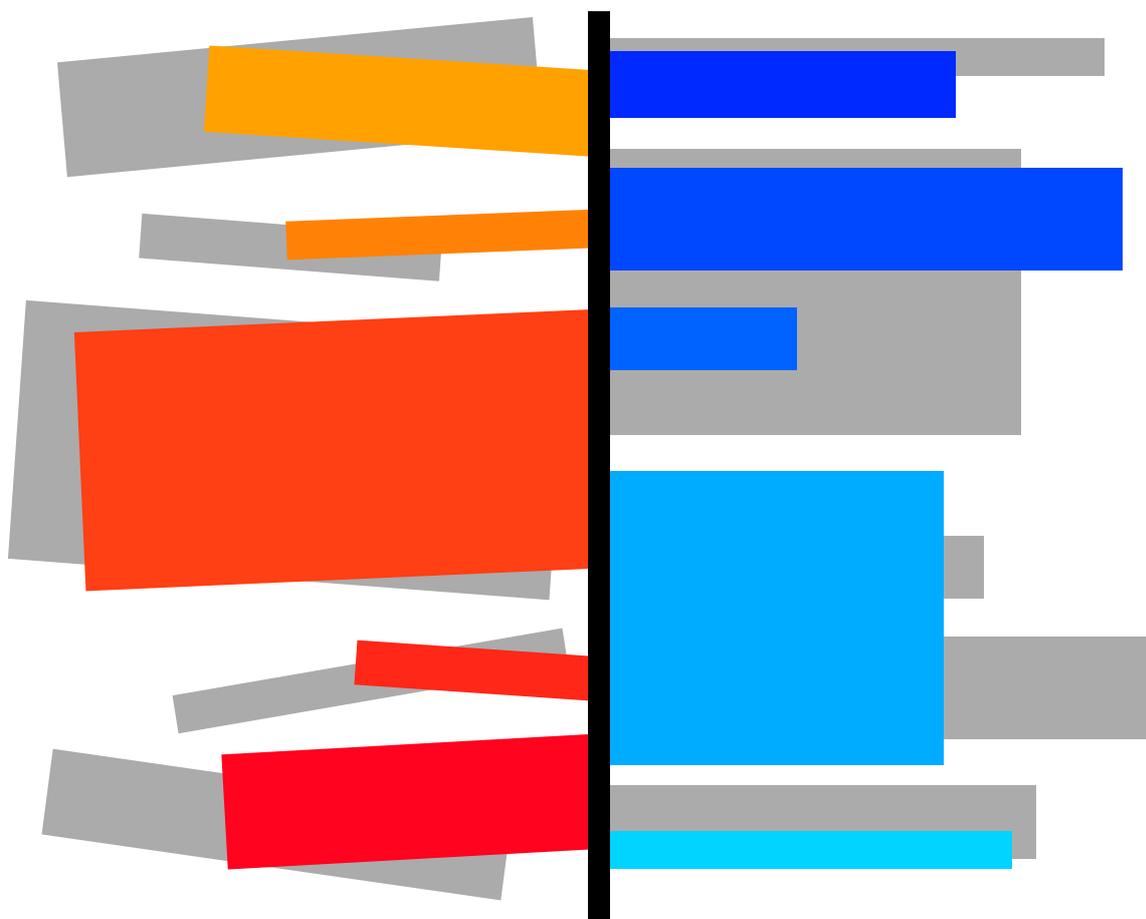


Numero XXI
Anno 2023



Viaggio nella Scienza

Ithaca



Sfide, parte A

Ithaca: Viaggio nella Scienza

Una pubblicazione del Dipartimento di Matematica e Fisica “*Ennio De Giorgi*” dell’Università del Salento

Registrazione presso il Tribunale di Lecce n. 6 del 30 Aprile 2013. e-ISSN: 2282-8079

Direttrice Responsabile
Loredana De Vitis

Ideatore
Giampaolo Co’

Comitato di redazione
Adriano Barra,
Rocco Chirivì,
Paolo Ciafaloni,
Maria Luisa De Giorgi,
Vincenzo Flaminio,
Luigi Martina,
Giuseppe Maruccio,
Marco Mazzeo,
Francesco Paparella,
Carlo Sempi.

Segreteria di Redazione
Daniela Dell’Anna

© 2023-2033 Dipartimento di Matematica e Fisica “*Ennio De Giorgi*”
© 2023 per i singoli articoli dei rispettivi autori. Il materiale di questa pubblicazione può essere riprodotto nei limiti stabiliti dalla licenza “Creative Commons Attribuzione - Condividi allo stesso modo 3.0 Italia” (CC BY-SA 3.0 IT).

Per il testo della licenza: <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/it/deed.it>

Ithaca: Viaggio nella Scienza
è disponibile al sito
<http://ithaca.unisalento.it>

Scriveteci all’indirizzo
ithaca@unisalento.it

Ithaca

Viaggio nella Scienza

XXI 2023

5 Dieci anni

Fisica

7 La fisica della materia: alcune sfide e prospettive dei prossimi anni

Lucio Claudio Andreani

Biologia

11 Il futuro della ricerca marina

Ferdinando Boero

Fisica

15 Gli acceleratori del futuro per la Fisica delle alte energie

Fabio Bossi

Fisica

19 Struttura e reazioni nucleari e l'origine degli elementi

Angela Bracco

Filosofia

29 Su alcuni possibili percorsi della filosofia della scienza

Mario Castellana

- 35** **Tecnologia**
Teoria e simulazione nei plasmi fusionistici
Matteo Valerio Falessi, Fulvio Zonca
- 43** **Matematica**
Il moto browniano
Franco Flandoli
- 47** **Fisica**
**Teoria Gravitazionale e Applicazioni Cosmologiche:
Possibili Sviluppi Futuri**
Maurizio Gasperini
- 53** **Medicina**
Il futuro della medicina
Chiara Gerardi e Silvio Garattini
- 59** **Economia Politica**
Quali prospettive per l'Economia Politica?
Michele Grillo
- 61** **Fisica**
Sfide per la fisica teorica
Alberto Lerda
- 71** **Comunicazione**
**Cosa mettono in comune un comunicatore scienzia-
to e il suo pubblico?**
Sandra Lucente
- 75** **Biologia**
Le malattie delle piante tra robot, AI e reti neurali
Andrea Luvisi

Fisica

79 Prospettive per nuovi orizzonti nell'astrofisica
Maurizio Spurio

91 Indici dei primi 20 numeri

Dieci anni

Questo numero inaugura il nuovo decennio di pubblicazioni di **Ithaca**. Come avviene spesso, il passaggio ad una cifra tonda spinge a fare un bilancio di quanto è avvenuto.

Abbiamo dedicato il numero XVII all'abuso delle analisi quantitative. Questo non significa che si deve evitare di utilizzare numeri, ma che bisogna comprenderne il significato. In effetti, qualche numero aiuta a capire cosa abbiamo realizzato in questo decennio. Abbiamo pubblicato 20 numeri nella serie **Normale** e 2 in quella **Educational**, per un totale di 211 articoli, 2765 pagine scritte da 255 autori.

Il numero riguardante i lettori della rivista, che è esclusivamente elettronica, è più difficile da valutare perché il numero delle pagine consultate è falsato da collegamenti fasulli fatti da *robot*. Una stima approssimativa, fatta con molte ipotesi, tutte da verificare, indica circa mille consultazioni per numero.

I numeri hanno difficoltà a valutare la qualità di quanto abbiamo proposto. Dato che non ci sono motivazioni economiche dietro questa avventura editoriale, la qualità è l'attributo che ci interessa maggiormente. Da questo punto di vista possiamo solo riferire l'apprezzamento dei colleghi e dei lettori che vengono a conoscenza di **Ithaca**, e questo ci conforta nel continuare questa avventura.

Il XXI numero ha una struttura particolare che lo distingue dai precedenti. Invece di collezionare ampi articoli legati tra loro da un argomento comune, abbiamo chiesto a vari colleghi di scrivere un breve contributo su quello che ritengono possa essere il futuro del loro campo di ricerca. Il titolo, **Sfide**, si riferisce proprio a questo. Per usare un termine tedesco, questo è un *Festschrift*

che celebra i 10 anni di **Ithaca** in cui gli autori esprimono la loro stima ed apprezzamento alla rivista.

Non si tratta di un panorama esaustivo, ma solo dello spaccato di alcuni temi che sono stati trattati nei numeri precedenti di **Ithaca** o che vorremmo trattare. Come si può vedere dall'indice, passiamo dalla Cosmologia alla Medicina, all'Editoria Scientifica di divulgazione. Speriamo che il lettore, in questo insieme di contributi, trovi interventi di suo interesse.

Buona lettura,
il Comitato di Redazione

P. S. In fondo a questo numero ci sono indici cumulativi riguardanti i 22 volumi pubblicati.

P. P. S. Il lettore avrà notato che in questo numero è cambiato il Direttore Responsabile di **Ithaca**. Rigraziamo Luigi Spedicato per il ruolo che ha svolto in questi anni, e auguriamo al nuovo Direttore, Loredana De Vitis, un lungo e proficuo lavoro insieme a tutta la redazione.

La fisica della materia: alcune sfide e prospettive dei prossimi anni

Lucio Claudio Andreani

Dipartimento di Fisica, Università di Pavia, via Bassi 6, 27100 Pavia, Italy

In questo contributo descrivo alcune prospettive per la fisica della materia nei prossimi anni che riguardano in particolare tre aree di ricerca: analogie fra sistemi elettronici e fotonici, eccitazioni elementari di natura ibrida, la seconda rivoluzione quantistica.

Introduzione

La fisica della materia è un campo molto ampio che comprende la fisica dei solidi, dei liquidi, la fisica atomica e molecolare, la *soft matter*, la fisica dei plasmi, l'ottica e la fotonica, l'informazione quantistica (quest'ultima in parziale sovrapposizione con l'area di fisica teorica). A partire dalla fine del secolo scorso, molti di questi campi hanno ricevuto un fortissimo impulso dallo sviluppo delle nanotecnologie, che permettono di realizzare strutture su scala sub-micrometrica, progettate (a volte si dice ingegnerizzate) sia per l'osservazione di effetti di natura fondamentale, sia per la realizzazione di dispositivi sempre

più miniaturizzati. Ciò garantisce a molti campi della fisica della materia possibilità di sviluppo in numerose direzioni, quasi senza limiti. In questo breve *excursus* mi soffermerò sui seguenti ambiti di ricerca:

- analogie fra sistemi elettronici e fotonici
- eccitazioni elementari di natura mista
- la seconda rivoluzione quantistica.

Si tratta ovviamente di una scelta personale e specifica, per la quale cercherò di fornire pochi *entry points* selezionati in una letteratura sempre più vasta.

Sistemi elettronici e fotonici: un percorso congiunto

Lo studio degli elettroni nei solidi (che ha avuto grande sviluppo negli anni '60 e '70) [1, 2] e della luce nei cristalli fotonici (a partire dagli anni '80 e '90) [3] hanno in comune il carattere ondulatorio di elettroni e fotoni, e le proprietà

che seguono dalla periodicità spaziale, in primo luogo l'esistenza di *gap* di energia e la possibilità di realizzare difetti controllati di varie dimensionalità. L'analogia si è poi estesa a numerosi ambiti, ad es. la localizzazione di Anderson in presenza di disordine, la realizzazione di atomi artificiali quali i *quantum dots* e le cavità fotoniche, il *design* e la fabbricazione di dispositivi fotonici planari che emulano le proprietà dei dispositivi elettronici (in primo luogo il transistor).

Da alcuni anni è emerso lo studio di un altro elemento unificante fra sistemi elettronici e fotonici, ossia le proprietà topologiche [4, 5, 6, 7]. Concetti quali la fase di Berry e gli invarianti topologici come il numero di Chern sono alla base di profonde analogie e hanno permesso di rivelare nuovi effetti riguardanti la luce (si pensi ad es. al *quantum spin-Hall effect* o ai sistemi non reciproci che emulano l'esistenza di un campo magnetico [7]). È facile prevedere che la commistione di concetti fra fisica dei solidi, fotonica, geometria e topologia, evocherà nei prossimi anni un campo di ricerca interdisciplinare con molteplici sviluppi in ampie aree della fisica della materia. Sarà anche di grande importanza l'applicazione di metodi di *quantum field theory* ai sistemi analoghi di carattere sia elettronico sia fotonico, con i quali vengono studiati e realizzati modelli nati in ambito puramente teorico.

Eccitazione elementari: un tema sempre vivo

Risale a poco prima degli anni '60 l'inizio dello studio sistematico delle eccitazioni elementari nei solidi, quali plasmoni, eccitoni, magnoni, polaritoni, in aggiunta ovviamente ai fononi [8, 9, 10]. Lo sviluppo delle nanotecnologie e delle tecniche spettroscopiche ha portato anche qui a svariate possibilità di indagine e controllo delle eccitazioni elementari in funzione della dimensionalità, si pensi ad esempio ai plasmoni localizzati [11] (noti specie in letteratura chimica come Surface Plasmon Resonance o SPR), che hanno rivoluzionato il campo dei sensori ottici.

Negli ultimi 20 anni, lo studio delle eccitazioni miste nei sistemi optomeccanici, *plasmon-excitons*, *exciton-polaritons*, spesso su piattaforme elettroniche di tipo quasi-bidimensionale come il grafene,

i semiconduttori 2D, le perovskiti ibride, si è rivelato un campo di ricerca estremamente fecondo per la realizzazione di effetti fisici fondamentali con varie prospettive applicative [12]. Un esempio significativo è lo studio dei fluidi quantistici e delle correlazioni tipiche della condensazione di Bose-Einstein [13], ora anche a temperatura ambiente. I continui progressi delle nanotecnologie e della scienza dei materiali fanno prevedere per i prossimi anni (e forse decenni) una grande varietà di ricerche nello studio di eccitazioni elementari di natura ibrida, di effetti prettamente quantistici, dando rinnovato vigore al tradizionale e sempre vivo campo dell'interazione radiazione-materia.

La seconda rivoluzione quantistica

Per molti decenni, i concetti della *quantum information* (in primo luogo il *quantum computing* e la comunicazione quantistica basata sulla *quantum key distribution*) sono evoluti come concetti puramente teorici o confinati a pochi esperimenti di natura fondamentale. Negli ultimi anni il computer quantistico è diventato una realtà anche commerciale, è disponibile sul *cloud* nelle varie piattaforme basate su circuiti superconduttivi [14], ioni intrappolati da fasci laser [15], e circuiti fotonici integrati [16] (questi ultimi non realizzano per ora lo *universal quantum computer*, d'altra parte hanno la caratteristica di operare a temperatura ambiente). La comunicazione quantistica è anch'essa una realtà tecnologica e si espande molto rapidamente nelle direzioni sia della comunicazione *free space* [17], sia della realizzazione di una rete quantistica su fibre ottiche [18]. Tutto questo avviene grazie ad un imponente sforzo di ricerca di carattere interdisciplinare, ma che ruota attorno alla fisica della materia, offrendo brillanti prospettive di ricerca per molti anni a venire. Un esempio emergente sono i processori quantistici basati su qu-bit a semiconduttori [19].

È difficile dire in che misura queste ed altre tecnologie quantistiche di seconda generazione, finora confinate a relativamente pochi ambiti pubblici e privati, entreranno anche nella vita quotidiana al pari di quelle di prima generazione

(si pensi all'elettronica e ai laser, indispensabili anche per la comunicazione ottica). È anche difficile dire ora se questa seconda rivoluzione quantistica sia almeno in parte una moda destinata a passare, oppure se diventerà un nuovo paradigma per la comprensione e magari anche per l'insegnamento della meccanica quantistica. È però certo che essa offre sempre nuove possibilità di ricerca e lega in un campo comune la fisica dei solidi, la fisica atomica e la fotonica (oltre a vari ambiti di ingegneria), confermando il ruolo centrale della fisica della materia nella ricerca e nell'innovazione anche tecnologica.

Conclusioni: una prospettiva personale

Le direzioni di ricerca sopra menzionate sono solo alcune fra le tante che potrebbero essere discusse: la fisica computazionale a principi primi e il suo impatto sulla scienza dei materiali, lo studio teorico di fenomeni complessi di natura multiscala (ad esempio l'attrito o il *folding* di biomolecole), le nanotecnologie quantistiche, le tematiche riguardanti l'energia e in particolare l'*energy harvesting*. La fisica della materia si espande rapidamente e in direzioni molto diverse, spesso comuni ad altre discipline quali la scienza dei materiali, la chimica, l'ingegneria, l'informatica. A differenza di altre aree (quali la fisica delle interazioni fondamentali) non esiste un modello standard, bensì una pluralità di conoscenze che tendono a produrre comunità distinte, a volte con poca comunicazione e difficoltà di comprensione reciproche. È necessario formare dei ricercatori che conoscano i percorsi storici delle idee e che abbiano una visione d'insieme della fisica e delle altre discipline, evitando una iperspecializzazione (che può portare anche al dogmatismo) e favorendo invece la multidisciplinarietà.

Ringraziamento - Sono grato a Dario Gerace per una lettura critica di questo contributo e per utili suggerimenti.



[1] F. Bassani and G. Pastori Parravicini, *Electronic States and Optical Transitions in Solids* (Pergamon Press, 1975).

- [2] G. Grosso and G. Pastori Parravicini, *Solid State Physics*, 2nd ed. (Academic Press, 2013).
- [3] J.D. Joannopoulos, S.G. Johnson, J.N. Winn, and R.D. Meade, *Photonic Crystals - Molding the Flow of Light*, 2nd ed. (Princeton University Press, 2008).
- [4] D. Xiao, M.-C. Chang, Q. Niu, *Rev. Mod. Phys.* **82**, 1959 (2010).
- [5] D. Vanderbilt, *Berry Phases in Electronic Structure Theory: Electric Polarization, Orbital Magnetization and Topological Insulators* (Cambridge University Press, 2018).
- [6] S.M. Girvin and K. Yang, *Modern Condensed Matter Physics* (Cambridge University Press, 2019).
- [7] T. Ozawa et al, *Rev. Mod. Phys.* **91**, 015006 (2019).
- [8] D. Pines, *Elementary Excitations in Solids* (CRC Press, 1999).
- [9] S.A. Maier, *Plasmonics - Fundamentals and Applications* (Springer, 2007).
- [10] L.C. Andreani, in *Strong Light-Matter Coupling: From Atoms to Solid-State Systems*, edited by A. Auffèves et al. (World Scientific, Singapore, 2014), p. 37.
- [11] S.V. Gaponenko, *Introduction to Nanophotonics* (Cambridge University Press, 2010).
- [12] Z. Cai, Y. Xu, C. Wang, and Y. Liu, *Adv. Optical Mater.* **8**, 901090 (2020).
- [13] I. Carusotto and C. Ciuti, *Rev. Mod. Phys.* **85**, 299 (2013).
- [14] Quantum computer based on superconducting circuits: <https://quantum-computing.ibm.com/>, vedi D. Castelvecchi, *Nature* **453**, 159 (2017); F. Arute et al., *Nature* **574**, 505 (2019).
- [15] Trapped ions quantum computing: <https://ionq.com/>, vedi ad es K. Wriht et al., *Nature Communications* **10**, 5464 (2019).
- [16] Photonic quantum computing: <https://aws.amazon.com/it/braket/quantum-computers/xanadu/>, vedi ad es. L.S. Madsen et al., *Nature* **606** 75 (2022).
- [17] S.K. Liao et al., *Nature Photonics* **11**, 509 (2017).
- [18] EuroQCI (European Quantum Communication Infrastructure) Initiative, <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/european-quantum-communication-infrastructure-euroqci>
- [19] Qubit a semiconduttori: <https://qutech.nl/>, vedi ad es. S.G.J. Philips et al, *Nature* **609**, 919 (2022).



Lucio Claudio Andreani: è Professore Ordinario di Fisica della Materia presso l'Università di Pavia. Si è occupato di semiconduttori, nanostrutture, eccitoni e polaritoni, microcavità, cristalli fotonici, plasmonica, temi applicati quali fotovoltaico e fotonica in silicio. Al momento si interessa soprattutto di fotonica chirale e metasuperfici.

Il futuro della ricerca marina

Ferdinando Boero

Stazione Zoologica Anton Dohrn, Università di Napoli Federico II, CoNISMa, CNR-IAS

Il futuro non esiste e quindi parlarne potrebbe significare parlare del nulla. L'oceano copre il 71% della superficie del pianeta, ma non è una superficie. Con la sua profondità media di 4000 m l'oceano è un volume, e rappresenta più del 90% dello spazio abitato dalla vita. Senza l'oceano il pianeta muore. In teoria, quindi, conoscere l'oceano dovrebbe essere di vitale importanza, visto che dall'oceano dipende il nostro benessere e che le nostre attività lo stanno deteriorando. In un mondo perfetto le priorità si dovrebbero decidere secondo le urgenze, ma non sempre è così.

Finalmente, dopo decenni di avvertimenti inascoltati, gli argomenti degli ecologi cominciano a fare breccia, almeno a parole. Nel 1992 si decide, a Rio de Janeiro, che la biodiversità è di vitale importanza per la nostra sopravvivenza e si riconosce che le nostre azioni la stanno deteriorando, contribuendo a creare condizioni che rendono l'ambiente ostile per il nostro benessere.

La logica conseguenza di questa presa di coscienza avrebbe dovuto essere un grande sviluppo degli studi sulla biodiversità. Abbiamo descritto due milioni di specie, ma si calcola che la biodiversità ammonti a otto milioni di specie. Sei milioni sono ancora da scoprire. Come si fa a proteggere un capitale naturale che non si conosce? Logica vorrebbe che la comunità scientifica fosse chiamata a uno sforzo immane per colmare questa lacuna.

Paradossalmente, invece, la scienza di base per

lo studio della biodiversità, la tassonomia, è in crisi. Il motivo è semplice: non ci sono finanziamenti. Da una parte si riconosce l'importanza cruciale della biodiversità, dall'altra si porta all'estinzione la conoscenza sulla biodiversità.

Questo esempio non è isolato. Ora, con il PNRR, abbiamo ricevuto miliardi per fare la transizione ecologica. Persino il Pontefice, con *Laudato Si'*, chiede la conversione ecologica. Dopo la biodiversità, ora si chiede la conversione ecologica. Biodiversità ed ecosistemi entrano nei valori fondanti della Costituzione, all'articolo 9.

Viene persino istituito un Ministero della Transizione Ecologica. Ma si ripete il paradosso di Rio. A dirigere il Ministero viene chiamato un tecnologo che non ha alcuna esperienza in ecologia e che, in qualche occasione, ha persino affermato che sia un ostacolo al progresso, per lui declinato solo con il progresso tecnologico. Il ruolo dell'ecologia nella transizione ecologica è irrilevante.

Quando, a Lecce, fu istituito il corso di Scienze e Tecnologie per l'Ambiente dicevo ai miei studenti che, in quel momento, le prospettive di lavoro erano esigue. Ma continuavo dicendo: stiamo facendo talmente tanti danni all'ambiente che, prima o poi, quello che imparerete avrà importanza cruciale, e voi sarete pronti per giocare il vostro ruolo. Sbagliavo. A parole si riconosce che quel che insegniamo loro ha importanza cruciale, ma in pratica questo tipo di conoscenza non viene valorizzato.

Esiste quindi uno scollamento tra quel che si riconosce essere importante e quel che si fa.

Di chi è la colpa?

La colpa è degli ecologi. L'ecologia studia l'argomento più difficile che esista. Studia la vita (il fenomeno più complesso nell'universo conosciuto) e i rapporti tra i viventi. Per farlo ha usato un approccio riduzionista. Prendiamo le scienze marine. Esse comprendono: oceanografia fisica, oceanografia chimica, geologia marina, sedimentologia, biologia marina, ecologia marina, socio-economia, geografia. Ognuna di queste discipline si suddivide in sub-discipline. La biologia marina comprende studi che vanno dalle molecole (DNA ambientale), alla biologia cellulare, organismica, la biodiversità, il plancton, il benthos, il necton, l'etologia, i cicli biologici. L'ecologia marina studia i rapporti tra gli organismi e il mondo fisico-chimico, inclusi i rapporti con la nostra specie, ad esempio con la pesca: l'ecologia studia gli ecosistemi e il loro sviluppo nel tempo. Poi c'è la socio-economia, di cui fa parte anche la pianificazione spaziale marittima.

I cultori di queste discipline sono iperspecializzati, conoscono bene la loro componente ma, di solito, non hanno grande familiarità con le altre. Ogni specialista, è inutile dirlo, pensa che la sua disciplina sia la più importante. E tende a minimizzare l'importanza delle altre discipline. Quando i rappresentanti della comunità scientifica si trovano in una stanza con i decisori, tendono a spingere per la propria disciplina e trascurano di menzionare le altre. Se un decisore dovesse chiedere a cento rappresentanti della comunità scientifica marina quale sia l'argomento più importante riceverebbe almeno trenta risposte differenti e tutti i cento rappresentati avrebbero comunque diverse sfumature persino nell'essere d'accordo. A chi dar retta? A chi è nella stanza. Risultato: si frammentano le ricerche e si disperdono le risorse.

