. Physics», 74(6): 478-481.
- Ros-Oton X. and Serra J. (2014). *The Dirichlet problem for the fractional Laplacian: regularity up to the boundary*. In: «J. Math. Pures Appl.» 9, 101(3): 275-302.
- Seuront L. and Stanley H.E. (2014). *Anomalous diffusion and multifractality enhance mating encounters in the Ocean*. In: «Proc. Natl. Acad. Sci. USA», 111(6): 2206-2211.
- Tintner G. (1940). *The variate difference method*. In: *Cowles Commission for Research in Economics 5*. Bloomington: The Principia Press.
- Vázquez J.L. (2007). *The porous medium equation*. In: *Mathematical theory*. Oxford: University Press.
- Wang Y. and Chen J. (2022). *From normal to anomalous diffusion of water molecules in narrow carbon nanotubes with defects, gases, and salts*. In: «Europhys. Lett.», 139(5): 51002.

La scoperta e la sintesi dei “punti quantici”: una pietra miliare nel colorato futuro delle nanoscienze e della tecnologia

Alberto Bossi*

SUNTO – Il 4 ottobre 2023 l’Accademia Reale Svedese delle Scienze ha assegnato a Moungi G. Bawendi (Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, MA, USA), Louis E. Brus (Columbia University, New York, NY, USA), Aleksey Yekimov (Nanocrystals Technology Inc., New York, NY, USA) il Premio Nobel per la Chimica. I tre scienziati, tra gli anni ’80 e ’90 del secolo scorso, hanno contribuito allo studio, alla sintesi riproducibile, e allo sviluppo dei *quantum dots* (o punti quantici), QD, “piantando i primi semi” che hanno portato alla fioritura del ricco e colorato mondo delle nanoscienze. I loro risultati sperimentali hanno permesso di verificare i principi fisici che legano i fenomeni quantici in nano-oggetti. Grazie alle loro modulabili proprietà ottiche, i QD sono oggi impiegati dall’industria elettronica per generare la luce policromatica che viene emessa dai monitor e schermi di dispositivi *smart* e TV, mentre medici e biochimici li utilizzano per mappare e seguire lo sviluppo di processi biologici e la crescita di tessuti. Questi sono alcuni tra gli aspetti trattati in questa nota insieme a quelli più prettamente fisici e chimici che regolano le proprietà di questi affascinanti nano-oggetti.

PAROLE CHIAVE – Nobel Chimica 2023; *Quantum dots*; Dispositivi a emissione di luce; Sistemi diagnostici.

ABSTRACT – On October 4, 2023, the Royal Swedish Academy of Sciences awarded Moungi G. Bawendi (Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, MA, USA), Louis E. Brus (Columbia University, New York, NY, USA), Aleksey Yekimov (Nanocrystals Technology Inc., New York, NY, USA) the Nobel Prize in Chemistry. The

* Istituto di Scienze e Tecnologie Chimiche “G. Natta” del CNR, CNR-SCITEC; Photoactive Molecular Materials & Devices Lab, via Fantoli 16/15, 20138 Milano. E-Mail: alberto.bossi@cnr.it. Relazione tenuta il 17 ottobre 2024.

three scientists, between the 80s and 90s of the last century, contributed to the study, reproducible synthesis, and development of quantum dots, QD, “planting the first seeds” that led to the flowering of the rich and colorful world of nanoscience. Their experimental results made it possible to verify the physical principles that bind quantum phenomena in nano objects. Thanks to their modular optical properties, QDs are now used by the electronics industry to generate the polychromatic light that is emitted by monitors and schematics of smart devices and TVs, while doctors and biochemists use them to map and follow the development of biological processes and tissue growth. These will be some of the aspects that will be covered during the seminar together with the more purely physical and chemical ones that regulate the properties of these fascinating nano-objects.

KEYWORDS – Nobel Prize in Chemistry 2023; Quantum dots; Light-emitting devices; Diagnostic systems.

INTRODUZIONE

Il Premio Nobel per la Chimica del 2023 è assegnato agli scienziati Moungi G. Bawendi, Lewis E. Brus e Aleksey I. Yekimov per, citando il documento originale, «the discovery and synthesis of nanometre-sized semiconductor crystals, the properties of which are determined by quantum size effects. Referred to as quantum dots (QDs), such nanoparticles are so small that their physical size determines the quantum mechanical states of the material’s charge carriers» (The Royal Swedish Academy of Sciences-The Nobel Committee for Chemistry, 2023). Il Premio Nobel per la Chimica riconosce «la scoperta e la sintesi di cristalli semiconduttori di dimensioni nanometriche, le cui proprietà sono determinate dagli effetti quantistici. Queste nanoparticelle, chiamate punti quantici, sono così piccole che la loro dimensione fisica determina gli stati quantomeccanici dei portatori di carica del materiale».

Le nanostrutture, come i nanocristalli o le nanoparticelle, sono oggetti di dimensioni nell’ordine di 10^{-9} metri di diametro e sono costituiti al massimo da qualche migliaio di atomi. Per avere un’idea del loro rapporto dimensionale, si può immaginare che la grandezza di un nanocristallo rispetto a un pallone da calcio è circa la stessa che il pallone ha rispetto alla Terra (Fig. 1).

Proprio le ridotte dimensioni di queste particelle conferiscono loro proprietà uniche, che dipendono dalla grandezza dell’oggetto, piuttosto che dalla sua composizione chimica. Tra le caratteristiche più rilevanti della funzione delle dimensioni vi sono l’assorbimento e l’emissione della luce. Come

illustrato in Fig. 1, le nanoparticelle più piccole appaiono colorate e assorbono principalmente la luce blu, mentre quelle di dimensioni maggiori tendono ad assorbire la luce rossa. Analogamente, l'emissione luminosa varia con la dimensione della particella: le più piccole emettono luce blu, che progressivamente vira verso il verde e infine al rosso con l'aumento del diametro. E sono queste le caratteristiche che ne hanno poi determinato l'ampia diffusione odierna in vari settori.



Fig. 1 – Nanocristalli, il colore e la luminescenza in base alle dimensioni. © Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences, © Milad Abolhasani/NCSU.

Le ricerche condotte da Bawendi, Brus e Yekimov, che hanno portato all'assegnazione del Premio Nobel per la Chimica, si sono svolte nell'arco di poco più di un decennio, dagli inizi degli anni '80 fino al 1993. Yekimov fu il primo a osservare effetti quantistici in semiconduttori inorganici dispersi in matrici vetrose, mentre Brus, quasi contemporaneamente, rilevò fenomeni simili nei semiconduttori colloidali ottenuti in soluzione acquosa. Bawendi, invece, fu il principale artefice della prima sintesi efficiente e riproducibile di questi materiali (Fig. 2).

1. LE PREMESSE STORICHE

I fenomeni quantistici osservati dai ricercatori premiati erano già stati teorizzati nel XX secolo per spiegare il comportamento delle particelle su scala atomica e subatomica. In particolare, le principali basi scientifiche si basano sui principi del dualismo onda-particella, sviluppati da Max Planck e Albert Einstein.

Questi ultimi introdussero l'idea che le particelle possano comportarsi sia come onde sia come particelle e suggerirono che la luce fosse composta da fotoni con energia quantizzata.

Un contributo fondamentale fu l'effetto fotoelettrico, per il quale Einstein vinse il Premio Nobel nel 1921: egli dimostrò che una radiazione luminosa incidente su una superficie metallica può provocare l'emissione di elettroni dalla superficie stessa e che l'energia necessaria per promuovere il fenomeno dipende dalla frequenza della luce, non dalla sua intensità.

Un altro concetto chiave particolarmente rilevante nel contesto dei nanocristalli è quello di *confinamento quantistico*. Questo principio, descritto teoricamente da Herbert Fröhlich nel 1937, si basa sul modello di un gas di elettroni liberi all'interno di un metallo e dimostra che le proprietà di un materiale possono variare drasticamente quando le sue dimensioni diventano estremamente ridotte. In particolare, quando il metallo ha dimensioni L paragonabili alla lunghezza d'onda di de Broglie λ , il suo comportamento fisico cambia significativamente.

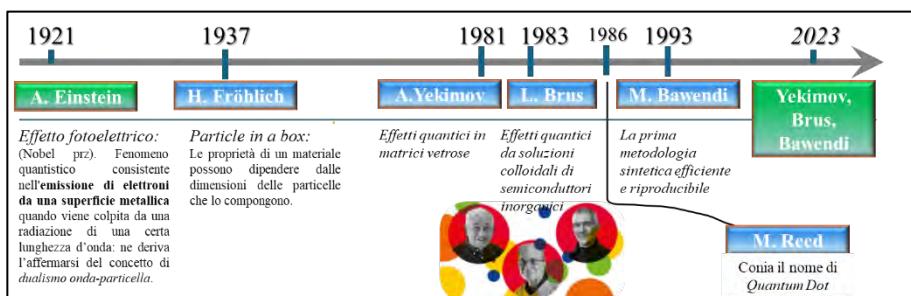


Fig. 2 – Eventi che hanno portato al Premio Nobel. Immagine prodotta dall'autore.

L’osservazione sperimentale di questi fenomeni richiese alcuni anni, con i primi studi condotti tra gli anni ’60 e ’70 del secolo scorso grazie allo sviluppo della microelettronica, che permise la realizzazione di semiconduttori in forma di film, ovvero strati, estremamente sottili, detti bidimensionali. Tuttavia, non si trattava ancora di veri e propri sistemi puntuali.

2. IL CONTRIBUTO DI ALEXEI YEKIMOV, LOUIS BRUS E MOUNGI BAWENDI

Durante la cerimonia di premiazione del Premio Nobel 2023,¹ sono state illustrate le fasi che hanno portato alla scoperta dei materiali semiconduttori che mostrano proprietà quantistiche. Alcuni recenti manoscritti, riportati nella seguente nota,² descrivono queste scoperte.

Nel 1981, mentre lavorava in Unione sovietica presso il Vavilov State Optical Institute, Yekimov studiava i filtri ottici ed era interessato a comprendere perché lo stesso composto, quando disperso nel vetro fuso, potesse modificare il colore. In realtà, già ai tempi dell’antica Roma (come dimostra la famosa Coppa di Licurgo,³ Fig. 3), la colorazione dei vetri era nota, sebbene in una forma “alchemica”. Nel Medioevo, i maestri vetrai perfezionarono inconsapevolmente l’uso della nanotecnologia, sviluppando tecniche raffinate per ottenere vetri colorati. Un processo che consisteva nell’inclusione di sistemi colloidali di elementi, leghe o composti finemente dispersi nel vetro fuso, seguito da trattamenti termici a temperature e tempi specifici.

Yekimov concentrò il suo studio su semiconduttori inorganici a base di cadmio e rame (CdS , CdSe , CuCl e CuBr), dispersi in vetro fuso a temperature comprese tra 500 e 700°C, con tempi di trattamento variabili da 1 a 96 ore (Yekimov *et al.*, 1981). Analizzando in dettaglio il CuCl disperso nel vetro, osservò che la banda ottica si spostava verso energie maggiori man mano che i cristalli nel vetro diminuivano di dimensione, fornendo così una chiara evidenza del confinamento quantistico.

¹ Si veda il video disponibile all’url: <https://youtu.be/upKNyxNIXfA?t=5796> [consultato il 18 settembre 2023].

² Per la storia del premio si veda l’url: <https://cen.acs.org/people/nobel-prize/Three-quantum-dot-researchers-awarded-Nobel-Prize-in-Chemistry/101/web/2023/10> [consultato il 18 settembre 2025]. Si veda altresì: Montanarella e Kovalenko (2022). Per le applicazioni in medicina: Abdellatif *et al.* (2022). *Review articles*: Yekimov (2021); Efros e Brus (2021).

³ Si veda la presentazione del British Museum, disponibile all’url: https://www.britishmuseum.org/collection/object/H_1958-1202-1 [consultato il 18 settembre 2025].

Quasi contemporaneamente a Yekimov, ma negli Stati Uniti presso i Bell Labs di New York, Brus studiava processi photocatalitici applicati alla sintesi chimica. Questa linea di ricerca, avviata nel decennio precedente da pionieri come Bard, Graetzel e Henglein, aveva portato a importanti scoperte nel campo della conversione dell'energia solare mediante semiconduttori inorganici.

Brus, considerando che l'efficacia dei catalizzatori eterogenei dipende dall'area superficiale disponibile per le reazioni chimiche, cercò di produrre photocatalizzatori sempre più piccoli. Infatti, a parità di quantità, la riduzione delle dimensioni delle particelle aumenta significativamente la superficie attiva. Per questo motivo iniziò a sintetizzare nanoparticelle di solfuro di cadmio (CdS) con diametri fino a poche decine di nanometri, utilizzando un metodo noto come *arrested precipitation*. Questo approccio prevedeva la preparazione di soluzioni colloidali acquose contenenti i precursori ionici del CdS . Durante questi esperimenti, Brus notò che lo spettro UV dei nanocristalli variava in funzione del tempo di invecchiamento delle soluzioni (Brus L. E. et al., 1983).

Per controllare meglio la crescita dei nanocristalli, insieme ai suoi collaboratori Paul Alivisatos e Michael Steigerwald, perfezionò il metodo delle “micelle inverse”, utilizzandole come microreattori di crescita. Questo sistema consentiva di regolare la nucleazione e la crescita lenta dei cristalli attraverso l'aggiunta controllata dei reagenti necessari. Inoltre, la passivazione superficiale reversibile dei nanocristalli permetteva un controllo più preciso della loro dimensione e delle loro proprietà ottiche.

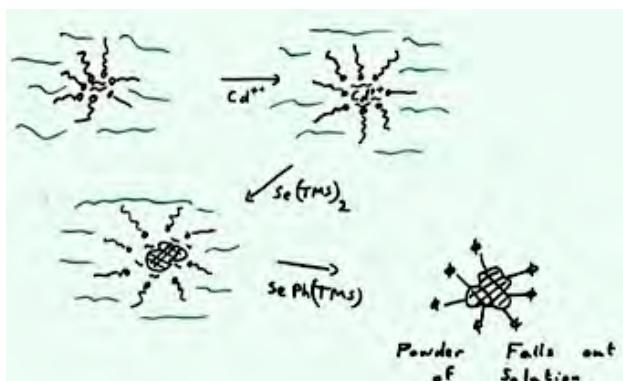


Fig. 3 – Sintesi di Brus tramite micelle inverse. Immagine adattata dall'autore.

Bawendi lavorò come *postdoc* sotto la direzione di Brus tra il 1988 e il 1990, concentrandosi sull’ottimizzazione della sintesi dei QD. Durante questo periodo, studiò diversi fattori chiave, tra cui il riscaldamento della miscela di reazione, la presenza di basi di Lewis e l’uso di agenti templanti per controllare la dimensionalità dei nanocristalli.

Tuttavia, fu nel 1993, dopo aver intrapreso la carriera accademica al MIT di Boston, che sviluppò la cosiddetta *hot injection synthesis*. Questo metodo prevede l’iniezione rapida dei reagenti in una soluzione calda contenente agenti templanti. Questo processo favorisce la nucleazione controllata e permette un’elevata precisione nella distribuzione dei diametri delle particelle grazie al raffreddamento rapido della miscela (Bawendi M.G.*et al.*, 1993).

Un esempio significativo di questa tecnica è illustrato nel video dedicato al Premio Nobel, al minuto 1h 36min e 40sec.⁴

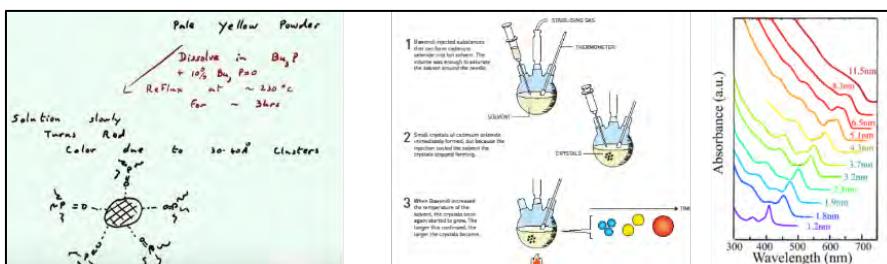


Fig. 4 – Schematizzazione del processo sviluppato da Bawendi, © Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences.

3. GLI SVILUPPI E LE APPLICAZIONI

Negli anni successivi, la ricerca sui QD ha conosciuto una crescita esponenziale, guidata da due principali necessità: stabilizzare i QD sintetizzati e renderli più versatili e multifunzionali.

Per affrontare queste sfide, sono stati sviluppati i *core-shell QD*, in cui il nucleo del *quantum dot* è rivestito da un guscio otticamente “trasparente”. Questo rivestimento non altera le proprietà ottiche del sistema, ma protegge il nucleo centrale dalla degradazione, migliorandone stabilità e durata. Parallelamente, sono stati introdotti i *functional QD*, in cui la superficie dei

⁴ Si veda *infra*, nota 2.

nanocristalli è funzionalizzata con composti organici specifici, conferendo loro proprietà chimiche mirate.

Anche la gamma di materiali impiegati si è ampliata: oggi esistono *quantum dots* basati su strutture cristalline omo-atomiche, etero-diatomiche e terinarie, come illustrato in Fig. 5. Inoltre, sono stati studiati sistemi con forme diverse da quella pseudosferica, apprendo nuove possibilità per applicazioni avanzate. Tutti questi sistemi hanno richiesto caratterizzazioni sempre più approfondite (Nelson K.A. et al., 2017; Qu J. et al., 2019), comprendenti studi strutturali e morfologici tramite diverse tecniche, tra cui:

- Microscopia elettronica a trasmissione (TEM) e microscopia elettronica a scansione (SEM) per l’analisi della struttura e della morfologia
- Dynamic Light Scattering (DLS) per la determinazione delle dimensioni e della distribuzione delle particelle
- Diffrazione di raggi X su polveri e spettroscopia EXAFS per lo studio della struttura cristallina

Elementi:

12 (e.g., Zn, Cd) – 16 (e.g., Se, S)
13 (e.g., Ga, In) – 15 (e.g., N, P)
14 (e.g., Pb) – 16 (e.g., Se, S)
11 (e.g., Au, Ag) (<i>nanoparticelle</i>)
14 (e.g., C, Si) (<i>«Atom»Dot</i>)
14-17-2 CsPbBr ₃ (<i>perowskiti</i>)



10	11	12	13	14	15	16	17
28 Ni nickel 58.693 ± 0.001	29 Cu rame 63.545 ± 0.001	30 Zn zinc 65.38 ± 0.001	31 Ga gallo 69.72 ± 0.001	32 Ge germanio 72.64 ± 0.001	33 As arsenico 75.00 ± 0.001	34 Se selenio 78.97 ± 0.008	35 Br bromo 79.90 ± 0.001
46 Pd palladio 106.45 ± 0.01	47 Ag argento 107.87 ± 0.01	48 Cd cadmio 112.42 ± 0.01	49 In indio 113.42 ± 0.01	50 Sn stannio 118.70 ± 0.01	51 Sb antimonio 121.76 ± 0.01	52 Te telegallo 127.80 ± 0.03	53 I iodio 126.90 ± 0.00
78 Pt platino 190.69 ± 0.02	79 Au oro 196.97 ± 0.01	80 Hg mercurio 200.59 ± 0.01	81 Tl talio 204.38 ± 0.01	82 Pb piombo 207.2 ± 0.01	83 Bi biassio 208.94 ± 0.01	84 Po polonio (209) ± 0.00	85 At astatio (210) ± 0.00

Forme:

Sferiche e pseudo sferiche (isotropiche),
Small rods, honey comb; star (anisotropiche)

Fig. 5 – Esempi di QD di diversa composizione atomica e diversa forma. Immagine prodotta dall’autore.

Oltre alle proprietà morfologiche e strutturali, sono stati analizzati anche gli aspetti chimico-fisici mediante:

- Spettroscopie elettroniche XPS e UPS per la caratterizzazione degli stati di ossidazione e delle proprietà elettroniche
- Spettroscopia a dispersione di energia (EDS) per la mappatura degli elementi
- Spettroscopia UV-VIS e luminescenza per lo studio dell'assorbimento e dell'emissione ottica
- Tecniche elettrochimiche per l'analisi delle proprietà redox
- Spettroscopia FT-IR per l'identificazione delle funzionalizzazioni chimiche
- Microscopia confocale per applicazioni in ambito biologico

Recentemente, è stata effettuata una mappatura degli utilizzi dei QD nei vari settori, evidenziandone la straordinaria versatilità (Fig. 5) (García de Arquer *et al.*, 2021).

Tra questi, uno degli ambiti più promettenti riguarda la tecnologia dei display e dell'illuminazione, dove i QD hanno rivoluzionato il settore grazie allo sviluppo dei primi Q-LED multicolore da parte di Sony, successivamente migliorati e commercializzati da Samsung. In questi dispositivi, una luce blu viene filtrata dai QDs e riemessa a una lunghezza d'onda adatta per ottenere sia luce bianca che colori altamente naturali e vividi. In futuro si prevede di usare i QD stessi come elementi elettroni-attivati nei display senza necessità di retroilluminazione.

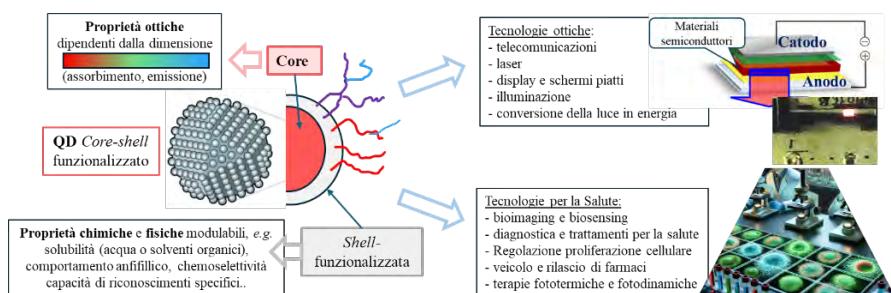


Fig. 6 – Possibili applicazioni dei QDs. Immagine prodotta dall'autore.

Un altro campo di grande interesse è la biomedicina (Weiss S. *et al.*, 1998; Barik e Mondal, 2022) con i lavori pionieristici di Paul Alivisatos, che riuscì a marcare fibroblasti di topo utilizzando QD fluorescenti. Questa scoperta ha aperto la strada a svariate applicazioni, tra cui:

- *Bioimaging e biosensing*, per la visualizzazione e l’analisi di cellule e tessuti
- Applicazioni teranostiche, combinando diagnostica e terapia
- *Drug delivery*, per il rilascio mirato di farmaci
- Terapie fotodinamiche e termodinamiche, sfruttando la risposta ottica dei QD per trattamenti innovativi

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano il Comitato di Presidenza dell’Istituto Lombardo, Accademia di Scienze e Lettere, e in particolare il Presidente, Professor Stefano Maiorana.

Per lo scambio di idee sulla organizzazione degli argomenti trattati nella presentazione si ringrazia la Dottoressa Laura Polito CNR-SCITEC, il supporto e la revisione della nota si ringrazia la Dottoressa Gabriella Di Carlo (Istituto per lo Studio dei Materiali Nanostrutturati del CNR – CNR-ISMN).

I collaboratori e le persone che hanno contribuito allo sviluppo di alcune delle ricerche presentate, Dottoressa Marta Penconi, Clara Baldoli, Mattia Manzotti, Daniele Marinotto, Davide Ceresoli (Istituto di Scienze e Tecnologie Chimiche del CNR); Professoressa Emanuela Licandro (Dipartimento di Chimica, Università degli Studi di Milano); Professor Francesco Paolucci (Università degli Studi di Bologna) e Professor Antonino Licciardello (Università di Catania).

Si ringraziano, per il supporto economico alla ricerca, il MUR, progetto PRIN2017 3D-FARE Prot. 2017FJCPEX; PRIN2022 MEET-Mechanism Enhanced Electrochemiluminescent Technology, Prot. 20225P4EJC; Smart-MatLab Center; Samsung GRO progetti PolDegOLED e PRIORITY.

BIBLIOGRAFIA

- Abdellatif A.A.H., Younis M.A., Alsharidah M., Al Rugaie O. and Tawfeek M.H. (2022). *Biomedical applications of quantum dots: overview, challenges, and clinical potential.* In: «Int J Nanomed», 17: 1951-1970.
- Barik P., Mondal S. (2022). Ed. *Application of quantum dots in biology and medicine, recent advances.* Berlin: Springer.
- Bawendi M.G. et al. (1993). *Synthesis and characterization of nearly monodisperse CdE (E = sulfur, selenium, tellurium) semiconductor nanocrystallites.* In: «J. Am. Chem. Soc.», 115(19): 8706-8715.
- Brus L.E. et al (1983). *Quantum size effects in the redox potentials, resonance Raman spectra, and electronic spectra of CdS crystallites in aqueous solution.* In: «J. Chem. Phys.», 79(2): 1086-1088.
- Efros A.L., Brus L.E. (2021). *Nanocrystal quantum dots: from discovery to modern development.* In: «ACS Nano», 15 (4): 6192-6210.
- Ekimov A.I. et al. (1981). *Quantum size effect in 3D microscopic semiconductor crystals.* In: «JETP Lett», 34: 345-349.
- García de Arquer F.P., Talapin D.V., Klimov V.I., Arakawa Y., Bayer M. and Sargent E.H. (2021). *Semiconductor quantum dots: technological progress and future challenges.* In: «Science», 373: 640.
- Montanarella F. and Kovalenko M.V. (2022). *Three millennia of nanocrystals.* In: «ACS Nano», 16(4): 5085-5102.
- Nelson K.A. et al. (2017). *Terahertz-driven luminescence and colossal Stark effect in CdSe-CdS colloidal quantum dots.* In: «Nano Letters», 17(9): 5375-5380.
- Qu J. et al. (2019). *Green emitted CdSe@ZnS quantum dots for FLIM and STED imaging applications.* In: «J. Innov. Opt. Health Sciences», 12(05): 1940003.
- The Royal Swedish Academy of Sciences-The Nobel Committee for Chemistry (2023). *Scientific background to the Nobel Prize in Chemistry 2023. Quantum dots – Seeds of nanoscience,* 4 october 2023. Testo disponibile all’url: <https://www.kva.se/en/news/the-nobel-prize-in-chemistry-2023> [consultato il 18 settembre 2025].
- Weiss S. et al. (1998). *Semiconductor nanocrystals as fluorescent biological labels.* In: «Science», 281 (September, 25): 2013-2016.
- Yekimov A.I. (2021). *Optical-properties of semiconductor quantum dots in glass matrix.* In: «Phys Scripta», T39: 217-222.

Avventure nella Zona Critica: una vita all'interfaccia

Antonello Provenzale*

SUNTO – La Zona Critica è un sottile strato che va dal fondo dell’acquifero superficiale alla cima della vegetazione. Qui avvengono tutti i processi fisici, chimici, geologici e biologici che sostengono gli ecosistemi terrestri. È uno strato che comprende il suolo, l’acqua, gli organismi viventi, i gas e le rocce, dove la biosfera e la geosfera interagiscono in modo inestricabile e la cui buona salute risulta estremamente importante, critica appunto, per la nostra stessa sopravvivenza. In questo contributo viene descritto come si studia questa componente essenziale del nostro pianeta, per poter sviluppare e valutare le migliori strategie di conservazione e gestione.

PAROLE CHIAVE – Zona Critica; Ecosistema; Pianeta Terra.

ABSTRACT – The Critical Zone is a thin layer going from the bottom of the surface aquifer to the top of vegetation canopy, where all physical, chemical, geological and biological processes sustaining terrestrial ecosystems take place. This layer includes soil, water, living organisms, gases and rocks, which together generate a complex system where geosphere and biosphere dynamics are inextricably linked. The good health of the Critical Zone is related to the integrity of such dynamics and it is essential for our own survival. Here I describe how this essential component of our planet is measured and modelled, with the ultimate goal of supporting the most appropriate conservation and management actions.

KEYWORDS – Critical Zone; Ecosystem; Planet Earth.

* Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere (Socio corrispondente non residente). Istituto di Geoscienze e Georisorse, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Torino, Italia. E-mail: antonello.provenzale@cnr.it. Relazione tenuta il 7 novembre 2024.

1. LA ZONA CRITICA

Tutti noi viviamo in un’interfaccia di pochi chilometri, fra il dominio ipogeico della Terra, caratterizzato da temperature e pressioni sempre più alte quanto più scendiamo in profondità, e il mondo rarefatto, freddo e ostile dello spazio cosmico che circonda il nostro pianeta. Tutti gli organismi viventi che conosciamo, e che insieme all’ambiente in cui vivono compongono la biosfera, conducono la loro esistenza entro questo guscio sottile, caratterizzato da forti gradienti di proprietà chimiche, fisiche e termodinamiche. Per quanto sappiamo oggi, soltanto pochi organismi si sono avventurati oltre l’atmosfera del loro pianeta di origine: forse qualche batterio intrappolato involontariamente in una meteorite, e alcuni esploratori terrestri che sono arrivati fino al nostro satellite.

Oggi, la maggior parte della biosfera terrestre ricava energia dalla luce del Sole, mediante i processi della fotosintesi aerobica. I produttori primari, organismi autotrofi come piante o alghe, utilizzano la luce della nostra stella per trasformare acqua e anidride carbonica in materia organica (e ossigeno), sostenendo tutta la rete trofica dei consumatori eterotrofi che su questa si basano. Ma la fotosintesi avviene solamente in uno strato verticale ancora più sottile, di poche centinaia di metri, confinato nelle acque superficiali dei mari e degli oceani (il cosiddetto strato eufotico) e nelle poche decine di metri occupate dalla chioma della vegetazione sulle terre emerse. Qui si trova la sorgente di energia di tutta la biodiversità e della dinamica della maggior parte degli ecosistemi del nostro pianeta – almeno, di quelli che utilizzano la luce solare come sorgente di energia.

Agli inizi di questo secolo, il National Research Council statunitense utilizzò il termine “Zona Critica” (*Critical Zone*), per indicare lo strato sulla superficie delle terre emerse che va dal fondo dell’acquifero superficiale alla cima della vegetazione (USNRC, 2001). Questo strato include le rocce, il suolo, gli organismi viventi (dal microbiota alla vegetazione e la macrofauna), l’acqua (superficiale e sotterranea) e l’atmosfera a contatto con il terreno. Nella Zona Critica avvengono tutti i principali processi che sostengono gli ecosistemi terrestri, inclusa l’alterazione delle rocce, la formazione di suolo, i complessi cicli biogeochimici che legano fra loro, in modo inestricabile, l’ambiente inorganico e gli esseri viventi (White e Provenzale, 2024). Un sistema altamente integrato, complesso, caratterizzato da interazioni multiple a tutte le scale di spazio e di tempo, che è stato anche poeticamente

definito come «lo strato dove la roccia incontra la vita». Questo strato è detto “critico” perché costituisce il sostegno a tutti gli ecosistemi e agroecosistemi terrestri, ed è quindi cruciale per la nostra esistenza, ma è critico anche perché è oggi minacciato da impatti antropici negativi quali il cambiamento climatico, l'inquinamento, la perdita di biodiversità, la modifica dei cicli biogeochimici e il degrado del suolo.

Semplificando, la Zona Critica è composta da uno strato superficiale, con un suolo maturo e ricco di sostanza organica e di vita, sopra il quale troviamo la parte fuori terra della vegetazione, dai pochi centimetri delle piante d'alta quota alle decine e decine di metri delle foreste equatoriali. In questo strato, la parte più bassa dell'atmosfera è in contatto diretto con il suolo e con la vegetazione, in una interazione continua che scambia energia, acqua, anidride carbonica, talvolta metano, composti organici volatili e tante altre componenti, con un controllo reciproco fra vegetazione e moti atmosferici. Scendendo più in profondità, il suolo lascia il posto alla regolite, con composizione più minerale, e più giù ancora alla roccia solo parzialmente alterata, fino ad arrivare alla roccia “fresca”, ma spesso frammentata, in cui spesso si insinuano le radici più profonde delle piante.

In molti casi, la parte più superficiale della Zona Critica ha un contenuto d'acqua che non satura i pori e gli interstizi, formando la zona insatura, o vadosa, come è chiamata in idrologia. Sotto una certa profondità, invece, l'acqua in genere satura i pori del sedimento o le fratture della roccia, generando le falde acquifere libere, o freatiche, così importanti per gli usi potabili o irrigui. La separazione fra la zona insatura superficiale e la zona satura è chiamata superficie freatica. Questa superficie di separazione si muove verticalmente in base al bilancio fra precipitazione, infiltrazione dell'acqua meteorica, evapotraspirazione e possibili emungimenti da parte umana. In alcune aree, la superficie freatica arriva alla superficie del suolo o anche più su; si formano allora, ad esempio, le aree umide. Nelle zone desertiche, la superficie freatica può invece essere molto profonda. Nelle aree calcaree, poi, le grotte formate dai processi carsici creano una circolazione di aria e acque sotterranee e fanno parte a pieno titolo della parte profonda della zona insatura e, più in generale, della Zona Critica.

La Zona Critica è dunque un sistema estremamente dinamico in cui geosfera e biosfera interagiscono strettamente, in cui geodiversità e biodiversità si completano l'un l'altra (Beierkuhnlein *et al.*, 2025). Sulle terreemerse,

possiamo studiare la Zona Critica ovunque, dalle aree agricole alle zone umide, nei deserti o sulle montagne più alte. Naturalmente, lo spessore di questo strato varia con il luogo, la latitudine, l'altitudine. È spesso pochi decimetri ad alta quota o in Artico, ma può raggiungere centinaia di metri nelle zone tropicali, su suoli molto sviluppati.

2. AVVENTURE ALL'INTERFACCIA

A partire dal 2017, nell'ambito di diversi progetti nazionali ed europei, il personale dell'Istituto di Geoscienze e Georisorse del CNR ha installato diversi osservatori di Zona Critica in aree remote, per studiare i processi che caratterizzano l'interazione fra geosfera e biosfera in condizioni naturali e, spesso, estreme. A oggi, l'Istituto gestisce un osservatorio all'altopiano del Nivolet nel Parco Nazionale Gran Paradiso (PNGP), un osservatorio nei pressi di Ny Alesund sull'isola di Spitsbergen (Svalbard), un altro nell'area di Piano Bello nel Parco dell'Etna e un osservatorio di zona critica e di idrogeologia sull'isola di Pianosa nel Parco Nazionale Arcipelago Toscano (PNAT). Un altro osservatorio è in via di costruzione a Cimalegna, nel massiccio del Monte Rosa, sopra Alagna Valsesia, in collaborazione con l'Università di Torino, il Geoparco Sesia Val Grande e Monterosa 2000 S.p.A., e nuove misure sono in corso nella Riserva Naturale Bosco della Mesola nel Parco del Delta del Po, alla torbiera di Fociomboli nel Parco naturale regionale delle Alpi Apuane e nelle praterie di Pian Cavallaro a Monte Cimone.

In questi osservatori si misurano molti aspetti della Zona Critica, come le proprietà chimiche e fisiche dell'acqua, sia superficiale sia sotterranea, le caratteristiche del suolo o del sedimento, la distribuzione e diversità della vegetazione, spesso in stretta collaborazione con il personale dei parchi o con i Carabinieri forestali. Specialmente nelle aree montane, buona parte della ricerca è dedicata all'analisi degli scambi di anidride carbonica (e metano per le zone umide) e di vapor d'acqua fra il suolo, la vegetazione e l'atmosfera. A tal fine, sono state installate tre torri di Eddy Covariance, al Nivolet, a Ny Alesund e all'Etna, che stimano i flussi verticali di gas e vapore utilizzando la turbolenza atmosferica, e una quarta torre è in via di installazione a Pianosa. La Fig. 1 mostra, come esempio, la torre al Nivolet (Vivaldo *et al.*, 2023).



Fig. 1 – La torre di Eddy Covariance a circa 2700 metri di altitudine nelle praterie d’alta quota del Nivolet, nel Parco Nazionale Gran Paradiso. Questo strumento misura gli scambi di anidride carbonica e vapor d’acqua fra suolo, vegetazione e atmosfera ed è una stazione associata (sigla IT-Niv) della rete europea ICOS ERIC. Foto dell’autore.

Oltre a queste torri, sono state installate camere a flusso automatiche, che misurano con una tecnica diversa gli stessi flussi di gas e forniscono un’informazione complementare, e sono condotte regolarmente campagne di misure estive con camere a flusso portatili (Parisi *et al.*, 2024).

Ma perché è importante misurare questi flussi? Per quanto riguarda l’anidride carbonica, si tratta di capire il bilancio fra assorbimento di CO₂, determinato dalla fotosintesi, e l’emissione generata dalla respirazione delle piante e dai processi micròbici nel suolo. Ovvero, definiamo lo scambio ecosistemico netto (NEE, *Net Ecosystem Exchange*) come la somma della produzione primaria (GPP, *Gross Primary Production*, qui definita negativa perché è un flusso che va dall’atmosfera al suolo) e della respirazione dell’ecosistema (ER, *Ecosystem Respiration*, definita positiva e che comprende sia la respirazione delle piante sia i processi micròbici nel suolo): NEE = GPP + ER. Questo bilancio ci dice se e quanta CO₂ può essere assorbita dall’ecosistema e immagazzinata nella Zona Critica (NEE<0), un’informazione

rilevante per capire come gli ecosistemi possano contribuire a ridurre la concentrazione atmosferica di anidride carbonica. Se invece $\text{NEE} > 0$, allora il sistema diventa un’ulteriore sorgente di anidride carbonica verso l’atmosfera.

Negli ultimi decenni, in media, gli ecosistemi terrestri hanno assorbito circa il 30% dell’anidride carbonica emessa dalle attività antropiche, rallentando la crescita delle temperature rispetto a quanto sarebbe successo senza questa azione calmierante della vegetazione. Questa capacità di assorbimento dipende dal bilancio fra fotosintesi (assorbimento) e respirazione (emissione), che a loro volta dipendono dalle condizioni climatiche (temperatura, precipitazione, irradiazione solare), dai nutrienti e dalla fisiologia della vegetazione presente in una data area. Ecco, quindi, che risulta importante capire come i flussi di carbonio dipendano dalle condizioni ambientali, per poter estrapolare l’informazione alle condizioni climatiche del prossimo futuro e stimare gli effetti delle possibili strategie di gestione della Zona Critica. Si vuole, cioè, massimizzare la capacità di assorbimento della CO₂ senza danneggiare la buona salute e l’integrità dell’ecosistema.

Nel caso delle praterie alpine al Nivolet o della tundra artica di Ny Alesund, i dati hanno mostrato che gli scambi di anidride carbonica sono regolati essenzialmente dall’irradiazione solare (per la GPP) e dalla temperatura del suolo (per ER), modulati però dall’umidità del suolo, dallo stato fenologico della vegetazione e dalle caratteristiche del suolo. L’analisi statistica dei legami fra flussi e variabili di controllo ha permesso di sviluppare un modello empirico, correlativo, che esplicita la dipendenza dalle variabili ambientali e rappresenta molto bene la variabilità dei dati, come illustrato nella Fig. 2 che confronta i dati misurati con i valori ottenuti dal modello (Magnani *et al.*, 2020). Risulta quindi possibile utilizzare questo approccio semplificato per stimare la risposta della Zona Critica alle modifiche delle variabili ambientali e al cambiamento climatico. In particolare, l’analisi dei dati ottenuti in un’area sperimentale del Gran Paradiso, nel vallone di Levionaz in Valsavarenche, ha mostrato come la produzione primaria (GPP) diventi estremamente sensibile all’umidità del suolo solo quando questa scende sotto una soglia critica minima, confermando la validità della decisione del Parco Nazionale Gran Paradiso di attivare forme di irrigazione naturale nel caso di siccità prolungate come quella del 2022 (Goiran *et al.*, 2025).

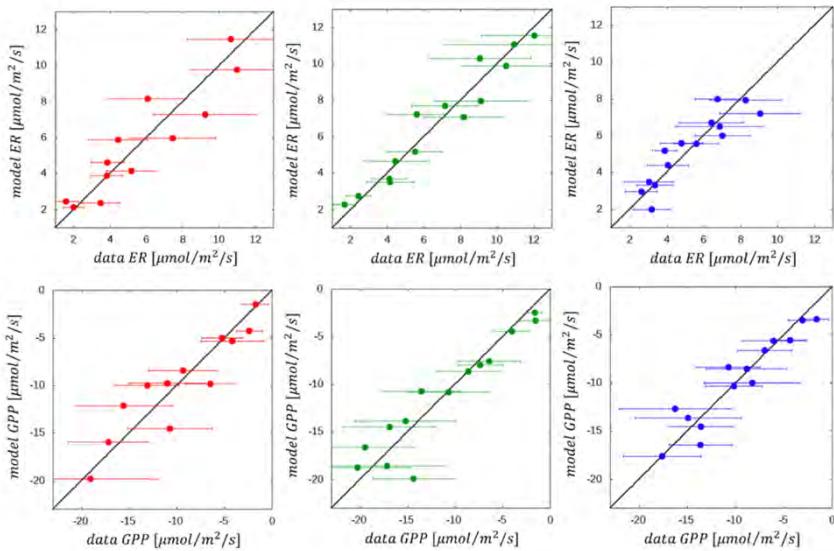


Fig. 2 – Confronto fra le misure dei flussi di anidride carbonica ottenute con le camere portatili (sulle ascisse) e i risultati del modello empirico (sulle ordinate) per la respirazione dell’ecosistema (ER, pannelli in alto) e la produzione primaria (GPP, pannelli in basso) in micromoli di CO₂ per metro quadro per secondo, in tre siti di studio all’altopiano del Nivolet nel Parco Nazionale Gran Paradiso, indicati dai tre colori rosso, verde e blu. Immagine tratta da Magnani et al., 2020.

In generale, misurando come i flussi dipendano da queste variabili, abbiamo verificato che le differenze nei parametri del modello empirico nelle diverse aree di prateria analizzate sono meno intense rispetto alle fluttuazioni interannuali di questi stessi parametri (Lenzi *et al.*, 2023). Questo vuol dire sia che possiamo probabilmente estrapolare lo stesso tipo di modello empirico ad aree montane diverse, sia che è comunque necessario un monitoraggio di lungo periodo per cogliere correttamente la variabilità nella risposta della Zona Critica fra un anno e l’altro.

Un secondo aspetto affrontato è stato, poi, lo studio dei processi di evapotraspirazione, di nuovo misurati mediante l’uso delle torri di Eddy Covariance e delle camere a flusso, sia automatiche (fisse) sia portatili. La stima dell’evapotraspirazione (somma dell’evaporazione dal suolo e della traspirazione dalla vegetazione) è un tassello cruciale per definire correttamente il

bilancio idrico del suolo. Se assumiamo che il suolo sia insaturo e trascuriamo per semplicità i movimenti orizzontali d'acqua nel suolo, il bilancio idrico locale è determinato dalla differenza fra gli apporti di acqua (dovuti all'infiltrazione della precipitazione, dell'acqua corrente superficiale e della fusione della neve) e le perdite, legate all'evapotraspirazione e all'infiltrazione dell'acqua verso gli strati più profondi. Se chiamiamo I la somma degli apporti legati all'infiltrazione ed E le perdite per evapotraspirazione, la differenza $I-E$ fornisce una stima dell'acqua che scende in profondità e può ricaricare le falde acquifere (Brussolo *et al.*, 2022). Anche in questo caso, l'analisi statistica dei dati raccolti al PNGP ha permesso di identificare le variabili di controllo principali dei flussi di evapotraspirazione e sviluppare un modello empirico semplificato del bilancio idrico nella parte superficiale della Zona Critica alpina.

3. PROSPETTIVE

Qualche anno fa, il filosofo Bruno Latour ha scritto che «lo studio della Zona Critica è la scienza dell'Antropocene» (Latour e Weibel, 2020). Il motivo è che questo strato sostiene tutti gli ecosistemi delle terre emerse, ed è alla base della produttività agricola. La buona salute della Zona Critica significa la disponibilità di servizi ecosistemici – o meglio di servizi della Zona Critica – quali aria e acqua pulita, stabilità dei versanti, cibo, materie prime, biodiversità. Mentre il degrado della Zona Critica implica l'annullamento di molti di questi benefici, inclusa la perdita di suolo fertile e il possibile collasso di alcuni ecosistemi.

Fra i benefici di una Zona Critica in buona salute vi è senza dubbio la capacità di immagazzinare carbonio, in particolare anidride carbonica, e immagazzinarlo nel suolo e nella vegetazione. Il degrado di questo sottile strato superficiale potrebbe diminuire drasticamente la possibilità di assorbimento del carbonio, o addirittura trasformare gli ecosistemi da pozzi a sorgenti di anidride carbonica in atmosfera, aggravando la già delicata situazione legata alla crescita delle concentrazioni di gas serra e conseguentemente delle temperature. Anche per il bilancio idrologico, la Zona Critica gioca un ruolo essenziale, come cerniera fra le precipitazioni e le acque sotterranee e come regolatrice dei processi di evapotraspirazione.

Per rimanere in ambito montano, un tema particolarmente interessante riguarda il cambiamento che sta avvenendo nelle zone proglaciali, lasciate

libere dal veloce ritiro dei ghiacciai alpini (Marta *et al.*, 2023). Qui si sviluppano nuovi ecosistemi che, in processi di successione assai complessi, portano alla formazione di suolo organico e alla crescita della vegetazione. Sono, queste, aree di grande interesse scientifico, ma di non facile monitoraggio, che possono fornire informazioni importanti sui cicli biogeochimici e sugli scambi di materia ed energia che avvengono nelle aree sempre più vaste liberate dai ghiacci.

Un altro tema rilevante riguarda l'effetto delle siccità, purtroppo previste in significativo aumento nella regione mediterranea (Baronetti *et al.*, 2022), sui processi della Zona Critica e sui cicli dell'acqua e del carbonio (UNCCD, 2024). Legata alle siccità, l'intera problematica degli incendi mediterranei (Trucchia *et al.*, 2023) apre la questione dell'interazione fra suolo, vegetazione e incendi, e diversi progetti di ricerca stanno proprio affrontando questi temi.

Oltre al monitoraggio, per formulare previsioni su quanto potrà accadere alla Zona Critica e valutare gli effetti delle possibili strategie di gestione e conservazione servono modelli numerici, dai più semplici modelli empirici, basati sulle correlazioni fra le diverse variabili come descritto prima, ai modelli di *machine learning*, versione sofisticata dei modelli correlativi, ai veri e propri *digital twin*, i gemelli digitali che cercano di riprodurre fedelmente, con più o meno successo, il sistema in esame. Un modello di questo genere sarebbe di grande interesse come condizione al bordo inferiore dei modelli atmosferici e climatici, perché i flussi di energia, acqua e gas sono controllati proprio dalla sottile interfaccia della Zona Critica. In tutti questi approcci modellistici, la difficoltà sta nel combinare scale di spazio e di tempo molto diverse, dai microaggregati del suolo a un intero bacino idrologico, dai velocissimi processi fotosintetici e biochimici al lento evolversi di un paesaggio per erosione, sedimentazione, formazione del suolo. Le difficoltà stanno anche nel gran numero di componenti interagenti, fisiche, chimiche, geologiche e biologiche, nei processi interconnessi, nello stretto legame fra geodiversità e biodiversità, fra geosfera e biosfera. Tutto questo è la Zona Critica, un sistema essenziale per la nostra vita e una sorgente inesauribile di meraviglia e di informazioni scientifiche fondamentali sul funzionamento del nostro pianeta.