Per anni ho fatto parte dell'European Marine Board, un organo di consulenza della Commissione Europea. In un documento di indirizzo intitolato *Navigating the Future* abbiamo scritto [1]:

" To truly progress this knowledge, European scientists across a broad range of disciplines and domains must make a quantum leap towards holistic approaches and integrated research on a scale which will help us to much better understand, protect, manage and sustainably exploit the seas and oceans which surround us. This is a Grand Challenge; not just Europe, but for human society as a whole. "

Passare all'approccio olistico

La comunità scientifica è irrimediabilmente riduzionista (le specializzazioni) ma il mondo è uno e i vari approcci vanno integrati e portati a sistema: il tutto è più della somma delle singole parti. Lo sappiamo bene: bisogna identificare le proprietà emergenti.

L'affermazione di principio, quindi, è che i vari riduzionismi siano integrati per ottenere una visione olistica. Ma l'eccessiva specializzazione porta a mantenere il riduzionismo.

La Commissione Europea ha cercato di incentivare questo passaggio, con la creazione dei Network Europei di Eccellenza. Ho fatto parte del Network su Biodiversità marina e Funzionamento degli Ecosistemi. Esistono due comunità scientifiche, una studia la biodiversità e l'altra studia gli ecosistemi. La Commissione mette a disposizione una montagna di denaro per mettere assieme i due approcci, passando da riduzionismo a olistico.

Durante il *kick off meeting*, a Bruges, uno fa una proposta: dividiamo il Network in due sezioni. Una sulla biodiversità e l'altra sugli ecosistemi. Io trasecolo. Alzo la mano e dico: "ma ci hanno dato questi fondi per mettere assieme i due approcci e noi li dividiamo sin dall'inizio?" L'*officer* di DG Research and Innovation, che ci ha dato i soldi, mi guarda come dire: "grazie"! Ma il coordinatore dice: "noi siamo un consorzio democratico. Votiamo". In due votiamo per tenere uniti i due temi. Tutti gli altri votano per tenerli separati. L'*officer* si tiene la testa tra le mani. Se le cose non vanno per il verso giusto, la colpa è della comunità scientifica.

Prevedere il futuro

La storia non si può prevedere con un'equazione. L'equazione della storia non esiste. Usando la ragione, mi verrebbe da dire che il futuro ci porterà a cercare risposta alle domande: quante specie ci sono sul pianeta, che ruoli giocano, come funzionano gli ecosistemi, come possiamo delimitare porzioni omogenee di ambiente tenute assieme ecologicamente da alta connettività, come cambiano gli ecosistemi a seguito delle nostre azioni, come possiamo fare per rimediare?

Sono domande che hanno a che fare con la transizione ecologica, universalmente ritenuta il problema numero uno. E non esiste un problema numero due che possa stare vicino a questo. La priorità è questa. Ed è una priorità urgente.

Mi verrebbe da prevedere che, in futuro, gli approcci riduzionistici saranno integrati con lo sviluppo di approcci olistici, e che finalmente ci impegneremo a rispondere a queste domande, visto che siamo tutti d'accordo.

Se guardo il passato, però, vedo che sono almeno 30 anni che siamo tutti d'accordo. E stiamo facendo l'esatto contrario di quel che diciamo andrebbe fatto. Non sto qui a elencare ricerche molto finanziate che non hanno queste priorità riconosciute. Non vorrei offendere qualcuno. Mi va benissimo che siano finanziate, a patto che lo siano anche quelle ritenute importantissime.

Non ho quindi risposta. Ho scritto quello che secondo me andrebbe fatto, ma temo che non lo faremo. Fino a quando avremo deteriorato l'ambiente in modo irreparabile per il benessere della nostra specie.

Dato però che il futuro non esiste, forse acquisiremo saggezza e faremo quel che va fatto, e il futuro non ripercorrerà gli errori del passato. Perché questo avvenga, però, i sistemi di formazione dovranno evolvere in modo da fornire alta specializzazione ma, anche, strumenti di dialogo tra le discipline. E qui potrei sollevare qualche polemica. Chi studia scienze ambientali o scienze biologiche studia anche matematica, fisica, chimica (le basi) e poi passa a livelli superiori di organizzazione. Chi studia le basi non riceve conoscenza sui livelli superiori di organizzazione (biodiversità ed ecosistemi) e questo non agevola l'integrazione delle conoscenze. Finché ci saranno discipline che si ritengono superiori rispetto

ad altre, ignorandone peraltro le fondamenta, l'integrazione tra le conoscenze non avverrà.

La sfida più grande è che questo avvenga, e che nell'orchestra che suona la musica della scienza i musicisti siano in grado di suonare assieme, e non ognuno per conto suo.

I sistemi di formazione

I giovani esemplari della nostra specie sono curiosissimi di cose di natura, con rarissime eccezioni. Di solito vogliono conoscere, prima di tutto, gli animali. Portateli in un bosco, su una spiaggia, e mostrate loro gli animali. Vi daranno tutta la loro attenzione e ricorderanno, senza bisogno di studiarlo, quel che avranno imparato. Bene: ora portateli a scuola. La natura non c'è, ci sono astrazioni. Tabelline, poesie, regole grammaticali e sintattiche, date di eventi importanti, teoremi. Tutte cose importantissime, non vorrei essere frainteso. Ma noi impariamo a parlare la nostra lingua madre in modo induttivo: prima parliamo, e utilizziamo regole che non conosciamo e che impareremo dopo. Pensare di insegnare una lingua impartendo prima le regole grammaticali e la sintassi, dicendo che dopo ne capiremo l'importanza, non darebbe buoni risultati. Prima la pratica e poi la teoria è etichettato come metodo induttivo, prima le regole e poi la pratica è invece deduttivo. Arrivata a maturità, una scienza deve essere ipotetico-deduttiva, ma l'apprendimento deve essere induttivo, perché è così che impariamo.

La divisione delle materie crea ulteriori barriere tra i vari campi di conoscenza, ma le barriere ci sono anche all'interno della stessa materia.

Ho tenuto per decenni un corso al primo anno di scienze biologiche prima e di scienze ambientali dopo. Mi accorsi che cose elementari, che davo per scontate, non erano familiari agli studenti appena usciti da un percorso di studi di 13 anni.

Per decenni nessuno fu in grado di rispondere alla domanda: bevete un litro d'acqua e poi fate la plin plin. Che strada ha fatto l'acqua? Per rispondere bisogna conoscere gli apparati digerente, circolatorio e respiratorio, il metabolismo cellulare e l'apparato escretore. Queste conoscenze dovrebbero essere impartite in quei 13 anni e, di solito, lo sono. Ma per rispondere

alla domanda sulla *plin plin* bisogna essere in grado di farli funzionare assieme. La scuola fornisce informazioni che non portano a conoscenza. Persino all'interno della stessa materia.

Sono stato costretto a imparare a memoria molte dimostrazioni di teoremi, sentendomi dire che "un giorno" mi sarebbero serviti. Quel giorno non è ancora venuto oppure, se è venuto, non me ne sono accorto. Solo dopo 40 anni mi sono accorto che i Promessi Sposi è un libro profondissimo e bellissimo. E ho odiato chi me lo ha fatto odiare.

Riduzionismo e olismo non sono antitetici

Il riduzionismo è inevitabile, se si vuole approfondire un argomento. Nel mio mestiere di tassonomo sono riduzionista. Il problema non è il riduzionismo, ma il mancato assemblaggio dei riduzionismi in un approccio olistico che faccia apprezzare le proprietà emergenti dei sistemi complessi. E forse sarebbe meglio iniziare con l'approccio olistico e poi passare ai vari riduzionismi, spiegando a grandissime linee la complessità per poi analizzarla nelle sue intricatezze, senza mai perdere di vista le connessioni.

Quando intraprendiamo un viaggio lo programiamo su una cartina (reale o virtuale) dove vediamo tutto il percorso, dall'inizio fino alla meta, e sappiamo, in un sol colpo, quale strada faremo, tappa per tappa. Poi, viaggiando, approfondiamo le conoscenze su quel che vediamo lungo il nostro percorso. La cartina è olistica, il viaggio è riduzionistico. Intraprendere un viaggio senza conoscere il percorso, senza programarlo, potrebbe non portarci dove vorremmo andare. O potremmo fermarci alla prima tappa, senza renderci conto di quel che perderemo.

Riformare radicalmente i sistemi di formazione, secondo me, sarebbe altamente auspicabile, ma temo che non avverrà. Ogni branca del sapere è intimamente convinta di avere supremazia logica rispetto alle altre e le materie vincenti non accetteranno mai di fare passi indietro per lasciar posto ad altre.

L'ecologia non fa parte dei programmi di insegnamento, se non con pochissime ore spesso in mano a docenti non molto competenti in materia.

Stiamo intraprendendo la transizione ecologica senza l'ecologia e nelle stanze dove si decidono i programmi scolastici non sono mai ammessi gli ecologi. Il paradosso dell'ammettere l'importanza di una cosa, facendo poi l'esatto contrario, tende a perpetuarsi.

Il decennio dell'oceano

Le Nazioni Unite hanno dedicato agli oceani il decennio 2021-2030. Il decennio precedente (2011-2020) fu dedicato alla biodiversità. Se n'è accorto qualcuno?



- [1] European Marine Board (2019): *Navigating the Future V: Marine Science for a Sustainable Future*. Position Paper 24 of the European Marine Board, Ostend, Belgium. ISBN: 9789492043757. ISSN: 0167-9309. DOI: 10.5281/zenodo.2809392 http://www.marineboard.eu/sites/marineboard.eu/files/public/publication/EMB_NFV_Webv10.pdf



Ferdinando Boero: è nato a Genova nel 1951. Ha iniziato la carriera universitaria presso l'Università di Genova, dove è stato ricercatore dal 1981 al 1987. Dal 1987 al 1993 è stato professore associato all'Università di Lecce, e professore ordinario dal 1993 al 2018 presso l'Università del Salento, per poi passare all'Università di Napoli Federico II. In pensione dal 2021. Attualmente è *chair* alla Stazione Zoologica Anton Dohrn e presidente della Fondazione Dohrn. Si occupa di biodiversità marina e funzionamento degli ecosistemi, museologia scientifica, filosofia della scienza. Ha partecipato alla redazione di documenti di indirizzo per la Commissione Europea, il G7, la FAO, il Ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica, l'Accademia Pontificia delle Scienze. Ha contribuito alla ideazione del volume *Generazione Oceano*, un episodio delle avventure di Topolino. Vicepresidente di Marevivo. Medaglia per l'Oceanografia dell'Institut Océanographique de Paris. Medaglia per le scienze fisiche e naturali dell'Accademia Nazionale delle Scienze o dei XL. Tridente d'oro.

Gli acceleratori del futuro per la Fisica delle alte energie

Fabio Bossi *Laboratori Nazionali di Frascati*

Dai primi esperimenti di diffusione di particelle alpha su bersagli metallici eseguiti da Rutherford Geiger e Marsden nel secondo decennio del secolo scorso l'uso di fasci di particelle cariche accelerate ad energie sempre più elevate ha costituito lo strumento principe per il progresso della nostra conoscenza sulla struttura ultima della materia.

Dall'epoca di Rutherford ai giorni nostri la scienza degli acceleratori è progredita enormemente. Uno dei momenti più importanti in questa storia è stata senza dubbio la realizzazione del primo collisore materia-antimateria da parte di Bruno Touschek e del suo gruppo ai Laboratori Nazionali di Frascati nei primi anni '60 del secolo scorso.

Lo sforzo per costruire *collider* di particelle ad energie sempre più elevate è recentemente culminato con la realizzazione di LHC al CERN di Ginevra, una macchina di più di 27 km di circonferenza che ha portato alla scoperta nel 2012 del Bosone di Higgs.

La comunità scientifica sta già pensando a realizzare in futuro nuove macchine, ancora più potenti di LHC. È tuttavia universalmente riconosciuto come la costruzione degli acceleratori di nuova generazione costituisca una impresa estre-

mamente impegnativa. Oltre a numerose questioni di natura tecnica da risolvere, vanno anche tenute in conto problematiche quali il contenimento dei costi di costruzione, i consumi energetici e la sostenibilità ambientale delle nuove macchine. Per questa ragione l'intera comunità internazionale di fisici ed ingegneri degli acceleratori si sta impegnando in un grande programma di ricerca e sviluppo, volto ad affrontare e risolvere le suddette questioni [1].

Prima di discutere quali siano le principali tematiche su cui questo sforzo si concentra, è utile dare alcune definizioni essenziali. I due parametri principali per descrivere le prestazioni di un collisore sono l'energia nel centro di massa ottenibile, energia che si misura in multipli dell'elettrovolt, eV, e che determina il potenziale di scoperta di nuove particelle; la luminosità, che misura la frequenza con cui si riescono a produrre interazioni fisiche tra i fasci collidenti e che si misura in unità di $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Ad esempio, LHC opera ad una energia nel centro di massa di 14 TeV (1 TeV è pari a mille miliardi di eV), e ad una luminosità di circa $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Un'ulteriore grandezza che menzioneremo nel seguito è l'emittanza dei fasci, che dà una misura di quanto le traiettorie delle particelle accumulate si disco-

stano dalla traiettoria ideale; emittanza piccole corrispondono in generale ad alte luminosità.

I collisori possono avere una geometria circolare o lineare. Un acceleratore circolare ha l'ovvio vantaggio di poter utilizzare più volte gli stessi fasci accumulati nell'anello (o negli anelli) che lo costituisce, ed è dunque in genere la soluzione preferita. Tuttavia per curvare fasci di particelle cariche di sempre maggiore energia occorre utilizzare magneti ad alto campo per i quali esistono inevitabili limiti tecnologici. Dal Tevatron negli anni '80, ad LHC, dei nostri giorni, si è fatto uso a questo scopo di magneti superconduttori costruiti con avvolgimenti in lega di niobio e titanio, per un campo massimo raggiungibile (in LHC) di 8.3 Tesla. Il passo immediatamente successivo, per il progetto HighLumi-LHC [2] consisterà nel costruire dipoli curvanti con un campo di 12 T, per cui è necessario utilizzare fili sottili di Nb_3Sn , e che ad oggi non si è ancora in grado di produrre nelle quantità e con i costi sperati. Il problema diviene ancora più complesso quando si pianifica di raggiungere i 16 T, necessari per il funzionamento del Future Circular Collider (Fcc), la gigantesca macchina circolare da 90 km che si progetta di costruire ed operare al CERN nella seconda metà del secolo [3]. Fcc aspira a fornire collisioni protone-protone con energia nel centro di massa di 100 TeV. Un'altra tecnologia di grande interesse è quella dei magneti superconduttori ad alta temperatura (HTS), in grado, in linea di principio, di raggiungere campi di 20 T, ma che ad oggi non hanno ancora superato lo stadio di semplici prototipi.

Tutti gli attuali acceleratori si basano sulla tecnologia delle cavità a radiofrequenza (RF) per ottenere gli alti gradienti acceleranti necessari a raggiungere le energie di interesse in fisica delle particelle.

Esistono due categorie principali di strutture RF: quelle che operano a temperatura ambiente, e quelle superconduttrici che lavorano a temperature criogeniche. La scelta di quale tecnologia usare è determinata dagli specifici parametri di fascio che caratterizzano la macchina in oggetto. In entrambe i casi, tuttavia, i gradienti acceleranti raggiungibili sono di alcune decine di MeV/m. Ne consegue, dunque, che se si mira a raggiungere energie dei fasci di parecchie decine di TeV, è necessario costruire macchine lunghe parecchie

decine di chilometri, con conseguente aumento della complessità del progetto e dei costi di costruzione. Di conseguenza è in atto un grande sforzo di ricerca e sviluppo per esplorare la possibilità di ottenere strutture acceleranti con gradienti sempre più elevati. A questo scopo sono sotto studio materiali innovativi che, in particolare, diminuiscano la probabilità di scarica, aumentino il fattore di merito delle cavità RF, contengano i consumi energetici.

D'altro canto, nuove tecniche di accelerazione, in particolare la accelerazione al plasma, sono, in linea di principio, in grado di raggiungere gradienti 100-1000 volte più intensi delle normali strutture a RF. In questo caso, i campi elettrici necessari per accelerare particelle cariche sono creati in un plasma eccitato da un impulso laser (laser driven acceleration) o da un pacchetto di particelle cariche (beam driven acceleration). Alcuni fondamentali esperimenti in questo senso sono stati eseguiti con successo in parecchi laboratori del mondo, dalla Cina, all'Europa, agli Stati Uniti. Tuttavia la capacità di costruire un collider che si basi su questa tecnologia è ancora tutta da dimostrare. Le sfide principali da affrontare includono lo sviluppo di schemi per accelerare i positroni, la capacità di accelerare fasci con alte correnti e la possibilità di mantenere l'emittanza dei fasci accelerati ai valori utili per produrre collisioni di alta luminosità. Un passo importante in questa direzione è costituito dalla pianificata costruzione, presso i Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN, di EuPRAXIASPARC_LAB, che sarà la prima *user facility* al mondo basata sulla accelerazione al plasma [4]. Gli elettroni così accelerati saranno utilizzati per produrre fasci di fotoni monocromatici a loro volta utilizzabili in numerose applicazioni di ricerca, in particolare nel campo della fisica dei materiali e delle scienze della vita. La costruzione della macchina è stata interamente finanziata dal governo italiano, mentre futuri finanziamenti europei sono previsti rafforzare la *facility* di Frascati e realizzarne una seconda in un sito ancora da definire.

Tutti i collisori sin qui costruiti utilizzano fasci di elettroni o protoni e/o delle relative antiparticelle. L'uso degli elettroni presenta l'indubbio vantaggio di basarsi su collisioni tra particelle

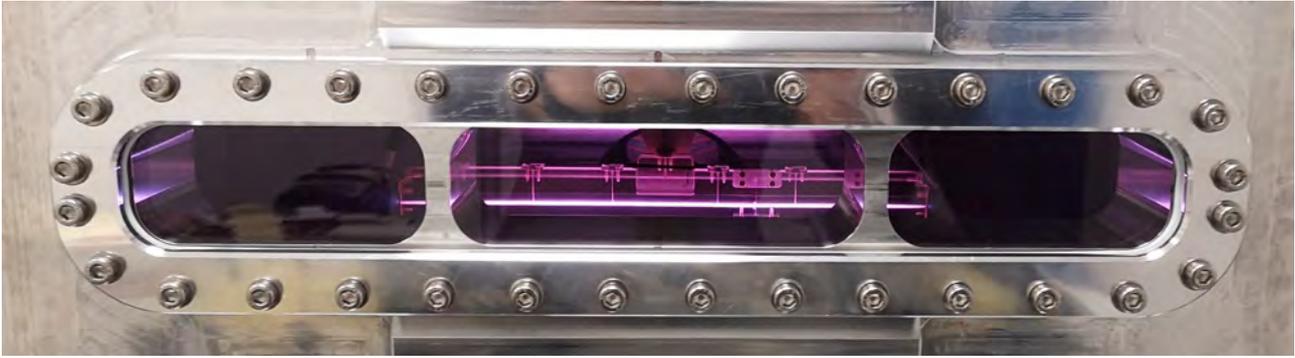


Figura 1: Scarica di plasma in un capillare per la *plasma acceleration* a Frascati.

realmente elementari (i protoni sono particelle complesse) e dunque di permettere lo studio di fenomeni più puliti, più semplici da descrivere teoricamente. D'altra parte, però, gli elettroni, curvando, tendono a perdere una grande quantità di energia a causa della emissione della cosiddetta radiazione di sincrotrone; la perdita di energia risulta essere proporzionale all'inverso della quarta potenza della massa della particella emittente e dunque i protoni (la cui massa è circa 2000 volte maggiore di quella dell'elettrone) sono preferibili quando si cerca di raggiungere le più alte energie di collisione.

Da qualche tempo è in corso un grande sforzo di ricerca e sviluppo per la realizzazione del primo collider che faccia uso di fasci di muoni, i fratelli più pesanti degli elettroni. Un simile *collider* avrebbe il vantaggio di produrre interazioni pulite tra particelle elementari come gli elettroni, sopprimendo drasticamente le perdite di energia dovute alla emissione di radiazione di sincrotrone, consentendo perciò un uso estremamente più efficiente delle cavità a radiofrequenza e la costruzione di un acceleratore più compatto e con consumi sostanzialmente ridotti a parità di energia nel centro di massa [5]. Sfortunatamente esiste una serie di problemi tecnici la cui soluzione non è stata ancora trovata. Innanzi tutto i muoni sono particelle instabili e perciò i fasci hanno vita media relativamente breve, e soprattutto producono intense quantità di radiazione lungo l'intero perimetro della macchina. Per quanto a prima vista paradossale, la radiazione di neutrini rappresenta un problema di sicurezza non trascurabile. Infatti l'ammontare di neutrini prodotti e le loro caratteristiche di collimazione possono produrre attivazione dei materiali nelle zone pubbliche vicine alla macchina ben oltre i

limiti consentiti dalle vigenti leggi in materia. In secondo luogo lo spettro di produzione dei muoni, ottenuto dal decadimento di pioni secondari in interazioni protone-bersaglio fisso, è piuttosto ampio e questo comporta una grande difficoltà a produrre fasci con una emittanza tale da consentire la massimizzazione della luminosità della macchina.

Nonostante queste difficoltà, al CERN si sta progettando la costruzione di un dimostratore di *muon collider*, con la speranza di poter realizzare il vero collisore nella seconda metà del secolo.

Quale che sia la macchina del futuro, la sua progettazione dovrà tener conto della sua sostenibilità ambientale e della ottimizzazione dei consumi energetici. Per avere un'idea dell'entità del problema possiamo ricordare che LHC consuma 700 GWh/anno, il consumo energetico di una città di medie dimensioni. Le richieste di Fcc, con le tecnologie all'attuale stato dell'arte, sarebbero un ordine di grandezza superiori. Metodi per mitigare questi consumi vanno dall'uso di tecnologie più efficienti energeticamente (risonatori a basse perdite, magneti permanenti, sistemi criogenici ad alta efficienza) a soluzioni più innovative, come per esempio l'uso di Linac a recupero energetico, che si basano sulla riutilizzazione della potenza del fascio, decelerandolo nelle stesse strutture RF che lo hanno accelerato. In generale il cosiddetto "*carbon footprint*" dei nuovi acceleratori è oggetto centrale di studio ed è parte integrante della loro progettazione.

La comunità dei fisici delle particelle elementari si trova ad affrontare un momento storicamente molto particolare e complesso. Da una parte le principali questioni teoriche in discussione spingono verso la sperimentazione a scale di energia sempre più elevate. Dall'altra, per riu-

scire a raggiungere queste energie c'è necessità di cambiare drasticamente le nostre tecniche di accelerazione, perchè quelle attualmente in uso sono o insufficienti o economicamente insostenibili. È dunque un momento di grande incertezza ma anche di grandi potenzialità di scoperta.



- [1] C. Adolphsen et al.: *European Strategy for Particle Physics – Accelerator R&D Roadmap*, CERN Yellow Rep. Monogr., 1 (2022) 1. eprint arXiv = 2201.07895
- [2] O. Bruning, L. Rossi: *The High Luminosity Large Hadron Collider*, Advanced Series on Directions in High Energy Physics, 24, World Scientific (Singapore). 2015
- [3] A. Abada et al.: *FCC-hh: the Hadron Collider*, Eur. Phys. J. Spec. Top., 228 (2019) 755.
- [4] W. Assmann et al.: *EuPRAXIA Conceptual Design Report*, Eur. Phys. J. Spec. Top., 229 (2020) 3675.
- [5] D. Schulte: *The Muon Collider*, JACoW, IPAC2022 (2022) 821.



Fabio Bossi: è Dirigente di Ricerca dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. La sua attività scientifica è da sempre focalizzata allo studio della fisica delle particelle elementari con acceleratori ed è stata svolta al CERN di Ginevra e presso i Laboratori Nazionali di Frascati. All'interno dell'INFN ha ricoperto vari ruoli dirigenziali, tra i quali la direzione della Sezione di Lecce e attualmente quella dei Laboratori Nazionali di Frascati.

Struttura e reazioni nucleari e l'origine degli elementi

Angela Bracco

Dipartimento di Fisica, Università degli studi di Milano, Sezione INFN di Milano

La sperimentazione riguardante lo studio dei nuclei lontano dalla stabilità e delle reazioni nucleari a energie stellari è fortemente motivata a ottenere molte informazioni indispensabili per comprendere l'origine degli elementi. I progressi fatti riguardano: i) misure di sezioni d'urto per la formazione di nuclei leggeri e per la produzione di energia delle stelle; ii) le proprietà dei nuclei con uno sbilanciamento innaturale nel numero di protoni e neutroni per studiare sia la materia neutronica simile a quella delle stelle di neutroni che i processi di nucleosintesi esplosivo che generano i nuclei pesanti. Molti risultati interessanti sono stati finora ottenuti ma la complessità del problema dell'origine degli elementi richiede ulteriore sperimentazione che è attualmente programmata in numerosi laboratori nel mondo.