BIBLIOGRAFIA

- Baronetti A. et al. (2022). *Future droughts in northern Italy: high-resolution projections using EURO-CORDEX and MED-CORDEX ensembles*. In: «Climatic Change», 172: 22.
- Beierkuhnlein C. et al. (2025). *Towards a comprehensive geodiversity-biodiversity nexus in terrestrial ecosystems*. In: «Earth-Sciences Review», 264: 105075.
- Brussolo E. et al. (2022). *Aquifer recharge in the Piedmont Alpine zone: historical trends and future scenarios*. In: «Hydrology and Earth System Sciences», 26: 407-427.
- Goiran S. et al. (2025). *Drought stress on CO₂ fluxes in mountain grasslands: the Levionaz case study, Gran Paradiso National Park*. Articolo in preparazione.
- Latour B. and Weibel P. (2020). *Critical Zones. The science and politics of landing on Earth*. Cambridge: MIT Press.
- Lenzi S. et al. (2023). *Spatial and temporal variability of carbon dioxide fluxes in the Alpine Critical Zone: the case of the Nivolet Plain, Gran Paradiso National Park, Italy*. In: «PLoS ONE», 18: e0286268.
- Magnani M. et al. (2020). *Drivers of carbon fluxes in Alpine tundra: a comparison of three empirical model approaches*. In: «Science of the Total Environment», 732: 139139.
- Marta S. et al. (2023). *Heterogeneous changes of soil microclimate in high mountains and glacier forelands*. In : «Nature Communications», 14: 5306.
- Parisi A. et al. (2024). *Carbon dioxide fluxes in Alpine grasslands at the Nivolet Plain, Gran Paradiso National Park, Italy 2017-2023*, In: «Scientific Data», 11: 652.
- Trucchia A. et al., *Wildfire hazard mapping in the eastern Mediterranean landscape*. In: «Int. J. Wildland Fires». Doi:10.1071/WF22138.
- UNCCD (2024). *World Drought Atlas*. Testo disponibile all'url: <https://www.unccd.int/resources/publications/world-drought-atlas> [consultato il 18 settembre 2025].
- USNRC (2001). *Basic research opportunities in the Earth sciences*. Washington D.C.: U.S. National Research Council-National Academy Press, 35-38.
- Vivaldo G. et al. (2023). *Carbon dioxide exchanges in an alpine tundra ecosystem (Gran Paradiso National Park, Italy): a comparison of results from different measurement and modelling approaches*. In: «Atmospheric Environment», 305: 119758.
- White T.S. and Provenzale A. (2024). *Critical zone and ecosystem dynamics*. Berlin: Springer.

Collinear homographic orbits in the general problem of N bodies

Antonio Giorgilli, Ugo Locatelli, Marco Sansottera*

SUNTO – Si ripropone uno studio dell'esistenza di soluzioni collineari del problema degli N corpi, come trattato da Eulero e Lagrange. Si segue la traccia proposta da Newton nei *Principia*, ossia considerare il problema nella sua generalità, senza assumere che la forza di attrazione dipenda dall'inverso del quadrato della distanza. Si mostra che in generale esistono orbite concentriche circolari, ovvero equilibri relativi. Per contro, si mostra che esistono orbite omografiche solo se le forze sono potenze della distanza.

PAROLE CHIAVE – Problema dei tre corpi; Orbite stazionarie; Orbite omografiche.

ABSTRACT – We revisit the problem of collinear solutions of the problem of N bodies, as investigated by Euler and Lagrange. Unlike most existing studies, we consider a general class of attractive forces. In this respect, we follow Newton's attitude in *Principia* of first considering the problem in its generality, without assuming that the force obeys the gravitational inverse square law. We find that circular concentric orbits, also named relative equilibria, exist as a general fact. Conversely, we show that homographic orbits do exist only for forces that obey a power law.

KEYWORDS – Problem of three bodies; Stationary orbits; Homographic orbits.

INTRODUCTION AND STATEMENT OF RESULTS

The aim of this paper is to revisit the study of collinear solutions of the problem of N bodies interacting through general force fields, not restricted to the case of Newton's gravitational force.

* Antonio Giorgilli: Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere (Membro effettivo). Già Professore ordinario di Fisica matematica, Università degli Studi di Milano. E-mail: antonio.giorgilli@unimi.it. Ugo Locatelli: Professore ordinario di Fisica matematica, Dipartimento di Matematica, Università degli Studi di Roma “Tor Vergata”. E-mail: locatell@mat.uniroma2.it. Marco Sansottera, Liceo Scientifico, Scuole della comunità ebraica di Milano, Via Sally Mayer 4–6, 20146 Milano. E-mail: marco.sansottera@gmail.com. Relazione tenuta il 21 novembre 2024.

Collinear solutions of the problem of three bodies have been investigated by Euler (Euler 1766; Euler 1767; Euler 1770). He openly recognized that a complete study of the problem of three bodies was inaccessible to his methods of Analysis. Therefore, Euler decided to begin with the simplified case of motion on a line. This included, in particular, a possible motion of the Moon on a state of perpetual alignment on syzygy. The first wide-scale study is due to Lagrange (Lagrange 1772), who succeeded in writing equations for the mutual distances among the bodies. He focused on the search of solutions such that the mutual distances, or at least the ratios between any two of them, remain constant. This is indeed the class of solution called *relative equilibria* and *homographic orbits*, respectively. In addition to Euler's collinear solutions, Lagrange also discovered the *triangular solutions*: the bodies are located at the vertices of an equilateral triangle, which revolves in space. A generalization of the collinear solutions of Euler and Lagrange has been found by Forest Ray Moulton (Moulton 1910). An extension to the case of four bodies had been previously published by Rudolf Lehmann-Filhés (Lehmann–Filhés 1891).

Our interest in collinear solution is connected with paper (Giorgilli and Guicciardini 2021). As discussed there, Newton made an accurate study before making the conclusion that the gravitational force obeys the inverse square law, with particular attention to forces obeying a power law. However, the great majority of papers on collinear, or planar stationary, or homographic orbits, consider only Newton's gravitational law. Thus, if only for pure academic interest, we take the attitude of considering a more general class of forces. As a first step, we focus our attention on collinear orbits, as Euler did. However, a similar investigation may be extended also to generalizations of Lagrange's triangular solutions, for instance polygonal configurations, that have been studied, for instance, in (Wintner 1941), and then in many papers. An extensive exposition concerning recent works, with many references, may be found in (Moeckel 2014; Saari 2005; Saari 2011).

Let us come to the statement of our results. We assume that the force function $\varphi(r)$ satisfies the following hypotheses:

- (H1) The intensity of the force is written as $mm'\varphi(r)$, where $r > 0$ is the distance between any two bodies and m, m' are the masses.
- (H2) The function $\varphi(r)$ is assumed to be positive, continuous and monotonically decreasing for increasing r , with $\varphi(r) \xrightarrow[r \rightarrow +\infty]{} 0$. Both cases, $\varphi(0)$ finite or $\varphi(0) = +\infty$, are allowed.
- (H3) The function $\varphi(r)$ is a convex function; that is, for $r < r'$ and for $0 \leq \lambda \leq 1$ we have $\varphi((1 - \lambda)r + \lambda r') \leq (1 - \lambda)\varphi(r) + \lambda\varphi(r')$.

It is an easy matter to prove that hypotheses (H2) and (H3) entail that for any $\delta > 0$ and for $r < r'$ we have $\varphi(r) - \varphi(r + \delta) > \varphi(r') - \varphi(r' + \delta)$. Later, we shall need a more stringent assumption.

- (H4) The force law is an inverse power of the distance, thus homogeneous; that is, $\varphi(r) = r^{-\alpha}$ with $0 < \alpha < 3$.

Here, the limits on the exponent α select a class forces which possess stable circular orbits, as is usual in discussing the problem of central forces. We note that our arguments apply to any negative power, but the cases selected here are the physically interesting ones.

We prove the following two theorems. First, using hypotheses (H1)–(H3), we prove the existence of relative equilibria.

Theorem 1. *Let N masses m_1, \dots, m_N be given, interacting with an attractive force $\varphi(r)$, where $r > 0$ is the distance between two bodies. Assume that $\varphi(r)$ satisfies the hypotheses (H1)–(H3) just stated. Then there exist $N!/2$ collinear configurations of relative equilibrium, with the masses aligned on a straight line which revolves with uniform angular velocity around the barycentre.*

The second theorem is concerned with the existence of homographic orbits corresponding to the collinear equilibria. This is a more intriguing problem: it requires some extra conditions on the forces.

Theorem 2. *With the hypotheses of Theorem 1, let also hypothesis (H4) be satisfied, namely $\varphi(r) = r^{-\alpha}$ with $0 < \alpha < 3$. Then, corresponding to every collinear solution, there exists a family of homographic orbits, such that the bodies remain aligned on a straight line revolving (non uniformly) around the barycentre, and the ratio of the relative distances between any two bodies remains constant.*

The curious fact is that we should restrict the force to depend on a power of the distance. This is indeed the condition found by Newton, when he was answering the following two questions for the problem of central motion; see (Giorgilli and Guicciardini 2021) for a transcription in our current mathematical language.

- (i) *To determine the motion of the apsidal line for orbits very close to a circular one ((Newton 1686), Liber I, sectio IX, problema XXXI).*
- (ii) *To find attractive forces such that the precession angle of the apsidal line does not depend on the radius of the circular orbit.*

Newton answers the first question for generic forces. Then he proves that the second question possesses a positive answer in case the force obeys a power law. Perhaps surprisingly, we need the same assumption.

1. HOMOGRAPHIC ORBITS, CENTRAL CONFIGURATIONS

The problem of homographic orbits is enunciated as follows:

To find orbits such that in a barycentric frame the geometric configuration of the bodies remains similar to itself during the motion.

1.1. The equations in the planar case

We choose an absolute rectangular frame with origin in the barycentre. The coordinates $\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N$ of the bodies obey Newton's equations

$$(1) \quad m_j \ddot{\mathbf{x}}_j = - \sum_{k \neq j} m_j m_k \varphi(r_{j,k}) \frac{\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_k}{r_{j,k}}, \quad j = 1, \dots, N,$$

where $r_{j,k} = \|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_k\|$. The equations possess the classical first integrals of the barycentre, total momentum and total angular momentum:

$$(2) \quad \sum_{j=1}^N m_j \mathbf{x}_j = 0, \quad \sum_{j=1}^N m_j \dot{\mathbf{x}}_j = 0, \quad \sum_{j=1}^N \mathbf{x}_j \wedge m_j \dot{\mathbf{x}}_j = \Gamma.$$

Now we assume that the orbits lie on a fixed plane orthogonal to Γ , so that in a rectangular frame with the z axis parallel to Γ we have $z_j = 0$. Let ξ_1, \dots, ξ_N be N fixed vectors in the orbital plane.

Homographic orbits are represented as

$$(3) \quad \mathbf{x}_j = \varrho \mathbf{R}_\theta \xi_j, \quad \mathbf{R}_\theta = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

where $\varrho(t)$, $\theta(t)$ depend on time. We distinguish three cases.

- (i) A *relative equilibrium* occurs if $\varrho(t) = \varrho_0$ remains constant. In this case the bodies revolve on circles around the barycentre, all with the same angular velocity $\dot{\theta} = \omega$. In a revolving frame with angular velocity ω the bodies remain fixed.
- (ii) A *homothetic orbit* occurs when $\theta(t) = \theta_0$ remains constant. In this case the bodies move on rectilinear orbits; the geometric configuration is subject only to resizing with a factor $\varrho(t)$.
- (iii) A *homographic orbit* occurs when neither $\varrho(t)$ nor $\theta(t)$ are constant. The geometric configuration is such that the ratio of the relative distance between any two bodies remains constant.

Thus, relative equilibria and homothetic orbits are particular cases of homographic orbits. In any case, we stress that the vectors ξ_1, \dots, ξ_N and the functions $\varrho(t)$, $\theta(t)$ are not arbitrary. Our aim is to prove that there exist solutions of Newton's equations (1).

Lemma 3. *Equations (1) for the orbits (3) are written as*

$$(4) \quad \frac{d}{dt} \varrho^2 \dot{\theta} = 0, \quad \dot{\theta} = \frac{L}{\varrho^2},$$

where L is a constant, and, denoting $r_{j,k} = \|\xi_j - \xi_k\|$,

$$(5) \quad \left(\ddot{\varrho} - \frac{L^2}{\varrho^3} \right) \xi_j = - \sum_{k \neq j} m_k \varphi(r_{j,k} \varrho) \frac{\xi_j - \xi_k}{r_{j,k}}, \quad j = 1, \dots, N.$$

The proof of the lemma reduces to writing Newton's equations in planar polar coordinates. This is a standard calculation in books on Mechanics.

1.2. Planar Central Configurations

Central Configurations are defined as follows (see (Wintner 1941), § 355).

Definition 4. *A system of bodies in space is said to be in a central configuration in case the total force acting on each body is proportional both to its mass and to its barycentric position.*

We emphasize that the enunciate is concerned only with the *configuration* of the system, that is, with the position of the bodies at a given fixed time, irrespective of the velocities.

In a central configuration the coordinates of the bodies must satisfy

$$(6) \quad \Psi \xi_j = \sum_{k \neq j} m_k \varphi(r_{j,k}) \frac{\xi_j - \xi_k}{r_{j,k}}, \quad j = 1, \dots, N.$$

where $\Psi > 0$ is a constant. There is some freedom here.

Lemma 5. *Let ξ_1, \dots, ξ_N be a solution of equations (6) with a given Ψ . Then the following holds true:*

- (i) *The vectors $R_\alpha \xi_1, \dots, R_\alpha \xi_n$, where R_α is a plane rotation matrix with an arbitrary angle α , solve the equations with the same Ψ .*

- (ii) Given any $\sigma > 0$, let us rescale $\xi_1 = \sigma\xi'_1, \dots, \xi_N = \sigma\xi'_N$, so that the relation $r_{j,k} = \sigma r'_{j,k}$ applies to the corresponding distances. Then the equations are changed as

$$\sigma\Psi\xi'_j = \sum_{k \neq j} m_k \varphi(\sigma r'_{j,k}) \frac{\xi'_j - \xi'_k}{r'_{j,k}}, \quad \left(\frac{\xi'_j - \xi'_k}{r'_{j,k}} = \frac{\xi_j - \xi_k}{r_{j,k}} \right)$$

The proof is straightforward: just make the necessary substitutions.

Proposition 6. *Let the bodies move on homographic orbits, including also the subcases of relative equilibria and of homothetic orbits. Then at any instant of time the bodies are in a central configuration.*

The claim is self-evident in view of Equation (5).

Corollary 7. *The quantities Ψ and L in Lemma 3, and the angular velocity ω are subject to the following rules.*

- (i) *For a relative equilibrium, we have $L^2/\varrho_0^3 = \Psi \neq 0$, with ϱ_0 the fixed initial value, and the angular velocity is $\omega = L/\varrho_0^2$.*
- (ii) *For a homothetic orbit, we have $\omega = L = 0$; Ψ is replaced by a positive function $\psi(\varrho)$ as in the next case (iii).*
- (iii) *For a homographic orbit the constant L is determined by the initial conditions; $\omega(t) = \dot{\theta}$ obeys Equation (4); Ψ is replaced by a positive function $\psi(\varrho)$ satisfying*

$$(7) \quad \psi(\varrho)\xi_j = \sum_{k \neq j} m_k \varphi(\varrho r_{j,k}) \frac{\xi_j - \xi_k}{r_{j,k}}, \quad j = 1, \dots, N,$$

where ξ_1, \dots, ξ_N are constant vectors.

Proof. (i) Equation (5) is rewritten as

$$\left(\ddot{\varrho} - \frac{L^2}{\varrho^3} \right) = -\Psi.$$

A solution of relative equilibrium exists only if $\ddot{\varrho} = \dot{\varrho} = 0$; if so, then we have $L^2/\varrho_0^3 = \Psi$, and $\dot{\theta} = \omega = \sqrt{\Psi/\varrho_0}$ in view of Equations (4).

(ii) Equation (4) entails $L = 0$.

(iii) The distances $r_{j,k}$ in Equation (5) are rescaled by a factor $\varrho(t)$. Hence, the right member obviously depends on ϱ . Since in Equation (3) the vectors ξ must be fixed, Ψ needs to depend on ϱ , but not on ξ . Q.E.D.

2. COLLINEAR CENTRAL CONFIGURATIONS

In the case of collinear orbits, the vectors ξ_1, \dots, ξ_N must all be parallel; hence a single coordinate describes the position of the bodies on a line, and the angle θ describes how the line is rotated in the plane.

Let us denote by $\xi = (\xi_1, \dots, \xi_N)$, ordered as $\xi_1 < \dots < \xi_N$, the coordinates of the N bodies on the line, taking the barycentre as the origin. The equation of the barycentre gives $m_1\xi_1 + \dots + m_N\xi_N = 0$.

In view of Lemma 5, we may suppose that we have $\varrho = 1$ at a given instant, so that the configuration of the bodies is given by ξ (on need, just rescale ξ). Denote by $r_{j,k} = |\xi_j - \xi_k|$ the relative distances between two bodies. The attractive force exerted by the k -th body on the j -th one is $\pm m_j m_k \varphi(r_{j,k})$, where the sign is positive if $j < k$, negative otherwise. Hence, ξ_1, \dots, ξ_n must obey the system of equations (forgetting the common factor m_j and assigning a positive sign to the attractive force)

$$(8) \quad \Psi \xi_j = \sum_{k=1}^{j-1} m_k \varphi(r_{k,j}) - \sum_{k=j+1}^N m_k \varphi(r_{j,k}), \quad j = 1, \dots, N,$$

where Ψ is a constant factor which controls the proportion between the attractive force acting on a body and the distance from the barycentre. Here, the first and the last sum are empty for $j = 1$ and $j = N$, respectively. These equations are not independent, since they must satisfy the equation of the barycentre. We introduce the $n = N - 1$ distances between two neighboring bodies

$$(9) \quad \delta_j = r_{j,j+1} = \xi_{j+1} - \xi_j, \quad j = 1, \dots, n,$$

so that for $j < k$ we have $r_{j,k} = \xi_k - \xi_j = \delta_j + \dots + \delta_{k-1}$. We will also use the collective notation $\delta = (\delta_1, \dots, \delta_n)$. Note that by definition we have $\delta_j > 0$, in view of the ordering of the coordinates ξ ; this excludes the case of two or more bodies occupying the same position. We subtract the j -th equation from the next one; thus defining

$$(10) \quad \begin{aligned} Q_j(\delta_j) &= \Psi \delta_j - (m_j + m_{j+1}) \varphi(\delta_j), \\ G_j(\delta) &= - \sum_{k=1}^{j-1} m_k [\varphi(r_{k,j}) - \varphi(r_{k,j} + \delta_j)] \\ &\quad - \sum_{k=j+2}^{n+1} m_k [\varphi(r_{j+1,k}) - \varphi(\delta_j + r_{j+1,k})]. \end{aligned}$$

We recall that the first and the last sum in the definition of $G_j(\delta)$ are empty for $j = 1$ and $j = n + 1 = N$, respectively. With this setting, we write the system of n equations

$$(11) \quad Q_j(\delta_j) = G_j(\delta), \quad j = 1, \dots, n.$$

Denoting by $\ell = r_{1,n+1} = \sum_{j=1}^n \delta_j$ the length of the chain of bodies, we add up all equations (11), and get the useful equation

$$(12) \quad \hat{Q}(\ell) = \hat{G}(\delta),$$

where

$$(13) \quad \begin{aligned} \hat{Q}(\ell) &= \Psi\ell - (m_1 + m_{n+1})\varphi(\ell), \\ \hat{G}(\delta) &= \sum_{k=2}^n m_k [\varphi(r_{k,n+1}) + \varphi(r_{1,k})]. \end{aligned}$$

This establishes the relation between the free parameter $\Psi > 0$ and the length ℓ of the chain of bodies, which is thus determined once the distances δ are found. We show how to find Equation (13). Exploiting the expression for $G_j(\delta)$ in (10), and appropriately removing the meaningless terms in $G_1(\delta)$ and $G_n(\delta)$, we calculate the sum $\sum_{j=1}^n G_j(\delta)$ as

$$\begin{aligned} & - \sum_{j=2}^n \sum_{k=1}^{j-1} m_k [\varphi(r_{k,j}) - \varphi(r_{k,j+1})] - \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=j+2}^{n+1} m_k [\varphi(r_{j+1,k}) - \varphi(r_{j,k})] \\ &= - \sum_{k=1}^{n-1} m_k \sum_{j=k+1}^n [\varphi(r_{k,j}) - \varphi(r_{k,j+1})] - \sum_{k=3}^{n+1} m_k \sum_{j=1}^{k-2} [\varphi(r_{j+1,k}) - \varphi(r_{j,k})] \\ &= - \sum_{k=1}^{n-1} m_k [\varphi(r_{k,k+1}) - \varphi(r_{k,n+1})] - \sum_{k=3}^{n+1} m_k [\varphi(r_{k-1,k}) - \varphi(r_{1,k})]. \end{aligned}$$

Here, in the intermediate line the sums have been exchanged, with an appropriate resetting of the limits. This produces two telescopic sums over the index j , which result in the simplified expression of the third line. Using the latter expression, we add up Equations (11), and using also $r_{k,k+1} = \delta_k$ we compensate the terms $(m_j + m_{j+1})\varphi(\delta_j)$ on the left side; thus, with some recasting, we get Equation (12).

With this setting, the problem of finding a central equilibrium is enunciated as follows:

Given $\Psi > 0$, to find a solution of Equations (11) and (10).

That is, we are actually looking for a family of central configurations parameterized by the positive quantity Ψ .

Proposition 8. *With the hypotheses of Theorem 1 on the force $\varphi(r)$, for any finite $\Psi > 0$, and for any set of positive masses m_1, \dots, m_N , the system of Equations (11) possesses a unique solution.*

The rest of the present section is devoted to the proof.

2.1. Preliminary general facts

By definition, the variables δ are all positive; hence we may consider them as belonging to the positive quadrant \mathbb{R}_+^n of \mathbb{R}^n .

We denote by Δ_j the set of the $n - 1$ variables δ_k with $k \neq j$, namely

$$\Delta_j = \{\delta_1, \dots, \delta_{j-1}, \delta_{j+1}, \dots, \delta_n\}.$$

When we say that Δ_j is fixed, we mean that every variable in Δ_j is fixed, so that the sole variable δ_j may vary.

Lemma 9. *The following properties hold true.*

- (i) *The functions $Q_j(\delta_j)$ and $\hat{Q}(\ell)$ are continuous and monotonically increasing between the limits*

$$\lim_{\delta_j \rightarrow 0} Q_j(\delta_j) = -(m_j + m_{j+1})\varphi(0), \quad \lim_{\delta_j \rightarrow +\infty} Q_j(\delta_j) = +\infty,$$

and

$$\lim_{\ell \rightarrow 0} \hat{Q}(\ell) = -(m_1 + m_{n+1})\varphi(0), \quad \lim_{\ell \rightarrow +\infty} \hat{Q}(\ell) = +\infty,$$

where $\varphi(0)$ may be either finite or infinite, depending on the character of the function $\varphi(r)$.

- (ii) *Let Δ_j be fixed, so that $G_j(\delta)$ may be considered as depending only on δ_j . This function is negative, continuous and monotonically decreasing between the limits*

$$\lim_{\delta_j \rightarrow 0} G_j(\delta) = 0,$$

$$\lim_{\delta_j \rightarrow +\infty} G_j(\delta) = - \sum_{k=1}^{j-1} m_k [\varphi(r_{k,j})] - \sum_{k=j+2}^N m_k [\varphi(r_{j+1,k})],$$

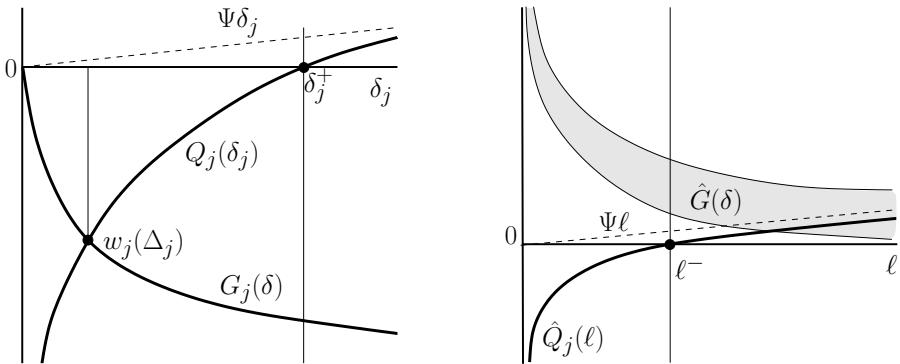


Fig. 1 – Illustrating the argument of proof of Lemmas 10 and 11. Left: the functions $Q_j(\delta_j)$ and $G_j(\delta)$, with Δ_j fixed, with the intersection $w_j(\Delta_j)$ and the upper bound δ_j^+ . Right: the function $\hat{Q}(\ell)$ and the lower bound ℓ^- ; $\hat{G}(\delta)$ is positive, and its graph lies in the gray band.

- (iii) For $k \neq j$, let Δ_k be fixed. Then $G_j(\delta)$, considered as depending only on δ_k , is a continuous and monotonically increasing function.
- (iv) The function $\hat{G}(\delta)$ is positive, continuous and monotonically decreasing between a positive, possibly infinite value for $\ell \rightarrow 0$, and with $\hat{G}(\delta) \rightarrow 0$ if all distances $r_{j,k}$ tend to $+\infty$. Moreover, it monotonically decreases if any of the distances $r_{j,k}$ increases.

Proof. According to Formulæ (10) and (13), all functions considered here are sums of continuous functions; hence they are continuous. In view of our hypotheses on $\varphi(r)$, for any positive h we have

$$(14) \quad \varphi(h) - \varphi(h + \delta_j) \quad \begin{cases} = 0 & \text{for } \delta_j \rightarrow 0, \\ = \varphi(h) & \text{for } \delta_j \rightarrow +\infty. \end{cases}$$

(i) The function $\varphi(r)$ is positive and monotonically decreasing, by hypothesis. The limits in the statement are straightforward consequences of Equation (14).

(ii) Every pair of square brackets in the expression (10) of $G_j(\delta)$ contains a difference of the form $\varphi(h) - \varphi(h + \delta_j)$, where $h > 0$ is one of the distances $r_{k,j}$ with $k < j$ or $r_{j+1,k}$ with $j+1 < k$, independent of δ_j ; since Δ_j is fixed, h is fixed, too. Then the difference is a monotonically increasing continuous function of δ_j , which enters with negative sign in $G_j(\delta)$. The limits are a straightforward consequence of Equations (14).

(iii) Every square bracket in the expression of the function G_j contains a difference of either form

$$\varphi(h + \delta_j) - \varphi(h) \quad \text{or} \quad \varphi(h + \delta_k + \delta_j) - \varphi(h + \delta_k) ,$$

where $h > 0$ is a finite sum of some quantities δ , excluding both δ_j and δ_k . In the first case the difference does not depend on δ_k , and does not affect G_j . In the second case, let $\delta_k < \delta'_k$. Then, in view of the convexity hypothesis (H3) on the force $\varphi(r)$, we have

$$\varphi(h + \delta_k) - \varphi(h + \delta_k + \delta_j) > \varphi(h + \delta'_k) - \varphi(h + \delta'_k + \delta_j) .$$

This enters with negative sign in $G_j(\delta)$, which proves the claim.

(iv) The function $\hat{G}(\delta)$ is a sum of positive functions $\varphi(r_{jk})$, which are all positive, continuous and monotonically decreasing; hence it inherits these properties. For $\ell \rightarrow 0$ we have $\varphi(r_{j,k}) \rightarrow \varphi(0)$ for every j, k ; this gives a positive, possibly infinite sum. If $r_{j,k} \rightarrow +\infty$ then $\varphi(r_{j,k}) \rightarrow 0$, which proves the second limit. Q.E.D.

In Fig. 1 we represent the qualitative graphs of the functions $Q_j(\delta_j)$ and $G_j(\Delta_j)$ (left) and of $\hat{Q}(\ell)$ (right). The function $\hat{G}(\delta)$ is positive, which is enough in order to establish some bounds on the solution of Equation (11).

Lemma 10. *For $\Psi > 0$ finite, the following holds true.*

(i) *There are positive numbers $\ell^- < \ell^+$ such that the length ℓ of the chain of bodies satisfies*

$$\ell^- < \ell < \ell^+ .$$

(ii) *For $j = 1, \dots, n$, there are positive numbers $\delta_j^- < \delta_j^+$ such that a solution of Equations (11), if it exists, must belong to the n -dimensional rectangle*

$$\Pi = (\delta_1^-, \delta_1^+) \times \dots \times (\delta_n^-, \delta_n^+) .$$

Proof. The right member of Equation (12) is a positive quantity. This, in view of Lemma 9-(i), entails that the equation $\hat{Q}(\ell) = 0$ possesses a single solution ℓ^- which provides the lower bound $\ell^- < \ell$. Since $G_j(\delta)$ is negative, the solution δ_j^+ of the approximated equation $Q_j(\delta_j) = 0$ provides the bound $\delta_j < \delta_j^+$. In turn, this provides also the upper bound $\ell < \ell^+ = \sum_{j=1}^n \delta_j^+$. Coming to the existence of lower bounds δ_j^- , the case $\varphi(0)$ finite is trivial; hence we examine the case $\varphi(0) = +\infty$. Recall that $\sum_j \delta_j \geq \ell^- > 0$, so

that at least one δ_j must be positive. Let us isolate two relevant terms in the second Equation (10), so as to rewrite it in the convenient form

$$(15) \quad G_j(\delta) = -m_{j-1}[\varphi(\delta_{j-1}) - \varphi(\delta_{j-1} + \delta_j)] - m_{j+2}[\varphi(\delta_{j+1}) - \varphi(\delta_j + \delta_{j+1})] \\ - \sum_{k=1}^{j-2} m_k [\varphi(r_{k,j}) - \varphi(r_{k,j} + \delta_j)] \\ - \sum_{k=j+3}^{n+1} m_k [\varphi(r_{j+1,k}) - \varphi(\delta_j + r_{j+1,k})].$$

In view of $\varphi(r)$ being convex, in the two sums we have, respectively,

$$\varphi(\delta_{j-1}) - \varphi(\delta_{j-1} + \delta_j) > \varphi(r_{k,j}) - \varphi(r_{k,j} + \delta_j), \\ \varphi(\delta_{j+1}) - \varphi(\delta_j + \delta_{j+1}) > \varphi(r_{j+1,k}) - \varphi(\delta_j + r_{j+1,k}).$$

Putting these inequalities in Equations (15) and introducing the abbreviated notations $\mu_1 = \nu_n = 0$, and

$$\mu_j = m_1 + \dots + m_{j-1} \quad \text{for } j > 1, \\ \nu_j = m_{j+2} + \dots + m_{n+1} \quad \text{for } j < n.$$

we find that for any δ we have

$$(16) \quad G_j(\delta) > -\mu_j[\varphi(\delta_{j-1}) - \varphi(\delta_{j-1} + \delta_j)] - \nu_j[\varphi(\delta_{j+1}) - \varphi(\delta_j + \delta_{j+1})].$$

Let us now consider the modified system of equations, for $j = 1, \dots, n$,

$$(17) \quad \Psi\delta_j - (m_j + m_{j+1})\varphi(\delta_j) = -\mu_j[\varphi(\delta_{j-1}) - \varphi(\delta_{j-1} + \delta_j)] \\ - \nu_j[\varphi(\delta_{j+1}) - \varphi(\delta_j + \delta_{j+1})];$$

this is obtained from Equations (11), replacing $G_j(\delta)$ with the right members of (16). Therefore, a solution δ' of these equations, compared with the corresponding solution δ^* of Equations (11), must satisfy $\delta'_j < \delta_j^*$. It is immediate to see that it must be $\delta'_j > 0$, in view of the following argument. For $j = 1$, the equation is written as

$$\Psi\delta_1 - (m_1 + m_2)\varphi(\delta_1) = -\nu_1[\varphi(\delta_2) - \varphi(\delta_1 + \delta_2)].$$

For $\delta_1 \rightarrow 0$, the left member tends to $-\infty$, while the right member tends to zero. We may imagine that we should let also $\delta_2 \rightarrow 0$, but this is the

physically meaningless solution. Moreover, the limit is ill defined.¹ The same objection applies to the cases $j > 1$, as the reader may easily see. This entails that all lower bounds δ_j^- must be positive. Q.E.D.

We may find explicit values for δ^- through Equation (17); for instance, trying $\delta_j^- = \ell^-/n$. Define the functions $G_j^-(\delta_j)$ of the sole variable δ_j as

$$(18) \quad G_j^-(\delta_j) = -\mu_j [\varphi(\delta_{j-1}^-) - \varphi(\delta_{j-1}^- + \delta_j)] - \nu_j [\varphi(\delta_{j+1}^-) - \varphi(\delta_j) + \delta_{j+1}^-].$$

For $\delta_j > \delta_j^-$ we have $G_j(\delta) > G_j^-(\delta_j)$, which is a stronger inequality than (16). Thus, the claim (ii) of Lemma 10 holds true with the selected values of δ^- .

Lemma 11. *For any $j = 1, \dots, n$, Equation (11) determines a family of surfaces*

$$\Sigma_j = \{\delta \in \mathbb{R}_+^n : Q_j(\delta_j) = G_j(\delta)\}, \quad j = 1, \dots, n.$$

The surface Σ_j is uniquely projected on the positive quadrant of the variables Δ_j , and is the graph of a continuous and one valued function $\delta_j = w_j(\Delta_j)$, with image in the interval $0 < \delta_j < \delta_j^+$.

Proof. We use Bolzano's theorem. By Lemma 9, for Δ_j fixed, the graphs of the functions $Q_j(\delta_j)$ and $G_j(\delta)$ possess an intersection at a single point δ_j (see Fig. 1). Letting Δ_j to vary, we get the function $w_j(\Delta_j)$, which by construction is continuous and one-valued, and defines the surface Σ_j . The bound $w_j(\Delta_j) < \delta_j^+$ is stated in Lemma 10. Q.E.D.

Corollary 12. *Let $k \neq j$, and Δ_k be fixed. Then $w_j(\Delta_j)$ is continuous, one valued and monotonically increasing with δ_k . Let $\delta_k^- \leq \delta_k \leq \delta_k^+$. Then the curve $\Sigma_j \cap \Pi$ joins continuously the points $(\delta_k^-, w_j(\delta_k^-))$ and $(\delta_k^+, w_j(\delta_k^+))$, and we have*

$$(19) \quad \delta_j^- < w_j(\Delta_j) \Big|_{\delta_k=\delta_k^-} < \delta_j^+, \quad \delta_j^- < w_j(\Delta_j) \Big|_{\delta_k=\delta_k^+} < \delta_j^+.$$

Proof. Let $\delta_k < \delta'_k$, and the corresponding Δ_j and Δ'_j differ only because δ_k is replaced by δ'_k . For $\delta_j = w_j(\Delta_j)$ fixed the function $Q_j(\delta_j)$ does not change. Conversely, by Lemma 9-(iii), $G_j(\delta)$ increases with $\delta_k \rightarrow \delta'_k$. Hence, the unique solution of the equation $Q_j(\delta_j) = G_j(\delta)$ is such that

¹This point will be discussed in some detail for the case $n = 2$, in Section 2.2.

$\delta'_j = w_j(\Delta'_j) > w_j(\Delta_j)$ (see Fig. 1). Let now $\delta_k \in [\delta_k^-, \delta_k^+]$. The intersection $\Sigma_j \cap \Pi$, with Δ_k fixed, is a piece of continuous, monotonically increasing curve, joining the points $(\delta_k^-, w_j(\delta_k^-))$ and $(\delta_k^+, w_j(\delta_k^+))$, on two opposite sides of the rectangle $[\delta_k^-, \delta_k^+] \times [\delta_j^-, \delta_j^+]$. Inequalities (19) are a byproduct of the proof of Lemma 10; only the inequality $\delta_j^- < w_j(\delta_k)$ deserves a comment. If $\delta \in \Sigma_j \cap \Pi$ and $\delta_k = \delta_k^-$ then we have $G_j(\delta) > G^-(\delta_j)$ as defined by (18), so that the inequality is satisfied by the solution of Equation (11).

Q.E.D.

In view of Lemma 11, we may redefine the surfaces Σ_j as

$$(20) \quad \Sigma_j = \{\delta \in \mathbb{R}^n : \delta_j = w_j(\Delta_j)\}.$$

The solution of the system of Equations (11) should be determined by the intersection of the surfaces Σ_j . This is the issue to be dealt with.

2.2. The case of three bodies

Here, as a significant example, we consider the case $N = 3$, hence $n = 2$, which can be illustrated with the help of figures. This is indeed the case first studied by Euler and Lagrange, who, however, considered only the case of Newton's gravitational force.

Writing Equations (10) and (11) in explicit form we get the system

$$(21) \quad \begin{aligned} \Psi\delta_1 - (m_1 + m_2)\varphi(\delta_1) &= -m_3[\varphi(\delta_2) - \varphi(\delta_1 + \delta_2)], \\ \Psi\delta_2 - (m_2 + m_3)\varphi(\delta_2) &= -m_1[\varphi(\delta_1) - \varphi(\delta_1 + \delta_2)]. \end{aligned}$$

In view of Lemma 10 we know that a solution (δ_1^*, δ_2^*) of the equations, if any, must lie inside the rectangle $\Pi = (\delta_1^-, \delta_1^+) \times (\delta_2^-, \delta_2^+)$.

The equations are symmetric in δ_1 and δ_2 ; hence it is enough to discuss the second one, so that we have $j = 2$ and $\Delta_2 = \{\delta_1\}$. In Fig. 2 we draw the qualitative graph of the functions $w_1(\delta_2)$ (blue) and $w_2(\delta_1)$ (red) in different possible cases. The rectangle Π where the desired solution may be located is highlighted; grey regions are progressively excluded.

In view of Lemma 11 and Corollary 12, the second Equation (21) determines a curve Σ_2 , defined by a continuous, one-valued and monotonically increasing function $w_2(\delta_1)$. The former property excludes the panel (a); the latter excludes the panel (b).

The graph of $w_2(\delta_1)$ for $\delta_1 \rightarrow 0$ may deserve some comment. This is not strictly necessary, for we are actually interested only on the interval $\delta_1 \geq \delta_1^-$,

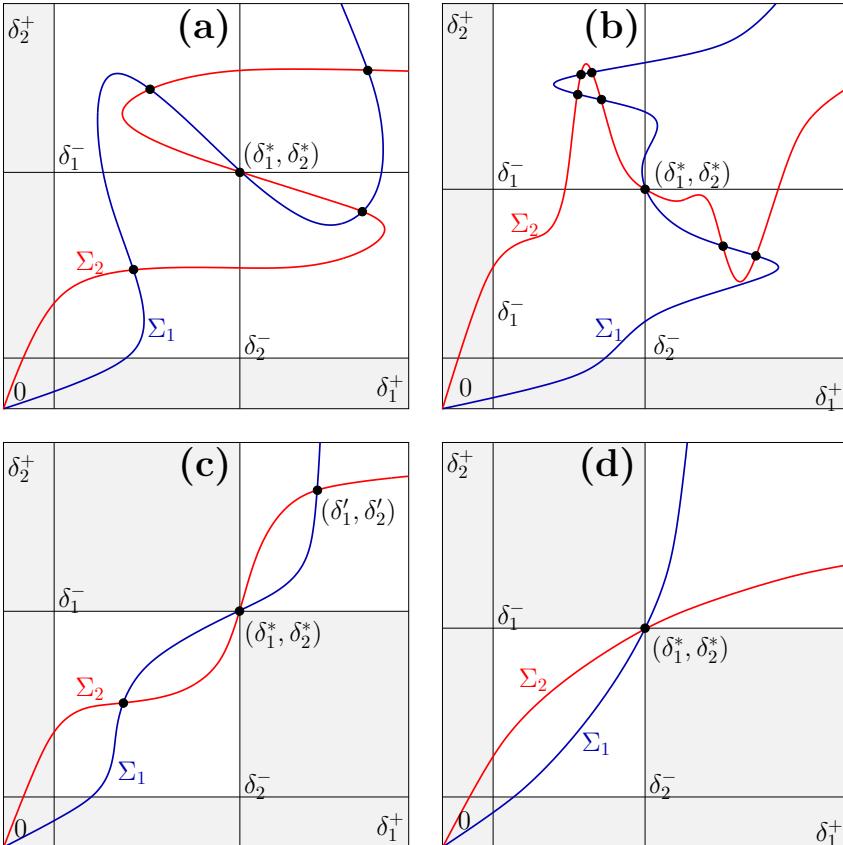


Fig. 2 – Schematic representation of the curves Σ_1 , Σ_2 defined by Equations $Q_1(\delta_1) = G_1(\delta_1, \delta_2)$ and $Q_2(\delta_2) = G_2(\delta_1, \delta_2)$, inside the rectangle Π . The four panels suggest some possible layout of the graphs.

but it may help to clarify the qualitative behaviour of the curve close to the origin. The critical case shows up if we let $\varphi(0) = +\infty$; we are confronted with a double limit $\delta_1 \rightarrow 0$ and $\delta_2 \rightarrow 0$. We are actually interested in determining $\lim_{\delta_2 \rightarrow 0} w_1(\delta_2)$; hence we proceed as follows. Let us choose a small $\varepsilon > 0$, and redefine $\varphi(r) = \varphi(\varepsilon)$ for $r < \varepsilon$. For $\delta_1 \rightarrow 0$ we just replace the infinite value $\varphi(0)$ in Equation (21) with the finite $\varphi(\varepsilon)$. Thus we get a positive solution $\delta'_1 = w_1(0)$, depending on ε . In the limit $\varepsilon \rightarrow 0$, for $\delta_1 < \varepsilon$

we keep only the dominating terms, thus rewriting Equation (21) as

$$\varphi(\delta_2) \simeq \frac{m_1}{m_1 + m_2 + m_3} \varphi(\delta_1) .$$

This shows that for small δ_1 we have $w_2(\delta_1) > \delta_1$, with $\delta_2 \rightarrow 0$, as represented in the figure. The same considerations, mutatis mutandis, apply to the first Equation (21), and so to the curve Σ_1 and to the function $w_1(\delta_2)$. We just note that when we let $\delta_2 \rightarrow 0$ we should exchange the role of the two limits, which makes the apparent intersection $\Sigma_1 \cap \Sigma_2$ at the origin in the figures a spurious fact.

Let us now focus on the intersection $\Sigma_1 \cap \Sigma_2$, looking at panels (c) and (d) of Fig. 2. We aim at proving that an intersection point exists, and that it is unique. From Corollary 12–(iii), we know that $\Sigma_1 \cap \Pi$ joins continuously two points on the lower and upper side of the rectangle Π ; similarly, $\Sigma_2 \cap \Pi$ joins continuously two points on the left and right side of the rectangle. In view of Bolzano's theorem, the two curves must have an intersection point. It remains to show that this point is unique.

By contradiction, suppose that there exists $\delta' \in \Sigma_1 \cap \Sigma_2$ such that $\delta^* \neq \delta'$. By possibly exchanging the points δ^* and δ' , we may consider only two different cases, namely: (i) $\delta'_1 \leq \delta_1^*$ and $\delta'_2 > \delta_2^*$; or (ii) $\delta'_1 > \delta_1^*$ and $\delta'_2 > \delta_2^*$. We show that neither of these two cases occurs. The case (i) is that of panels (a) or (b) of Fig. 2, that we have already excluded. In case (ii), both δ^* and δ' must satisfy also Equation (12) for the length $\ell = \delta_1 + \delta_2$, which in our case is written as

$$\Psi\ell - (m_1 + m_3)\varphi(\ell) = m_2 [\varphi(\delta_1) + \varphi(\delta_2)] ,$$

with the corresponding lengths $\ell^* = \delta_1^* + \delta_2^*$ and $\ell' = \delta'_1 + \delta'_2$. This cannot be, for, by increasing both δ_1 and δ_2 , the left member increases, and the right member decreases, in view of the monotonically decreasing character of $\varphi(r)$. This excludes the case of panel (c), thus showing that panel (d), with a single intersection point, is the correct one.

As an example, consider the case of Newtonian force $\varphi(r) = r^{-2}$, using some algebra. We may conveniently introduce better variables, adapted to the case $n = 2$. Using the length $\ell = \xi_3 - \xi_1$ as a parameter, we set $\delta_1 = \sigma$ and $\delta_2 = \ell - \sigma$, and rewrite Equations (21) as

$$(22) \quad \begin{aligned} \Psi\sigma - (m_1 + m_2)\varphi(\sigma) &= -m_3 [\varphi(\ell - \sigma) - \varphi(\ell)] , \\ \Psi(\ell - \sigma) - (m_2 + m_3)\varphi(\ell - \sigma) &= -m_1 [\varphi(\sigma) - \varphi(\ell)] . \end{aligned}$$

Multiplying the first equation by $(\ell - \sigma)$ and the second by σ , and subtracting member by member we get

$$(m_1 + m_2)(\ell - \sigma)\varphi(\sigma) - m_3(\ell - \sigma)[\varphi(\ell - \sigma) - \varphi(\ell)] \\ = (m_2 + m_3)\sigma\varphi(\ell - \sigma) - m_1\sigma[\varphi(\sigma) - \varphi(\ell)] .$$

Now we introduce a variable $x = \sigma/\ell$, with $x \in (0, 1)$, and set $\varphi(r) = \frac{1}{r^2}$. Rearranging the equation we write

$$\frac{m_1 + m_2(1-x)}{x^2} - \frac{m_3 + m_2x}{(1-x)^2} = m_1x - m_3(1-x) .$$

We are thus led to solve the algebraic equation of fifth degree

$$(m_3 + m_1)x^5 - (3m_3 + 2m_1)x^4 + (3m_3 + 2m_2 + m_1)x^3 \\ - (3m_2 + m_1)x^2 + (3m_2 + 2m_1)x - m_1 - m_2 = 0 .$$

We know from our general argument that a unique solution exists; on need, we calculate it through numerical methods. For given ℓ , this gives δ_1 and δ_2 , while Ψ may be found through Equation (12). The discussion of the orbits goes as in the general case.

We have thus recovered the collinear solutions discovered by Euler (Euler 1767; Euler 1770) and Lagrange (Lagrange 1772). However, we emphasize once again that our theory applies also to the case of generic forces satisfying our hypotheses (H1)–(H3).

2.3. Proof of Proposition 8

Coming to the general case $N > 3$, we study the intersections of the surfaces Σ_j defined by Equation (20). Corollary 12 plays a main role here. We use notations such as $F(\delta)|_{\Sigma_j}$ to denote the restriction of a function $F(\delta)$ to the surface Σ_j . That is, $F(\delta)|_{\Sigma_j} = F(\delta)|_{\delta_j=w_j(\Delta_j)}$, so that the function on the left side is made independent of δ_j , and depends only on $n - 1$ variables.

We construct the proof through a recurrent procedure, schematically represented in Fig. 3. Let us define the sets

$$(23) \quad \Omega_1 = \Sigma_1 , \quad \Omega_s = \Omega_{s-1} \cap \Sigma_s \quad \text{for } s = 2, \dots, n .$$

Our aim is to prove that $\{\Omega_s\}$ is a sequence of surfaces of decreasing dimension $n - s$, ending up with a single point δ^* which is the solution of

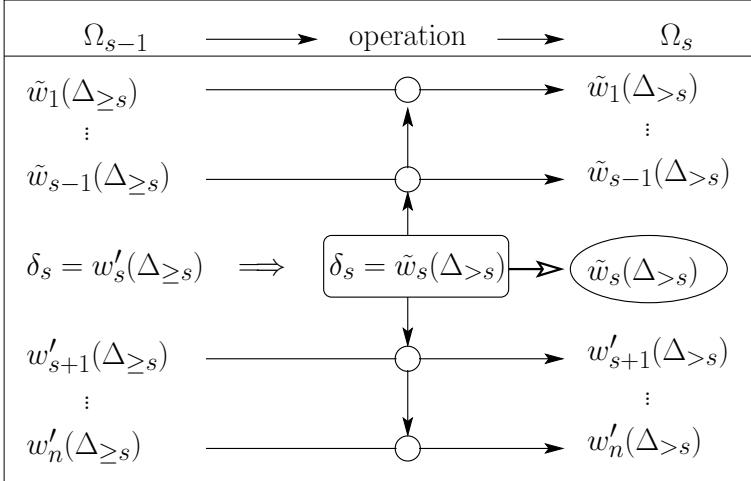


Fig. 3 – Schematic representation of the recurrent proof of Proposition 8

Equations (10). We use the simplified notation $\Delta_{<s} = \{\delta_1, \dots, \delta_{s-1}\}$, and similar notations $\Delta_{\leq s}$, $\Delta_{>s}$ and $\Delta_{\geq s}$, with obvious meaning.

At every step $s = 1, \dots, n - 1$, we construct by recurrence a set of functions

$$\begin{aligned} \tilde{w}_j(\Delta_{>s}) &\quad \text{for } j = 1, \dots, s, \\ w'_k(\Delta_{>s}) &\quad \text{for } k = s + 1, \dots, n; \end{aligned}$$

(we avoid overloading the notations by introducing a further label s which identifies the step; the scheme shows how the functions actually change, and the functions on the right of the scheme completely replace those on the left). The $(n - s)$ -dimensional surface Ω_s (in the right column of Fig. 3) is described by the s functions $\tilde{w}_1(\Delta_{>s}), \dots, \tilde{w}_s(\Delta_{>s})$. The remaining functions $w'_k(\Delta_{>s})$ are defined as $w'_k(\Delta_{>s}) = w_k(\Delta_k)|_{\Omega_s}$, namely the restriction of the initial functions to the surface Ω_s . A key point is that at every step the functions $w'_k(\Delta_{>s})$ enjoy the properties of Corollary 12, that is, they are continuous and monotonically increasing, and satisfy the inequalities (19). Now we describe the procedure in algorithmic form, postponing the proof of these properties.