Comprendere l'origine della materia visibile è un problema molto complesso, ma affascinante, che guida la ricerca sperimentale e teorica coinvolgendo fortemente la fisica dei nuclei. Le indagini

sperimentali sulle proprietà nucleari richiedono l'uso e il continuo sviluppo di un arsenale di tecniche sperimentali e diversi tipi di infrastrutture di ricerca e approcci teorici. Questo perché la fisica dei nuclei atomici è ricca di fenomeni, varia ed estremamente complessa a molti livelli. Gli sviluppi tecnici per la ricerca nucleare sono in gran parte applicati anche a vantaggio della nostra società.

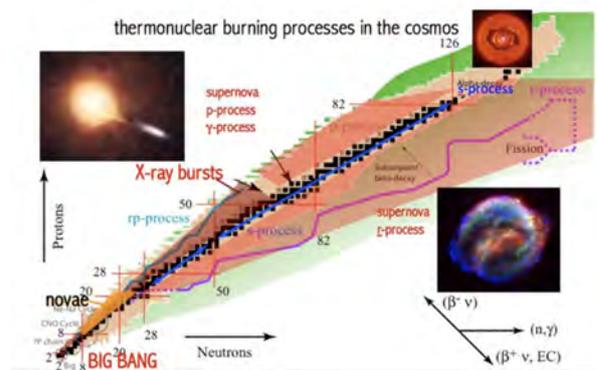


Figura 1: Illustrazione schematica della carta dei nuclidi con indicazione dei diversi processi di nucleosintesi.

Con lo studio delle proprietà dei nuclei e delle reazioni nucleari si vuole capire come gli elementi chimici sono stati prodotti e l'evoluzione della

materia nella sua complessità attraverso i tempi cosmologici. Questi tempi sono quelli del Big Bang durante cui i nuclei più leggeri, idrogeno, elio e litio, sono stati prodotti, prima che si formassero le prime stelle. Sono anche quelli dopo il Big Bang, durante i cicli di vita delle stelle, quando sono stati creati gli elementi primari necessari per la vita e nei violenti eventi cosmici che hanno prodotto gli elementi più pesanti (vedi Figura 1).

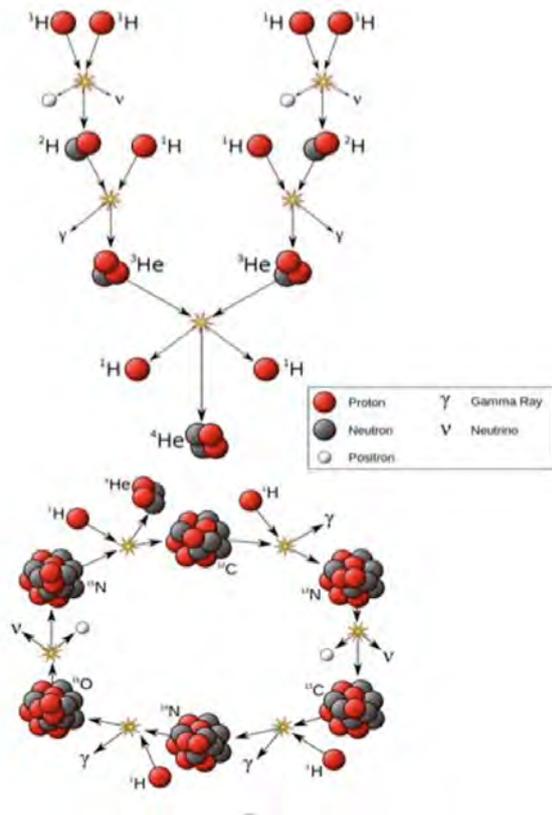


Figura 2: Illustrazione schematica del ciclo dell'idrogeno, parte superiore, e del CNO (Carbonio, Azoto, Ossigeno) nella parte inferiore.

Per quanto riguarda la formazione dei nuclei leggeri, con catene di reazioni nucleari che si verificano nel plasma (vedi Figura 2), e il problema dell'energia delle stelle, l'esperimento LUNA al laboratorio nazionale INFN del Gran Sasso e le numerose misure ai Laboratori Nazionali del Sud dell'INFN hanno portato a molti risultati unici. Questi risultati hanno ricadute anche sulla produzione di neutrini, sulla determinazione della densità della materia ordinaria, o densità barionica (vedi referenza [1]). Sappiamo poco su come vengono creati gli elementi più pesanti del ferro nella tavola periodica.

La teoria suggerisce che molti di loro sono generati in ambienti estremamente violenti come l'esplosione di una supernova che pone fine alla vita di una stella molto massiccia, seguita dal collasso del suo nucleo in una stella di neutroni o in un buco nero. Altri processi stellari di interesse sono quelli in cui una nana bianca in un sistema stellare binario viene resuscitata in modo esplosivo estraendo gas dalla sua compagna. Anche eventi più violenti come la fusione di due stelle di neutroni o buchi neri possono innescare questi rapidi processi di nucleosintesi. Questi processi coinvolgono migliaia di specie nucleari instabili su entrambi i lati della valle della stabilità, attorno all'insieme centrale di nuclei stabili, come illustrato schematicamente in Figura 1.

La natura ha fornito alla Terra circa 300 nuclei stabili e a lunga vita che possiamo studiare in laboratorio. Tuttavia, molto più grande è la varietà di isotopi instabili, quelli creati durante le esplosioni stellari, che possono essere prodotti come fasci radioattivi nei laboratori utilizzando diversi sistemi di acceleratori di ioni. Gli sviluppi nel corso degli anni di questi acceleratori hanno fornito l'accesso a un numero crescente di nuclei esotici. Tuttavia, solo circa 3000, dei forse più di 8000 diversi nuclei che dovrebbero esistere, sono stati prodotti e caratterizzati. Resta ancora da scoprire una grande terra incognita dominata dai nuclei ricchissimi di neutroni e dagli elementi superpesanti.

Per questi studi è iniziata un'era nuova in cui è possibile realizzare misure di alta precisione in nuclei esotici per quanto riguarda il numero di protoni e neutroni e le loro eccitazioni. Questo grazie alla varietà di fasci di ioni stabili e radioattivi, e questi ultimi sono ora e in futuro prodotti con sempre maggiori intensità e purezza e con nuovi metodi.

Le problematiche di grande interesse nell'ambito della struttura nucleare, molte con implicazioni nei modelli di nucleosintesi e delle stelle di neutroni, a cui si rivolge la sperimentazione attuale sono numerose. Per affrontarle si intende:

- studiare l'evoluzione della struttura a strati (*shell*) dei nuclei e il verificarsi di nuovi numeri magici,
- comprendere l'origine microscopica della

deformazione nucleare e l'interazione tra particella singola e i gradi di libertà di tipo collettivo,

- ricerca di forme esotiche ed estreme (es. iperdeformazione),
- stabilire la coesistenza delle forme e le transizioni delle forme, e comprendere i meccanismi che portano alla loro comparsa,
- verificare le previsioni teoriche per la distribuzione di neutroni (*neutron skin*) e il collegamento con la stabilità e la struttura delle stelle di neutroni,
- sondare la natura delle correlazioni di coppia e indagare come viene generato il momento angolare,
- misurare il grado di rottura della simmetria di isospin,
- trovare evidenze di comportamento caotico nei nuclei,
- ...

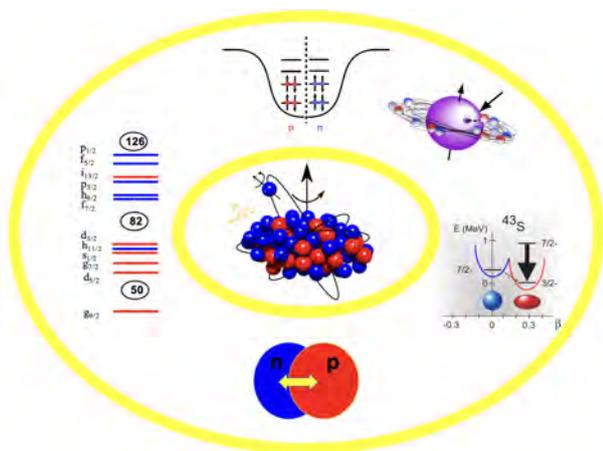


Figura 3: Illustrazione schematica di alcuni gradi di libertà dei nuclei che derivano da diverse configurazioni ed eccitazioni nucleari. Partendo dall'alto in centro si mostrano: l'interazione di accoppiamento degli spin dei nucleoni, le eccitazioni di particella singola, la coesistenza di forme, le vibrazioni collettive dipolari, e la struttura a shell (dalla referenza [2]).

La Figura 3 mostra schematicamente alcuni di questi gradi di libertà nucleari che sono dovuti all'effetto combinato delle interazioni tra nucleoni e alla complessità dovuta alla presenza di molti

nucleoni responsabili di diverse configurazioni, forme, vibrazioni e rotazioni collettive dei nuclei.

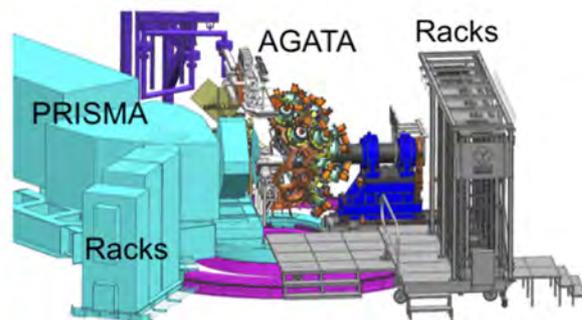


Figura 4: Layout generale di AGATA 2 π accoppiato allo spettrometro magnetico PRISMA (in azzurro) installato presso i laboratori LNL (INFN). Il Rack che contiene i digitalizzatori e gli alimentatori (in grigio), i racks che contengono l'autofill del sistema di azoto liquido (in azzurro), l'elettronica per i rivelatori accoppiati e il sistema ad alta tensione AGATA sono indicati in figura. Figura tratta da referenza [3].

La spettroscopia gamma è molto utilizzata con diversi tipi di reazioni nucleari, a energie attorno alla barriera Coulombiana ma anche in reazioni con ioni radioattivi fino a 1 GeV/u, per investigare le diverse proprietà dei nuclei e delle interazioni nucleari. In particolare, il sistema di rivelatori Advanced Gamma Tracking Array, AGATA, la cui costruzione si evolve negli anni, ha permesso e permetterà in futuro grossi passi avanti nella comprensione dei nuclei nelle configurazioni più estreme per sbilanciamento di numero di neutroni e protoni, energia di eccitazione e momento angolare. AGATA è uno spettrometro, costituito esclusivamente da rivelatori di Germanio di elevata purezza e altamente segmentati ed è in grado di misurare raggi γ a partire da poche decine di keV ad oltre 10 MeV, con efficienza senza precedenti, eccellente risoluzione della posizione per le singole interazioni dei raggi γ , e capacità di conteggio molto elevata. È uno strumento realizzato in collaborazione europea ed è, e sarà, utilizzato in campagne di misure in diversi laboratori europei, quali LNL di INFN, GANIL in Francia e FAIR in Germania che forniscono fasci di ioni stabili e radioattivi.

Attualmente AGATA è installato presso il laboratorio INFN-LNL (vedi referenza [3]) ed è utilizzato con reazioni che utilizzano fasci stabili

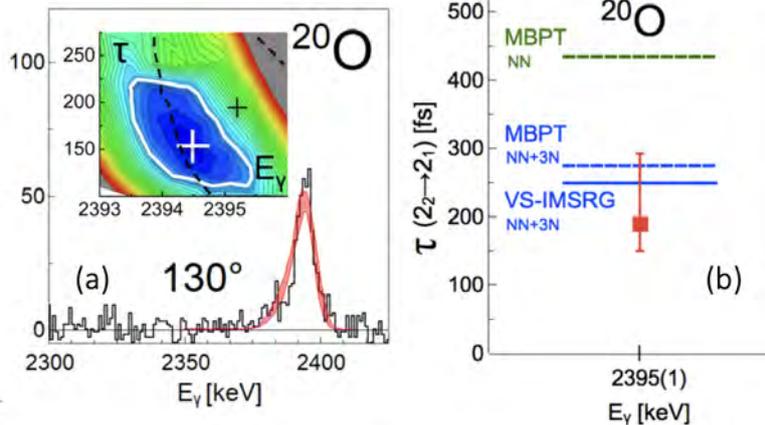
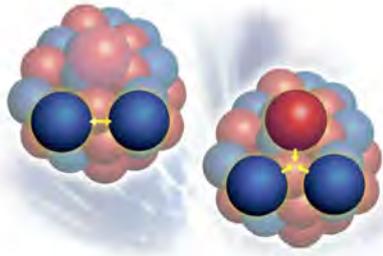


Figura 5: Pannello a sinistra: Spettro per la transizione γ a 2396 keV dallo stato a lunga vita lungo ($\tau = 3.5$ ps) nel nucleo ^{20}O misurato con lo spettrometro AGATA (con precisione < 4 mm) a 130° . Lo spettro simulato sovrapposto ai dati corrisponde al minimo valore della differenza tra lo spettro misurato e quelli simulati in corrispondenza a diversi valori del tempo di vita dello stato e dell'energia della transizione gamma. Pannello a destra: Valore della vita media misurata confrontato con diverse previsioni teoriche. Quelle che includono l'interazione a tre corpi riproducono meglio il valore sperimentale. Figura tratta da referenza [2].

e nei prossimi anni sar  usato con i fasci radioattivi del complesso di acceleratori SPES. Il sistema AGATA   accoppiato allo spettrometro magnetico PRISMA e a molti altri rivelatori di particelle cariche e neutroni per selezionare la reazione che popola i nuclei d'interesse. Per l'efficiente rivelazione di gamma di alta energia sono accoppiati rivelatori a scintillazione di nuova generazione.

In questo articolo sono brevemente illustrati alcuni risultati ottenuti, insieme alle prospettive future, per la struttura nucleare con la spettroscopia gamma, in particolare utilizzando il rivelatore AGATA (vedi la referenza [2] e quelle riportate nella bibliografia).

Interazione dei nucleoni nei nuclei

L'interazione tra i nucleoni che sono coinvolti nelle diverse eccitazioni nucleari, non sembra avere semplicemente una natura a due corpi ma ci sono attualmente evidenze del ruolo rilevante dell'interazione a tre corpi.

Una delle sfide della fisica nucleare   arrivare a una descrizione unificata di tutti i nuclei basata approcci di tipo *ab initio* che utilizzano una

Teoria del Campo Effettivo (EFT) basata sulle simmetrie e sui relativi gradi di libert  della teoria *Quantum Chromo Dynamics* (QCD) in regime di bassa energia. Fino ad ora le previsioni *ab initio* hanno avuto successo nel descrivere gli stati fondamentali ed eccitati di nuclei leggeri e anche pi  pesanti degli isotopi dell'ossigeno. L'accordo di questi risultati con i dati sperimentali ha dimostrato la potenzialit  delle interazioni di tipo EFT, in particolare di quelle a due e a tre nucleoni. Per quanto riguarda l'effetto dell'interazione a tre nucleoni (3N)   stato trovato che includendo le forze a tre nucleoni nei calcoli si ottiene un miglioramento significativo nella descrizione delle energie di legame e degli spettri di eccitazione per gli isotopi dell'ossigeno ricchi di neutroni. Inoltre, lo stesso approccio riproduce bene gli spettri di eccitazione degli isotopi di ossigeno ricchi di neutroni e prevede che il nucleo ^{24}O si trovi alla *drip line* per neutroni.

Il risultato ottenuto per il secondo stato eccitato di tipo quadrupolare nel nucleo ^{20}O , mostrato in Figura 5, evidenzia che questo tipo di misure, che permettono di ottenere i valori delle vite medie in nuclei vicini alla *drip line*, sono possibili grazie all'alta segmentazione dei rivelatori come quelli di AGATA. La misura di queste vite medie   un'osservabile ideale per verificare le teorie che

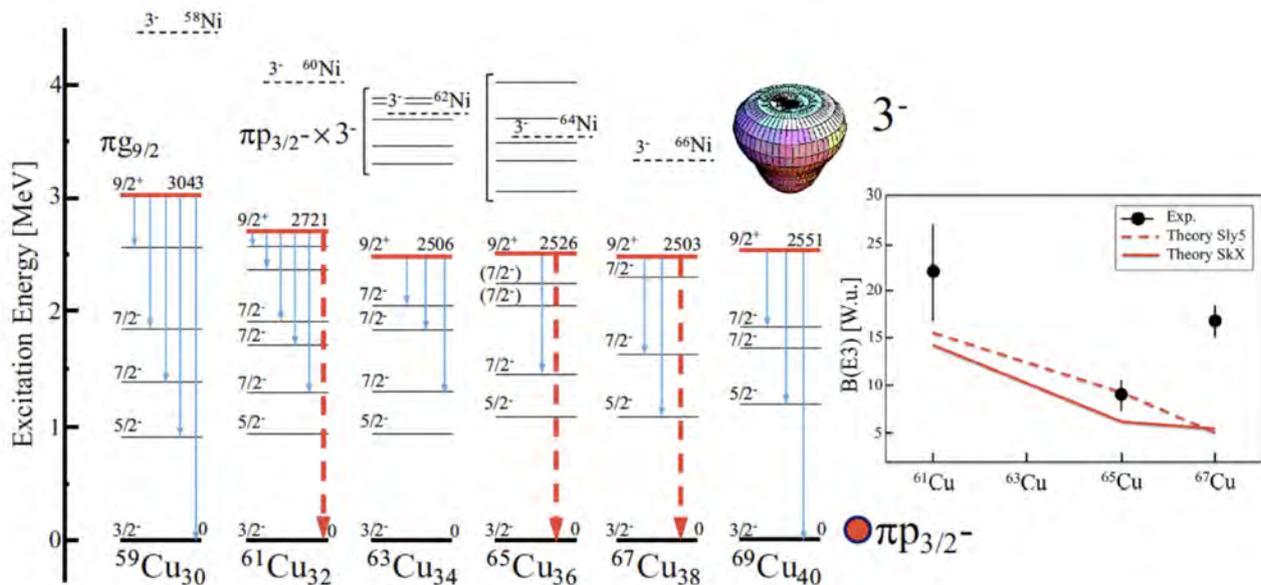


Figura 6: Pannello di sinistra: livelli di energia e ramificazioni dei raggi γ per i primi stati eccitati $9/2^+$ negli isotopi dispari-pari $^{59-69}\text{Cu}$. Gli stati 3^- (ottupolo) nei corrispondenti isotopi Ni per i quali è stata misurata la probabilità di transizione elettromagnetica $B(E3)$ sono indicati da linee tratteggiate. Pannello di destra: dati $B(E3)$ per gli isotopi Ni dispari-pari ricchi di neutroni rispetto alle previsioni. I calcoli sono stati eseguiti all'interno del modello schematico di accoppiamento particella-fonone di Bohr e Mottelson, per gli stati $9/2^+$ negli isotopi $^{61,65,67}\text{Cu}$. Figura tratta da referenza [2].

si basano sull'approccio *ab initio*.

Eccitazioni collettive e di particella singola

Accoppiamento particelle-vibrazioni

A partire dalle prime indagini sulle proprietà delle eccitazioni nucleari è apparso chiaro che i nuclei sono sistemi molto complessi caratterizzati dalla presenza sia di eccitazioni di particella singola che di modi collettivi e dalla loro interazione. È ben noto che la descrizione di questi modi, in termini di configurazioni dei nucleoni e delle loro interazioni sottostanti, richiede la conoscenza delle osservabili elettromagnetiche. Quindi questi concetti di base sono attualmente molto sfruttati, in particolare per nuclei poco conosciuti e/o per eccitazioni e decadimenti non facilmente accessibili sperimentalmente ma molto interessanti per fornire dei test alle teorie moderne.

Una questione chiave riguarda le vibrazioni di tipo quadrupolo e ottupolo a bassa energia e i loro accoppiamenti a particelle singole. L'idea che esistano mattoni specifici, vale a dire

eccitazioni di particella singola e modi collettivi, che possono essere utilizzati per descrivere le eccitazioni nucleari si è rivelata cruciale per il progresso dello studio della struttura nucleare. Infatti, il modello a *shell* non può sempre descrivere stati vibrazionali o rotazionali (e altri fenomeni collettivi nei nuclei) e quindi è diventato piuttosto naturale percepire che diversi stati nucleari eccitati possono essere dovuti a eccitazioni di particella singola e di modi collettivi e delle loro combinazioni.

Il lavoro sperimentale esistente, svolto spesso in parallelo con studi teorici sempre più raffinati, ha confermato la rilevanza, per la descrizione dei nuclei atomici, di un modello basato sull'interazione tra i gradi di libertà fermionici e bosonici. In questo contesto, i nuclei dispari sono di particolare interesse, essendo sensibili ai termini nella forza nucleare e alle correlazioni che semplicemente non si presentano nei sistemi pari-pari. In un contesto più ampio, i fenomeni di accoppiamento tra fermioni ed eccitazioni collettive (bosoni) sono ben note nei sistemi a molti corpi in altri campi della fisica. Partendo dai casi emblematici dei sistemi elettronici vanno ricordati gli accoppiamenti elettrone-plasmone nei metalli, o gli

accoppiamenti elettrone-fonone che danno origine alla superconduttività. Questi fenomeni sono le controparti degli accoppiamenti di nucleoni con eccitazioni collettive. Inoltre, contrariamente alle molecole, le scale di energia nucleare sono correlate a quelle vibrazionali e le eccitazioni di una singola particella sono dello stesso ordine, e quindi il loro intreccio ha profonde conseguenze.

Alcune misure recenti in isotopi del ferro $^{62,64}\text{Fe}$ ottenute con fasci radioattivi a 400-440 AMeV e la tecnica dell'eccitazione Coulombiana e l'emissione di radiazione gamma, presentate in figura 7, mostrano chiaramente che gli isotopi del Fe più ricchi di neutroni hanno un numero maggiore di eccitazioni dipolari. Questo risultato è ben interpretato con le previsioni del modello *Quasi Particle Phonon Model* (QPM), una teoria che è stata ampliata nel corso degli anni per includere accoppiamenti a configurazioni sempre più complesse. Questo meccanismo è quello che dà origine a una maggiore frammentazione degli stati di tipo dipolare.

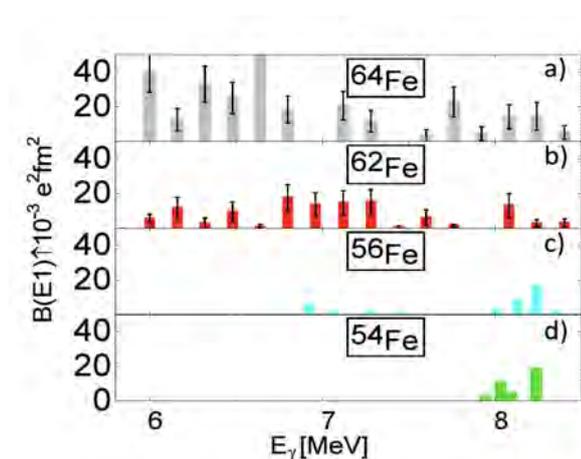


Figura 7: Intensità delle transizioni di tipo dipolare misurata con il rivelatore AGATA per i nuclei $^{62,64}\text{Fe}$ e con fasci radioattivi. Figura tratta da referenza [2].

Rotazione e le deformazioni estreme dei nuclei

Quando un nucleo deformato ruota, l'energia degli stati dei nuclei (orbitali) cambia valore e quindi gli orbitali con particolari numeri quantici, spesso con alto valore del momento angolare,

che di solito si trovano ad alte energie si abbassano in energia (diventano orbitali così detti *intruder*). In assenza di rotazione, per popolare questi orbitali è necessario andare nelle regioni di nuclei con molti più nucleoni. Questi orbitali *intruder* sono significativamente influenzati dalla frequenza di rotazione. Questo dà origine alla configurazione caratteristica dei nucleoni su cui si costruiscono molte bande rotazionali. Lo studio delle proprietà della bande rotazionali può essere utilizzato per stabilire la natura di queste configurazioni e quindi determinare le energie di *shell* nei nuclei lontani dalla stabilità. Una caratteristica della rotazione è la rottura degli accoppiamenti degli spin dei nucleoni con il corrispondente allineamento degli spin delle coppie di nucleoni. Questo corrisponde al passaggio di un sistema da superfluido a normale.