The first step, $s = 1$, is a trivial matter. Noting that $\Delta_{>1} = \Delta_1$, we fill the left column of the scheme in Fig. 3, corresponding to $s - 1 = 1$, by just setting

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \tilde{w}_1(\Delta_{>1}) = w_1(\Delta_1); \\ \delta_k &= w'_k(\Delta_{>1}) = w_k(\Delta_k)|_{\delta_1 = \tilde{w}_1(\Delta_{>1})}, \quad k = 2, \dots, n. \end{aligned}$$

The substitution $\delta_1 = \tilde{w}_1(\Delta_{>1})$ on the last line performs the restriction $w_k(\Delta_k)|_{\Omega_1}$; the variable δ_1 is made to depend on $\Delta_{>1}$, which reduces the dimension. The point to be highlighted is that $\delta_2 = w_s(\Delta_2)$ defines the surface Σ_2 , since the second member is independent of δ_2 ; the substitution removes δ_1 from the free arguments, but reintroduces δ_2 , thus promoting the definition to be an equation for δ_2 .

Now we come to the recurrent part of the proof, $s = 2, \dots, n-1$. Suppose that we have filled the left column of the scheme for Ω_{s-1} . We focus on the central row of the scheme. Solving the equation $\delta_s = w'_s(\Delta_{>s})$ with respect to δ_s , we get the new function $\delta_s = \tilde{w}_s(\Delta_{>s})$, written in the central rectangle and replicated in the right column; this replaces the function $w'_s(\Delta_{\geq s})$ on the left. The other lines mean that in each function on the left, either $\tilde{w}_j(\Delta_{\geq s})$ or $w'_k(\Delta_{\geq s})$, we substitute $\delta_s = \tilde{w}_s(\Delta_{>s})$, symbolized by the small circles; this represents indeed the restriction, either $\tilde{w}_j(\Delta_{\geq s})|_{\Omega_s}$ or $w'_k(\Delta_{\geq s})|_{\Omega_s}$, reported in the right column as depending only on $\Delta_{>s}$.

For $s = n$, in the left column we have functions of the sole variable δ_n . The solution of the equation $\delta_n = w'(\delta_n)$ provides a value satisfying $\delta_n^* = \tilde{w}_n(\delta_n^*)$. The other lines determine $\delta_j^* = \tilde{w}_j(\delta_n^*)$. This provides the final value $\delta^* = (\delta_1^*, \dots, \delta_n^*)$ which is the desired solution of Equation (10).

This describes the algorithm. Here from, in view of Lemma 10, we restrict our attention to the rectangle II. We should prove the following:

- (i) that the solution of the equation $\delta_s = w'_s(\Delta_{>s})$ exists and is unique;
- (ii) that the functions $\tilde{w}_j(\Delta_{>s})$ and $w'_k(\Delta_{>s})$ found at step s are continuous and monotonically increasing, and enjoy the properties of Corollary 12 with respect to the variables $\Delta_{>s}$ on which they depend.

It may seem natural to argue that a solution of the equation for δ_s should exist, and that it inherits the properties of Corollary 12, for we are selecting a restricted set among the solutions of the equation $Q_s(\delta_s) = G_s(\Delta_s)$, which do exist, indeed. This, however, may be a puzzling point; so let us clarify it. We make reference to Fig. 4.

For $s = 1$ we have $\tilde{w}_1(\Delta_{>1}) = w_1(\Delta_1)$, and there is nothing to prove. The functions $w'_k(\Delta_{>1}) = w_k(\Delta_k)|_{\Omega_1}$ are compositions of continuous and monotonically increasing functions, that only make δ_1 to depend on $\Delta_{>1}$. Hence, $w'_k(\Delta_{>1})$ inherits all properties, including those of Corollary 12.

Suppose that the claims (i) and (ii) are true up to $s-1$, and focus attention on the equation $\delta_s = w'_s(\Delta_{>s})$. Let, for a moment, $\Delta_{>s}$ be fixed; thus the equation means that we may restrict our attention to considering a continuous, monotonically increasing map $w'_s(\delta_s; \Delta_{>s})$, depending on the variables $\Delta_{>s}$ as parameters. By Corollary 12 the image of the map is an interval

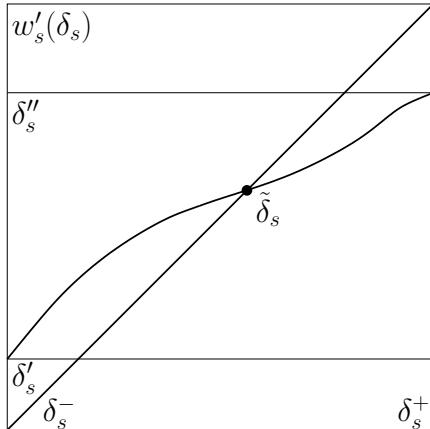


Fig. 4 – Illustrating the solution of the equation $\delta_s = w'_s(\Delta_{>s})$, for $\Delta_{>s}$ fixed, in the square $(\delta_s^-, \delta_s^+) \times (\delta_s^-, \delta_s^+)$.

$[\delta'_s, \delta''_s] \subset [\delta_s^-, \delta_s^+]$, with the properties stated in Equations (19). The qualitative graph of the map is represented by the curve in Fig. 4, to be intersected with the graph of the identity. By Bolzano's theorem, there is at least one fixed point $\tilde{\delta}_s$. We prove that such a point is unique, using Equation (12) for the length $\ell = \delta_1 + \dots + \delta_n$ of the chain. By contradiction, suppose that there is a second fixed point $\bar{\delta}_s > \tilde{\delta}_s$. Since $\Delta_{>s}$ are fixed and all functions \tilde{w}_j are monotonically increasing with δ_s , the left member $\hat{Q}(\ell)$ must increase. Conversely, the right member $\hat{G}(\delta)$, as defined by Equation (13), must decrease. Therefore a second fixed point $\bar{\delta}_s$ cannot exist.

Let now Δ_s to vary. In all previous steps we have just made a sequence of restrictions of the initial functions $w_s(\Delta_s)$ to the surfaces $\Omega_1, \dots, \Omega_{s-1}$; thus we have $w'_s(\Delta_{\geq s}) = w_s(\Delta_s)|_{\Omega_{s-1}}$. That is, at every point $\Delta_{\geq s}$ we calculate the composed function

$$w'(\Delta_{\geq s}) = w_s(\tilde{w}_1(\Delta_{\geq s}), \dots, \tilde{w}_{s-1}(\Delta_{\geq s}), \delta_s, \dots, \delta_n),$$

Letting any of the variables $\Delta_{>s}$ to increase, and by the induction hypothesis, the functions $\tilde{w}_j(\Delta_{\geq s})$ increase too, and are continuous and one valued. By composition, $w'(\Delta_{\geq s})$ inherits all these properties. For any $\Delta_{\geq s}$ we determine an unique point $\tilde{\delta}_s(\Delta_{>s})$, thus constructing a function which is still continuous, one valued and monotonically increasing with every variable in $\Delta_{>s}$ (Fig. 4 may help). Furthermore, for any $\Delta_{\geq s}$ the interval $[\delta_s^-, \delta_s^+]$ is mapped into $[\delta'_s, \delta''_s] \subset [\delta_s^-, \delta_s^+]$, thus making $\tilde{\delta}_s(\Delta_{>s})$ to inherit the proper-

ties of Corollary 12. Let us define the new function

$$(24) \quad \tilde{w}_s(\Delta_{>s}) = w'_s(\Delta_{\geq s}) \Big|_{\delta_s = \tilde{\delta}_s}.$$

This is again a composition of continuous, one valued and monotonically increasing functions, which for any $\Delta_{>s}$ maps the interval $[\delta_s^-, \delta_s^+]$ into itself, and retains all desired properties, including those of Corollary 12. This completes the induction step up to $n - 1$.

For $s = n$ we use only the proof that the equation $\delta_n = w'(\delta_n)$ has a unique solution δ_n^* ; thus the substitution $\delta_n = \delta_n^*$ makes the right column of the scheme in Fig. 3 to contain only unique numbers δ_j^* . As already said, this provides the final value $\delta^* = (\delta_1^*, \dots, \delta_n^*)$ which is the desired solution of Equation (10). The proof of Proposition 8 is thus complete.

3. RELATIVE EQUILIBRIA AND STATIONARY ORBITS

We come to the proof of Theorem 1. We show that to every solution δ^* of the system of equations (11) there corresponds a relative equilibrium. The orbits are written as in (3), with the bodies aligned on a straight line at positions ξ_1, \dots, ξ_N . These positions are calculated from $\delta_1, \dots, \delta_n$, as follows. We first set, by recurrence, $\xi_1 = 0$ and $\xi_j = \xi_{j-1} + \delta_j$ for $j = 2, \dots, N$; then we translate the origin to the barycentre. Equation (12) provides the length ℓ of the chain. According to Corollary 7, for a stationary orbit we have $\varrho(t) = \varrho_0$ and $\dot{\theta} = \omega = L/\varrho_0^2$, where L is determined from the relation $L^2/\varrho_0^3 = \Psi$. Recall that at the beginning of Section 4 we have introduced a rescaling so that $\varrho_0 = 1$. Thus, by Proposition 8, the desired stationary orbit is described as

$$\varrho(t) = 1, \quad \omega = \sqrt{\Psi}.$$

Since a solution exists for any positive Ψ , we have actually found a whole one-parameter family of stationary orbits. Any such solution corresponds to a given order of the masses, which is given in advance. Hence, by applying an arbitrary permutation, and identifying symmetric solutions obtained by inversion of the order, we may find $N!/2$ different configurations. This completes the proof of Theorem 1.

4. HOMOGRAPHIC ORBITS AND HOMOTHETIC ORBITS

The question concerning homographic orbits and homothetic orbits is more challenging: the point that deserves to be examined is whether a rescaling of

coordinates with a factor $\varrho(t)$ may be introduced in a form compatible with Equations (4). As stated in Corollary 7, we should replace the constant Ψ Equation (3) with a function $\psi(\varrho)$, satisfying a compatibility relation with the function $\varphi(\varrho r)$.

Corollary 13. *Let us suppose that $\varphi(\varrho r) = g(\varrho)\varphi(r)$. Then, to any solution of Equations (8) with a given positive Ψ we may associate a family of solutions parameterized by $\varrho > 0$, just substituting the constant Ψ with the function $\psi(\varrho) = \Psi g(\varrho)$, and leaving $\xi = (\xi_1, \dots, \xi_N)$ fixed.*

The proof is just matter of factoring out $g(\varrho)$ in the right members of Equations (8).

According to Corollary 7, the solution of Newton's equation for the central motion provides both functions $\varrho(t)$ and $\theta(t)$, the constant L being calculated from the initial data. Since all positions of the bodies are multiplied by a common factor $\varrho(t)$, the ratio between mutual distances of bodies remains constant.

Homothetic orbits are a particular case, when the initial conditions are such that $L = 0$. In this case the motion is rectilinear.

It is quite natural, though not necessary for a dynamical model, to assume that the force function $\varphi(r)$ should be differentiable. In this case we prove that the function should be homogeneous, hence a power law.

Lemma 14. *Let the force function $\varphi(r)$ be differentiable. Then we have $\varphi(r) \propto r^\alpha$ with some α , so that $\psi(\varrho) \propto \varrho^\alpha$.*

Proof. Let $\varrho = 1 + \varepsilon$, and write

$$\begin{aligned}\varphi((1 + \varepsilon)r) &= \varphi(r) + \varepsilon r \varphi'(r) + o(\varepsilon), \\ g(1 + \varepsilon)\varphi(r) &= [g(1) + \varepsilon g'(1) + o(\varepsilon)]\varphi(r).\end{aligned}$$

Setting $g(1) = 1$ and $g'(1) = \alpha$ and equating the coefficients of ε we immediately get the equation $r\varphi'(r) = \alpha\varphi(r)$. By separation of variables we get $\varphi(r) = r^\alpha$ up to a multiplicative factor, as claimed. Q.E.D.

This Lemma justifies the introduction of our hypothesis (H4). The proof of Theorem 2 is thus concluded.

We illustrate our result by drawing some orbits for three bodies in Fig. 5; the bodies are labeled as A (green), B (red) and C (blue). In the upper left panel we draw the orbits for the Newtonian gravitational force, $\varphi(r) = 1/r^2$: the orbits are homographic ellipses. The right upper plane shows the orbits for the force $\varphi(r) = 1/r^{3/2}$; the orbits are still homographic, and exhibit

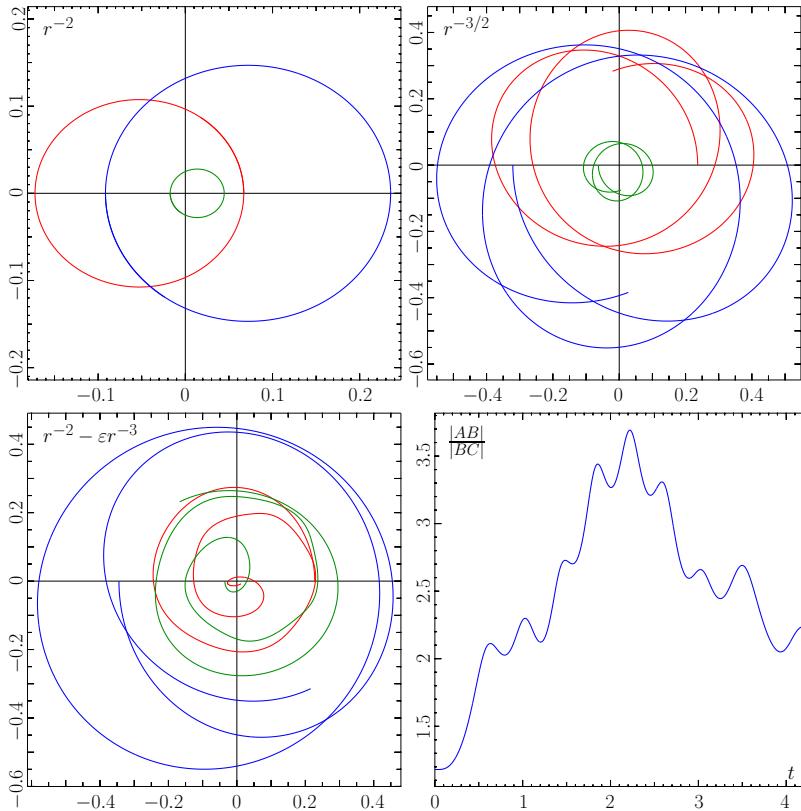


Fig. 5 – Collinear solutions of the problem of three bodies. Upper left panel: $\varphi(r) = 1/r^2$, homographic ellipses. Upper right panel: $\varphi(r) = 1/r^{3/2}$, homographic orbits with apsidal precession. Lower left panel: a non-homogeneous force $\varphi(r) = 1/r^2 - \varepsilon/r^3$, with $\varepsilon = 0.225$; the orbits are not homographic. Lower right panel: the time evolution of the ratio $|AB| / |BC|$.

an apsidal precession with an angle independent of the radius, as predicted by Newton (see, for instance, (Giorgilli and Guicciardini 2021)). The lower panels refer to the non-homogeneous force $\varphi(r) = 1/r^2 - \varepsilon/r^3$, where ε is a positive parameter; stationary (circular) orbits do exist as well, but non-stationary orbits are not homographic, as predicted by our theory. This is confirmed by the lower right panel: the time evolution of the ratio of the distances $|AB| / |BC|$ is not constant.

5. CONCLUSIONS

We have proved the existence of collinear central configurations for a system of N bodies, thus generalizing the solutions of the problem of three bodies found by Euler and Lagrange. With respect to the existing literature, we consider a general class of forces, obeying mild conditions of monotonicity, continuity and convexity. This includes in particular, as a subclass, forces depending on an inverse power of distance.

As a general fact, we prove the existence of stationary solutions, akin to relative equilibria, with the bodies revolving around the barycentre in a rigid configuration. Then we prove the existence of homographic and homothetic orbits by restricting the forces to obey an inverse power law. The latter forces are widely considered in Newton's *Principia*.

Our discussion reduces the study concerning the qualitative shape of homographic orbits to that of a single body moving in a central force field. A detailed discussion of the latter point would require a considerable number of pages, which is incompatible with the length of an article like this. On the other hand, it may be found on classical treatises on Mechanics or Celestial Mechanics — Newton's, for instance.

ACKNOWLEDGEMENTS

We want to express our gratitude to Diego Noja, Simone Paleari and Tiziano Penati for their careful reading of the text and for useful suggestions.

REFERENCES

- Euler L. (1766). *Considerationes de motu corporum coelestium*. In: «Novi Commentarii Academiae Scientiarum Petropolitanae», 10: 544-558 [Reprinted in: Id. (1952), *Opera omnia*, s. II, vol. 25, 246-257].
- Euler L. (1767). *De motu rectilineo trium corporum se mutuo attrahentium*. In: «Novi Commentarii Academiae Scientiarum Petropolitanae», 11: 144-151 [Reprinted in: Id. (1952), *Opera omnia*, s. II, vol. 25, 281-289].
- Euler L. (1770). *Considérations sur le problème des trois corps*. In: «Mémoires de l'Académie des Sciences de Berlin», 19: 194-220 [Reprinted in: Id. (1953), *Opera omnia*, s. II, vol. 26, 246-257].
- Giorgilli A. and N. Guicciardini (2021). *La legge gravitazionale dell'inverso del quadrato nei Principia di Newton*. In: «Rendiconti dell'Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere – Classe di Scienze matematiche e naturali», 155: 169-196.
- Lagrange J.L. (1772). *Essai sur le problème des trois corps*. In: «Mémoires de l'Académie des Sciences de Paris» [Reprinted in: Id. (1873), *Oeuvres de Lagrange*, VI t. Paris: Gauthier-Villars, 229-331].
- Lehmann-Filhés R. (1891). *Ueber zwei Fälle des Vielkörperproblems*. In: «Astronomische Nachrichten», 127: 137-144.
- Moeckel R. (1914). *Lectures on central configurations*. In: *Lecture notes of an advanced course at the Centre de Recerca Matemàtica*, Barcelona. Available at the url: www-users.cse.umn.edu/~rmoeckel/notes/Notes.html [last access September 18, 2025].
- Moulton F.R. (1910). *The straight line solutions of the problem of N bodies*. In: «Annals of Mathematics», s. 2, 12: 1-17.
- Newton I. (1726). *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, auctore Is. Newton, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali, Londini, jussu Societatis Regiae ac typis Josephi Streeter, Anno MDCLXXXVII. London: Guil & Joh. Innys, Regiae Societatis typographos [third edition].
- Saari D.G. (2005). *Collisions, rings, and other Newtonian N-body problems*. In: *CBMS Regional conference series in mathematics*, vol. 104. Providence: American Mathematical Society.
- Id. (2011). *Central configurations – A problem for the twenty-first century*. In: Shubin, T., Hayes, D., Alexanderson, G., eds., *Expeditions in mathematics*, MAA Spectrum. Washington, DC: Mathematical Association of America, 283-297.
- Wintner A. (1941). *The analytical foundations of celestial mechanics*. Princeton: University Press.

Storia del vetro siliceo: aspetti chimici e tecnologici

Rinaldo Psaro*

SUNTO – Il vetro è uno dei materiali più rivoluzionari della storia, con un impatto straordinario sullo sviluppo della società, della scienza e della tecnologia. Dalla sua scoperta fino ai giorni nostri, ha trasformato la vita umana in numerosi ambiti. In questo articolo viene riportata la storia della scoperta e dello sviluppo tecnologico nell'era antica del vetro siliceo. Dalle origini fino all'innovazione della canna da soffio, una svolta epocale nella produzione del vetro, che trasformò questo materiale da raro e costoso a un bene di largo consumo. Questa innovazione, probabilmente sviluppata nel I secolo a.C., rivoluzionò la lavorazione del vetro e accelerò la sua diffusione nell'Impero Romano. Un esempio straordinario di questa evoluzione tecnologica è la Coppa Licurgo, realizzata dai maestri vetrai romani nel IV secolo d.C., che rappresenta una delle prime applicazioni nanotecnologiche *ante litteram*.

PAROLE CHIAVE – Vetro siliceo; Evoluzione storica; Canna da soffio; Chimica dei vetri colorati; Coppa di Licurgo.

ABSTRACT – Glass is one of the most revolutionary materials in history, with an extraordinary impact on the development of society, science and technology. From its discovery to the present day, it has transformed human life in numerous areas. This article tells the story of the discovery and technological development in the ancient era of silica glass. From its origins to the innovation of the blowpipe, an epoch-making breakthrough in glass production, which transformed this material from a rare and expensive to a widely consumed commodity. This innovation, probably developed in the 1st century BC, revolutionised glassmaking and accelerated its spread in the Roman Empire. An extraordinary example of this technological evolution is the Lycurgus Cup, made by Roman glassmakers in the 4th century AD, which represents one of the first *ante litteram* nanotechnological applications.

* CNR-SCITEC, Istituto di Scienze e Tecnologie Chimiche “Giulio Natta”, via C. Golgi 19, Milano. Membro del Gruppo nazionale di Fondamenti e Storia della chimica. E-mail: rinaldo.psaro@scitec.cnr.it. Relazione tenuta il 19 dicembre 2024.

KEYWORDS – Siliceous glass; Historical evolution; Blowpipe; Chemistry of coloured glass; Lycurgus cup.

INTRODUZIONE

La scienza e tecnologia dei materiali nasce e si sviluppa insieme alla storia dell'*Homo sapiens*, che coincide con quella dell'*Homo faber*. Fin dagli albori, l'ingegno e l'intraprendenza umana hanno guidato la scoperta e l'utilizzo dei materiali per migliorare la qualità della vita. Nelle prime fasi del suo percorso tecnico-scientifico, l'uomo ha impiegato materiali naturali per realizzare utensili e contenitori. Tra questi, quelli di origine vegetale, come il legno, quelli di origine animale, come l'avorio, l'osso e il corno, e quelli di origine minerale, come la pietra, l'argilla, i metalli e le loro leghe. I metalli sono gli elementi chimici più numerosi, la cui scoperta ha avuto grande importanza nella storia dell'uomo, tanto che, nella Preistoria, al periodo del Paleolitico, del Mesolitico e del Neolitico seguì un terzo periodo detto Età dei metalli.

L'introduzione dei metalli ha costituito un fondamentale elemento di distinzione tra i diversi momenti dello sviluppo umano, non solo da un punto di vista esclusivamente tecnologico, ma anche socio-culturale. Da un punto di vista storico l'età dei metalli si suddivide in tre periodi, ciascuno dei quali prende il nome dal metallo che l'uomo iniziò a usare in quell'epoca nella seguente successione: Età del rame, del bronzo e del ferro (Psaro, 2019).

E arriviamo al vetro, il primo materiale interamente artificiale creato dall'*Homo faber*. La storia del vetro è affascinante e antichissima, intrecciata con l'evoluzione della scienza e della tecnologia dei materiali.

Il vetro è diverso da qualsiasi altro materiale dell'antichità e la sua produzione ha richiesto alcuni dei metodi più avanzati di tutte le tecnologie chimiche di questo periodo. In termini di proprietà del materiale, i suoi analoghi moderni più vicini sono le plastiche, oggi ampiamente utilizzate. Il vetro era il materiale più versatile che i Romani conoscessero. Come la moderna plastica, il vetro imitava altri materiali nella forma, nei colori e nella progettazione di manufatti: «nesque est alia nunc sequacior materia» (“non c'è oggi altro materiale che sia più flessibile”), scrisse Plinio.

Molto prima dello sviluppo della fabbricazione del vetro, le prime tribù hanno scoperto e modellato il vetro formato dalla natura. Tali materiali naturali comprendono vetri vulcanici come l'ossidiana e vetri da impatto (impacchetti o tektiti): rocce create o modificate da uno o più impatti di un meteorite.

La fulgurite è un'altra pietra vetrosa, che si forma quando un fulmine colpisce la Terra, creando elevate temperature. Il terriccio e la sabbia sulle quali cade il fulmine, fondendo, danno luogo alla formazione di queste pietre tubolari dalla forma fantastica.

L'ossidiana, anche chiamata “l'oro nero della Preistoria” (Forest Martin e Scotto Di Carlo, 2024), si trovava in pochi punti del Mediterraneo: nelle isole di Lipari, Pantelleria, Sardegna, nell'isola Egea di Melos, in Anatolia, Armenia, nei Carpazi. Per questo si sviluppò un fiorente commercio e Lipari fu il centro di esportazione dell'ossidiana in tutto il bacino di questo mare. L'ossidiana, nel Neolitico, era il materiale più tagliente che l'uomo avesse a disposizione, più tagliente della selce ma assai meno robusto.

Il maggior valore dell'ossidiana, tuttavia, derivava dal fatto che la sua frattura concoidale permetteva di trasformarla facilmente in oggetti con bordi molto taglienti (Heide *et al.*, 2011). Questa proprietà, unita alla sua resistenza relativamente elevata, rendeva l'ossidiana adatta alla produzione di utensili da taglio e da incisione. I manufatti conosciuti includono varie lame, raschiatoi, punteruoli, braghe e seghe (Fig. 1). Anche le armi sono state prodotte in grande abbondanza. Tra queste figurano punte di freccia e di lancia, coltelli e persino spade. Le spade in ossidiana, tuttavia, non consistevano in un'unica grande lama, ma utilizzavano un pezzo di legno tempestato di denti di ossidiana affilati.

La fabbricazione di utensili in ossidiana ha preceduto di molto lo sviluppo degli utensili in metallo e ha quindi svolto un ruolo significativo nello sviluppo delle prime civiltà (Heide *et al.*, 2011).

Il vetro è stato uno dei primi prodotti interamente artificiali inventati dall'uomo. Nel Satyricon di Petronio Trimalcione afferma: «Lasciatemelo dire: io per me preferisco il vetro, almeno non puzza. Che se non fosse fragile, io per me lo preferirei all'oro».

Allo stato fuso, il vetro può essere versato in quasi tutte le forme e le mantiene dopo il raffreddamento, il che lo rende un materiale ampiamente versatile per una vasta gamma di applicazioni. Nell'antichità il vetro si trovò a competere con successo con materiali come i metalli e la ceramica, che dominavano il mercato del vasellame a uso domestico. Il vetro raggiunse il massimo sviluppo e progresso durante il periodo Romano, a quando possiamo farne risalire la scoperta?



Fig. 1 – Manifatti in ossidiana. Immagine in OA tratta da Wikipedia, all’url: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Michoacan_%28messico_occ.le%29,_lame,_punte,_lamelle_e_nuclei_in_ossidiana_nera,_preclassico_recente,_100_ac-250_dc_ca.jpg [consultato il 18 settembre 2025].

1. LE ORIGINI DEL VETRO

I dettagli specifici dell'origine e della produzione del vetro sintetico sono sconosciuti e la sua scoperta è stata attribuita da vari autori ai siriani, agli egizi e persino ai cinesi (Partington, 1935). Nel corso dei secoli molte leggende sono state riportate su come nacque l'invenzione del vetro (Rasmussen, 2012). La più famosa di queste è stata raccontata dallo storico romano del I secolo Plinio il Vecchio (Plinio, 77 d.C.), anche se è stato proposto che la storia possa aver avuto origine dal precedente studioso greco Alessandro Polistor (c.a. 100 a.C.) (Partington, 1935). Come riportato nella sua *Naturalis historia*, Plinio racconta la scoperta del vetro:

Quella parte della Siria che si chiama Fenicia e che confina con la Giudea include nel monte Carmelo una palude che si chiama Candebia. Si crede che da là nasca il fiume Belo, che dopo aver percorso cinque miglia sfocia nel mare, nei pressi della colonia di Tolemaide. Il suo corso è lento, le sue acque non sono buone a bere e tuttavia sono usate nelle ceremonie sacre; il suo letto è limoso, profondo e riversa nel mare le sue sabbie solo con la bassa marea. Perciò queste brillano, finché non sono agitate dalle onde e ripulite così dalle impurità; inoltre esse furono utilizzate solo nel momento in cui si pensò che avessero proprietà aspre e astringenti, tipiche dell'acqua salmastra. E proprio in un così piccolo litorale, non più largo di cinquecento passi, molti secoli fa ebbe origine il vetro. Si narra che una nave di mercanti di soda sia lì approdata; i mercanti, riversatisi sulla spiaggia, cominciarono a preparare le cibarie, ma non essendovi una pietra adatta a sostenere il focolare, posero sotto i calderoni dei pani di soda [*nitrum*] che avevano preso dal loro carico, ma quando li accesero dopo che essi si furono impastati con la sabbia, un rivo di nuovo, trasparente liquido cominciò a fluire: questa fu l'origine del vetro.

Oggi sappiamo che l'attribuzione ai Fenici di questa invenzione è errata e che l'introduzione del vetro dovette avvenire in Mesopotamia. Testimonianze archeologiche della più antica lavorazione del vetro ci portano a Esh-nunna (antica città presso la riva sinistra della Diyala, in Iraq), dove è stata trovata una sbarra di vetro blu risalente al tardo periodo sargonide (XXIII sec. a.C.). Due secoli più avanti all'inizio della III dinastia di Ur (XXI sec. a.C.) si data invece il blocco in vetro blu trovato a Eridu (antichissima città sumera e babilonese sulla sponda delle lagune del Golfo Persico). Inizialmente il vetro era utilizzato per la realizzazione di monili o intarsi per imitare le pietre dure o semipreziose, più costose. Solo intorno la metà del II millennio a.C. (fine XVI o XV sec. a.C.) cominciano a essere prodotti in

Mesopotamia i primi vasi in vetro. Per la conoscenza della lavorazione del vetro possiamo fare riferimento ad antiche ricette contenute nelle tavolette cu-neiformi rinvenute nella biblioteca del Palazzo di Ninive (sul Tigri, vicino all'attuale Mosul), ad esempio una tavoletta risalente al 1400-1200 a.C. (Fig. 2), rinvenuta a Tell Umar (area archeologica di Seleucia al Tigri), illustra una ricetta per il vetro rosso.

Lo sviluppo in Egitto della produzione del vetro è attestato da piccoli vasi trovati nella tomba del faraone Tutmosi III, il quale probabilmente, ritornando dalle campagne militari svolte tra il 1467 e 1445 a.C. in Siria, condusse con sé vetrari siriani, che dettero un impulso all'artigianato locale. Il vaso in vetro pollicromo (Fig. 3) a forma di pesce "bulti": è il più spettacolare di un piccolo gruppo di vasi a forma di pesce, tutti raffiguranti il pesce "bulti", comune nel Nilo e caratteristico dell'arte decorativa egizia. Il corpo è realizzato in vetro blu con finitura opaca ed è decorato con semplici festoni a gruppi di tre o quattro linee bianche seguite da una linea gialla. Le decorazioni della coda sono degli stessi colori. La pinna dorsale è composta da una serie di fili pesanti nel corpo (blu, bianco, giallo e turchese). Le pinne anteriori sono composte ciascuna da un filo blu chiaro e uno più scuro. Le pinne ventrali anteriori sono composte da un filo bianco e uno giallo ciascuna, mentre la pinna ventrale posteriore è di vetro blu turchese. Un filo giallo delinea la bocca. Gli occhi sono cerchi bianchi opachi con le pupille rappresentate da anse di filo nero. Il pesce è assemblato da diversi frammenti.

Uno studio del 2005 ha rivelato che gli antichi Egizi erano già in grado di produrre vetro pochi anni dopo i mesopotamici, e che usavano questa tecnologia per estendere la propria influenza attraverso il Mediterraneo e il Medio Oriente (Rehren *et al.*, 2005). Alcuni manufatti rinvenuti nella parte orientale del delta del Nilo, nei pressi dell'antica capitale del faraone Ramses II, attestano che in quella regione il vetro veniva prodotto a partire da materie prime già intorno al 1250 a.C. Le rovine rappresentano il più antico sito di produzione vetraria conosciuto al mondo, l'unico risalente all'età del bronzo. Le scoperte offrono inoltre preziose informazioni sulle tecniche utilizzate per la fabbricazione del vetro nell'antichità. Al di là del divertente racconto di Plinio che non è accettato come storicamente accurato, la vera origine della scoperta del vetro rimane sconosciuta. Gli studiosi ritengono che essa sia derivata da un sottoprodotto della metallurgia o da una sequenza evolutiva nello sviluppo dei materiali ceramici (Brill, 1963). Entrambe le ipotesi sono ritenute plausibili, poiché le due tecnologie seguivano procedure che possono essere considerate precursori della produzione del vetro (Lambert, 2005).

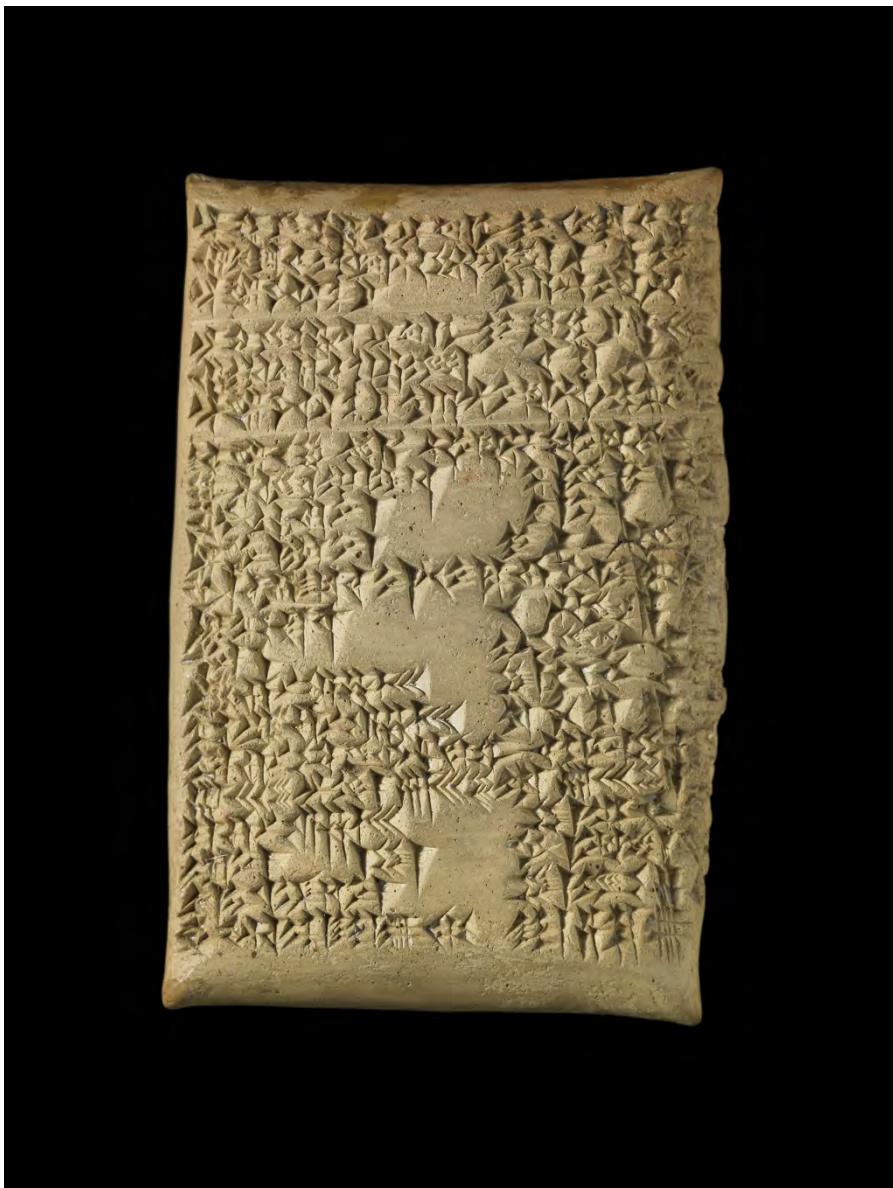


Fig. 2 – Tavoletta di argilla proveniente da Tell Umar, 1400-1200 a.C. Londra, The British Museum. © The Trustees of the British Museum. Autorizzazione alla pubblicazione concessa in data 22 settembre 2025 (License No. 142737).



Fig. 3 – Vaso in vetro policromo a forma di pesce, Egitto, 1550-1069 a.C. Londra, The British Museum. © The Trustees of the British Museum. Autorizzazione alla pubblicazione concessa in data 22 settembre 2025 (License No. 142737).

2. ASPETTI CHIMICI E FISICI DEL VETRO

Lo stato vetroso si realizza quando un liquido, sottoposto a raffreddamento, aumenta la propria viscosità al punto da assumere, pur rimanendo tecnicamente un liquido, le proprietà fisiche di un solido omogeneo e compatto. Tuttavia, a differenza della solidificazione cristallina, il passaggio allo stato vetroso avviene in modo disordinato: gli atomi non si dispongono in strutture ordinate, ma riducono drasticamente i loro movimenti, mantenendo una distribuzione simile a quella dello stato liquido. Una sostanza in queste condizioni è detta amorfa, poiché priva di una struttura cristallina ben definita. Il vetro è quindi un solido amorfo, che può essere considerato, con una certa approssimazione, uno stato intermedio tra solido e liquido (Zarzycki, 1991), assimilabile a un liquido sottraffreddato a elevatissima viscosità (Debenedetti *et al.*, 2001). A differenza dei materiali cristallini, il vetro non ha una temperatura di fusione o solidificazione precisa, ma un intervallo di trasformazione, entro il quale avviene la transizione dallo stato liquido a quello solido. La temperatura di transizione vetrosa dipende sia dalla composizione chimica del fuso vetroso sia dalla velocità di raffreddamento.

Comunemente, con il termine “vetro” si intende vetro siliceo, cioè costituito quasi esclusivamente da biossido di silicio o silice SiO_2 e dalla sua forma policristallina, la sabbia. La forma più comune di silice naturale è il quarzo, un solido cristallino. Tutti i silicati sono reti tridimensionali estese di tetraedri di SiO_4 con l’atomo di silicio al centro e 4 ossigeni ai vertici in cui gli ossigeni di tetraedri adiacenti condividono gli angoli, dando luogo a una struttura polimerica altamente reticolata di alternanza di silicio e ossigeno (Fig. 4). Al contrario, il vetro non presenta una ripetizione regolare nella sua struttura macromolecolare mostrando una struttura disordinata simile alle sostanze allo stato liquido (Fig. 5). Sebbene la fusione della sabbia delle spiagge possa portare a uno stato vetroso, la temperatura necessaria per fondere la silice ($\sim 1710^\circ\text{C}$) era troppo alta per essere raggiunta con i metodi di riscaldamento disponibili nell’antichità (Pollard *et al.*, 2008). Questo limite fu superato intorno al 2000 a.C., quando gli antichi artigiani scoprirono che la fusione della silice poteva essere realizzata a temperature significativamente più basse grazie all’uso di un fondente (in latino *fluxus*) (Pollard *et al.*, 2008).

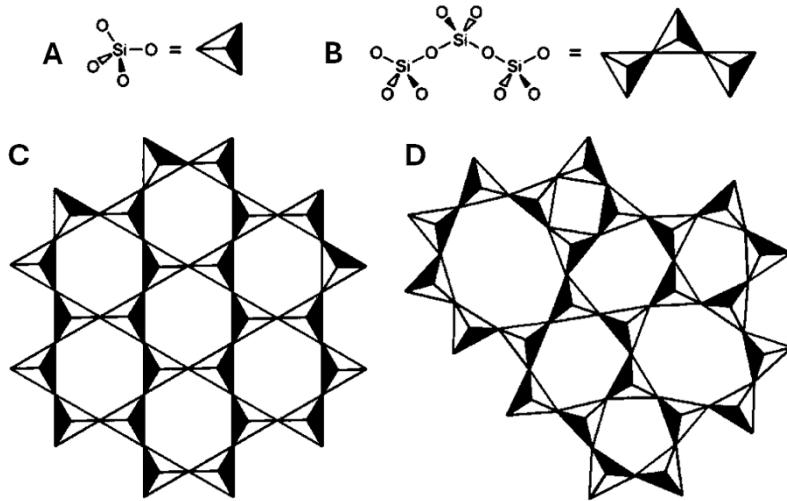


Fig. 4 – Rappresentazione bidimensionale delle strutture di silicati: A) SiO_4 tetraedro; B) struttura polimerica; C) struttura cristallina; D) struttura amorfa.
Rielaborazione dell'autore.

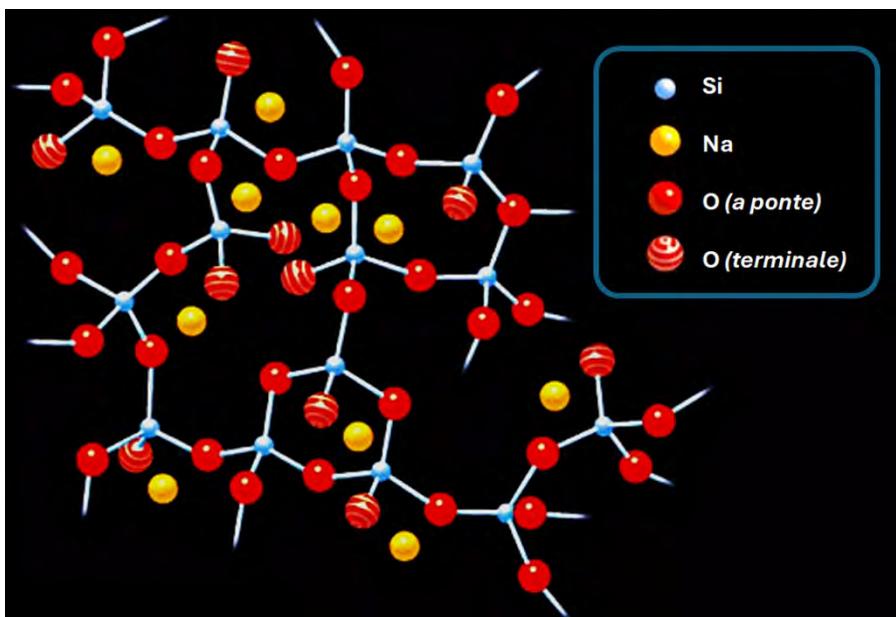


Fig. 5 – La disposizione irregolare degli ioni in un vetro di silicato di sodio.
Rielaborazione dell'autore.

L'origine del fondente affonda le sue radici nella metallurgia, dove consisteva in una specie aggiunta al forno per rendere liquide le impurità non minerali (cioè la roccia e altri silicati di allumina) alla temperatura di fusione (Raymond, 1986). Nella sua applicazione alla vetreria, il fondente più comune era la soda (carbonato di sodio, Na_2CO_3) (Cummings, 2002), il cui uso poteva ridurre il punto di fusione della silice a meno di 1000 °C (Rasmussen, 2008). La soda, a circa 800°C, si decompone in CO_2 e ossido di sodio. Quest'ultimo ha la capacità di reagire allo stato solido con la silice, trasformando il quarzo in silicati di sodio che fondono a più bassa temperatura.

Sebbene la temperatura necessaria per produrre vetro fuso possa essere significativamente ridotta grazie all'applicazione di soda, il sodio contenuto nel vetro risultante è altamente solubile e quindi suscettibile di essere attaccato dall'acqua. Di conseguenza, l'uso della soda come fondente produce un vetro a bassa stabilità chimica. Per contrastare questa situazione è necessario un terzo componente che agisce come stabilizzatore del vetro risultante (Cummings, 2002). Le specie stabilizzanti contengono generalmente cationi meno solubili; le specie più comuni contengono calcio o magnesio. Combinando quantità di soda e di sali di calcio, la temperatura di fusione della silice può essere ridotta fino a ~725 °C. La tripla miscela eutettica che determina la temperatura di fusione più bassa fornisce un vetro con una composizione del 73,5% di SiO_2 , 21,3% di Na_2O e 5,2% di CaO (Lambert, 2005). I prodotti ottenuti da questa combinazione sono tipicamente indicati come vetro sodio-calcico e la maggior parte dei primi vetri nel mondo occidentale consisteva in varie composizioni di soda-calce-silice che dipendevano dalle specifiche materie prime utilizzate (Sayre *et al.*, 1961).

Nella sua forma più evoluta, la maggior parte del vetro dell'antichità era prodotto a partire da sabbia di spiaggia e da una fonte grezza di soda, con entrambi i componenti che apportavano una quantità di calce o magnesia sufficiente a garantire una certa stabilità chimica (Kurkjian *et al.*, 1998).

Il fondente in epoca romana e altomedievale era il natron, carbonato di sodio naturale che si trova nei laghi salati dell'Egitto e del Medio Oriente. L'esatta composizione era una miscela di carbonato di sodio decaidrato e circa il 17% di bicarbonato di sodio, oltre a piccole quantità di cloruro di sodio e sulfato di sodio.

Il vetro, fuso in Siria, Egitto o in Libano con sabbie siliceo-calcaree locali, veniva esportato sotto forma di blocchi di vetro grezzo per essere rifuso e lavorato in centri vetrari diffusi in tutto il bacino del Mediterraneo e nel Nord Europa. Nella Fig. 6 viene mostrato un blocco di vetro rinvenuto a Pompei: l'analisi della composizione chimica ha confermato che contiene materie

prime provenienti dal Medio Oriente. Sebbene i primi vetri vengano definiti vetri sodio-calcici, la loro composizione era solitamente più complessa di quanto suggerito da questa semplice descrizione. Oltre ai componenti primari di silice, fondente e stabilizzante, questi vetri contenevano anche agenti coloranti o decoloranti, oltre a una serie di impurità non volute introdotte insieme ai componenti primari. Di conseguenza, la composizione chimica e la struttura del vetro potevano essere molto complesse ed estremamente variabili, dando origine a materiali con un'ampia gamma di proprietà fisiche e chimiche. Per complicare ulteriormente le cose, il carattere del vetro dipende non solo dalla sua composizione chimica, ma anche dal modo e dal grado di riscaldamento, nonché dalla velocità di raffreddamento del vetro caldo (cioè dalla ricottura del vetro). Infatti, il vetro formato conserva ancora una elevata temperatura (500-600°C) e non potrebbe resistere a un rapido raffreddamento spontaneo. Essendo un cattivo conduttore termico, la superficie si raffredderebbe rapidamente a differenza della massa e l'insorgere delle tensioni interne determinerebbe la rottura dell'oggetto. Si procede perciò a un lento raffreddamento, chiamato impropriamente tempea o ricottura.

Naturalmente, la tecnologia di produzione del vetro sintetico non è stata scoperta come una pratica consolidata, ma è cresciuta lentamente attraverso il costante sviluppo della composizione chimica e delle tecniche di produzione, manipolazione e applicazione dei materiali (Cummings, 2002). Come descritto nel §2, si ritiene che l'origine di questa tecnologia non sia posteriore al 3000 a.C. In epoca romana il suo sviluppo aveva raggiunto un livello avanzato e il periodo compreso tra il I e il IV secolo d.C. è spesso considerato la prima età dell'oro del vetro (Philips, 1941).

3. UNA RIVOLUZIONE TECNOLOGICA

La storia tecnologica del vetro si distingue in due grandi fasi, quella precedente e quella posteriore all'invenzione della soffiatura avvenuta nel I secolo a.C. L'invenzione della canna da soffio significò che gli oggetti cavi e il vasellame che richiedevano un lungo processo di lavorazione, con questa tecnica potevano essere fatti in tempi brevissimi e con un risparmio sulla quantità di materiale per ogni manufatto.

In uno scavo alla fine degli anni '70 sotto il selciato di una strada, nel quartiere ebraico della città vecchia a Gerusalemme, costruita da Erode nel 37-34 a.C., è stata individuata una vasca contenente frammenti di vetro, assieme a monete e reperti ceramici, che hanno permesso di fissare la tecnica

della soffiatura a metà del I sec. a.C. L'invenzione della canna da soffio è un affascinante enigma nella storia del vetro antico. Come accadde che l'*Homo faber* elaborasse un'idea semplice ma allo stesso tempo rivoluzionaria?

Indubbiamente l'aver scoperto che l'aria calda può espandere il vetro ammorbidito, ha sicuramente preceduto l'invenzione della canna. Sebbene la scoperta iniziale sia avvenuta lungo la costa sino-palestinese, dove la produzione e la lavorazione vetraria vantava una tradizione più che centenaria, fu in Italia che la tecnica della soffiatura venne perfezionata.

Durante il lungo e tranquillo periodo di pace che segue l'avvento al potere di Ottaviano Augusto (27 a.C.-14 d.C.), a Roma e in tutte le città dell'impero si registrò l'apertura di officine vetrarie. La produzione del vetro divenne una vera e propria industria i cui effetti si manifestarono in vari settori della vita quotidiana.