Nella diseccitazione di uno stato di tipo *intruder* in un nucleo in forte rotazione (quindi da una banda rotazionale) attraverso l'emissione di raggi γ , i nuclei ricchi di neutroni possono a un certo punto diventare instabili contro l'emissione di neutroni, portando alla comparsa del nuovo fenomeno di una emissione γ ritardata, dopo l'emissione di neutroni. Un'analogia emissione di protoni è già stata osservata nei nuclei carenti di neutroni. Sul lato ricco di neutroni, l'emissione di particelle non è ostacolata dalla barriera di Coulomb. Tali misurazioni potrebbero quindi dare immediatamente informazioni sulla posizione dello stato *intruder* all'interno della sequenza dei livelli di particella singola. Studiando stati ad alto spin, isomeri con alti valori della proiezione del momento angolare lungo l'asse di simmetria del potenziale sarà possibile determinare le proprietà e posizioni dei livelli di particella singola e quindi ottenere l'accesso alle proprietà delle *shell* di questi nuclei.

La scoperta di forme di molto allungate dei nuclei, superdeformazioni (SD), in nuclei in rapida rotazione e quindi in nuclei altamente eccitati è stata una gli esempi più eclatanti di cambiamenti e coesistenza di forma all'interno dello stesso nucleo. Oggi sono state misurate più di duecento bande rotazionali di tipo SD per le quali è stato anche stabilito un buon accordo con le previsioni teoriche.

Tuttavia, nella maggior parte dei casi il decadimento delle bande SD verso strutture nucleari

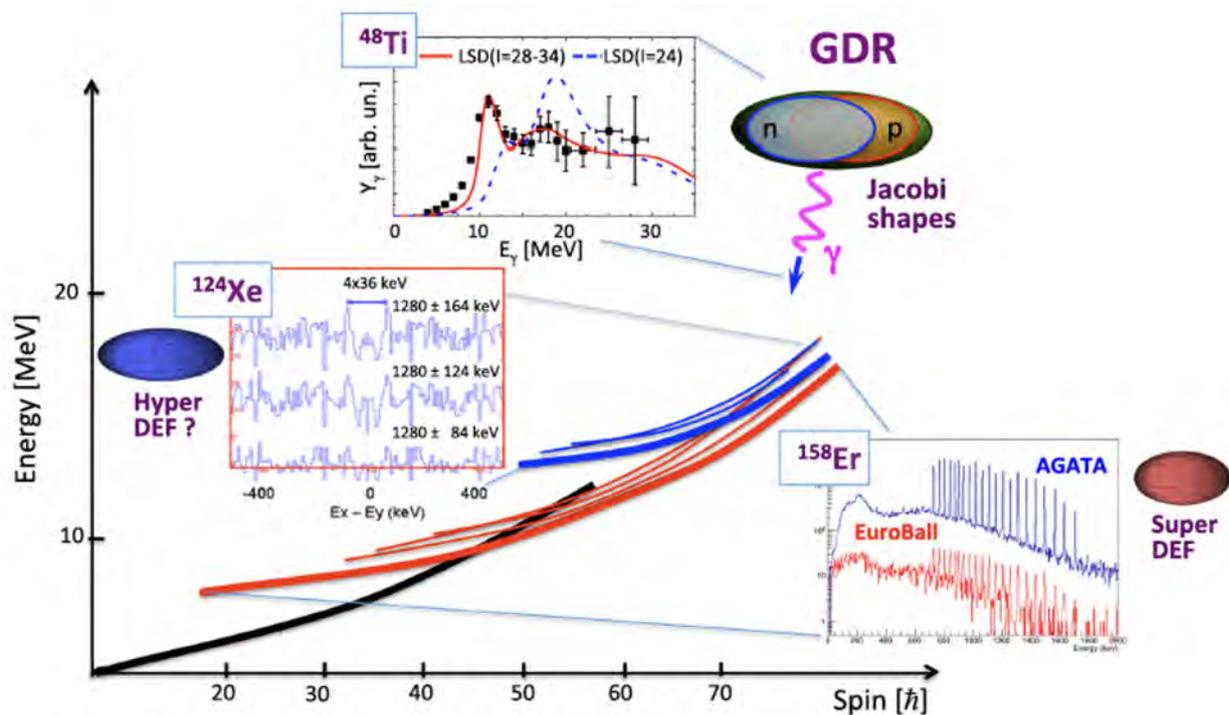


Figura 8: Illustrazioni della risposta nucleare ai massimi spin e simulazioni di spettri per esempi selezionati per confrontare risultati ottenuti con la generazione precedente di spettrometri di raggi gamma, come EUROBALL, rispetto alla configurazione a 4π con lo spettrometro AGATA. Nella parte in basso sono mostrate la popolazione di strutture altamente allungate in nuclei freddi. La banda fortemente deformata triassiale a più bassa energia in ^{158}Er è mostrata a destra e le strutture forse iperdeformate in ^{124}Xe sono mostrate a sinistra. Il decadimento della componente a bassa energia della risonanza gigante di dipolo (GDR) in un nucleo rotante caldo che subisce una transizione di forma del tipo Jacobi che è molto allungata in ^{48}Ti è mostrato nella parte alta della misura. Lo spettrometro gamma AGATA, in futuro nella sua configurazione 4π , consentirà di studiare molto meglio questi fenomeni fisici. Sarà possibile misurare con alta statistica coincidenze γ di alta molteplicità e quindi migliorerà le prestazioni degli apparati usati in passato. Figura tratta da referenza [4].

caratterizzate da deformazioni molto minori non è stato stabilito sperimentalmente. Pertanto, le energie di eccitazione, gli spin e le parità degli stati SD non sono noti, e questa mancanza di informazione ostacola gravemente un confronto dettagliato con i modelli teorici.

L'esistenza di forme ancora più estreme, le cosiddette forme iperdeformate (HD) (che si avvicinano ad un allungamento con un rapporto 3:1) non è ancora stata chiaramente dimostrata sperimentalmente.

Studi correlati al problema delle super e iper deformazioni includono, per esempio, la connessione tra queste strutture estremamente deformate strutture nei nuclei freddi e la "transizione di forma Jacobi" (da prolate a oblate) a temperature sufficientemente elevate (vedi Figura 8). In particolar modo, il ruolo svolto dalla componente a bassa energia della risposta dipolare nella popolazione degli stati SD e HD è un problema

aperto che potrebbe essere affrontato in futuro.

Per studiare i problemi aperti riguardanti le SD nucleari e la ricerca degli stati HD sarà necessario avere a disposizione fasci di ioni stabili ad alta intensità, o addirittura fasci radioattivi molto intensi ricchi di neutroni, che dovrebbero popolare stati di alto momento angolare a causa dell'aumento nella barriera di fissione con numero di neutroni.

Forme nucleari non assiali, ed in particolare configurazioni triassiali, sono d'interesse in quanto possono dare luogo a effetti di chiralità. La chiralità nasce quando un oggetto fisico non può essere sovrapposto con la sua immagine speculare attraverso un movimento continuo, come ad esempio mani umane sinistra e destra o una tripletta di vettori. Il ruolo della chiralità nella struttura nucleare può essere studiato in modo specifico nei nuclei dispari-dispari, dove i tre vettori, quelli dei due momenti angolari del protone

e neutroni spaiati insieme al vettore di rotazione collettiva R , sono su tre diversi assi. In linea di principio, una tale tripletta di vettori distinti nella teoria del campo medio microscopico nucleare non genera nessuna distinzione dinamica, implica solo che un nucleo ruoti da sinistra a destra o da destra a sinistra e quindi dovrebbe dare energie di rotazione identiche. L'osservazione di sequenze rotazionali non identiche è un segno di meccanismi che vanno oltre il campo medio e la scala della rottura della simmetria fornisce input importanti per una modellazione avanzata e sulla rottura spontanea della simmetria. Gli effetti della chiralità sono stati osservati fino ad ora negli spettri di energia di eccitazione di certi nuclei dispari-dispari e la loro spettroscopia si è dimostrata essere estremamente complicata. Ulteriori dettagli, a quindi ulteriori indagini, sono necessari per comprendere appieno l'influenza della chiralità.

Prove convincenti per la triassialità nei nuclei sono state ottenute con l'osservazione di eccitazioni di tipo *wobbling* (vibrazioni) nella rotazione ad alto spin nei nuclei di lutezio attorno alla massa $A \sim 160$. Più recentemente, diverse configurazioni triassiali fortemente deformate a frequenze di rotazione molto alta sono state osservate anche nel nucleo ^{158}Er e nei nuclei vicini. Il problema aperto è quello di stabilire il valore del momento angolare di questi stati.

La determinazione di deformazioni nucleari di tipo ottupolari ha implicazioni anche in esperimenti che mirano a trovare se esiste un momento di dipolo elettrico atomico diverso da zero (EDM). Questo perché c'è un effetto nucleare che dà origine a dipolo elettrico nell'atomo. Nei nuclei si vuole misurare la differenza di energia tra *parity doublets* che per i nuclei di massa dispari non sono noti. Anche le misure dirette dei momenti ottupolari, molto difficili, dovranno essere fatte in futuro per verificare la teoria. La ricerca sulle nuove simmetrie nucleari esotiche include la ricerca di simmetrie tetraedriche e ottaedriche e la sottostante deformazione nucleare e anche questa ricerca sarà oggetto di futura sperimentazione.

La simmetria di isospin

La simmetria isospin si basa sul fatto che protoni e neutroni sono particelle (quasi) identiche per la generazione della forza nucleare forte.

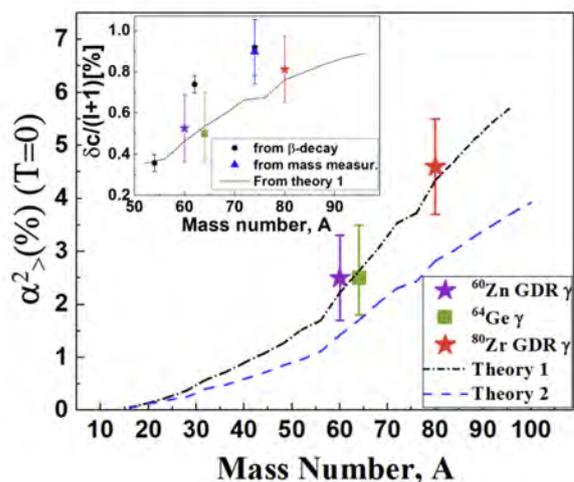


Figura 9: Miscelazione isospin α^2 e correzione miscelazione isospin δ_c in funzione del numero di massa calcolati utilizzando teorie basate sui funzionali densità energia (DFT). Stelle e quadrati sono valori sperimentali ottenuti utilizzando transizioni di tipo $E1$ che sono proibite nel caso non ci sia la rottura della simmetria di isospin. Figura tratta da referenza [2].

Anche se è noto che la simmetria di isospin è rotta, in piccola parte della forza forte, in modo più significativo dalla forza debole e ancor più dall'interazione elettromagnetica, il formalismo di isospin, che caratterizza gli stati nucleari mediante il numero quantico di spin isotopico (isospin), rimane uno strumento estremamente potente per descrivere i nuclei.

Il concetto di simmetria di isospin è evidente nei cosiddetti nuclei speculari, cioè nuclei con la stessa massa ma con il numero di protoni e neutroni scambiati, per i quali la struttura nucleare è stata trovata essere molto simile. Più in generale, i nuclei isobari (con lo stesso numero di massa A) hanno livelli corrispondenti, che possono essere raggruppati in multipletti di stati con lo stesso valore del numero quantico di isospin.

La rottura simmetria di isospin porta a una miscelazione di valori di isospin, e può essere derivata dagli esperimenti. Questa rottura di simmetria dovuta alla forza Coulombiana aumenta

con il numero atomico Z e per una data massa essa è al suo massimo per nuclei con $N = Z$.

Sperimentalmente la rottura della simmetria di isospin può essere studiata esaminando l'*isospin mixing* di stati nucleari, che può essere direttamente accessibile misurando le transizioni dipolari di natura elettrica ($E1$) che dovrebbero rispettare un certo numero di regole tra cui:

- le transizioni di tipo $E1$ tra stati di uguale isospin sono proibite in nuclei con $N = Z$,
- i valori della probabilità di emissione di radiazione elettromagnetica di tipo $E1$ tra stati corrispondenti in nuclei speculari dovrebbero essere uguali.

Per le transizioni $E1$, oltre agli studi di spettroscopia discreta, si misurano i decadimenti gamma dagli stati di risonanza gigante di dipolo dove si concentra la massima intensità della transizione elettrica dipolare ed è quindi ideale per la ricerca di piccoli effetti nella rottura delle regole di selezione dovute alla simmetria di isospin.

In particolare, si può dedurre il *mixing* di isospin in nuclei con $N = Z$ prodotti a temperatura finita, in quanto gli stati di risonanza gigante di dipolo sono presenti in nuclei fortemente eccitati. Si può da tali dati dedurre il valore a temperatura zero mediante l'utilizzo di modelli teorici. I risultati riguardanti il *mixing* di isospin ottenuti con questo metodo sono mostrati in Figura 9 insieme ad altri risultati ottenuti con misure di transizioni a bassa energia e alle previsioni teoriche.

Conoscere il *mixing* di isospin è importante in quanto questa è una informazione utile per dedurre dal processo di decadimento beta, dovuto alla forza debole, il grado di accoppiamento dei quark up e down che è un elemento della matrice Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM). A questo scopo la funzione d'onda del nucleo deve essere corretta e il fattore di correzione, dedotto dai dati esistenti, che è legato all'*isospin mixing*, è mostrato nel riquadro interno della Figura 9. Da notare che il punto a maggior valore del numero di massa è stato ottenuto con il decadimento gamma dalla risonanza gigante di dipolo. I programmi futuri dovranno realizzare una mappatura più precisa dell'*isospin mixing*.

Un altro aspetto interessante dei nuclei speculari è il comportamento della differenza di energia degli stati in funzione dello spin. Sono stati

ottenuti molti dati che mostrano che gli effetti dovuti dell'interazione Coulombiana tra protoni non è sufficiente per spiegare le differenze di energia misurate ma bisogna aggiungere dei termini nel modello a *shell* dei quali bisognerà in futuro chiarirne l'origine.

I nuclei superpesanti

La ricerca di qual è l'elemento più pesante che possa esistere in natura e quindi di trovare il limite estremo dell'esistenza della materia, ha motivato una grande quantità di lavoro sperimentale e speciali sviluppi che nel corso degli anni hanno spinto quel limite sempre più in alto.

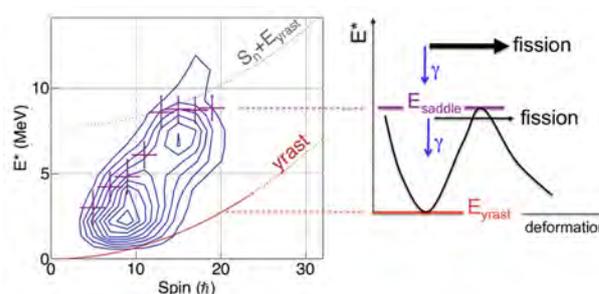


Figura 10: Distribuzione in energia e spin della popolazione del nucleo ^{254}No non misurati con una reazione di fusione tra ioni pesanti (Sinistra). Le linee continue e tratteggiate corrispondono alla linea con energia minima e l'altra corrisponde all'energia di separazione dei neutroni. Le croci, indicano i punti in cui la distribuzione dell'intensità di popolazione del nucleo ^{254}No scende a metà del suo valore massimo. La figura sulla destra mostra l'energia potenziale del nucleo in funzione della deformazione assiale e illustra come il decadimento γ domina a energie sotto l'energia di sella (*saddle*) mentre la fissione prende il sopravvento a energie al di sopra della barriera. Figura tratta da referenza [4].

Inoltre, dal punto di vista teorico, la comprensione dell'estensione della tavola periodica degli elementi richiede una combinazione di fisica e chimica quantistica per descrivere la disposizione dei nucleoni e degli elettroni. Sono stati costruiti apparati di misura molto complessi e messe a punto tecniche uniche che hanno permesso di raggiungere una sensibilità record per la separazione e rivelazione di eventi rarissimi costituiti da nuclei superpesanti per quali si è po-

tuto determinare la formazione e il decadimento. Per alcuni di questi nuclei, che possono essere popolati più facilmente come il ^{254}No , si possono studiare gli stati eccitati e i loro decadimenti gamma.

Tali studi forniscono informazioni chiave sulla presenza di effetti collettivi in questa regione di massa. Inoltre, la localizzazione degli orbitali vicino alla superficie di Fermi fornisce un *test* discriminante di modelli di strutture nucleari nei nuclei superpesanti e suggerisce la posizione dell'isola di stabilità per nuclei superpesanti. Quindi nei prossimi anni l'obiettivo è quello di stabilire energie e momenti angolari degli stati di nuclei superpesanti e anche le barriere di fissione.

Conclusione

I piani futuri riguardanti sia le reazioni a energie stellari con apparati dedicati come LUNA al LNGS, sia gli studi di struttura nucleare con apparati come AGATA e altri apparati come FAZIA che sfruttano la misura di neutroni e particelle cariche in reazioni nucleari energetiche sono molto vasti e ben pianificati. Sono fortemente motivati a fornire informazioni sulle proprietà dei nuclei in condizione estreme di isospin (ovvero della differenza $N - Z$), di massa, di momento angolare, di energia di eccitazione e anche di temperatura.

I laboratori di fisica nucleare nel mondo offrono e offriranno in futuro, con i loro sistemi di acceleratori nuovi o rimodernati, fasci di qualità sempre migliore e varietà di ioni radioattivi sempre più grandi che permetteranno di ottenere risultati unici e molto rilevanti. Questi dati sperimentali saranno utili per la modellizzazione dei processi di nucleosintesi e delle stelle di neutroni e ci permetteranno di scoprire quanto finora è rimasto nascosto e quindi segreto del nucleo atomico.



[1] V. Mossa et al.: *The baryon density of the Universe from an improved rate of deuterium burning*, *Nature*, 587 (2020) 210.

[2] A. Bracco, G. Duchêne, Zs. Podolyák, and P. Reiter: *Gamma spectroscopy with AGATA in its first phases: New insights in nuclear excitations along the nuclear chart*,

Progress in Particle and Nuclear Physics, 121 (2021) 103887.

[3] J. J. Valiente-Dobón et al.: *Conceptual design of the AGATA 2 array at LNL*, *Nucl. Instr. Meth. A*, 1049 (2023) 68040. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2023.168040>

[4] W. Korten et al.: *Physics opportunities with the Advanced Gamma Tracking Array: AGATA*, *Eur. Phys. J. A*, 56 (2020) 137. <https://doi.org/10.1140/epja/s10050-020-00132-w>



Angela Bracco: è professore ordinario di Fisica Sperimentale Nucleare presso l'Università degli Studi di Milano e ricercatore associato dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN). Dal 2005 al 2011 è stata presidente della Commissione Scientifica Nazionale per la Fisica Nucleare dell'INFN e dal 2012 al 2017 è stata presidente del comitato europeo NuPECC. Dal 2020 è Presidente della Società Italiana di Fisica. Si occupa di esperimenti di struttura nucleare con spettroscopia gamma. È membro di molti comitati internazionali di valutazione e di *advisor* in paesi europei ed extra europei.

Su alcuni possibili percorsi della filosofia della scienza

Mario Castellana *Università del Salento*

Diversi sono gli itinerari di ricerca in corso nell'ambito della filosofia della scienza, la cui strutturale natura metacognitiva si è sempre innervata sullo *status quaestionis* delle problematiche scientifiche con lo scopo di individuarne alcuni punti fermi; ma data l'enorme espansione del patrimonio tecnico-scientifico in corso, essa viene a presentarsi sempre più come la coscienza critica del fatto che le scienze sono il prodotto della presa in carico delle "infinite ragioni" del reale, per usare un'espressione di Leonardo Da Vinci, o sua complessità. Si intendono affrontare alcuni temi che, pur sembrando per così dire laterali e a volte latenti nel corso della sua stessa e ancora breve storia concettuale, possono costituire dei possibili itinerari di ricerca meritevoli di essere presi in debita considerazione con l'obiettivo strategico di considerare la scienza come pensiero *tout court*.

Le diverse "ragioni della scienza"

Se la specificità di ogni sano percorso filosofico e nello stesso tempo suo "dramma", a dirla con lo scrittore colombiano Nicolás Gómez Dávila, è quello di parlare del "tutto ma attraverso le sue parti", tale impresa si rivela oggi ancora più problematica per la filosofia della scienza o epistemologia; essa, come avevano già indicato i Maestri Greci nel gettare le basi del lavoro gnoseologico, ha come oggetto quello di studiare la scienza come produzione di conoscenza *tout court* ma attraverso le singole scienze con l'obiettivo primario di farne emergere le diverse ed insite "ragioni" o "anime" con le conseguenziali svolte storico-concettuali di cui sono portatrici, come già indicavano all'unisono nei primi decenni del secolo scorso Federigo Enriques e Moritz Schlick, impegnati a costruire dei possibili percorsi di tale disciplina nelle rispettive opere, [1, 2]

Tali opere, insieme ai fondamentali lavori di altre figure di scienziati-filosofi o *savants* come Cournot, Mach, Duhem e Poincaré, sia pure su binari diversi e con meno o più fortuna, hanno tracciato dei binari poi venuti a maturazione nei decenni successivi in vari contesti culturali col creare delle vere e proprie tradizioni di ricerca epistemologica che hanno arricchito di ulteriori

problematiche il già vasto campo della riflessione filosofica; e questo è stato possibile grazie ad una più profonda analisi degli strutturali cambiamenti avvenuti tra '800 e '900 nelle diverse scienze che hanno contribuito a fornire nuovi strumenti per indagare più in profondità il grande "libro della natura" con aprirne altri inediti capitoli. Ne derivò una conseguente nuova "filosofica militia", per usare l'espressione di Federico Cesi quando fondò nel 1603 l'Accademia dei Lincei, portata avanti sia da più *savants* che da figure di filosofi a loro volta fattisi scienziati, come avvenne in particolar modo in Francia con la nascita della *Revue de Métaphysique et de Morale* e l'organizzazione del primo "Congrès International de Philosophie" del 1900 dove si confrontarono Russell, Poincaré e Hilbert; nell'affrontare questioni relative alla validità o *valeur* delle geometrie non euclidee e delle nuove teorie fisiche, tali figure gettarono le basi per una diversa e più solida configurazione dei rapporti tra scienza e filosofia, che portò nello stesso tempo al superamento da una parte della ristretta visione di matrice positivista e dall'altra a combattere quella vasta letteratura dell'anti-scienza, che specialmente in Italia più che altrove è venuto ad incidere in profondità nel tessuto non solo culturale.

L'anima storica della scienza

Tale fenomeno culturale, sia pure non omogeneo, di vero e proprio fervore epistemologico e di dimensione europea, chiamato sino agli anni '20 "*critique des sciences*", preparò il terreno allo sviluppo della cosiddetta corrente *Standard* che portò al consolidamento della filosofia della scienza come disciplina autonoma con la formazione professionale dell'epistemologo e con la creazione di una ricca letteratura imperniata quasi esclusivamente sul centrale momento della stabilità e dei fondamenti logici delle teorie, base delle ricerche sull'informatica e sull'intelligenza artificiale. Ma c'era un altro e non meno cruciale tema in un primo momento trascurato, ma intravisto nella sua estrema cogenza epistemica quasi in maniera paradigmatica da Ludwig Boltzmann, le cui preoccupazioni erano già tese a come garantire l'oggettività delle teorie fisiche e della scienza più in generale pur nei loro continui cambiamenti concettuali di base; con l'obiettivo di chiarirne

il senso dei processi veritativi comunque messi in atto, si svilupparono, prima in area francofona negli anni '30 e con la sola presenza in Italia di Federico Enriques, alcuni percorsi di orientamento storico e poi negli anni '50-'60 ulteriori tradizioni di ricerca come le epistemologie postneopositivistiche, che nel loro complesso hanno arricchito di altre prospettive il già articolato patrimonio epistemologico con l'aprirlo all'incontro-scontro con la dimensione e anima storica della scienza e del suo variegato mondo.

Non è stata un'operazione facile sul terreno concettuale, ed in parte lo è ancora oggi, la metabolizzazione della storicità della scienza e di certe scienze come la matematica in particolar modo, pure attraversata come le altre da diverse ed inevitabili crisi, crisi di crescita all'interno del suo "granitico impero" e non solo ai "confini", come diceva Hermann Weyl [3] qualche anno prima dei teoremi limitativi di Kurt Gödel; e diverse dinamiche filosofico-scientifiche hanno portato nella seconda metà del secolo scorso ad una maggiore acquisizione epistemica della strutturale dimensione storica delle singole scienze grazie appunto, da una parte, alle diverse cosiddette epistemologie storiche concentrate in particolar modo sulle analisi dei momenti di crescita della scienza e delle rivoluzioni scientifiche da Bachelard a Kuhn e dall'altra ad altri decisivi eventi scientifici col loro pieno portato di ulteriori svolte e bisognosi di ulteriori approcci.