Nei centri vesuviani e nelle popolose città dell'Impero, il vasellame domestico in terracotta e in metallo viene progressivamente affiancato e sostituito da quello in vetro, cui si riconoscono particolari e apprezzate caratteristiche per la conservazione di frutta, cibi, bevande, cosmetici e, in campo medico, di sostanze farmaceutiche. Da ciò deriva che anche nelle città sepolte dall'eruzione del Vesuvio del 79 d.C. si era avuto modo di osservare come il vetro fosse sostanza chimicamente neutrale, e, cosa non secondaria, quanto la trasparenza consentisse di valutare lo stato delle sostanze in esso contenute (Fig. 7). Gli storici sono concordi nel ritenere che la scoperta della soffiatura del vetro ha avuto una forte influenza sullo sviluppo culturale della società umana, contribuendo a un profondo cambiamento nelle abitudini e nei costumi e dell'uomo.

I progressi tecnici nella lavorazione del vetro soffiato ebbero una ricaduta anche nell'architettura. Tradizionalmente, l'esistenza di lastre da finestra nel mondo romano è un argomento che ha goduto di poco credito, considerato un fenomeno marginale e non recepito dalla maggior parte della popolazione. Eppure, già i primi visitatori che nel corso del '700 e nell'800 si recarono in visita a Ercolano e Pompei ebbero modo di osservare, con meraviglia, la quantità di vetri ancora collocati nei telai delle finestre delle abitazioni e degli edifici pubblici.



Fig. 6 - Blocco di vetro verde scuro Pompei, Insula Occidentalis, I secolo d. C. ©Parco archeologico di Pompei. Autorizzazione concessa in data 2 ottobre 2025.



Fig. 7 – Balsamari Pompei, I, 14, 9. Hospitium (1957) SAP, Seconda metà del I secolo d.C. © Parco archeologico di Pompei, Autorizzazione concessa in data 2 ottobre 2025.

Nelle borgate agricole di Pompei, le finestre guarnite di vetri non erano numerose e, il più delle volte, consistevano di piccoli “dischi” di vetro senza telaio, semplicemente murati col bordo. Ma, nelle città importanti, e specie a Roma e nelle sfarzose ville patrizie della zona laziale, già allora si davano numerosi esempi di ampie aperture chiuse con lastre di vetro. La lastra doveva essere destinata alla chiusura di finestre o lucernai, come attestano i molti altri esemplari restituiti a Pompei sia da scavi recenti, sia dagli scavi ottocenteschi delle Terme del Foro (Dell'Acqua, 2004).

4. LA CHIMICA DEI VETRI COLORATI

I vetri dell’antichità erano raramente incolori a causa delle impurità di ferro presenti nella silice o nelle fonti alcaline. Tutte le sabbie contengono quantità di ferro sotto forma di FeO o Fe₂O₃. La specie ferro (II) è particolarmente problematica e funge da agente colorante molto forte per dare un colore blu-verde al vetro. Al contrario, l’ossido di ferro (III) dà un colore giallo (Fig. 8), mentre le miscele dei due ossidi possono dare origine a colori che vanno dall’ambra al verde. È stato dimostrato che i vetri con appena lo 0,4% di ferro presentano un pallido verde traslucido. Sebbene l’effetto colorante di queste impurità potesse essere inizialmente involontario, i vetrai svilupperono infine la capacità di generare una varietà di vetri colorati attraverso la scelta appropriata di additivi a base di metalli di transizione (~1-3% in peso) e, entro il 1375 a.C., la gamma di colori per il vetro sia opaco che traslucido era aumentata rapidamente. Il vetro colorato di blu poteva essere prodotto utilizzando coloranti di rame e/o cobalto. Il rame è generalmente considerato il colorante più antico e, insieme al ferro, era la specie colorante più comune, dando un vetro che può variare dal blu chiaro traslucido al blu scuro. Le analisi hanno mostrato una gamma di 0,59-1,45% di CuO, con una media di ~1%.

L’aggiunta di rame determinava due tonalità: ossido rameico con colorazione blu, ossido rameoso con colorazione rosso-ceralacca. La formazione del tipo di ossido dipende dall’atmosfera di trattamento termico. In atmosfera, il rame entra in soluzione con il vetro e si forma la colorazione blu; in atmosfera riducente si realizza la formazione di cristalli di ossido rameoso con conseguente opacità e colorazione rossa.

Il cobalto era comune nella produzione di vetri blu intenso, viola e indaco durante il II millennio a.C. Il cobalto nei vetri blu intenso egiziani è compreso tra lo 0,075 e lo 0,55% di CoO (Fig. 9). Molti vetri blu risalenti ai primi periodi contengono anche quantità significative di antimonio oltre al rame

e/o al cobalto. L'aggiunta di antimonio rendeva questi vetri opachi e di solito conferiva al vetro finale un colore turchese, sebbene i vetri potessero anche variare dal blu medio al blu scuro (Shortland, 2002). Altri vetri opachi sono quelli all'antimonio, tra cui il bianco da antimonato di calcio ($\text{Ca}_2\text{Sb}_2\text{O}_7$ e CaSb_2O_6) e il giallo da antimonato di piombo ($\text{Pb}_2\text{Sb}_2\text{O}_7$). Nel caso dei vetri bianchi, la mancanza di trasparenza è dovuta a piccole particelle di antimonato di calcio (in genere $\sim 5 \mu\text{m}$) che disperdono la luce, dando luogo a un aspetto lattiginoso o opaco. Poiché questi vetri non hanno un contenuto di calcio superiore a quello di altri, si ritiene che l'antimonio venisse aggiunto da solo per creare il vetro bianco, con il contenuto di calce del vetro che contribuisce alla formazione dei particolati di antimonato di calcio.

Interessante è l'applicazione del biossido di manganese (MnO_2) per eliminare la colorazione verde dovuta al silicato di Fe (II). Questo composto veniva aggiunto al vetro fuso per ossidare il ferro a Fe (III), il cui silicato presenta una debole colorazione gialla. Tale tonalità viene poi neutralizzata dalla lieve colorazione rossa del MnSiO_3 che si forma nel processo. Per questa sua capacità di pulire il vetro dalle impurità cromatiche, il biossido di manganese è stato popolarmente denominato “sapone dei vetrari”.

La scoperta e l'uso sistematico del MnO_2 (Bidegaray *et al.*, 2019) è stata attribuita ai Romani, che grazie a questo processo erano in grado di produrre un vetro più chiaro e trasparente, molto apprezzato nell'antichità. I reperti archeologici dimostrano che i vetrari romani utilizzavano il biossido di manganese già nel II secolo a.C.



Fig. 8 – Piccola bottiglia per profumi, cm 17.8 x 6.7; attribuzione fenicia c.a. 625-600 a.C. New York, MET Museum. Immagine OA tratta dall'url: <https://www.metmuseum.org/art/collection/search/239897> [consultato il 18 settembre 2025].



Fig. 9 – Vaso per unguenti, Egitto, Nuovo Regno, Periodo Amarna 625-600. New York, MET Museum. Immagine in OA tratta dall'url: <https://www.metmuseum.org/art/collection/search/546255> [consultato il 18 settembre 2025].

5. LA COPPA DI LICURGO

La Coppa di Licurgo (Fig. 10) è uno dei più straordinari esempi di vetro romano a diatreta, risalente al IV secolo d.C. Si distingue non solo per la sua complessa struttura traforata, ma soprattutto per il suo sorprendente effetto dicroico: il vetro cambia colore a seconda dell'illuminazione (Freestone *et al.*, 2007). La tecnica di fabbricazione è di eccellenza, il motivo decorativo è scolpito a partire da un unico blocco di vetro, lasciando una sottile “gabbia” connessa al corpo della coppa tramite esili ponticelli. La decorazione rappresenta il re Licurgo di Tracia, punito per aver offeso Dioniso. Il sovrano è raffigurato avvolto nei tralci di vite, simbolo della vendetta del dio.

La Coppa di Licurgo è considerata un capolavoro della lavorazione del vetro antico e la sua tecnologia è rimasta un enigma per gli studiosi. Le coppe a gabbia sono state rinvenute in tutto l’Impero Romano, ma il numero di esemplari recuperati è esiguo e probabilmente si conoscono solo circa 50-100 esemplari (Harden, 1959). Sono considerate tra gli oggetti in vetro tecnicamente più sofisticati prodotti prima dell’era moderna.

Il vetro della coppa è dicroico, alla luce diretta (luce riflessa) assomiglia alla giada con una tonalità giallo-verdastra opaca (Fig. 10a), ma quando la luce brilla attraverso il vetro (luce trasmessa) diventa un colore rubino traslucido (Fig. 10b). La coppa è stata acquistata dal British Museum da Lord Rothschild nel 1958 (con il contributo del National Art Collection Fund) e viene menzionata per la prima volta nella nel 1845, ma la storia iniziale è sconosciuta così come il luogo del ritrovamento. Tuttavia, fino al 1950 non venne effettuato alcuno studio dettagliato, quando su richiesta di Lord Rothschild venne esaminata da Harden e Toynbee, che pubblicarono l’articolo definitivo nel 1959 (Harden *et al.*, 1959).

Inizialmente si discusse se la coppa fosse effettivamente di vetro, in quanto sembrava impossibile, con le conoscenze tecniche dell’epoca romana nella lavorazione del vetro, produrre un simile effetto ottico. Tuttavia, il Dottor G.F. Claringbull, custode del Dipartimento di Mineralogia del British Museum, concluse che si trattava di vetro (piuttosto che di opale o giada), un risultato che fu poi confermato mediante diffrazione di raggi X.¹ Quando negli anni Cinquanta il vetro è stato sottoposto all’attenzione degli studiosi, la base, a sua volta aggiunta nel primo periodo moderno per coprire o riparare danni precedenti, è stata rimossa sono stati ritrovati alcuni frammenti di vetro

¹ British Museum Research Laboratory File 1144, letter dated 5.2.59 to Dr Mackey, Department of Physics, Birkbeck College, London.

dalla base originale, grazie ai quali è stato possibile effettuare accurate indagini. Dopo uno studio preliminare al British Museum, che comprendeva un'analisi spettrografica qualitativa, nel 1959 il British Museum inviò un campione ai laboratori di ricerca della General Electric Company Ltd (GEC) a Wembley per una microanalisi più dettagliata, per cercare di determinare il colorante. Le analisi chimiche mostrarono che il vetro è del tipo sodio-calcico, simile alla maggior parte degli altri vetri romani, e inoltre contenente circa lo 0,5% di manganese (Chimside, 1963) e una serie di oligoelementi, tra cui argento e oro, che costituiscono l'1% finale. B.S. Cooper della GEC osservò che la presenza di tracce di oro, argento e nel vetro poteva essere responsabile dei complessi effetti cromatici, dovuti alla diffusione del metallo colloidale nel vetro. Nel 1962 un campione fu inviato al Dottor Robert Brill del Corning Museum of Glass, che confermò che il dicroismo era legato alla presenza di minime quantità di oro (circa 40 ppm) e argento (circa 300 ppm) nel vetro.

I sistemi colloidali possono dare origine a fenomeni di diffusione della luce che si traducono in effetti dicroici. Si è ipotizzato che sia l'oro che l'argento contribuissero al colore, essendo la componente aurea principalmente responsabile del rosso in trasmissione e l'argento della riflessione verdastra. Tuttavia, non si era in grado di dimostrare se i colloidi metallici fossero una lega oro-argento o particelle separate di argento e oro. Per questo motivo, alla fine degli anni Ottanta, un altro piccolo frammento della coppa è stato esaminato da Barber e Freestone (Barber *et al.*, 1990). La microscopia elettronica a trasmissione ha rivelato la presenza di nanoparticelle di metallo, tipicamente di 50-100 nm di diametro (Fig. 11). L'analisi ai raggi X ha mostrato che queste nanoparticelle sono una lega argento-oro, con un rapporto tra argento e oro di circa 7:3, contenente inoltre circa il 10% di rame. Un più recente articolo di Wagner e collaboratori dimostra che l'oro si dissolve nel vetro in forma monovalente (Wagner *et al.*, 2000) e che la riduzione dell'argento e dell'oro precedentemente disciolti, durante il trattamento termico del vetro, determina la formazione delle nanoparticelle di argento e oro.



Fig. 10a – La Coppa di Licurgo 1958, 1202.1 altezza: 16,5 cm (con supporto metallico moderno), diametro: 13,2 cm. London, British Museum. © The Trustees of the British Museum. Autorizzazione concessa in data 22 settembre 2025 (License No. 142737).



Fig. 10b – La Coppa di Licurgo 1958, 1202.1 altezza: 16,5 cm (con supporto metallico moderno), diametro: 13,2 cm. London, British Museum. © The Trustees of the British Museum. Autorizzazione concessa in data 22 settembre 2025 (License No. 142737).

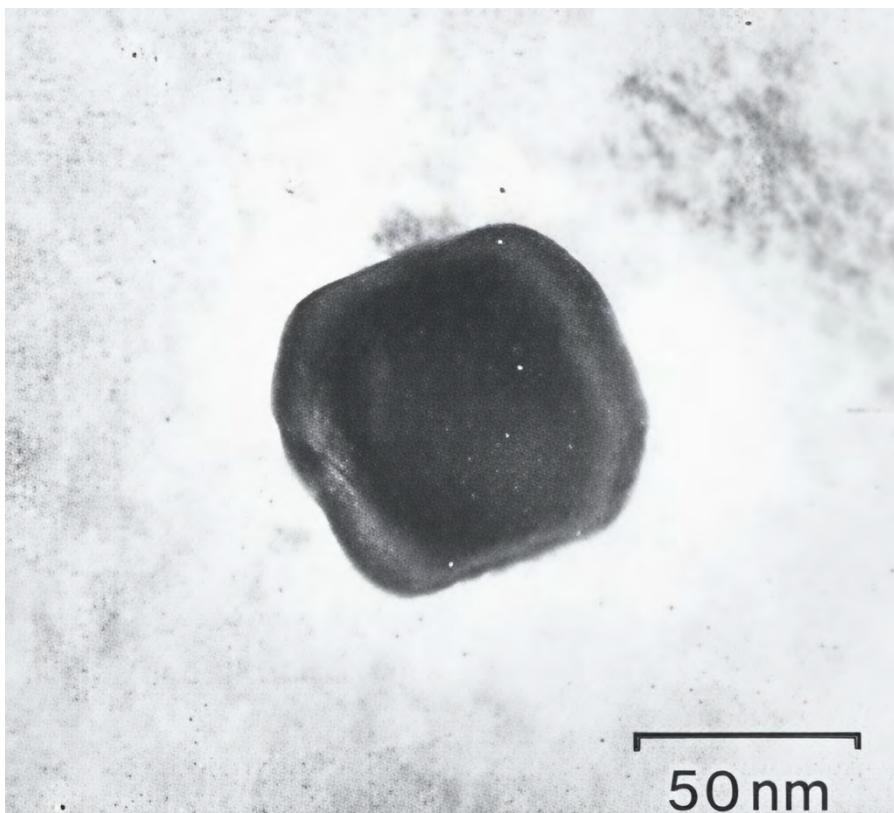


Fig. 11 – Immagine al microscopio elettronico a trasmissione di una particella in lega argento-oro all'interno del vetro della coppa di Licurgo. Immagine tratta da Barber e Freestone (1990), Fig. 5, pp. 33-45.

Come descritto nel §4, l'aggiunta di ossidi metallici per colorare il vetro era una tecnica già nota ai vetrai romani. Alcuni autori hanno ipotizzato che i sottoprodoti ossidati dei processi metallurgici (scorie) venissero talvolta impiegati per colorare il vetro, il che potrebbe spiegare la scoperta dell'effetto Lycurgo (Badger *et al.*, 1939). Questa ipotesi giustificherebbe anche i livelli relativamente elevati di ossidi di rame e di piombo riscontrati nel vetro. Tuttavia, esistono altre possibilità che suggeriscono una scoperta casuale dell'oro rubino, tra cui incidenti nella produzione di bicchieri decorati con foglia d'oro. Una volta scoperta, questa tecnologia rappresentò una sfida per i vetrai romani, tanto che, per la sua complessità, non venne più applicata dopo il IV secolo. La produzione di vetro rosso con l'oro è menzionata negli

scritti islamici medievali, ma finora non sono stati confermati esempi concreti di questo tipo di vetro. Sebbene il vetro rosso utilizzato nelle finestre delle chiese medievali sia stato spesso attribuito alla presenza di nanoparticelle d'oro, le analisi condotte finora hanno rivelato che il colorante impiegato era in realtà il rame.

La produzione su larga scala dell'oro rubino sembra non essere avvenuta prima del XVII secolo in Europa, quando il medico e chimico tedesco Andreas Cassius nel 1666 scoprì la cosiddetta porpora di Cassio (Hunt, 1976). Tuttavia si deve a Johan Kunckel, chimico e vetrario tedesco, la tecnica di colorazione del vetro con la porpora di Cassio e nel 1679 produsse i primi vetri colorati in oro rubino (Fig. 12).

Kunckel lavorò per la corte di Brandeburgo e successivamente per il re di Svezia, guadagnandosi il titolo di barone di Löwenstern. Scrisse il trattato *Ars vitraria experimentalis*, una delle opere fondamentali sulla fabbricazione del vetro, che contribuì alla diffusione delle tecniche per ottenere il famoso vetro color rubino (Fig. 13).

Gli abili artigiani romani scoprirono che il vetro poteva essere colorato di rosso e che si potevano ottenere insoliti effetti di cambiamento di colore generati dall'aggiunta di oro e argento quando il vetro era fuso. Oggi sappiamo che questi effetti sono dovuti alla formazione di nanoparticelle di argento e oro nel vetro. L'effetto cromatico della Coppa di Licurgo dimostra che, anche senza una comprensione teorica delle nanoparticelle, gli artigiani romani riuscirono a ottenere materiali con proprietà ottiche avanzate, anticipando di secoli le moderne applicazioni delle nanotecnologie. Per questi motivi la coppa di Licurgo spesso viene considerata il simbolo delle nanoscienze e delle nanotecnologie.



Fig. 12 – Vetri in oro rubino provenienti dalla camera del tesoro dei Wittelsbacher situata nella Residenz di Monaco. Il bicchiere con il coperchio è attribuito a Johannes Kunckel. Immagine in OA tratta da Wikipedia, disponibile all'url: https://it.wikipedia.org/wiki/Vetro_cranberry#/media/File:Goldrubinglas_Schatzkammer_M%C3%BCnchen.jpg [consultato il 18 settembre 2025].



Fig. 13 – J. Kunckel, *Ars vitraria experimentalis*, Oder vollcommene Glasmacher-Kunst, Lehrende, 1689. Milano, Biblioteca Nazionale Braidense (seg. XV. 01. 0009). Immagine pubblicata su concessione del Ministero della Cultura – Pinacoteca di Brera – Biblioteca Braidense, Milano. Si vieta ogni ulteriore riproduzione o duplicazione con qualsiasi mezzo.

CONCLUSIONI

L'industria vetraria nell'Impero Romano fu una delle più avanzate dell'antichità e segnò un grande sviluppo nella produzione e nell'uso del vetro. Grazie all'innovazione tecnologica e all'ampia rete commerciale romana, il vetro divenne sempre più diffuso nella vita quotidiana. I Romani ereditarono la conoscenza del vetro dai Fenici e dagli Egizi, ma ne ampliarono l'uso e la produzione. Dalla fine del I secolo a.C., la tecnica della soffiatura del vetro permise di realizzare oggetti con maggiore rapidità ed efficienza. I centri principali della produzione vetraria erano Roma, Pompei, Alessandria d'Egitto, Colonia, Lione, Aquileia e il Medio Oriente.

L'industria vetraria romana era ben organizzata: le materie prime (sabbia silicea e soda) venivano trasportate in grandi forni centrali, da cui il vetro grezzo veniva distribuito alle botteghe locali. Il vetro romano veniva esportato in tutto l'Impero, fino alla Britannia e all'India. Dopo la caduta dell'Impero Romano d'Occidente (V secolo d.C.), l'industria vetraria conobbe un declino in Europa, mentre continuò in Oriente, soprattutto a Bisanzio.

Le tecniche romane influenzarono direttamente la produzione del vetro medievale e quella delle celebri vetrerie veneziane di Murano. L'Impero Romano fu una delle prime civiltà ad adottare pratiche di riciclo del vetro, anticipando concetti moderni di economia circolare. Il vetro era un materiale prezioso, e la sua rifusione permetteva di risparmiare materie prime e ridurre i costi di produzione. I Romani erano esperti nel riciclo del vetro, come attestano numerosi ritrovamenti archeologici di scarti di lavorazione e frammenti fusi. Una citazione latina sul riciclo del vetro proviene da un editto dell'imperatore Diocleziano (III-IV secolo d.C.), che menziona la raccolta e il riutilizzo del vetro: «frangitur, ut iterum fiat» ("si rompe, affinché possa essere fatto di nuovo"). L'industria vetraria romana rappresenta una delle più grandi conquiste tecnologiche dell'epoca, anticipando molte delle tecniche ancora usate oggi.

BIBLIOGRAFIA

- Badger A.E., Weyl W. and Rudow H. (1939). *The effect of heat treatment on colour of gold ruby glass*. In: «The Glass Industry»: 407-414.
- Barber D.J. and Freestone I.C. (1990). *An investigation of the origin of the colour of the Lycurgus Cup by analytical transmission electron microscopy*. In: «Archaeometry», 32: 33-45.
- Bidegaray A.I., Godet S., Bogaerts M., Cosyns P., Nys K., Terryn H. and Ceglia A. (2019). *To be purple or not to be purple? How different production parameters influence colour and redox in manganese containing glass*. In: «Journal of Archaeological Science: Reports», 27: article number 101975.
- Brill R.H. (1963). *Ancient glass*. In: «Sci. Am.», 109: 120-130.
- Chimside R.C. and Proffitt P.M.C. (1963). *The Rothschild Lycurgus Cup: an analytical investigation*. In: «J. Glass Studies», 5: 18.
- Cummings K. (2002). *A history of glass forming*. London: A&C Black, London, 38-43.
- Debenedetti P.G. and Stillinger F.H. (2001). *Supercooled liquids and the glass transition*. In: «Nature», 410: 259-267.
- Dell'Acqua F. (2004). *Le Finestre invetriate nell'antichità romana*. In: M. Beretta e G. Di Pasquale, a cura di, *Vitrum. Il vetro fra arte e scienza nel modo romano*. Firenze: Giunti, 109-119.
- Forestà Martin F., Scotto Di Carlo N., a cura di (2024). *L'oro nero del Mediterraneo. L'ossidiana nella preistoria*. Milano: Villaggio letterario editore.
- Freestone I., Meeks N., Sax M. and Higgitt C. (2007). *The Lycurgus Cup – A Roman nanotechnology*. In: «Gold Bulletin», 40, 270-277.
- Harden, D.B and Toynbee J.M.C. (1959). *The Rothschild Lycurgus Cup*. In: «Archaeologia», 97: 179-212.
- Heide K. and Heide G. (2011). *Vitreous state in nature-origin and properties*. In: «Chem. Erde», 71, 305-335.
- Hunt L. (1976). *The true story of Purple of Cassius*. In: «Gold Bulletin», 9: 134-139.
- Kurkjian C.R. and Prindle W.R. (1998). *Perspectives on the history of glass composition*. In: «J. Am. Ceram. Soc.», 81: 795-813.
- Lambert J.B. (2005). *The deep history of chemistry*. In: «Bull. Hist. Chem.», 30, 1-9.
- Martinek K.P. (2000). *Before striking gold in gold-ruby glass*. In: «Nature», 407: 691-692.
- Partington J.R. (1935). *Origins and development of applied chemistry*. London: Longmans, Green and Co., 119-120.
- Philips C.J. (1941). *Glass: the miracle maker*. New York: Pitman Publishing Corporation, 3-14.
- Plinio il Vecchio, *Naturalis historia*, Liber XXXVI, 65, 190-191.
- Pollard A.M. and Heron C. (2008). *Archaeological chemistry*. Cambridge: RSC Publishing, 144-192.

- Psaro R. (2019). *Homo faber: come i metalli hanno segnato e segnano anche oggi la civiltà dell'uomo*. In: Maiorana S. e Bianchi Robbiati A., a cura di, *La tavola periodica ha 150 anni ... ma non li dimostra*, Milano: Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere, Incontro di studio n. 103, 105-131.
- Rasmussen S.C. (2012). *How glass changed the world. The history and chemistry of glass from antiquity to the 13th century*. Heidelberg: Springer (Springer Briefs in Molecular Science: History of Chemistry), 11-20.
- Id. (2008). *Advances in 13th century glass manufacturing and their effect on chemical progress*. In: «Bull. Hist. Chem.», 33, 28-34.
- Raymond R. (1986). *Out of the fiery furnace. The impact of metals on the history of mankind*. University Park (PA): The Pennsylvania State University Press, 27, 10-16.
- Rehren T. and Pusch E.B. (2005). *Late bronze age glass production at Qantir-Piramesses, Egypt*. In: «Science», 308: 1756-1758.
- Sayre E.V. and Smith R.W. (1961). *Compositional categories of ancient glass*. In: «Science», 133: 1824-1826.
- Shortland J. (2002). *The use and origin of antimonate colorants in early Egyptian glass*. In: «Archaeometry», 4: 517-530.
- Wagner F.E., Haslbeck S., Stievano L., Calogero S., Pankhurst Q.A. and Zarzycki J. (1991). *Glass physics and chemistry*. Cambridge: University Press.

Dalla ricerca alla clinica: l'esempio delle emoglobinopatie

Maria Domenica Cappellini*

SUNTO – Le emoglobinopatie sono patologie ereditarie del globulo rosso dovute a un difetto genetico di una delle catene globiniche (alfa o beta) che formano l'emoglobina. Si caratterizzano per anemia di grado variabile conseguente a eritropoiesi inefficiente nel midollo. Le forme più severe in genere dovute a omozigosi per il difetto globinico sono trasfusione dipendenti ovvero richiedono supporto trasfusionale con 2/3 unità di globuli rossi ogni 2-3 settimane per tutta la vita. Le emoglobinopatie hanno un'elevata prevalenza in alcune aree come sud-est asiatico, Africa, Medio Oriente e area del mediterraneo, ma per le recenti migrazioni sono ormai diffuse in tutto il mondo. Le emoglobinopatie si distinguono in 2 gruppi principali: i. le forme dovute a varianti della catena globinica (alfa o beta) in cui si ha una normale produzione quantitativa, ma la catena prodotta è anomala per cui può conferire anomalie funzionali alla globina stessa (diversa affinità per l'O₂, precipitazione ecc.). Si conoscono più di 400 varianti ma fortunatamente molte sono silenti dal punto di vista clinico. La più importante è la HbS responsabile di anemia falciforme o drepanocitosi (*sickle cell disease*). ii. le forme che si caratterizzano per una ridotta o assente sintesi della globina geneticamente mutata, che sono rappresentate dalle “sindromi talassemiche”. Negli ultimi anni sono state sviluppate terapie molecolari e nuove terapie farmacologiche per le emoglobinopatie aprendo un nuovo scenario per la cura di queste patologie.

PAROLE CHIAVE – Emoglobinopatie; Globina; Catena globinica; Sindromi talassemiche.

ABSTRACT – The hemoglobinopathies are hereditary red cell disorders due to an abnormal globin chain that leads to ineffective erythropoiesis and consequent anemia. According to the globin chain defect two main groups could be distinguished: i. hemoglobin variants (more

* Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere (Socio corrispondente residente). Fondazione IRCCS Ca Granda Policlinico. Università degli Studi di Milano. E-mail: maria.cappellini@unimi.it.

than 400) that cause an abnormal function of the hemoglobin such as different O₂ affinity, dehydration etc. Among these, the most clinically relevant is HbS (sickle cell anemia) very common in Africa and South-east Asia. ii. thalassemia forms due to a reduced or absent production of the affected globin, leading to different amounts of ineffective erythropoiesis and consequent anemia. The most severe forms of thalassemia (usually homozygous for severe beta globin mutations) are transfusion dependent, which means that patients should receive 2/3 units of red blood cells transfusions every 2/3 weeks along life. The hemoglobinopathies are prevalent in Africa, South-east Asia, middle east and Mediterranean basin however due to recent migration they are spread all over the word. During the last decade gene therapy and novel pharmacological therapies have been developed for the cure of such disorders.

KEYWORDS – Hemoglobinopathies; Globin; Globin chain; Thalassemic syndromes.

INTRODUZIONE

Con la definizione “emoglobinopatie” si considerano due gruppi di patologie dell’emoglobina (Hb) e precisamente: le varianti emoglobiniche che si caratterizzano per la presenza di emoglobina anomala, ma prodotta in quantità normale, e le sindromi talassemiche che si caratterizzano per la ridotta produzione di Hb. In entrambi i casi sono patologie ereditarie autosomiche recessive ad alta prevalenza in Africa, nel Sud-est asiatico, in Medio Oriente e nel bacino del Mediterraneo. Tuttavia, con le recenti migrazioni, sono ormai diffuse in tutto il mondo interessando anche le Americhe e i Paesi europei (Taher *et al.*, 2018). Ad oggi si conoscono oltre 500 varianti di Hb, molte delle quali sono clinicamente silenti. Sicuramente importante dal punto di vista clinico è la HbS, che causa anemia a cellule falciformi (*sickle cell anemia*) responsabile di severe crisi dolorose vaso-occlusive (Harteveld *et al.*, 2022). In questa presentazione mi focalizzerò sulle sindromi talassemiche che sono le forme più frequenti nel nostro paese e per le quali nell’ultimo decennio sono stati fatti grossi progressi terapeutici.

La Hb ha un’struttura proteica costituita da 2 globine alfa e due globine beta perfettamente appaiate: un difetto di sintesi geneticamente determinato di una o dell’altra catena determinerà uno squilibrio con conseguente ridotta o addirittura assente produzione di Hb. Questo fenomeno si traduce in “eritropoiesi inefficiente”, che rappresenta il meccanismo fisiopatologico delle sindromi talassemiche che potranno essere alfa o beta secondo la globina affetta. La sintesi delle globine alfa è regolata da quattro geni (due su ciascun allele) mentre la sintesi delle globine beta è regolata da due geni (uno su

ciascun allele): ne consegue che le forme di beta talassemia in omozigosi siano più frequenti con conseguenti quadri clinici più severi rispetto alle forme alfa. Nel gene beta sono state identificate circa 400 diverse mutazioni alcune che inibiscono completamente la funzione del gene (β^0) altre che la riducono parzialmente (β^+). Questi difetti possono essere ereditati singolarmente (eterozigosi) e in questo caso sono responsabili di modesta anemia microcritica, irrilevante dal punto di vista clinico, oppure in omozigosi o doppia eterozigosi (β^0/β^0 o β^0/β^+). Queste ultime condizioni rappresentano le forme severe che clinicamente vengono distinte in trasfusione dipendenti (TDT) e trasfusione indipendenti (NTDT). Nelle forme NTDT il paziente è anemico, ma è in grado di mantenere spontaneamente livelli di Hb tra 7 e 9gr/dl, per cui ha necessità di trasfondere unità di globuli rossi solo in situazioni particolari quali interventi chirurgici, gravidanza, infezioni. I soggetti TDT (malattia di Cooley o talassemia *major*), invece, richiedono un appporto trasfusionale regolare, in genere 2/3 unità di sangue ogni 15/21 giorni per tutta la vita. Le trasfusioni di sangue, se da un lato correggono l'anemia, sono però responsabili di accumulo di ferro che necessita di essere eliminato con l'uso di farmaci in quanto l'organismo umano non ha meccanismi fisiologici per eliminare il ferro in eccesso (Harteveld *et al.*, 2022).

1. TERAPIA CONVENZIONALE DELLA BETA-TALASSEMIA

La terapia convenzionale della beta-talassemia prevede trasfusioni di emazie concentrate ogni 2/3 settimane per mantenere un livello di Hb pre-trasfusionale tra 9.5 e 10.5gr/dl e terapia ferrochelante per rimuovere il ferro che si accumula a livello di organi vitali come cuore, fegato e ghiandole endocrine, introdotto con le trasfusioni. Dagli anni '70 al 2000 circa l'unico ferrochelante disponibile era la desferrioxamina, che, per essere efficace, doveva essere somministrata sottocute per 8/10 ore al giorno mediante pompa per tutta la vita (Taher *et al.*, 2021). Ciò ha radicalmente cambiato la prognosi, prolungando la sopravvivenza dei pazienti talassemici, ma con un impatto negativo sulla qualità di vita dei pazienti stessi. Dal 2000 sono disponibili due chelanti orali (deferrirhone e deferasirox), che hanno decisamente migliorato la *compliance* dei pazienti, pur rimanendo una terapia molto impegnativa in quanto deve essere praticata giornalmente per tutta la vita (Mussallam *et al.*, 2025).

Una terapia curativa fu introdotta nel 1982, quando fu praticato il primo trapianto di midollo osseo in un bambino affetto da talassemia *major* con il

razionale di sostituire le cellule staminali emopoietiche del paziente con quelle di un donatore sano (Thomas *et al.*, 1982) Ci vollero alcuni anni per mettere a punto i protocolli di mieloablazione per “ripulire” completamente il midollo del paziente per accogliere le cellule staminali normali. Ad oggi il trapianto di midollo, secondo i dati del registro internazionale, è un’opzione terapeutica curativa proponibile per i pazienti di età <14 anni che abbiano un donatore HLA identico: ciò limita i pazienti idonei a circa il 25% della totalità (Baronciani *et al.*, 2016). Pertanto, nonostante il miglioramento in termini di sopravvivenza ottenuto negli ultimi vent’anni, il peso della terapia convenzionale e la presenza di co-morbidità (cardiopatia, epatopatia, endocrinopatia) rappresentano a tutt’oggi un problema clinico importante, da cui la necessità di ricercare nuovi approcci terapeutici.

2. NUOVE TERAPIE DELLA BETA-TALASSEMIA

I potenziali bersagli terapeutici della talassemia sono rappresentati nella Fig. 1 (Cappellini e Motta, 2017) e possono essere di tipo molecolare o farmacologico.

2.1. *Terapia molecolare*

Le modalità terapeutiche molecolari possono prevedere l’aggiunta del gene beta normale alle cellule staminali del paziente stesso (*gene addition*) o la manipolazione dei geni che controllano la produzione della Hb sempre nelle cellule staminali del paziente (*genome editing*). In entrambi i casi le cellule staminali emopoietiche del paziente vengono prelevate dal midollo osseo e inviate al laboratorio per l’adeguata preparazione. L’approccio di *gene addition* richiede l’utilizzo di un veicolo virale per introdurre il gene beta normale nelle cellule staminali. Dopo vari tentativi, la scelta è ricaduta sui *lentivirus* per maggior efficacia di integrazione, pur mantenendo il possibile rischio di sviluppo di patologie neoplastiche a causa di errata integrazione. EMA aveva approvato la terapia genica (Zynteglo) per le forme severe di beta-talassemia nel 2021, ma successivamente il brevetto è stato ritirato dall’azienda farmaceutica (nel 2022) e attualmente è approvato solo da FDA.

L’approccio di *genome editing* si basa sulla tecnica CRISPR/Cas9 e mira a modificare il gene BCL11A che fisiologicamente sopprime la produzione di HbF nel momento del passaggio dalla vita fetale alla vita adulta. Poiché è

noto dalla letteratura che mantenendo attiva la produzione di HbF in un soggetto talassemico si può correggere il fenotipo clinico, l'obiettivo di questo approccio terapeutico è quello di ripristinare la produzione di HbF per compensare l'incapacità di produrre HbA. Questo approccio (Exa-cel), sulla base dei *trials* clinici sia nella talassemia che nella SCD ha dato risultati estremamente positivi rendendo i pazienti talassemici trasfusione indipendenti dopo l'infusione delle cellule staminali manipolate e privi di crisi occlusive i pazienti con SCD: Exa-cel è stato approvato da EMA e FDA ed è attualmente in approvazione da parte delle commissioni regolatorie nazionali (Scaramellini *et al.*, 2025) (Fig. 2).

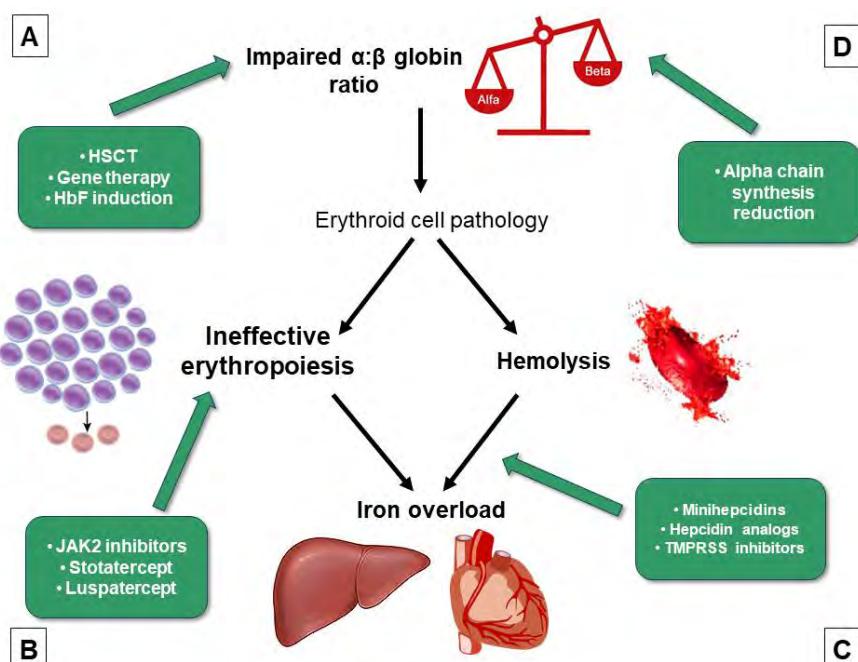


Fig. 1 – Nuovi approcci terapeutici per le beta talassemia trasfusione dipendenti. Immagine modificata da: Cappellini e Motta (2017).

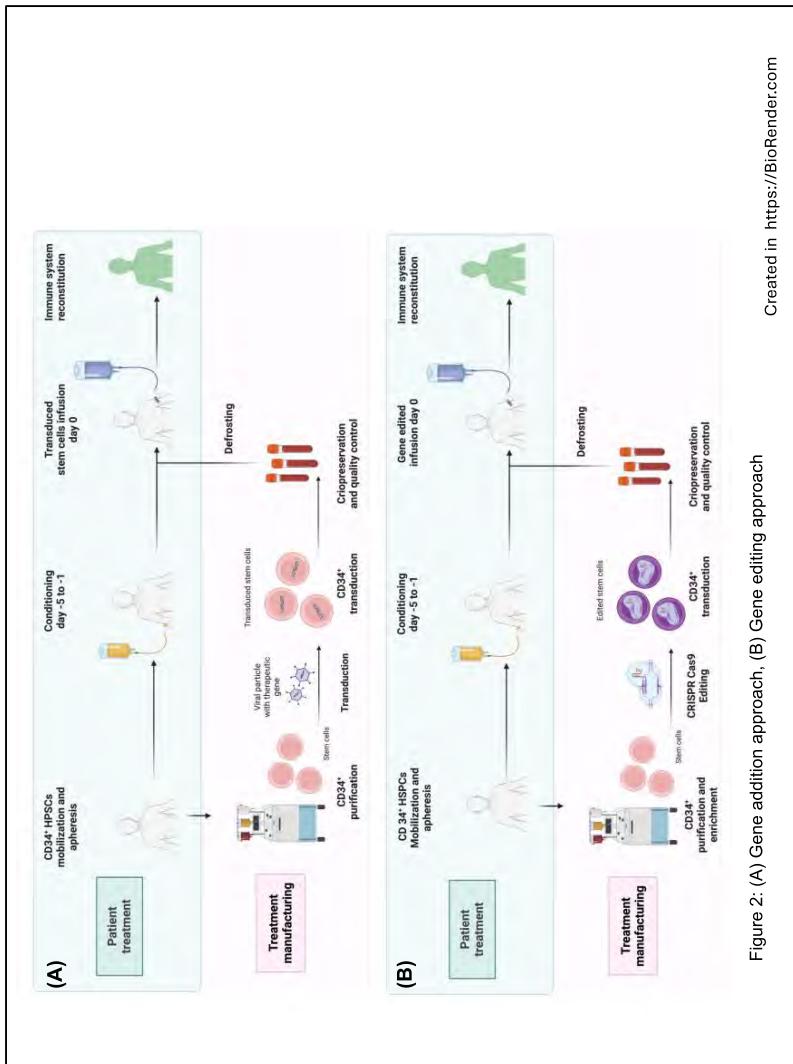


Figure 2: (A) Gene addition approach, (B) Gene editing approach

Created in <https://BioRender.com>

Fig. 2 – Approccio molecolare di gene therapy e genome editing per le beta talassemie trasfusioni dipendenti.
Immagine creata dall'autrice.

2.2. Terapia farmacologica

Come indicato nella Fig. 1 tra i meccanismi fisiopatologici delle sindromi talassemiche ci sono diversi potenziali bersagli farmacologici quali l'eritropoiesi inefficace (B), il metabolismo del globulo rosso o l'omeostasi del ferro (C). Il farmaco oggi approvato sia da EMA che FDA per trattare l'anemia da eritropoiesi inefficace, nelle forme di talassemia severe è Luspatercept. Si tratta di un fattore di maturazione eritroide che neutralizza alcuni ligandi della famiglia dei *beta growth factors*, inibendo così una via di controllo dell'eritropoiesi e promuovendo la maturazione dei globuli rossi. Non è una terapia curativa, ma riduce significativamente il fabbisogno trasfusionale (>33% rispetto al basale) come dimostrato dagli studi di fase 3 e da ormai una quantità di dati a lungo termine dopo la registrazione (Cappellini *et al.*, 2020). Il farmaco viene somministrato sottocute ogni 21 giorni

Luspatercept è oggi disponibile per la terapia dell'anemia, sia in TDT che in NTDT. Ovviamente risultati a lungo termine consentiranno di valutare quanto la risposta sia duratura e quali siano i pazienti che meglio rispondono (Cappellini *et al.*, 2025; Panzieri *et al.*, 2024).

Un'altra possibilità per ridurre il fabbisogno trasfusionale e incrementare l'Hb nelle talassemie si è dimostrato essere il miglioramento dello stato metabolico del globulo rosso talassemico. Ciò è stato ottenuto con un farmaco (Mitapivat) già approvato come induttore di piruvato chinasi (PK) nei pazienti affetti da *deficit* di PK. Mitapivat, attivando PK, attiva la via glicolitica aumentando la produzione di ATP che fornisce energia al globulo rosso. Il globulo rosso talassemico è costantemente esposto a stress ossidativo e di conseguenza a emolisi e morte precoce. Migliorando lo stato energetico il GR sopravvive più a lungo come è stato dimostrato negli studi clinici (Energize ed Energize-T) nelle forme di TDT con riduzione del fabbisogno trasfusionale >50% rispetto al basale e nelle NTDT con aumento di Hb >1.5gr/dl. 8. Mitapivat è attualmente alla valutazione delle autorità regolatorie EMA e FDA (Hadroj *et al.*, 2025; Musallam *et al.*, 2022).

Sono stati considerati altri possibili interventi terapeutici modulando l'omeostasi del ferro attraverso il controllo dell'epcidina che è il regolatore chiave della distribuzione del ferro nell'organismo, ma ad oggi gli studi clinici iniziati sono stati interrotti per mancanza di efficacia.

CONCLUSIONI

Numerosi progressi sono stati ottenuti negli ultimi vent'anni con la terapia convenzionale delle sindromi talassemiche che si sono tradotti in un prolungamento della sopravvivenza dei pazienti talassemici sia TDT che NTDT. In Italia oggi la sopravvivenza media di tali pazienti supera 40 anni, tuttavia, la qualità di vita rimane inficiata dalla terapia trasfusionale, dalla terapia ferro chelante e dalle comorbidità legate alla malattia stessa. È auspicabile pertanto che in un prossimo futuro siano disponibili terapie innovative, alternative alla terapia convenzionale. In tal senso, sono in corso studi clinici con nuovi approcci terapeutici molecolari o farmacologici alcuni dei quali hanno già ottenuto l'approvazione.

BIBLIOGRAFIA

- Baronciani D., Angelucci E., Potschger U., Gaziev J., Yesilipek A., Zecca M. et al. (2016). *Hemopoietic stem cell transplantation in thalassemia: a report from the European Society for Blood and Bone Marrow Transplantation Hemoglobinopathy Registry, 2000-2010*. In: «Bone Marrow Transplant», 51(4): 536-541.
- Cappellini M.D. and Motta I. (2017). *New therapeutic targets in transfusion-dependent thalassemia*. In: «Hematology Am Soc hematol Educ Program».
- Cappellini M.D., Viprakasit V., Georgiev P. et al. (2025). *Long-term efficacy and safety of luspatercept for the treatment of anaemia in patients with transfusion-dependent beta-thalassemia (BELIEVE): final results from a phase 3 randomized trial*. In: «Lancet Haematol», 12(3): e180-e189.
- Cappellini M.D., Viprakasit V., Taher A.T. et al. (2020). *A phase 3 trial of Luspatercept in patients with transfusion dependent beta-thalassemia*. In: «N Engl J Med», 382: 12319-1231.
- Hadroj M.H., Klim J., Charbel N. and Taher A. (2025). *Mitapivat: a step forward across different hemolytic diseases*. In: «Expert Opin Emerg Drug», 29:1-3.
- Harteveld C.L., Achour A., Arkesteijn S.J.G., Ter Huurne J., Verschuren M., Bhagwandien-Bisoen S. et al. (2022). *The hemoglobinopathies, molecular disease mechanisms and diagnostics*. In: «Int J Lab Hematol», 44 (Suppl 1): 28-36.
- Musallam K.M., Cappellini M.D., Porter J.B. et al. (2025). *TIF guidelines for the management of transfusion-dependent beta thalassemia*. In: «Hemasphere», 9(3): e70095.
- Musallam K.M., Taher A.T. and Cappellini M.D. (2022). *Right in time: Mitapivat for the treatment of anemia in α- and β-thalassemia*. In: «Cell Rep med», 3(10): 100790.

- Panzieri D.L., Consonni D., Scaramellini N. et al. (2024). *Real-world efficacy and safety of luspatercept and predictive factors of response in patients with transfusion-dependent beta-thalassemia*. In: «Am J Hematol», 99(12): 2395-2398.
- Scaramellini N., Panzieri D.L. and Cappellini M.D. (2025). *Gene therapy for sickle cell disease and thalassemia*. In: «Curr Opin Hematol», 1, 32: 120-129.
- Taher A.T., Musallam K.M. and Cappellini M.D. (2021). *β-Thalassemias*. In: «N Engl J Med», 384(8): 727-743.
- Taher A.T., Weatherall D.J. and Cappellini M.D. (2018). *Thalassemia*. In: «Lancet», 391: 155-167.
- Thomas E.D., Buckner C.D., Sanders J.E. et al. (1982). *Marrow transplantation for thalassemia*. In: «Lancet» 2: 227-229.

Pubblicato con licenza Creative Commons Attribuzione - Non commerciale - Non opere derivate 4.0 Internazionale (CC BY-NC-ND 4.0).

Sono riservati i diritti per Text and Data Mining (TDM), AI training e tutte le tecnologie simili.

L'opera, comprese tutte le sue parti, è tutelata dalla legge sul diritto d'autore. L'Utente nel momento in cui effettua il download dell'opera accetta tutte le condizioni della licenza d'uso dell'opera previste e comunicate sul sito <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.it>.

I link attivi e gli eventuali QR code inseriti nel volume sono forniti dall'autore. L'editore non si assume alcuna responsabilità su link e QR code ivi contenuti che rimandano a siti non appartenenti a FrancoAngeli.

I «Rendiconti» sono pubblicati 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 degli Studi di Bergamo.

Redazione - amministrazione - distribuzione: FrancoAngeli srl, viale Monza 106, 20127 Milano. Tel. +39.02.2837141, e-mail: riviste@francoangeli.it.
Coordinamento editoriale di Anna Buccinotti

Autorizzazione del Tribunale di Milano n. 5504 del 10-01-1961 – quadrimestrale.
Diretrice responsabile: Rita Pezzola.
Copyright © 2026 by FrancoAngeli s.r.l., Milano.

II quadrimestre 2025 – Data di prima pubblicazione: febbraio 2026

FrancoAngeli srl
V.le Monza 106
20127 Milano

II quadri mestre 2025

Edizione fuori commercio
R9506.2025.2