Se sino agli anni '60 del secolo scorso, nella maggior parte dei contesti di ricerca in filosofia della scienza, parlare di storia della conoscenza scientifica significava essenzialmente parlare di una ferita ad essa inferta o, per usare una celebre metafora del gruppo di matematici riuniti sotto lo pseudonimo di Nicolas Bourbaki, di vera e propria "patologia della verità" iniziata per queste figure per opera di Bernhard Riemann [4], man mano questo pregiudizio o "ostacolo epistemologico", nel senso di Gaston Bachelard, è venuto sempre meno; si sono così aperti altri orizzonti metacognitivi in grado di far vedere le logiche e le diverse ragioni della scienza più pluriarticolate al loro interno e non più soggette come nel passato ad interpretazioni riduttivistiche affette dal "virus dell'onniscienza", nel senso avanzato dai più recenti lavori di Mauro Ceruti [5]. Ma comprendere sul terreno teoretico la dimensione

intrinsecamente storica delle scienze è un percorso che va sempre più coltivato sul terreno epistemologico per capirne sempre di più le loro strutturali modalità di essere imprese cognitive nel produrre conoscenza delle diverse ragioni del reale; in tal modo diventa sempre più necessario impegnarsi, a dirla con Federigo Enriques, a cogliere il pieno “significato della storia del pensiero scientifico” [6], una strategia che meglio coglie l’intero patrimonio tecnico-scientifico come pensiero *tout court*, o *pensée des sciences* nel senso francese del termine.

Il pensiero complesso come dono razionale e quadro metacognitivo

E la nuova coscienza epistemica di orientamento storico è venuta quasi a sedimentarsi nelle nostre menti sino a funzionare come un “a priori dello spirito”, nel senso avanzato da una figura femminile dedita alla storia delle idee chimiche come Hélène Metzger (1888-1944) [7], nel permettere di allargare i modelli di razionalità e di non rimanere chiusi nei recinti a volte forzati imposti da visioni riduttive delle singole discipline; e questo ha contribuito a metabolizzare meglio il senso teoretico di rilevanti eventi come il quasi inatteso forte “ritorno del geometrico”, il ruolo sempre più strategico assunto dalle scienze del vivente e dalle neuroscienze, il già vasto capitolo della filosofia del digitale e delle relative tecnologie, il rapporto di circolarità tra teoria e tecnica, quest’ultima vista a sua volta come generatrice di teorie e fattore rilevante, già individuato da Ludovico Geymonat negli anni ‘70 come uno dei compiti non secondari dell’impresa epistemologica rivolta a chiarire la struttura storico-concettuale del patrimonio tecnico-scientifico. Tali eventi nel loro complesso stanno contribuendo a ridelineare il tessuto della conoscenza e a ridisegnarne i contorni da parte delle diverse comunità epistemiche impegnate su più fronti nel denunciare le parzialità di certe epistemologie di stampo normativo, concentratesi su alcune “ragioni della scienza” a scapito di altre.

Ma ciò che è emersa con maggiore fervore è la necessità di mettere sempre più in campo una visione di insieme dei fenomeni e delle loro logiche

sottostanti, fatto solo frutto di una solida e vigile coscienza storico-epistemologica non a caso invocata e praticata da figure di scienziati-filosofi della seconda metà del secolo scorso da Alexandre Grothendieck a Ilya Prigogine e Gerald Edelman che, tra le altre sfide, hanno lanciato l’idea di una nuova alleanza tra saperi scientifici e saperi umanistici, oggi sempre più avvertita come cogente in diversi settori; e questo ha giovato sia pure in parte a fare i conti con l’irruzione nel “gran teatro della conoscenza”, per usare un altro termine di Federico Cesi [8], delle scienze dei sistemi complessi che, pure presenti in modo germinale nei lavori di Poincaré nel farsi carico dei risultati negativi, hanno portato nel loro corredo concettuale una serie di problematiche bisognose di ben diversa attenzione e sensibilità teoretiche in quanto hanno fatto emergere il problema dei vari livelli del reale o sua pluri-oggettività, non riconducibili a quadri normativi anche se finemente elaborati. E se nel terreno più strettamente scientifico il variegato mondo della complessità è entrato a piene mani e coltivato con sempre più sofisticati strumenti di modellizzazione col dare decisivi frutti in vari settori, nel campo epistemologico, nonostante gli eroici sforzi dei padri fondatori, non viene ancora percepito come una piena conquista della ragione o dono razionale che il pensiero filosofico-scientifico nel suo insieme è stato in grado di raggiungere.

Come sostenuto da Mauro Ceruti e da Silvano Tagliagambe, almeno per quanto riguarda la situazione italiana, occorre continuare da parte della comunità dei filosofi della scienza a lavorare ancora nello sforzo di dare al pensiero complesso, o ragione complessa, una più adeguata fisionomia concettuale per renderlo un quadro metacognitivo di fondo e anche per evitarne usi distorti e riduttivi, a volte presenti in certi ambienti; il praticare ed il mettere in atto nei vari contesti teorici le molteplici vie della complessità è, pertanto, necessario per arrivare costruire una vera e propria *paideia* di cui si avverte in ogni campo dell’umano ed in sua difesa l’urgenza col mettere in primo piano, a dirla con Walter Benjamin, “l’ora della conoscibilità” piena dei fenomeni. Un’operazione del genere richiede preliminarmente, come aveva già lucidamente avvertito negli anni ‘50 Jean Piaget ed ora Silvano Tagliagambe, di mettersi *au carrefour* delle singo-

le scienze e di costruire una prassi epistemico-filosofica basata in modo strategico sul tra; in tal modo gli incontri-scontri tra scienze producono ulteriori progressi cognitivi, diventano più solide sentinelle contro le sempre presenti tentazioni di mentire sul reale che ci circonda. Nello scambiarsi i rispettivi contenuti storico-veritativi, le scienze mettono in atto contestuali “cambiamenti qualitativi discontinui”, come li chiamava Federigo Enriques nei “Problemi della scienza” [1], dovuti all’interconnessione e alla interazione delle conoscenze, ormai prassi saliente del pensiero scientifico che, pur sempre più in via di consolidamento, non ha ricevuto un adeguato interesse di ordine epistemologico.

Il tema delle limitazioni della conoscenza

Nello stesso tempo tale operazione, che si potrebbe considerare una ulteriore “rivoluzione nella riflessività” per usare una significativa espressione dello storico della scienza Yehuda Elkana, permette di riprendere alcuni temi ed aspetti che, pure intravisti precedentemente, erano stati tenuti ai margini del dibattito epistemologico se non scartati o quasi rimossi; tale è, ad esempio, il fondamentale tema delle limitazioni della conoscenza, pur essendo uno dei risultati più salienti del pensiero scientifico già del primo Novecento dalla fisica alle matematiche per poi far parte del corredo concettuale delle stesse scienze biologiche e non solo, tale da poter dire con Victor A. Kusik che “più si allunga il raggio della conoscenza più si espande la circonferenza dell’ignoto”. Se rimesso al centro dei dibattiti con gli strumenti del pensiero della complessità come ha fatto Mauro Ceruti, esso acquista un diverso significato epistemico ben lontano da quella vasta e sempre in agguato deformante letteratura prodotta dall’anti-scienza sui limiti della ragione e sulla conseguente presunta perdita di senso prodotto dalle scienze; può tramutarsi quasi in un dono razionale se si concentra sulle poste in gioco dei processi di auto-delimitazione concettuale che le scienze e le loro teorie producono al loro interno con arrivare a generare veri e propri processi di natura eco-cognitiva delle conoscenze stesse nel senso avanzato da Lorenzo Magnani [9].

Ogni scienza e ogni teoria, man mano che vanno avanti, prendono atto di una ragione del reale e nello svilupparne le diverse articolazioni, si delimitano concettualmente scoprendo i limiti dei vari sistemi concettuali costruiti; ad esempio, la stessa storia della fisica è una continua delimitazione al suo interno dei principi meccanici che ne assicurano il passaggio ad altri col mettere in atto quella che il filosofo della fisica Gaston Bachelard chiamava “sintesi storiche trasformanti” nelle sue analisi sulle teorie del primo Novecento. Ma una scienza arrivata ad un certo punto della sua storia, come la fisica, diventa un modello di riferimento per altre sino a permetterle di nascere e di svilupparsi; ma quest’ultime, arrivate a loro volta ad un certo grado di complessità, compiono delle svolte concettuali e vengono costruiti statuti epistemici autonomi che delimitano la stessa fisica sino ad autolimitarsi esse stesse. In tal modo si può considerare la storia delle scienze come un processo continuo di auto-delimitazioni successive che va chiaramente analizzato caso per caso per non cadere in posizioni normative; in tal modo si prende atto della necessità e nello stesso tempo della parzialità delle singole epistemologie che si costruiscono per dare conto del valore veritativo intrinseco delle singole teorie.

Un’attitudine del genere, forte dell’acquisizione sul piano epistemico della doppia dimensione teoretica e storica delle conoscenze scientifiche prodotte, porta come conseguenza di prendere in debita considerazione quella che un filosofo della matematica francese del tutto sconosciuto come Maximilian Winter (1871-1935), che si confrontò con i lavori di Poincaré, Hilbert e Russell, chiamava quasi profeticamente “estensioni meta-scientifiche di una teoria” [10]; tale esito fu visto già presente nella cosiddetta “logistica” e nei diversi lavori della logica matematica dell’epoca che tra gli altri obiettivi si ponevano quello di ridurre tutta la matematica ad uno dei suoi rami. Ed uno sguardo pur sommario alla storia del pensiero scientifico dell’intero Novecento e alle tradizioni di ricerca nel campo della filosofia della scienza da una parte ci mette di fronte a diversi tentativi del genere e dall’altra al loro sistematico fallimento; ed il pensiero complesso è uno dei pochi percorsi che ha metabolizzato in pieno tale fatto e ci fornisce un quadro meta-cognitivo più coerente per ridare a questi temi

la dovuta centralità, temi chiaramente suscettibili di ulteriori e inevitabili approfondimenti e finalizzati a comprendere sempre meglio le diverse “pieghe” della scienza, come le chiamava Ludovico Geymonat [11].



- [1] F. Enriques: *Problemi della scienza*, Zanichelli, Bologna (1906).
- [2] M. Schlick: *Allgemeine Erkenntnislehre*, Berlino (1918) (tr. it. di Ernesto Palombi: *Teoria generale della conoscenza*, Franco Angeli, Milano, (1986)).
- [3] H. Weyl: *Philosophie der Mathematik und Naturwissenschaft* (1927), (*Philosophy of Mathematics and Natural Science*, University Press, Princeton (1963)).
- [4] N. Bourbaki: *Éléments d'histoire des mathématiques*, Hermann, Paris (1969)).
- [5] M. Ceruti: *La fine dell'onniscienza*, Studium, Roma (2014).
- [6] F. Enriques: *Signification de l'histoire de la pensée scientifique* Hermann, Paris (1934) (ried. *Il significato della storia del pensiero scientifico*, trad. di F. Enriques e a cura di M. Castellana, Barbieri-Selvaggi Ed., Manduria (2007)).
- [7] H. Metzger: *La Méthode philosophique en histoire des sciences. Textes 1934-1939*, a cura di G. Freudenthal, Fayard, Paris (1987) (trad. it. di Antonella Coletta, *Il metodo filosofico nella storia delle scienze. Testi 1914-1939 e lettere raccolte da G. Freudenthal*, a cura di M. Castellana, Barbieri-Selvaggi Ed., Manduria (2009)).
- [8] F. Cesi: *Del naturale desiderio di sapere. The Natural Desire for Knowledge*, testo bilingue, a cura di Carlo Vinti, Pontificia Academia Scientiarum, Città del Vaticano (2003).
- [9] L. Magnani: *The Abductive Structure of Scientific Creativity. An Essay on the Ecology of Cognition*, Springer, Berlin (2017); *Eco-Cognitive Computationalism*, Springer, Berlin (2021).
- [10] M. Winter: *La Méthode dans la philosophie des mathématiques*, Alcan, Paris (1911) (trad. it. di Mario Castellana, *Il metodo storico-critico per una nuova filosofia delle matematiche*, a cura di M. Castellana, Meltemi, Milano (2020)).
- [11] L. Geymonat: *Filosofia e filosofia della scienza*, Feltrinelli, Milano (1960) e *Lineamenti di filosofia della scienza*, Mondadori, Milano (1985) e UTET, Torino (2006).



Mario Castellana: già docente di Filosofia della scienza e di Epistemologia presso alcuni Corsi di Laurea Magistrali e Triennali dell'Università del Salento, ha fatto parte di diversi Dottorati di Ricerca e di quello in Storia della Scienza presso

l'Università degli Studi di Bari; ha concentrato le sue ricerche sui dibattiti del primo e secondo Novecento in area italiana e francofona sulla filosofia della matematica e della fisica e sui rapporti tra epistemologia e storia della scienza; ha pubblicato diversi lavori con curarne alcuni scritti su Federigo Enriques, Gaston Bachelard, Albert Lautman, Maximilien Winter, Ferdinand Gonseth, Jean Piaget, Hélène Metzger, Simone Weil, Suzanne Bachelard, Jean Desanti. Ha collaborato col Laboratoire Disciplinaire “Pensée des sciences” dell'École Normale Supérieure di Parigi, finalizzato a far conoscere il patrimonio epistemologico europeo col dirigere la collana internazionale “Pensée des sciences” in collaborazione con tale centro di ricerca; grazie a tali studi è approdato all'epistemologia della complessità nel recente volume *Briciole di complessità. Tra la rugosità del reale.*, con prefazione di Mauro Ceruti (Roma, Ed. Studium 2022).

Teoria e simulazione nei plasmi fusionistici

Matteo Valerio Falessi

*Center for Nonlinear Plasma Science and C.R. ENEA Frascati,
C.P. 65, 00044 Frascati, Italy*

Fulvio Zonca

*Center for Nonlinear Plasma Science and C.R. ENEA Frascati,
C.P. 65, 00044 Frascati, Italy
Institute for Fusion Theory and Simulation, School of Physics,
Zhejiang University, Hangzhou, China*

Lo sfruttamento dell'energia da reazioni di fusione termonucleare non è un mero problema ingegneristico e tecnologico, ma pone importanti sfide per comprendere il comportamento dei plasmi magnetizzati come sistemi complessi. Questo lavoro descrive brevemente alcuni dei problemi che si affronteranno nei prossimi anni.

Introduzione

Nei plasmi magnetizzati per lo sfruttamento dell'energia prodotta mediante reazioni di fusione termonucleare, l'energia termica è $\gtrsim 10$ keV (equivalenti a più di 10^8 K) e il plasma stesso è prevalentemente un gas di elettroni, deutoni e tritoni interamente ionizzato, contenuto in una bottiglia magnetica con topologia toroidale, illustrata in Fig. 1 nel caso della configurazione tokamak. Esempi di plasmi confinati in configurazione tokamak sono quelli del Joint European Torus (JET), che nel 2021 ha ottenuto il record di 59 MJ di energia da fusione prodotta [1], e del Experimental Advanced Superconducting Tokamak (EAST), che ha recentemente raggiunto il record di 1056 s di regime di confinamento

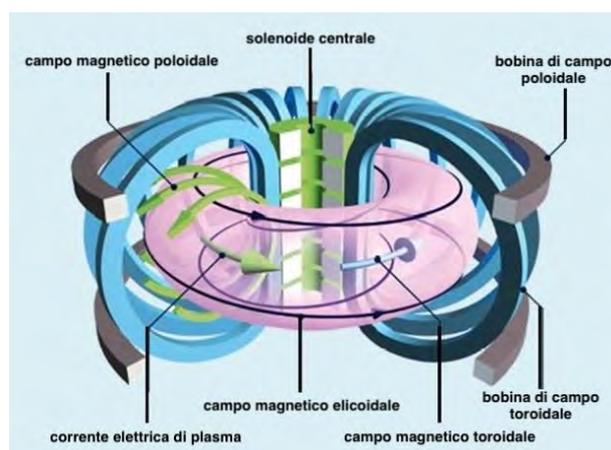


Figura 1: Illustrazione schematica del plasma confinato magneticamente in un tokamak (Immagine adattata dell'originale per cortesia di The Czech Academy of Sciences, Institute of Plasma Physics, con un ringraziamento speciale a UKAEA).

migliorato [2]. Il raggiungimento di questi risultati straordinari nel campo della fusione a confinamento magnetico, che si accompagnano ai risultati altrettanto esaltanti ottenuti nel campo della fusione a confinamento inerziale grazie all'utilizzo di potenti fasci laser con la produzione di 3.15 MJ di energia da fusione nella National Ignition Facility (NIF) [3], apre la strada allo

sfruttamento dell'energia da fusione nel prossimo futuro. In questa prospettiva, rimangono però ancora aperte importanti sfide tecnologiche e di comprensione della ricca fenomenologia alla base dei fenomeni che governano la fisica dei plasmi termonucleari o fusionistici. Il prossimo passo di importanza fondamentale verso lo sfruttamento dell'energia da fusione a confinamento magnetico è costituito dal International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) [4], la cui complessità richiederà una adeguata preparazione della sperimentazione basata sulla simulazione numerica mediante modelli teorici in grado di descriverne i processi fisici fondamentali [5, 6]. Elemento di grande novità ed interesse sarà la caratteristica unica di avere dei plasmi prossimi alla soglia di ignizione ed un bilancio di potenza dominato dalla presenza delle particelle alfa di fusione a 3.5 MeV^1 , fortemente sovratermiche [7]. La teoria e simulazione saranno inoltre ingredienti chiave anche per la fase di disegno concettuale e progettazione del Demonstration Power Plant (DEMO) [8].

Plasmi fusionistici come sistemi complessi

Il regime di confinamento di un plasma termonucleare, ossia quanto bene l'energia termica è contenuta dalla configurazione magnetica di equilibrio, dipende dai profili radiali² di densità e temperatura del plasma, nonché dalle proprietà delle fluttuazioni elettromagnetiche (turbolenza) che sono le principali responsabili del trasporto di particelle ed energia verso l'esterno e, in ultima analisi, della loro perdita. Vi è un ampio consenso sul fatto che i plasmi fusionistici siano sistemi complessi e auto-organizzati, dove lo spettro della turbolenza e le corrugazioni radiali dell'equilibrio magnetico e dei profili del plasma possono essere intesi come equilibri non lineari che evolvono nel tempo [9]. In questi equilibri non lineari, i vari elementi si comportano come interconnessi e cambiare uno di essi implica la

¹Nel caso di reazioni di fusione $D + T \rightarrow ^4\text{He} (3.5 \text{ MeV}) + n (14.1 \text{ MeV})$.

²Per radiale si intende la direzione che incrementa dal centro della colonna di plasma fino al suo bordo, seguendo la direzione di variazione massima del flusso magnetico.

modifica di tutti gli altri. Una descrizione degli scenari di plasma, intesa come evoluzione dinamica del sistema dove tutti gli elementi sono tenuti in considerazione sullo stesso piano, richiede un approccio in cui simulazione numerica e modelli teorici abbiano un ruolo centrale. Centralità che, al tempo stesso, è motivata dal-

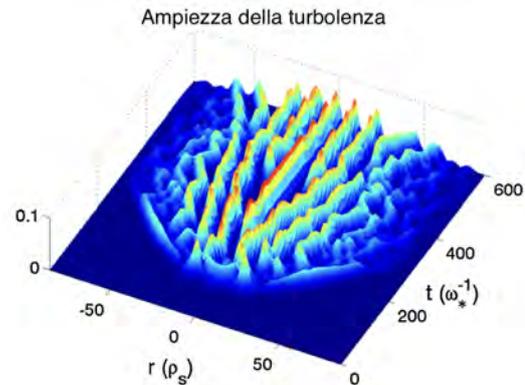


Figura 2: Andamento spazio-temporale dell'ampiezza della turbolenza di deriva. La scostamento nella coordinata radiale r rispetto alla posizione iniziale del pacchetto d'onda è espresso in unità del raggio di Larmor ionico calcolato alla temperatura degli elettroni, ρ_s . Il tempo è espresso in unità dell'inverso della frequenza diamagnetica, ω_*^{-1} . (Immagine adattata dall'originale di Ref. [14]).

l'oggettiva difficoltà nell'operare un impianto nucleare in cui la complessità non è solo quella testé descritta del sistema fisico, ma riguarda anche il sistema ingegneristico, con le sue complicazioni tecniche e tecnologiche. In altre parole, comprendere la complessità dei plasmi fusionistici non può basarsi unicamente sull'esplorazione dello spazio delle operazioni, per quanto metodica. Per queste ragioni, lo sfruttamento dell'energia da fusione non richiede solo la soluzione di un problema unicamente ingegneristico e tecnologico, bensì la comprensione dei suoi processi fisici fondamentali.

Turbolenza e interazione multiscala

Le corrugazioni radiali dell'equilibrio magnetico e dei profili del plasma, o strutture zonali, giocano un ruolo particolarmente importante in quanto diffondono lo spettro delle fluttuazioni verso

lunghezze d'onda più corte [10, 11], in generale linearmente stabili, regolando quindi l'intensità della turbolenza e del trasporto che ne consegue [12] che è proporzionale all'intensità della turbolenza [13]. Ciononostante, è proprio l'esistenza delle strutture zonali che causa la non località del trasporto turbolento, perché l'intensità della turbolenza risulta dipendere dalla proprietà del plasma in posizioni ed a tempi diversi. In Fig. 2, ad esempio, si può apprezzare l'andamento spazio-temporale della turbolenza di deriva nel piano (r, t) , dove lo scostamento nella coordinata radiale r rispetto alla posizione iniziale del pacchetto d'onda è espresso in unità del raggio di Larmor ionico calcolato alla temperatura degli elettroni, ρ_s , ed il tempo è espresso in unità dell'inverso della frequenza diamagnetica, ω_*^{-1} [14]. Lo sparpagliamento della turbolenza è evidenziato dalla comparsa di strutture solitoniche che si propagano in direzione radiale, mentre le strutture zonali sono caratterizzate da un analogo comportamento con picchi localizzati tra le creste della turbolenza di deriva. Questo grafico è ottenuto risolvendo le equazioni di Maxwell-Boltzmann nel limite di bassa frequenza rispetto alla frequenza ciclotronica ionica [15], ovvero usando la cosiddetta teoria girocinetica, alla base del moderno approccio alla teoria e simulazione numerica dei plasmi confinati magneticamente.

La grande sfida della ricerca sulla fusione a confinamento magnetico è lo sviluppo di un metodo predittivo per l'evoluzione dei profili di plasma macroscopici su scale temporali lunghe, confrontabili con il tempo di confinamento dell'energia. Su queste scale temporali, è ragionevole aspettarsi che il trasporto del plasma indotto dalle fluttuazioni giochi un ruolo importante e entri sullo stesso piano dei processi dovuti alle collisioni binarie Coulombiane tra particelle, nonché delle sorgenti e pozzi di particelle e di energia come, ad esempio, il riscaldamento e/o la guida non induttiva di corrente mediante onde a radiofrequenza o l'iniezione di fasci sovratermici di particelle. Nell'ottica di indagare questi fenomeni e di sviluppare una capacità di modellizzazione predittiva dell'intero sistema, l'approccio generalmente adottato è quello di estendere a scale temporali lunghe le simulazioni girocinetiche [5, 6, 16]. Questo approccio rimane tuttavia troppo impegnativo per la potenza di calcolo de-

gli odierni computer al peta-flop e rappresenta una sfida anche per la nuova classe di sistemi informatici ad alte prestazioni previsti, ad esempio, dall'Exascale Computing Project [17] e dall'EuroHPC Joint Undertaking [18]. Diventa quindi di fondamentale importanza la formulazione di approcci ridotti, con livelli di fedeltà diversi, per descrivere le complesse fenomenologie dei plasmi termonucleari confinati magneticamente in modo accurato e al tempo stesso con risorse di calcolo accettabili sia per costi che per prestazioni richieste. Esistono teorie che adottano una descrizione girocinetica multiscale del trasporto del plasma, accoppiata con equazioni evolutive per lo spettro delle fluttuazioni [19]. Si basano su una separazione sistematica delle instabilità su microscala, che sono alla base della turbolenza, dall'evoluzione dei profili del plasma sulle macroscale. I plasmi di interesse reattoristico, tuttavia, sono caratterizzati dal ruolo unico e peculiare dei prodotti di fusione carichi (le particelle alfa nel caso delle reazioni D-T), e più in generale delle particelle energetiche o sovratermiche, che giocano un ruolo dominante nel bilancio di potenza. Per questo, le particelle energetiche possono eccitare fluttuazioni caratterizzate da lunghezze d'onda macroscopiche. Al tempo stesso, le fluttuazioni elettromagnetiche così generate su grande scala, caratterizzate da uno spettro continuo in frequenza come le onde Alfvéniche di taglio (o *shear Alfvén waves*) in equilibri non uniformi [20], possono perturbare il plasma su scale sempre più piccole fino a quelle del raggio di Larmor degli ioni del plasma termico [21], ossia le microscale. Infine, le particelle energetiche sono in grado di eccitare instabilità su scale dell'ordine del loro raggio di Larmor, quindi su scale intermedie (le mesoscale) tra le macroscale dei profili di plasma e le microscale della turbolenza. In altre parole, attraverso le strutture zonali che queste fluttuazioni multiscale possono indurre nonlinearmente, le particelle energetiche si comportano come *mediatrici* nell'interazione tra scale diverse nei plasmi fusionistici [7, 22].

Trasporto nello spazio delle fasi nei plasmi fusionistici

La caratteristica peculiare delle particelle energetiche di dominare il bilancio di potenza di un reattore termonucleare, e quindi di agire come mediatrici nell'interazione tra scale diverse, non è la sola che rende unico il loro ruolo. Infatti, essendo caratterizzate da alte energie rispetto alla componente termica, sono soggette a deboli collisioni Coulombiane³ e, conseguentemente, la loro funzione di distribuzione può deviare in modo apprezzabile dall'equilibrio termodinamico locale. Il fenomeno descritto si verifica, in particolare, a causa dell'interazione risonante onda-particella con le fluttuazioni elettromagnetiche presenti nel plasma. Questo processo è rappresentato in Fig. 3 attraverso la tecnica delle Lagrangian Coherent Structures [23], che permette di apprezzare la forte deviazione delle traiettorie vicine alla condizione di risonanza. La

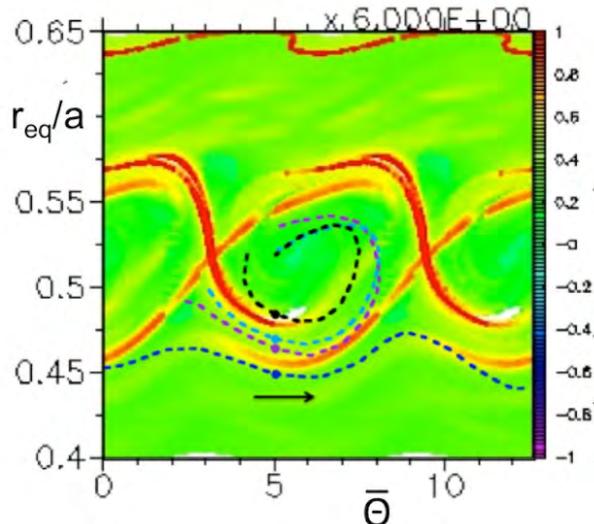


Figura 3: Interazione risonante onda-particella descritta attraverso il codice girocinetico HM-GC. Sono rappresentate diverse traiettorie di particelle nello spazio delle fasi individuato dalla coordinata radiale (normalizzata al raggio del plasma a) e dalla fase onda-particella $\bar{\theta}$. Le traiettorie sono sovrapposte alla struttura risonante prodotta dalle fluttuazioni elettromagnetiche mostrata come curve di livello dei "Finite time Lyapunov exponents" del sistema. Figura riprodotta con permesso da Ref. [24].

³Questa caratteristica discende dalla dipendenza della sezione d'urto di Rutherford dall'inverso dell'energia al quadrato.

descrizione della funzione di distribuzione risulta quindi di fondamentale importanza ed è resa possibile dall'introduzione delle cosiddette strutture zonali nello spazio delle fasi [25]. In analogia con le strutture zonali introdotte in precedenza, le strutture zonali nello spazio delle fasi non sono soggette a rapidi processi di decadimento non collisionale e possono, pertanto, essere descritte in uno spazio delle fasi ridotto descritto dagli invarianti che caratterizzano il moto di ogni particella. Per questa loro proprietà, esse sono influenzate solo dagli effetti dissipativi collisionali, dai termini di sorgente nello spazio delle fasi (sia positivi che negativi) e dai processi nonlineari. Costituiscono dunque la descrizione fisica naturale dei processi di trasporto nello spazio delle fasi nonché la loro manifestazione come modifica dei profili di plasma macroscopici [26]. Le strutture zonali nello spazio delle fasi, insieme con le strutture zonali, definiscono in ogni istante di tempo un equilibrio nonlineare, chiamato stato zonale, determinato in maniera autoconsistente con il livello di fluttuazioni elettromagnetiche presenti nel sistema. Attraverso la teoria girocinetica è possibile descrivere l'evoluzione dello stato zonale [26]. In particolare, è possibile derivare un'equazione di Schrödinger per l'intensità delle fluttuazioni elettromagnetiche, accoppiata con un'equazione di Dyson che permette di descrivere la funzione di distribuzione rinormalizzata a causa delle fluttuazioni stesse [27]. Quest'ultima equazione può essere espressa come equazione di continuità nello spazio delle fasi ridotto che caratterizza le strutture zonali nello spazio delle fasi. In Fig. 4, a titolo esemplificativo, è rappresentato il flusso associato a questa equazione di continuità simulato per un particolare tipo di fluttuazione Alfvénica nel Divertor Tokamak Test (DTT) [28, 29], un importante esperimento in costruzione presso i laboratori ENEA di Frascati. Questo approccio consente di ridurre la dimensionalità e quindi la complessità del problema considerato e descrivere in maniera efficace i processi di trasporto in plasmi fusionistici su tempi lunghi. Grazie alla continua evoluzione delle capacità di calcolo numerico, con questo approccio sarà possibile descrivere la fenomenologia osservata nelle moderne macchine tokamak non solo per quanto riguarda le particelle energetiche ma anche per

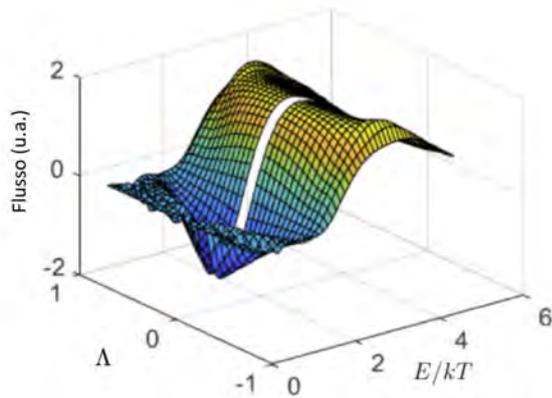


Figura 4: Flusso di particelle (in unità arbitrarie) nello spazio delle fasi ridotto utilizzato per descrivere le strutture zonali nello spazio delle fasi. Le coordinate rappresentano due degli integrali primi che caratterizzano il moto di singola particella nell'equilibrio magnetico. Figura riprodotta con permesso da Ref. [30].

il plasma termico.

Controllo della potenza di fusione e interazione tra plasma e componenti materiali

Uno dei problemi nodali di un reattore a fusione sarà l'estrazione della potenza. Da un lato, la potenza dei neutroni a 14.1 MeV prodotti dalle reazioni di fusione D-T sarà raccolta da un mantello, che, oltre a fungere da mezzo per assorbirla e quindi convertirla in potenza elettrica, agirà anche da componente attiva atta a rigenerare il trizio e a chiudere il ciclo del combustibile⁴. Dall'altro, la potenza delle particelle alfa a 3.5 MeV, adeguatamente confinate, garantirà il riscaldamento necessario per il funzionamento del reattore in condizioni pressoché stazionarie. Questa potenza andrà successivamente recuperata dal sistema, una volta che le particelle alfa saranno termalizzate e trasformate in ceneri di elio, che a loro volta andranno estratte dal sistema e sostituite da nuovo combustibile da iniettare nel reattore. La rimozione della potenza e delle particelle in eccesso (Power and Particle Exhaust, o PPEX) è quindi un aspetto di vitale importanza per il funzionamento di un reattore a fusione.

⁴Questo passaggio riveste un ruolo di fondamentale importanza nel funzionamento del reattore a fusione, ma esula dal tema di questa breve analisi.

I problemi di PPEX in un reattore tokamak sono controllati mediante il divertore (Fig. 5) ossia la struttura materiale su cui vengono fatte confluire in modo controllato le superfici di flusso magnetico aperte, divise da una separatrice (visibile in figura dalla presenza di un *punto a X*) dalle superfici di flusso magnetico chiuse che contengono il plasma ben confinato. La presenza

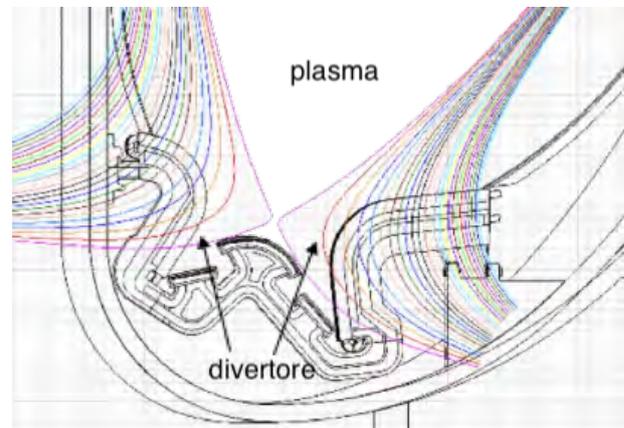


Figura 5: Illustrazione schematica del divertore nel Divertor Tokamak Test (DTT) [28, 29] (riproduzione da originale in Ref. [28]). Le superfici di flusso magnetico aperte sono rappresentate dalle linee colorate che confluiscono sulla struttura materiale del divertore. La regione di plasma è caratterizzata da superfici di flusso magnetico chiuse non indicate in figura.

del divertore consente di agire mediante il controllo del trasporto perpendicolare e parallelo alle superfici di flusso magnetico.

A causa della presenza di particelle neutre, impurezze e plasma relativamente freddo nella zona del divertore, una descrizione accurata dei processi fisici rilevanti, che vanno dalla fisica del plasma alla fisica atomica e all'interazione delle varie specie di particelle (ionizzate e non) con le pareti materiali, è estremamente complessa. I modelli ridotti generalmente usati per descrivere la dinamica dei processi di plasma si basano su una gerarchia di equazioni ottenuta dai momenti (integrali nello spazio delle velocità) dell'equazione di Boltzmann, dove la relazione di chiusura, ossia la relazione tra il momento di ordine più alto con i momenti di ordine inferiore, è data da un modello in cui il ruolo delle collisioni è considerato dominante [31, 32]. La dinamica delle particelle neutre è invece trattata obbligatoriamente con un approccio cinetico per tenere

conto della molteplicità dei processi fisici coinvolti e menzionati in precedenza. Lo stato dell'arte dei modelli di simulazione per ITER e DEMO [33] rimane comunque non sufficientemente predittivo per descrivere le peculiarità della regione esterna dei plasmi di rilevanza reattoristica, caratterizzata da alta densità e bassa collisionalità, che non sono riproducibili sperimentalmente nei tokamak esistenti.

A questo si aggiunge il fatto che, in un reattore, le particelle energetiche influenzano in modo importante non solo il trasporto turbolento tra parte interna e bordo del plasma, ma possono avere un effetto diretto sul divertore nell'eventualità siano trasportate nella regione di bordo senza aver ceduto adeguatamente la loro energia termalizzando. Oltre ad avere un impatto evidente sull'efficienza del processo di autosostentamento delle reazioni termonucleari, questa condizione può influire in modo significativo sulla modalità di operazione del divertore a causa di una popolazione non trascurabile di particelle alfa ancora sovratermiche. La descrizione accurata di questi processi richiede l'utilizzo di modelli di plasma avanzati, che possono essere comunque basati sulla ben nota gerarchia di equazioni ottenibili da momenti dell'equazione di Boltzmann, purché completati da relazioni di chiusura cinetiche come, ad esempio, proposto in Ref. [34]. Come nel caso dell'analisi del trasporto turbolento nella regione interna e ben confinata del plasma, l'interazione multiscala è un ingrediente essenziale del trasporto nella regione del bordo e del divertore. Inoltre, a causa della transizione tra superfici di flusso magnetico chiuse e aperte attraverso la separatrice, i profili radiali del plasma possono variare su lunghezze scala corte nella regione di bordo, inficiando la separazione tra macro- e micro-scale. L'analisi di questi processi è tra gli argomenti su cui la comunità dei ricercatori è più attiva, sia per l'importanza pratica che per l'interesse scientifico del problema. Per questo motivo, è in costruzione presso il Centro Ricerche dell'ENEA di Frascati il DTT [28, 29], un tokamak che si propone di studiare il problema del PPEX in condizioni che si avvicineranno a quelle di un reattore termonucleare come in nessun altro tokamak attualmente esistente.

Conclusioni

La produzione di energia da reazioni di fusione in plasma confinato magneticamente pone enormi sfide tecniche e tecnologiche ma, al tempo stesso, richiede lo sviluppo di teorie per la comprensione dei fenomeni complessi che caratterizzano i plasmi termonucleari e di modelli per la simulazione numerica in grado di prevederne in modo affidabile l'evoluzione dinamica su scale di tempo lunghe. I problemi di teoria e simulazione nei plasmi fusionistici e gli strumenti adottati per studiarli hanno notevoli punti in comune con altri campi della fisica, come la fisica dei laser a elettroni liberi [25], la fisica dello spazio [35], e la fisica del plasma nonlineare [7]. In prospettiva, questo rende attraente questo settore di ricerca non solo per le implicazioni pratiche ma anche per l'interesse scientifico che può avere.



- [1] E. Gibney: *Nuclear-fusion reactor smashes energy record*, Nature, 602 (2022) 371.
- [2] Y. Song et al.: *Realization of thousand-second improved confinement plasma with Super I-mode in tokamak EAST*, Science Advances, 9 (2023) eabq5273.
- [3] D. Clery: *Explosion marks laser fusion breakthrough*, Science, 378 (6625) (2022) 1154.
- [4] K. Tomabechi et al.: *ITER conceptual design*, Nuclear Fusion, 31 (1991) 1135.
- [5] D. A. Batchelor et al.: *Simulation of Fusion Plasmas: Current Status and Future Direction*, Plasma Science and Technology, 9 (2007) 312.
- [6] Ph. Lauber: *Super-thermal particles in hot plasmas - Kinetic models, numerical solution strategies, and comparison to tokamak experiments*, Physics Reports, 533 (2013) 33.
- [7] L. Chen e F. Zonca: *Physics of Alfvén waves and energetic particles in burning plasmas*, Reviews of Modern Physics, 88 (2016) 015008.
- [8] I. T. Chapman et al.: *Analysis of high β regimes for DEMO*, Fusion Engineering and Design, 86 (2011) 141.
- [9] L. Chen e F. Zonca: *Nonlinear equilibria, stability and generation of zonal structures in toroidal plasmas*, Nuclear Fusion, 47 (2007) 886.
- [10] L. Chen et al.: *Excitation of zonal flow by drift waves in toroidal plasmas*, Physics of Plasmas, 7 (2000) 3129.
- [11] L. Chen et al.: *Non-linear zonal dynamics of drift and drift-Alfvén turbulence in tokamak plasmas*, Nuclear Fusion, 41 (2001) 747.

- [12] P. H. Diamond et al.: *Zonal flows in plasma—a review*, Plasma Physics and Controlled Fusion, 47 (2005) R35.
- [13] Z. Lin and T. S. Hahm: *Turbulence spreading and transport scaling in global gyrokinetic particle simulations*, Physics of Plasmas, 11 (2004) 1099.
- [14] Z. Guo et al.: *Radial Spreading of Drift-Wave–Zonal-Flow Turbulence via Soliton Formation*, Physical Review Letters, 103 (2009) 055002.
- [15] E. A. Frieman and L. Chen: *Nonlinear gyrokinetic equations for low-frequency electromagnetic waves in general plasma equilibria*, Physics of Fluids, 25 (1982) 502.
- [16] D. Zarzoso et al.: *Nonlinear interaction between energetic particles and turbulence in gyro-kinetic simulations and impact on turbulence properties*, Nuclear Fusion, 57 (2017) 072011.
- [17] The U.S. Department of Energy: *The Exascale Computing Project* <https://www.exascaleproject.org/exascale-computing-project/>
- [18] The European Commission: *Shaping Europe’s digital future* <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en>
- [19] I. G. Abel et al.: *Multiscale gyrokinetics for rotating tokamak plasmas: fluctuations, transport and energy flows*, Reports on Progress in Physics, 76 (2013) 116201.
- [20] H. Grad: *Plasmas*, Physics Today, 22 (12) (1969) 34.
- [21] A. Hasegawa and L. Chen: *Kinetic processes in plasma heating by resonant mode conversion of Alfvén wave*, Physics of Fluids, 19 (1976) 1924.
- [22] F. Zonca et al.: *Energetic particles and multi-scale dynamics in fusion plasmas*, Plasma Physics and Controlled Fusion, 57 (2015) 014024.
- [23] M.V. Falessi, F. Pegoraro, and T.J. Schep: *Lagrangian coherent structures and plasma transport processes*, Journal of Plasma Physics, 81 (2015) 1469-7807.
- [24] X. Wang, S. Briguglio, C. Di Troia, M. V. Falessi, G. Fogaccia, V. Fusco, G. Vlad, and F. Zonca: *Analysis of the nonlinear dynamics of a chirping-frequency Alfvén mode in a tokamak equilibrium*, Physics of Plasmas, 29 (2022) 032512.
- [25] F. Zonca et al.: *Nonlinear dynamics of phase-space zonal structures and energetic particle physics in fusion plasmas*, New Journal of Physics, 17 (2015) 013052.
- [26] M. V. Falessi and F. Zonca: *Transport theory of phase space zonal structures*, Physics of Plasmas, 26 (2019) 022305.
- [27] F. Zonca, L. Chen, M. V. Falessi, and Z. Qiu: *Nonlinear radial envelope evolution equations and energetic particle transport in tokamak plasmas*, Journal of Physics: Conference Series, 1785 (2021) 012005.
- [28] F. Crisanti et al.: *The Divertor tokamak Test facility proposal: Physical requirements and reference design*, Nuclear Materials and Energy, 12 (2017) 1330.
- [29] R. Albanese et al.: *Design review for the Italian Divertor tokamak Test facility*, Fusion Engineering and Design, 146 (2019) 194.
- [30] Y. Li, M.V. Falessi, P. Lauber, Y. Li, Z. Qiu, G. Wei, and F. Zonca: *Physics of drift Alfvén instabilities and energetic particles in fusion plasmas*, Plasma Physics and Controlled Fusion, submitted (2022).
- [31] S. I. Braginskii: *Transport Phenomena in a Completely Ionized Two-Temperature Plasma*, Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics, 6 (1958) 358.
- [32] S. I. Braginskii: *Transport Processes in a Plasma*, Reviews of Plasma Physics, 1 (1965) 205.
- [33] X. Bonnin et al.: *Presentation of the New SOLPS-ITER Code Package for tokamak Plasma Edge Modelling*, Plasma and Fusion Research, 11 (2016) 1403102.
- [34] L. Chen et al.: *A Gyrokinetic simulation model for low frequency electromagnetic fluctuations in magnetized plasmas*, SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy, 64 (2021) 245211.
- [35] F. Zonca, X. Tao and L. Chen: *A Theoretical Framework of Chorus Wave Excitation*, Journal of Geophysical Research: Space Physics, 127 (2022) e2021JA029760.

Matteo Valerio Falessi: è ricercatore presso il Centro di Ricerca ENEA di Frascati ed esperto di teoria girocinetica e dinamica non lineare che applica allo studio della fisica delle particelle energetiche nei plasmi fusionistici. Ha pubblicato diversi articoli sulla teoria girocinetica e sulla fisica delle particelle energetiche tra cui *Transport theory of phase space zonal structures* (Physics of Plasmas 26, 022305, 2019) con il Dr. F. Zonca. È inoltre coinvolto in varie collaborazioni internazionali, tra cui l’Enabling Research Project ATEP (EUROfusion) e la collaborazione ENEA-IFTS-NFRI. Ha ricevuto l’EPS Physics division PhD Prize nel 2018.

Fulvio Zonca: è Dirigente di Ricerca e Coordinatore del *Center for Nonlinear Plasma Science* presso il Centro Ricerche ENEA di Frascati dove lavora dal 1988, e Professore Aggiunto dal 2009 presso l’Institute for Fusion Theory and Simulation, Zhejiang University, Hangzhou, in Cina, presso la quale è Qíushì Chair Professor dal 2020. È autore di più di 190 articoli su riviste internazionali, tra cui *Physics of Alfvén waves and energetic particles in burning plasmas* (Review of Modern Physics 88, 015008, 2016) col Prof. Liu Chen e *Nonlinear dynamics and phase space transport by chorus emission* (Reviews of Modern Plasma Physics 5, 8, 2021) con il Prof. Xin Tao e il Prof. Liu Chen.

Il moto browniano

Franco Flandoli Scuola Normale Superiore, Pisa

Il moto browniano

Probabilmente da considerarsi il Principe dei processi stocastici, esso ha trovato sempre posto in Fisica a partire dai primi anni del 1900, oltre che in altre discipline come la Finanza Matematica, dove forse si può rintracciare per la prima volta in assoluto, nella tesi di dottorato di Bachelier [1]. Tra i contributi forse meno noti nell'ambito della Fisica può essere curioso ricordare la tesina per il raggiungimento del Diploma di Laurea presso la Scuola Normale Superiore da parte di Enrico Fermi, discussa il 20 giugno 1922, poi pubblicato sul Nuovo Cimento [2] (si può trovare una rivisitazione in [3]).

Ricordiamo che uno spazio di probabilità $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$ è una terna composta da un insieme non vuoto Ω , che potremmo chiamare universo degli eventi elementari $\omega \in \Omega$, una famiglia \mathcal{F} di sotto-insiemi di Ω (che sia una σ -algebra, concetto che non definiamo qui) ed una misura di probabilità \mathbb{P} su \mathcal{F} . Come insegnato da Kolmogorov [4], questo è un ottimo costruito su cui basare le nozioni di variabile aleatoria, processo stocastico, probabilità condizionale e indipendenza e tante altre.

Sia $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$ uno spazio di probabilità. Un moto browniano è un processo stocastico, ovvero una funzione misurabile $B : [0, \infty) \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}$, che scriveremo $B_t(\omega)$ o quasi sempre solamente B_t , con le seguenti proprietà:

1. $B_0 = 0$
2. per ogni $t \geq s \geq 0$ l'incremento $B_t - B_s$ è una variabile aleatoria gaussiana di media zero e varianza $t - s$

3. per ogni successione finita $t_n \geq t_{n-1} \geq \dots \geq t_0 \geq 0$ gli incrementi $B_{t_n} - B_{t_{n-1}}, \dots, B_{t_1} - B_{t_0}$ sono indipendenti

4. per ogni $\omega \in \Omega$, la traiettoria $t \mapsto B_t(\omega)$ è una funzione continua, da $[0, \infty)$ in \mathbb{R} .

Le proprietà 1 e 4 possono anche essere richieste a meno di un insieme di $\omega \in \Omega$ di probabilità zero. L'andamento di un moto browniano B_t è sicuramente assai erratico, come stabilito dalla proprietà 3: ogni nuovo passetto in avanti è indipendente dai precedenti. Ma ancor di più la proprietà 2 quantifica il grado di erraticità. Infatti, il rapporto incrementale $(B_t - B_s)/(t - s)$, per una nota proprietà delle gaussiane rispetto a moltiplicazione per costanti, è una variabile aleatoria gaussiana di media zero e varianza $1/(t - s)$. Da qui si intuisce che le traiettorie del moto browniano non dovrebbero essere funzioni derivabili, perché per $t - s$ molto piccolo, il rapporto incrementale $(B_t - B_s)/(t - s)$, è enorme e di segno variabile. Con una dimostrazione piuttosto complessa si riesce a vedere addirittura che (a meno di un insieme di $\omega \in \Omega$ di probabilità zero) la traiettoria $t \mapsto B_t(\omega)$ non è differenziabile in alcun punto! Non è facile costruire funzioni continue ma non differenziabili in alcun punto; eppure questa proprietà vale per quasi ogni traiettoria del moto browniano.

Il teorema capito da Fermi [2], pur non formulato esplicitamente per il moto browniano ma solo per una sua approssimazione discreta, la passeggiata aleatoria, si può parafrasare dicendo che, se si calcola il massimo del moto browniano

su un intervallo $[0, t]$

$$M_t = \max_{s \in [0, t]} B_s$$

il processo M_t ha le stesse proprietà statistiche del valore assoluto di B_t : per esempio

$$\mathbb{P}(M_t > a) = \mathbb{P}(|B_t| > a)$$

per ogni numero reale a . Fermi utilizzò questa “legge del massimo” in un problema di astrofisica, nella sua tesina per il diploma della Normale [2].

Le equazioni differenziali stocastiche

Anche se, per le applicazioni, è a volte molto utile considerare equazioni differenziali con parametri aleatori, dati iniziali aleatori, forzanti aleatorie aventi traiettorie un po’ regolari, il termine equazione differenziale stocastica è riservato ad una classe assai particolare, ma dalle proprietà ricchissime rispetto ai casi sopra citati dei parametri aleatori ecc.: equazioni differenziali euristicamente della forma

$$dX_t = b(t, X_t) dt + \sigma(t, X_t) dB_t \quad (1)$$

dove B_t è un moto browniano. Per evitare inutili complicazioni simboliche, limitiamoci a discutere il caso uni-dimensionale. Anche la soluzione X_t (quando esista) sarà un processo stocastico a traiettorie continue; mentre $b, \sigma : [0, \infty) \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ sono funzioni (deterministiche) date. La presenza lineare del moto browniano in queste equazioni è obbligata dalla difficoltà tecnica di definire gli oggetti: la derivata temporale di una traiettoria di B_t non esiste, ed operazioni nonlineari riguardanti dB_t/dt sono troppo complesse. Già il prodotto di dB_t/dt con $\sigma(t, X_t)$ è un’operazione di grande complessità, superata però classicamente dalla teoria dell’integrazione di Itô [5], più recentemente dalla teoria dei *rough-paths* [6]. Visto il carattere non classico dell’operazione di prodotto $\sigma(t, X_t) dB_t$ ed anche il fatto che X_t non avrà proprietà di regolarità migliori di B_t (come si intuisce dal fatto che dX_t e dB_t sono proporzionali), quindi anche la derivata dX_t/dt non esiste, si è deciso di adottare la notazione (1), piuttosto insolita in Matematica, così da rammentare la

necessità di un’interpretazione speciale. Che è l’interpretazione integrale

$$X_t = X_0 + \int_0^t b(s, X_s) ds + \int_0^t \sigma(s, X_s) dB_s$$

una volta che l’integrale $\int_0^t \sigma(s, X_s) dB_s$ sia stato bene definito [5], [6].

Le equazioni stocastiche trovano applicazioni in svariate scienze, prima di tutto in Fisica, ma anche in Finanza, in Biologia ed altre. Le soluzioni X_t sono un po’ come dei moti browniani più flessibili, cioè hanno fluttuazioni ed irregolarità simili a B_t , che ne motivano l’uso nei campi in cui queste fluttuazioni ed irregolarità vengono osservate sperimentalmente, ma al tempo stesso possono avere proprietà aggiuntive o diverse. Ad esempio, la soluzione del problema

$$dX_t = -X_t dt + dB_t$$

somiglia ad un moto browniano ma fluttuante in modo stazionario (almeno dopo che il breve transitorio sia passato) attorno a $x = 0$, mentre il moto browniano ha una certa tendenza a divergere come $\pm\sqrt{t}$ quando t cresce. Oppure la soluzione X_t del sistema newtoniano

$$dX_t/dt = V_t$$

$$dV_t = -\frac{1}{\tau} V_t dt + \frac{1}{\tau} dB_t$$

descrive ottimamente una particella browniana, cioè immersa in un fluido e così leggera da risentire degli urti molecolari (descritti dal termine $\frac{1}{\tau} dB_t$), con tempo di rilassamento τ (come prescrive il termine $-V_t dt/\tau$). Quando $\tau \rightarrow 0$, si può dimostrare che X_t tende al moto browniano teorico (per la precisione, X_t tende a $X_0 + B_t$).

Tra le ragioni di interesse sia applicativo sia teorico per le equazioni differenziali stocastiche, citiamo il loro legame con varie equazioni alle derivate parziali di tipo parabolico ed ellittico, denominate Fokker-Planck e Kolmogorov. Rimandiamo a testi specializzati [7].

Regolarizzazione e selezione tramite rumore

Concludiamo questa introduzione velocissima citando un’interessante direzione di ricerca sulle

equazioni differenziali stocastiche. È ben noto il fenomeno di Peano, cioè la mancanza di unicità per equazioni della forma (a titolo di esempio, scegliamo la potenza $1/3$ invece che la solita $1/2$, in onore della “legge di Richardson” in teoria della turbolenza)

$$\frac{dx(t)}{dt} = |x(t)|^{1/3}, \quad x(0) = 0.$$

Oltre alla soluzione nulla, che indicheremo con $x_-(t)$, è soluzione anche $x_+(t) = Ct^{3/2}$ ($C = (2/3)^{3/2}$); e lo sono anche le curve $x_{t_0}(t) = C(t - t_0)^{3/2} 1_{\{t \geq t_0\}}$ per ogni $t_0 \geq 0$, che formano il “ciuffo di Peano”.

Se ora si prende l’equazione differenziale stocastica

$$dX_t = |X_t|^{1/3} dt + \epsilon dB_t, \quad X_0 = 0$$

con $\epsilon > 0$, essa ha soluzione unica! Ci sono varie nozioni di unicità per le equazioni stocastiche ma in questo caso valgono tutte, quindi non ci addentriamo nei particolari. Questo è un esempio del fenomeno della regolarizzazione con rumore, valido in vari casi, anche per alcune equazioni alle derivate parziali [8].

Inoltre, quando $\epsilon \rightarrow 0$, la soluzione X_t^ϵ del problema precedente tende a $x_+(t)$. Questo ed altri risultati di selezione, per equazioni deterministiche prive di unicità, si possono trovare in [9]. Purtroppo la teoria multidimensionale o addirittura infinito dimensionale (equazioni alle derivate parziali) resta poco compresa. Il problema è considerato della massima rilevanza ad esempio in fluidodinamica, a causa dei recenti risultati di non unicità per equazioni di Eulero [10] e Navier-Stokes [11]. Stando al recente risultato [12], la situazione sembra davvero complicata.



- [1] L. Bachelier: *Théorie de la spéculation*, Annales scientifiques de l’É.N.S. 3e série, 17 (1900) 21.
- [2] E. Fermi: *Sopra una formula di calcolo delle probabilità*, Nuovo Cimento, 3 (1926) 313.
- [3] F. Flandoli: *Un teorema di calcolo delle probabilità di Enrico Fermi*, Quaderni di Storia della Fisica, 28 (2023) .
- [4] A. Kolmogorov: *Fondamenti della teoria della probabilità (Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitsrechnung)*, Springer, Berlin (1933).

- [5] D. Revuz, M. Yor: *Continuous martingales and Brownian motion*, Springer, Berlin (2013).
- [6] T. J. Lyons: *Differential equations driven by rough signals*, Revista Matemática Iberoamericana, 14 (1998) 215.
- [7] D.W. Stroock, S.R.S. Varadhan: *Multidimensional diffusion processes*, Springer, Berlin (1997).
- [8] F. Flandoli: *Random Perturbation of PDEs and Fluid Dynamic Models: École d’été de Probabilités de Saint-Flour XL–2010*, Springer, Berlin (2011).
- [9] R. Bafico, P. Baldi: *Small random perturbations of Peano phenomena*, Stochastics, 6 (1982) 279.
- [10] C. De Lellis, L. Székelyhidi Jr.: *The Euler equations as a differential inclusion*, Ann. of Math., 170 (2009) 1417.
- [11] D. Albritton, E. Brué, M. Colombo: *Non-uniqueness of Leray solutions of the forced Navier-Stokes equations*, Ann. of Math., 196 (2022) 415.
- [12] M. Colombo, G. Crippa, M. Sorella: *Anomalous dissipation and lack of selection in the Obukhov-Corrsin theory of scalar turbulence*, arXiv:2207.06833.



Franco Flandoli: laureato in Matematica presso l’Università di Pisa ed allievo della Scuola Normale Superiore (SNS), professore di Analisi Matematica e poi di Probabilità e Statistica presso le università di Torino, la SNS di Pisa, l’Università di Pisa ed ora alla SNS. Si occupa di equazioni differenziali stocastiche ed altre dinamiche stocastiche sia per problemi interni alla matematica, sia in applicazioni alla fluidodinamica ed a volte in biomedicina, geofisica, nello studio dei cambiamenti climatici e della transizione energetica.

Teoria Gravitazionale e Applicazioni Cosmologiche: Possibili Sviluppi Futuri

Maurizio Gasperini

*Dipartimento Interateneo di Fisica, Università di Bari
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Bari, Bari, Italy*

Una rapida rassegna di alcuni tra i principali argomenti che riguardano l'interazione gravitazionale e la cosmologia, e che sono attualmente in corso di studio e di dibattito. Si parlerà in particolare del principio di equivalenza, di materia oscura, di energia oscura, della costante cosmologica, di gravità quantistica, e dell'Universo primordiale.

1. Piccole e grandi distanze

Come in tutti i campi della fisica (teorica e sperimentale), anche nell'ambito della gravitazione e della cosmologia ci sono diversi problemi attualmente aperti, alcuni dei quali decisamente importanti. Essendo di professione un fisico teorico, in questa breve nota mi concentrerò sulla discussione di tali problemi e sulla loro possibile evoluzione futura in un contesto puramente teorico/fenomenologico.

Possiamo subito fare una prima – e apparente-

mente ovvia – distinzione tra gli effetti gravitazionali da scoprire (o semplicemente da verificare) alle piccole distanze e quelli alle grandi distanze (come vedremo in seguito, però, tale separazione è valida se le distanze non sono troppo piccole o troppo grandi).

Sappiamo infatti che alle ordinarie distanze macroscopiche la gravità è molto ben descritta dalla relatività generale di Einstein, che si riduce alla teoria di Newton nel limite in cui tutti gli effetti relativistici sono trascurabili. La teoria di Einstein è basata sul principio di equivalenza, ossia, da un punto di vista più formale, sull'ipotesi che l'interazione gravitazionale sia completamente descritta dallo scambio di particelle di spin 2 e massa nulla, i gravitoni (si veda ad esempio [1]), che si accoppiano in modo universale – ossia, con la stessa intensità – a tutte le forme di energia. Ma cosa succede a distanze molto piccole o molto grandi, non direttamente accessibili agli attuali *test* del principio di equivalenza [2]?

A piccole distanze potrebbe entrare in gioco una ulteriore componente dell'interazione gra-

vitazionale mediata da nuove particelle massive, che producono forze a corto raggio d'azione (e sono quindi invisibili a livello macroscopico) e che dipendono dalla struttura interna dei corpi (ad esempio, dalla loro carica barionica). A grandi distanze, invece, potrebbe esserci il contributo di altre particelle, con massa nulla o talmente piccola da generare forze a lunghissimo raggio, che si accoppiano diversamente ai vari tipi di materia ma così debolmente da produrre effetti sensibili solo quando l'ordinaria gravità macroscopica è trascurabile (ad esempio, a livello cosmico).

In entrambi i casi la teoria gravitazionale di Einstein andrebbe modificata, e in modo diverso a seconda delle distanze coinvolte. Per quel che riguarda il prossimo futuro (diciamo i prossimi dieci anni) personalmente non mi aspetto che vengano trovate violazioni del principio di equivalenza (o delle equazioni gravitazionali standard) mediante esperimenti effettuati a distanze minori di quelle che riguardano le attuali verifiche, che si spingono fino ad una scala di circa 10^{-3} cm [3]. Se andiamo a distanze molto più piccole entriamo infatti nel regime molecolare, atomico, nucleare, etc, dove le interazioni dominanti sono svitati ordini di grandezza più intense di quella gravitazionale, e gli effetti della gravità diventano fisicamente invisibili.

2. Gravità cosmica oscura

Per quel che riguarda la gravità a grandi distanze, invece, sono più possibilista. In quel caso, infatti, non si tratta (solo) di effettuare verifiche sperimentali del principio di equivalenza, ma anche di confrontare le previsioni della teoria standard con la dinamica delle sorgenti gravitazionali dominanti su grandi scale. E se ci spingiamo alle massime scale cosmiche osservabili (scala galattica, intergalattica e scala di Hubble) abbiamo vari interrogativi attualmente aperti, tra cui, in particolare, quelli che riguardano la corretta interpretazione delle quantità denominate materia oscura e energia oscura.

Tutti i tentativi finora effettuati di identificare queste sorgenti di gravità cosmica come composte di particelle, o come campi, previsti dal modello standard (o dalle sue generalizzazioni) sono da una parte certamente compatibili con le attuali osservazioni, ma, dall'altra parte,

non si è ancora trovata una indiscutibile prova (diretta o indiretta) che sia a favore di uno specifico modello e smentisca tutte le altre possibili interpretazioni.

Per cui, va anche seriamente considerata la possibilità (studiata da molti gruppi di ricerca) che le modifiche del modello cosmologico standard, prodotte da esotiche componenti oscure introdotte per mantenere invariate le equazioni gravitazionali a livello cosmico, siano invece prodotte da una dinamica gravitazionale cosmica che è diversa da quella macroscopica, e che non può essere correttamente (o completamente) descritta dalle equazioni della teoria di Einstein.

Per riportare solo qualcuno dei possibili e numerosi esempi, la corretta teoria che non richiede la presenza di materia oscura potrebbe essere basata su un modello di spazio-tempo che a grandi scale ha una struttura geometrica di tipo frattale anziché Riemanniana [4]; oppure, a grandi scale, potrebbero entrare in gioco nuovi e diversi contributi della geometria all'interazione gravitazionale con la materia [5]; e così via. Io credo, o perlomeno auspico, che interrogativi di questo tipo possano venire almeno parzialmente risolti grazie alla precisione sempre crescente delle osservazioni astronomiche che sono in corso, e che sono previste per il prossimo futuro.

3. Costante cosmologica

In questo contesto si ritrova anche quello che probabilmente è uno dei problemi più famosi non solo della teoria gravitazionale ma di tutta l'attuale scienza fisica: il problema della costante cosmologica. La componente cosmica di energia oscura, infatti, è stata inventata proprio per evitare di inserire direttamente una costante cosmologica nelle equazioni di Einstein. Ma perché dovremmo evitare questa semplice operazione formale?

Perché la costante cosmologica rappresenta, fisicamente, la densità d'energia totale del vuoto. Se cerchiamo di calcolarla, includendo il contributo di tutte le interazioni descritte dalle attuali teorie unificate, troviamo un valore esattamente nullo se il vuoto gode di importanti simmetrie come la supersimmetria tra campi bosonici e fermionici. Se tali simmetrie sono rotte, invece, si ottiene per la costante cosmologica un va-

lore talmente elevato da risultare inaccettabile (per ottenere il valore giusto bisognerebbe far ricorso a modelli di spazio-tempo molto esotici [6]). Ecco dunque un tipico esempio di effetto che impedisce (come preannunciato) una netta distinzione tra la fisica delle piccole e delle grandi distanze: infatti, l'energia di punto zero dei campi quantistici a livello microscopico, che contribuisce all'energia del vuoto, potrebbe avere effetti sull'evoluzione dell'intero Universo a livello cosmico.

4. Gravità quantistica

Tornando alle piccole distanze, non posso non menzionare quello che a mio avviso è il più importante problema aperto: la formulazione di una corretta teoria gravitazionale quantistica. Per affrontare (ed eventualmente risolvere) tale problema è necessario riferirsi a scale di distanze non solo molto più piccole di quelle che entrano in gioco nella verifica del principio di equivalenza, ma anche molto più piccole delle minime distanze accessibili con gli attuali acceleratori di altissima energia (circa 10^{-16} cm).

Una consistente e completa quantizzazione della gravità, infatti, è inevitabilmente e strettamente legata alla soluzione di altri enigmi che riguardano ad esempio la presenza di nuove (super-)simmetrie, di dimensioni spaziali e/o temporali extra (quante?), di una struttura discreta della geometria microscopica, di una corrispondente scala di lunghezza minima che impedisce (anche concettualmente) la nozione di oggetti puntiformi, di una possibile modifica del principio di indeterminazione. E così via.

Personalmente non mi aspetto che indizi di questa nuova fisica possano apparire alle energie (e quindi alle scale di distanza) raggiungibili dagli acceleratori di particelle disponibili ora e in un prossimo futuro. La ragione, a mio avviso, è che non può esistere un modello di gravità quantistica esatto, consistente a tutti gli ordini di approssimazione, e nel quale gli effetti quantistici della gravità diventino confrontabili con quelli delle altre interazioni, se non nell'ambito di uno schema teorico che descriva in modo unificato tutte le interazioni fondamentali.

L'unico schema teorico attualmente in grado di realizzare questa unificazione – perlo-

meno in linea di principio – è la teoria delle (super)stringhe. E così come l'unificazione delle interazioni elettromagnetiche, deboli e forti è caratterizzata dalla cosiddetta scala di grande unificazione, ossia da scale di energia dell'ordine dei 10^{15} GeV, l'unificazione completa che include anche la gravità è caratterizzata dalla scala di stringa, che si pensa corrispondere a energie pari a circa un decimo di quella di Planck, ossia a energie dell'ordine dei 10^{18} GeV. Alla scala di Planck, tra parentesi, le equazioni della relatività generale diventano quantisticamente inconsistenti anche secondo l'ordinaria teoria quantistica dei campi.

Sono dunque queste, secondo l'attuale schema teorico, le scale di energia, e le corrispondenti scale di distanza (dell'ordine dei 10^{-32} cm), alle quali dovremmo arrivare per verificare le conseguenze di un modello esatto di gravità quantistica (e distinguerlo dalle sue approssimate versioni semiclassiche, che a quelle scale non sono più valide).

5. Universo primordiale

E qui troviamo un altro stretto collegamento tra le piccolissime e le grandissime distanze. Se non possiamo trovare tracce di effetti gravitazionali quantistici alle piccole scale con esperimenti di laboratorio (perché è impensabile che gli attuali rivelatori possano migliorare di tanti ordini di grandezza il loro massimo regime energetico, pari a circa 10^3 GeV), potremmo però trovarle alle grandi scale di distanza.

Guardare lontano nello spazio, infatti, significa guardare indietro nel tempo (perché i segnali viaggiano a velocità finita, e più lontane sono le sorgenti, più vecchie sono le informazioni che oggi riceviamo). Il nostro Universo, d'altra parte, si sta espandendo, per cui segnali più vecchi corrispondono a epoche più remote nelle quali l'Universo era molto più piccolo, e quindi più denso, più caldo e più curvo. In altri termini, i segnali più lontani ci portano fotografie di uno stato cosmico caratterizzato da una scala di energia molto più elevata, e una scala di distanza molto più piccola, di quelle attuali.

Ci sono dei limiti, però, alla possibilità di raccogliere informazioni dirette sullo stato primordiale dell'Universo. Se ci basiamo, ad esempio, sui

segnali elettromagnetici attualmente accessibili alla nostra informazione possiamo allora risalire al massimo fino all'epoca del cosiddetto *decoupling* (disaccoppiamento), alla quale l'Universo è diventato trasparente alla radiazione elettromagnetica, che ha potuto quindi propagarsi fino ai giorni nostri.

In tempi precedenti l'Universo era così denso che la radiazione elettromagnetica emessa veniva immediatamente riassorbita dalla materia circostante, per cui tale radiazione non è più accessibile alla nostra diretta osservazione. La scala di energia del *decoupling* è milioni di volte superiore alla attuale scala di energia cosmica, ma è purtroppo ancora molto lontana da quelle scale – menzionate in precedenza – alle quali ci aspettiamo che la gravità venga modificata dagli effetti quantistici.

Se crediamo nel modello cosmologico standard, però, l'evoluzione cosmica non parte dal *decoupling*. Possiamo andare più indietro nel tempo, trovando che l'energia, la densità, la temperatura continuano a crescere senza limiti, raggiungendo inevitabilmente (perlomeno in linea di principio) anche la scala di stringa e la scala di Planck, alle quali gli effetti gravitazionali quantistici dovrebbero essere rilevanti.

Diventa quindi cruciale chiedersi: che informazioni potremmo avere su queste epoche così remote, e precedenti al *decoupling*? In particolare, sulle fasi primordiali che l'Universo ha attraversato subito dopo (o subito prima) l'enigmatica epoca del *Big Bang*? Sottolineo per chiarezza che il termine *Big Bang* va qui inteso (come più volte ribadito anche dal collega e amico Gabriele Veneziano) non tanto in senso formale come un'ipotetica singolarità iniziale, quanto invece in senso fisico come l'epoca del cosiddetto *reheating* (riscaldamento), caratterizzata da un'esplosiva produzione di particelle di altissima energia che rapidamente si diffondono riempiendo tutto lo spazio al momento disponibile, e segnando così l'inizio della fase cosmologica standard dominata dalla radiazione.

6. Radiazione gravitazionale fossile

Concludiamo questa breve discussione cercando di rispondere alla domanda formulata alla fine della sezione precedente. La risposta (forse sorprendentemente) è positiva: non possiamo ricevere segnali elettromagnetici da quelle epoche così remote, ma possiamo ricevere le loro fotografie stampate sulla radiazione gravitazionale che è stata emessa grazie agli effetti quantistici durante quelle epoche e che, al contrario della radiazione elettromagnetica, si è potuta propagare liberamente fino ai giorni nostri. Tale radiazione potrebbe essere direttamente rivelata dalle antenne gravitazionali attualmente in funzione, o da quelle di prossima costruzione, non appena verrà raggiunta la sensibilità necessaria [7].

E in che modo questi segnali potrebbero darci informazioni sulla dinamica primordiale e sul corretto modello di gravità quantistica da usare? In un modo molto semplice. Lo spettro (ossia, l'andamento in frequenza) di questa radiazione gravitazionale fossile riproduce esattamente (come una fotografia, appunto) l'andamento nel tempo della curvatura dell'Universo durante le epoche in cui è stata prodotta.

D'altra parte, la curvatura cosmica prima del *reheating* è prevista essere decrescente nel tempo (o al massimo costante) secondo i modelli di evoluzione primordiale (e inflazionaria), basati sulla quantizzazione della Relatività Generale; crescente nel tempo, invece, secondo i modelli basati sulla teoria delle stringhe. Di conseguenza, ci possiamo aspettare un fondo di radiazione gravitazionale fossile con spettro decrescente (o piatto) in frequenza per i modelli cosmologici standard, crescente in frequenza per i modelli di cosmologia di stringa [8].

Tale differenza è cruciale perchè con uno spettro crescente l'intensità del segnale gravitazionale cresce con l'aumentare della frequenza, e quindi ha più probabilità di essere rivelato nel *range* di frequenze (relativamente alte rispetto alle tipiche frequenze cosmiche) nel quale sono sensibili le attuali antenne. Il contrario avviene invece per lo spettro del modello standard, che prevede dunque in quel *range* un segnale troppo debole per essere attualmente rivelato.

La scoperta e la misura di un fondo cosmico di onde gravitazionali fossile, residuo di epoche primordiali, potrebbe quindi darci conferma degli effetti fisici prodotti dalla gravità quantistica, nonché importanti indicazioni per la quantizzazione e l'unificazione di tutte le interazioni fondamentali. Speriamo che ciò avvenga in un futuro non troppo lontano, in modo tale che tutti i lettori del presente articolo possano assistere e partecipare a questi importanti progressi scientifici.

Ringraziamenti

Questo lavoro è parzialmente supportato dall'INFN mediante il programma TAsP: "Theoretical Astroparticle Physics", e dal progetto di ricerca numero 2017W4HA7S "NAT-NET: Neutrino and Astroparticle Theory Network", finanziato nel contesto del PRIN 2017 dal Ministero dell'Università e della Ricerca (MUR).



- [1] M. Gasperini: *Le onde gravitazionali nella fisica moderna*, Ithaca: Viaggio nella Scienza, XII (5) 2018. <http://ithaca.unisalento.it/>
- [2] M. Gasperini: *Gravity at finite temperature, equivalence principle, and local Lorentz invariance*, in "Breakdown of the Einstein's Equivalence Principle", ed. by A. G. Lebed (World Scientific, 2023, Cap. 3, p. 77).
- [3] P. Touboul et al: *Space test of the equivalence principle: first results of the MICROSCOPE mission*, Class. Quantum Grav., 36 (225006) 2019.
- [4] L. Cosmai, G. Fanizza, F. Sylos Labini, L. Pietronero and L. Tedesco: *Fractal universe and cosmic acceleration in a Lemaitre-Tolman-Bondi scenario*, Class. Quantum Grav., 36 (2019) 4.045007
- [5] G. Fanizza, G. Franchini, M. Gasperini and L. Tedesco: *Comparing the luminosity distance for gravitational waves and electromagnetic signals in a simple model of quadratic gravity*, Gen. Rel. Grav., 52 (2020) 11.111
- [6] M. Gasperini: *Higher-dimensional perturbations of the vacuum energy density*, JHEP, 06 (2008) 009.
- [7] Y. Jiang, X. L. Fan and Q. G. Huang: *Search for stochastic gravitational-wave background from string cosmology with Advanced LIGO and Virgo's O1-O3 data*, preprint, arXiv:2302.03846 ([gr-qc]).
- [8] M. Gasperini: *Elementary introduction to pre - big bang cosmology and to the relic graviton background*, in "Gravitational Waves", edited by I. Ciufolini, V. Gorini, U. Moschella and P. Fre' (IOP Publishing, Bristol, 2001) p. 280-337. ISBN: 0-7503-0741-2; hep-th/9907067

Maurizio Gasperini: attualmente in pensione, è stato professore ordinario di Fisica Teorica all'Università di Bari. Ha svolto (e svolge) attività scientifica e didattica nel campo della relatività, della cosmologia, della gravitazione e della teoria delle interazioni fondamentali. È stato in precedenza ricercatore all'Università di Torino, *Academic Staff Member* alla Università della California (Santa Barbara) e *Scientific Associate* al CERN dove, in collaborazione con Gabriele Veneziano, ha formulato e sviluppato un modello di universo primordiale basato sulla teoria delle stringhe. Per ulteriori dettagli si veda <http://www.ba.infn.it/~gasperin/academic.html>

Il futuro della medicina

Chiara Gerardi e Silvio Garattini

IRCCS- Istituto di Ricerche Farmacologiche "Mario Negri", Milano

In questo articolo proponiamo una nostra visione sul futuro della medicina. Presentiamo un discorso che racchiude alcune parole chiave: ricerca, etica, prevenzione, donna.

Non c'è futuro della medicina senza ricerca (clinica)

L'unico modo che ha la medicina per volgere uno sguardo al futuro è quello appunto della ricerca scientifica. Senza questa, non potremmo avere speranza per le patologie che ad oggi non hanno una cura definitiva o un trattamento che può migliorare le condizioni, la qualità o la durata della vita di un paziente.

La ricerca clinica, in modo particolare, quale ultimo *step* del processo di ricerca e sviluppo di un farmaco, *medical device* o intervento chirurgico, rappresenta in maniera particolare quel *tres d'union* tra il laboratorio e la pratica medica. Questi studi infatti, hanno lo scopo di verificare l'efficacia e la sicurezza di un trattamento sui pazienti o in alcuni casi su volontari sani, dopo che sono stati fatti i *test* di laboratorio e la sperimentazione animale. Costituisce l'ultimo tassello della ricerca medica prima dell'immissione in commercio del farmaco e la sua valutazione su larga scala, in condizioni di pratica clinica.

Se fino a ieri però, vi era una netta divisione tra il mondo della ricerca e l'ospedale, la pandemia causata dal virus Covid-19 ci ha insegnato a non vedere più il prima e dopo della sperimentazione. Abbiamo imparato che, mettendo al primo posto l'etica e la sicurezza del paziente, seppur

convivendo con l'incertezza, si può fare ricerca in situazioni di emergenza estrema accorciando le distanze tra la ricerca e la clinica. L'avvento e la scoperta dei vaccini durante questi ultimi tre anni ha rappresentato un punto di svolta, un momento in cui ci siamo resi tutti conto che una domanda clinica urgente, una pandemia che ha provocato milioni di morti, necessitava di essere fermata e ciò è stato possibile grazie a un immediato riscontro da parte del mondo scientifico che ha studiato e messo a punto il farmaco adatto alla situazione.

Ciò è stato possibile anche grazie all'unione delle forze di diversi esperti e competenze messe a disposizione con il grande scopo di migliorare la sopravvivenza dei pazienti colpiti dal virus che ha causato la pandemia globale.

L'urgenza di rispondere ad un quesito clinico non deve essere trasformata però in un taglio ai fondi di ricerca o un azzeramento di studi e ricerche per far approvare in tempi stretti un farmaco sul mercato, riducendo drasticamente i tempi fisiologici per indagarne la sua efficacia e sicurezza. Dare una cura ad un male che non lascia possibilità di uscita, è un bisogno clinico urgente ma per essere certi del rapporto rischio beneficio di un trattamento non si può ridurre il suo percorso di studio e ricerca e sviluppo.

Ci si è chiesto, spesso negli ultimi anni se davvero abbiamo bisogno degli studi clinici, per le loro lunghe tempistiche, per le difficoltà di includere pazienti, per le lungaggini burocratiche e gli enormi costi che comporta fare ricerca sull'uomo.

La risposta è affermativa. Fare ricerca con le giuste professionalità (clinici, statistici, biologi, farmacisti eticisti, informatici...) è l'unico modo

che abbiamo per tutelare i pazienti dalla fretta di un mercato volto a raggiungere in tempi brevi profitti. Fare ricerca ci aiuta anche a porre argine alle pretese alte di costi insormontabili per il nostro Servizio Sanitario Nazionale, relativamente a nuovi farmaci, *device*, macchinari per interventi chirurgici e molto altro.

Ci aiuta a discernere se ciò che è definito come “novità” è davvero un’innovazione terapeutica per il paziente, e che quindi contribuisce ad allungare la sua sopravvivenza, evita la ricomparsa della malattia o dei suoi sintomi o meglio ancora ne modifica il suo decorso.

Etica: il ruolo dei pazienti e della ricerca

Leggiamo sempre più spesso slogan relativamente all’inclusione e partecipazione dei pazienti alla ricerca medica.

Questo è di vitale importanza ma ciò deve essere messo in pratica prima di tutto da chi si occupa di scienza e ricerca conducendo studi eticamente e metodologicamente validi.

Chiedere e ottenere un ruolo attivo del paziente o del cittadino al tavolo dei decisori o al momento della progettazione di uno studio clinico è di fondamentale importanza ma non basta.

Mettere al primo posto l’etica nei progetti di ricerca non vuol dire solo porsi delle domande sulla liceità del trattamento in esame, ma significa anche progettare degli studi clinici metodologicamente corretti, abbandonare l’utilizzo del placebo nel gruppo di confronto quando esiste un gold standard terapeutico. Significa scegliere degli studi di superiorità e non di non inferiorità (accetto che il mio farmaco sia leggermente meno efficace dello standard a fronte di un beneficio di sicurezza, per esempio). Eticità della ricerca significa anche scegliere degli esiti di valutazione delle terapie in esame volte a valutare il beneficio clinico reale per il paziente, per esempio relativamente a una sperimentazione di un farmaco antipertensivo, non accontentarsi di vedere che la pressione arteriosa migliora ma che non vi sono eventi cardiovascolari maggiori. Questo perché utilizziamo spesso delle misure di beneficio surrogate e che non catturano l’effetto di un trattamento in maniera importante e rilevante

per il paziente. Cerchiamo il *marker* biologico ma non ci interessiamo se quel trattamento apporta un beneficio clinico reale che modifica la storia naturale della malattia.

Confrontare con un *trial* clinico due farmaci già in commercio per una patologia e capire il loro valore aggiunto, costituisce la più grande possibilità di ottimizzazione delle cure e allo stesso tempo un’ottima *spending review* per il nostro Servizio Sanitario Nazionale. Ci consente, questo tipo di ricerca, di capire quale farmaco è appropriato e quale no, quale trattamento conferisce un aumento di sopravvivenza clinicamente rilevante, quale intervento consente di allungare la vita di un paziente o ridurre drasticamente l’impatto o la progressione dei sintomi di una malattia.

Fare ricerca rappresenta sempre la più grande sfida della medicina ma guardando al presente e al futuro, gli studi clinici devono e dovranno confrontarsi con le informazioni cliniche del laboratorio, con l’esame di un *test* genetico, con l’intelligenza artificiale e la sua capacità di predire la risposta ad un trattamento per esempio.

Fatta questa premessa, dobbiamo riflettere su quale figurano gravitano o lo faranno in un futuro prossimo nel mondo medico: non più solo clinici, infermieri, farmacisti o biologi. Domani siederanno allo stesso tavolo matematici, fisici, chimici, ingegneri: avranno tutti un ruolo cruciale per individuare il *target* biologico per sviluppare il miglior farmaco o trattamento disponibili; oppure studieranno i migliori supporti o *device* per migliorare la qualità di vita del paziente.

Tutte queste figure e cotanto progresso ci porteranno a porci delle domande di etica, sul ruolo degli algoritmi applicati alla medicina, sulla genetica e su tanti altri temi su cui dovremmo interrogarci cercando di saldare questa disparità temporale con cui l’innovazione arriva prorompente nel mondo clinico e l’affanno con cui la segue il mondo legislativo e regolatorio, sempre in ritardo rispetto all’innovazione scientifica.

La prevenzione

I prezzi dei trattamenti approvati costituiscono una fetta di spesa importante per il Servizio Sanitario Nazionale e ciò è suffragato dagli ultimi eclatanti esempi quali quelli delle terapie innova-

tive cellulari ingegnerizzate per la cura di alcuni tumori del sistema linfatico e del sangue, l'immunoterapia o il caso meno recente di farmaci per il trattamento dell'epatite C.

Alla spesa notevole dei farmaci non corrisponde una partita importante di risparmio che potrebbe essere rappresentata dalla prevenzione. Questa potrebbe costituire il miglior investimento per la salute di ciascun cittadino. La prevenzione riguarda maggiormente due categorie; gli stili di vita e i percorsi di *screening* o vaccinali. Il 50% dei tumori è evitabile eppure il tasso di mortalità (180000/anno) relativo a questa patologia è ancora troppo alto.

La spesa attuale è arrivata a 6.6 miliardi per la cura dei tumori relativamente ai farmaci, non contando i costi di degenze, chirurgie e radioterapie.

Conosciamo da tempo le variabili che possono incidere sull'insorgenza di determinate patologie oncologiche, cardiovascolari e renali quali il fumo, il sovrappeso, la sedentarietà, il consumo di alcolici eppure lo Stato non contribuisce a disincentivare questi comportamenti.

Non implementiamo le campagne anti-fumo e non aumentiamo i divieti nei luoghi di aggregazione pubblica all'aperto.

Non si fanno campagne o non vi sono incentivi statali per i datori di lavoro che danno la possibilità ai dipendenti di svolgere attività fisica nelle loro strutture o con particolari convenzioni.

Nelle mense scolastiche a partire dalla Scuola dell'Infanzia, non vi sono spesso dei menu equilibrati elaborati secondo il fabbisogno calorico dei bambini, con una nutrizione variegata fatta di frutta, verdura e legumi ma piena di grassi o senza alcuna proposta di frutta. Proprio i bambini dovrebbero avere la possibilità già dalla prima infanzia di svolgere attività fisica anche all'aperto durante la loro giornata a scuola.

In ultima analisi, la prevenzione passa anche dallo *screening*. E qui vi è un grosso problema relativamente ai livelli minimi di assistenza che presentano un grandissimo problema di liste di attesa a volte lunghe anni per una mammografia o una colonscopia o un PAP test.

L'attività di *screening* spesso è demandata al privato e il cittadino che paga regolarmente le tasse e vede negarsi un diritto costituzionale di salu-

te al quale lo stesso Stato non riesce ad adempiere nei tempi previsti.

La ricerca medica e le donne

La ricerca medica ha dimenticato l'altra metà del cielo.

Il futuro della ricerca medica, passa da questo cambio di rotta e deve interrogarsi sui grandi errori fatti in passato escludendo quasi completamente la donna sia da un ruolo passivo nella ricerca come paziente, sia come ruolo attivo sia esso di clinico o di ricerca.

Negli anni infatti le donne sono state sottorappresentate nella ricerca clinica. Molto spesso ciò è avvenuto per motivi etici, uno di questi è che le donne sottoposte a sperimentazione possano andare incontro a gravidanza, compromettendo la salute del feto o del nascituro.

Viene spesso citata l'espressione "cecità di genere" (*gender blindness*), per definire questo fenomeno non solo nelle scienze mediche ma anche in quelle sociali. Ciò però è molto grave perché alcune patologie si sviluppano in maniera differente tra maschi e femmine. Così anche il percorso del farmaco nel nostro organismo e la sua interazione con il *target* molecolare (Farmacocinetica e farmacodinamica).

Inoltre la manifestazione della malattia, la propensione ad ammalarsi può essere differente tra uomini e donne, i sintomi clinici e il decorso post trattamento così come la risposta al farmaco.

Da qui emerge il bisogno urgente di includere le donne nei *clinical trial*. Ciò risulta importante per studiare l'efficacia e la sicurezza di quel farmaco nel *setting* femminile cercando di indagare benefici e rischi nella popolazione maschile e femminile.

Questo ha fondamento anche nel passato con la Food and Drug Administration (ente regolatorio americano) che vietò l'inclusione delle donne nelle donne, nel 1977, in età fertile negli studi di fase 1 e 2, al fine di prevenire il possibile rischio di testare i medicinali in donne incinte. Anche se la regolamentazione cambiò tra gli anni '80 e '90, l'inclusione delle donne negli studi clinici fatica ancora a raggiungere i livelli ottimali. Infine, ci sono motivazioni di ordine pratico che possono diminuire l'adesione alla partecipazione agli studi da parte delle donne spesso dovute all'im-

pegno che ciò comporta per una donna come può essere la compilazione di questionari, controlli periodici. Alcuni studi hanno riportato che le donne sono meno inclini alla partecipazione agli studi. Tra le ragioni, oltre al rischio percepito e alla mancanza di fiducia, viene spesso citata la preoccupazione per il tempo da dedicare alla sperimentazione, per esempio alle visite periodiche, alla compilazione di questionari, etc..

Il ruolo delle donne nella ricerca e l'impatto sulla conduzione e risultati degli studi

Preso atto del problema relativo all'equità di genere e alla sotto rappresentazione delle donne bisogna fare un passo avanti volto al superamento del vecchio approccio quasi indifferente alle differenze delle specificità tra uomo e donna. Ciò implica un cambiamento nell'ambito della sperimentazione clinica da parte di chi promuove i *trial*, di chi si occupa della scelta dei pazienti da includere, della misurazione degli esiti e della farmaco-vigilanza, e da parte dei gruppi collaborativi e società scientifiche che promuovono la ricerca.

La componente femminile nel coordinamento della ricerca, come i ruoli di medico di *principal investigator* del progetto o la presenza delle donne nei ruoli apicali ha dimostrato essere un fattore importante per l'inclusione di pazienti di sesso femminile. Avere un medico donna è un fattore trainante negli studi clinici anche per l'inclusione negli studi di pazienti di pazienti donne, e più in generale si è notata una maggiore attenzione anche alla produzione di materiale scientifico rilevante per la sperimentazione.

Da un recente studio canadese pubblicato su *British Medical Journal* [1] condotto sull'intera popolazione chirurgica (circa 104.000 persone) dell'Ontario (Canada), sottoposta a 25 diverse procedure operatorie tra il 2007 e il 2015 è emersa anche l'importanza delle donne in sala operatoria relativamente agli *outcome* clinici. Infatti i pazienti operati da una donna presentavano una mortalità inferiore (il 4% in meno rispetto ai pazienti operati da un chirurgo maschio), un tasso inferiore di complicanze e un'incidenza di ricoveri inferiore nell'arco del mese successivo

alla procedura chirurgica. Ciò può essere dovuto anche al *bias*, dovuto al fatto che arrivare a fare il chirurgo è una lunga corsa a ostacoli ed è difficile via di realizzazione con grossi sacrifici personali.

Le donne medico superano gli uomini anche nel merito, quando si parla di medicina interna. Uno studio di Harvard pubblicato sulla rivista scientifica *JAMA* [2] con i dati di pazienti inclusi nella assicurazione Medicare (analizzando oltre 1 milione e mezzo di ricoveri) ha messo in luce, che le donne hanno una maggiore empatia con i pazienti, propensione alla cura, alla collaborazione e ascolto. I pazienti seguiti da donne medico presentavano un tasso di mortalità e di nuovi ricoveri inferiori, rispetto a quelli affidati alle cure dei medici maschi.

Conclusioni

Occorre continuare a trovare nuovi farmaci e confrontarli su qualità, efficacia e sicurezza e valutarne il valore terapeutico aggiunto tramite la ricerca scientifica senza saltare degli *step* importanti del percorso di ricerca e sviluppo di un farmaco, giustificando erroneamente ciò con l'urgenza terapeutica. I tempi fisiologici di un percorso regolare per la sperimentazione clinica tutelano il paziente perché permettono di studiare efficacia e sicurezza del farmaco senza tagliare momenti importanti della valutazione su grandi numeri di un trattamento sperimentale.

In questo percorso non può mancare una riflessione sulla presenza della donna negli studi clinici, cruciale infatti è lo studio delle peculiarità femminili e la risposta al trattamento, gli effetti avversi e le eventuali caratteristiche cliniche che consentono di comprendere la sua unicità nel percorso di cura.

Nell'affermarsi continuo della medicina personalizzata, bisogna ricordare che questa può significare anche sviluppare protocolli di cura distinti per uomini e donne che tengano conto della loro diversità.

Infine, è importante ricordare che molte malattie dipendono da noi e la prevenzione rappresenta l'unico ostacolo alla loro diffusione e il Servizio Sanitario Nazionale deve impegnarci a fare ciò, con tutte le strade percorribili.



- [1] C. J. D. Wallis, B. Ravi, N. Coburn et al.: *Comparison of postoperative outcomes among patients treated by male and female surgeons: a population base matched cohort study*, The British Medical Journal, 359 (2017) j4366.
- [2] Y. Tsugawa, B. Anupam, J. F. Figueroa: *Comparison of Hospital Mortality and Readmission Rates for Medicare Patients Treated by Male vs Female Physicians*, JAMA Intern. Med., 177 (2017) 206.



Chiara Gerardi: laureata nel Luglio 2010 in Chimica e Tecnologia Farmaceutiche presso l'Università degli Studi di Padova. Presso la stessa Università, consegue nel Dicembre 2010 l'abilitazione all'esercizio della professione di farmacista. Da Novembre 2010 a Novembre 2011 frequenta il Master in "Ricerca Clinica" presso la facoltà di Medicina e Chirurgia dell'Università degli Studi di Milano e da Gennaio 2011 inizia il tirocinio nel laboratorio di Ricerca Clinica Dipartimento di Oncologia, presso l'Istituto di Ricerche Farmacologiche "Mario Negri" di Milano. Nello stesso Istituto Consegue il Dottorato di Ricerca in Scienze Farmacologiche nel 2018. Qui approfondisce lo studio della metodologia della ricerca clinica, dello sviluppo farmaceutico e dei processi autorizzativi dei farmaci a livello Europeo, la stesura di revisioni sistematiche e meta-analisi. Da Gennaio 2011 al 2014 svolge presso l'Istituto l'attività di Coordinatore di studi clinici oncologici, in chirurgia e con device a livello nazionale ed internazionale. Dal 2011 svolge l'attività di docente per il Master in Ricerca Clinica dell'Università Statale di Milano, di coordinatore e docente in un corso per Monitor Clinico (2011-2018). Dal 2017 è docente del corso di Perfezionamento della facoltà di Medicina e Chirurgia in Ricerca Clinica presso l'Università degli Studi di Milano. Dal 2014 si occupa in particolare, di ricerca: in ambito chirurgico con particolare attenzione alle attività di *health technology assessment*, studi clinici ed osservazionali, revisioni sistematiche e meta-analisi, in collaborazione con l'Organizzazione Mondiale della Sanità per alcune attività relative alla Lista dei Medicinali Essenziali con particolare attenzione all'accesso ai farmaci sulla base di valutazioni di efficacia, sicurezza, accessibilità e fattibilità, nel settore delle politiche regolatorie e

percorsi di approvazione dei farmaci a livello Europeo, di sperimentazioni ed evidenza clinica in chirurgia. Coordina gruppi di lavoro nell'ambito della sintesi delle evidenze per la valutazione delle tecnologie sanitarie e accesso ai farmaci. Ha svolto attività di ricerca integrata all'assistenza sanitaria come parte di sviluppo di percorsi diagnostico, terapeutici e assistenziali. E' autore di numerose pubblicazioni scientifiche su riviste peer review (tra cui *Neurology* e il *British Medical Journal*, *Annals of Surgery*) e divulgative, relatore a convegni nazionali e internazionali e autore di capitoli di libri.

Silvio Garattini: Dottore in Medicina. Libero Docente in Chemioterapia e Farmacologia. Assistente ed Aiuto presso l'Istituto di Farmacologia dell'Università di Milano fino all'anno 1962. Fondatore nel 1963 e direttore dell'Istituto di Ricerche Farmacologiche "Mario Negri". Autore di molte centinaia di lavori scientifici pubblicati in riviste nazionali ed internazionali e di numerosi volumi nel campo della farmacologia. Fondatore dell'European Organization for Research on Treatment of Cancer.

Negli ultimi decenni è stato membro di vari organismi fra cui: Comitato di Biologia e Medicina del Consiglio Nazionale delle Ricerche (C.N.R.), Consiglio Sanitario Nazionale e Commissione della Presidenza del Consiglio dei Ministri per la politica della ricerca in Italia, Membro della Commissione Unica del Farmaco (CUF) del Ministero della Salute.

Tra le numerose onorificenze ricevute si segnalano: la Legion d'Onore della Repubblica Francese per meriti scientifici; Premio della Società Italiana di Chimica "Giulio Natta", Grand Ufficiale della Repubblica Italiana e Lauree Honoris Causae alle Università di Bialystok, Polonia e di Barcelona, Spagna.

Quali prospettive per l'Economia Politica?

Michele Grillo *Università Cattolica del Sacro Cuore di Milano*

Itaca celebra il suo decennale interrogandosi su futuri sviluppi disciplinari. In Economia Politica coglierei due segnali differenti.

Il primo attiene ai fondamenti di una disciplina che più di ogni altra scienza sociale fa leva sull'individualismo metodologico. Al centro dell'analisi economica c'è il comportamento di un *homo oeconomicus*, guidato da una razionalità soggettiva, strumentale rispetto a fini esogeni. Da tempo però gli economisti si interrogano criticamente su questa premessa, anche in una prospettiva interdisciplinare. Così, dall'interazione con gli psicologici, ha preso avvio una ricerca di *behavioral economics* che ha ampliato molto lo spettro interpretativo dei comportamenti individuali, sia analizzando la razionalità strumentale in una prospettiva più articolata, sia interrogandosi sui comportamenti guidati da convenzioni sociali. Plausibilmente la ricerca teorica continuerà ad approfondire questi aspetti, anche affrontandoli con un metodo di analisi innovativo che fa leva su un approccio sperimentale.

Vorrei però soffermarmi di più su un secondo segnale che appare più complesso e di rottura e i cui sviluppi sono meno prevedibili. Quando nacque nella seconda metà del Settecento come disciplina autonoma a partire dalla filosofia morale e politica, l'Economia Politica assunse come oggetto di indagine il sistematico allargamento della sfera produttiva, che individuava come condizione essenziale per rendere possibile la stabile convivenza pacifica di società di uomini

liberi. Nella prima metà del Novecento, Keynes identificava ancora così il "problema economico" e ne prevedeva ottimisticamente la soluzione nel volgere di alcuni decenni. Assumendo che quella profezia fosse ormai in via di realizzazione, si è evoluta nella seconda metà del XX secolo l'Economia Politica in forme che hanno contribuito a diffondere nella cultura occidentale la percezione di vivere una "fine della storia". Nel mondo anglosassone la disciplina ha perfino cambiato il proprio nome, da *political economy* a *economics*, assegnandosi un ruolo non ambizioso di scatola degli attrezzi (l'analisi costo-beneficio) per dare soluzione tecnica a problemi specifici di allocazione di mezzi scarsi a fini alternativi.

L'inizio del millennio ha però reso evidente che la "fine della storia" è al di là dell'orizzonte. L'economia politica è tornata a essere pungolata da questioni radicali che ne avevano caratterizzato il sorgere e che ancora oggi chiamano in causa il tema della pace e della guerra tra le nazioni. L'idea che le relazioni economiche sono strumento essenziale di pace è stata pietra angolare della cultura occidentale degli ultimi due secoli. Il merito storico dell'economia è stato quello di porre al centro dell'analisi la divisione del lavoro - tra gli individui e tra le nazioni - come fonte di un surplus collettivo, perché ciò ha trasformato il paradigma delle relazioni sociali - tra gli individui e tra le nazioni - da gioco a somma zero a contesto *win-win*.

Pur con l'importante eccezione del trentennio

che lega la fine della Belle Époque alla seconda guerra mondiale, per due secoli l'Occidente ha idealmente improntato le relazioni internazionali a un principio di allargamento dei mercati. Così la fine della divisione del mondo a blocchi nel penultimo decennio del XX secolo è stata salutata come l'inizio di una nuova era progressiva di globalizzazione. Oggi però, a trent'anni di distanza, i sistemi di mercato occidentali si confrontano con una impreveduta incapacità di cogliere i benefici attesi. Senza distinzione tra amministrazioni repubblicana e democratica, gli USA velano sotto il nome ipocrita e fuorviante di "legge per la riduzione dell'inflazione" un vasto e progressivo estendersi di misure protezionistiche. La stessa Europa, che per oltre mezzo secolo ha costruito un proprio progetto di unità politica sull'allargamento del mercato, si interroga sul grado di apertura dei propri commerci verso vasta parte del mondo che tende a identificare sempre più in un rapporto conflittuale perché la vede conseguire più agevolmente i benefici della globalizzazione.

Su queste premesse, vedo la riflessione di economia politica davanti a un bivio. La disciplina potrà, sulla scia degli sviluppi degli ultimi decenni, continuare a essere *economics* (scatola tecnica degli attrezzi) applicata a un contesto inatteso ed esogeno di conflittualità internazionale, cercando perfino giustificazioni economiche a favore di un ritorno al conflitto, al protezionismo o, come pudicamente qualcuno lo descrive oggi, di una *riglobalizzazione* all'interno di gruppi integrati di Paesi affini. Oppure potrà cercare di recuperare le radici non pienamente sviluppate di una *political economy* per tornare a interrogarsi sulle ragioni intrinseche dell'economia come fattore di pace e di cooperazione internazionale e sul perché tali ragioni sembrano aver smesso di operare.

Questa seconda alternativa potrà forse chiamare in gioco anche un ripensamento critico di premesse metodologiche che oggi diamo per acquisite nella disciplina. All'origine l'economia politica non si identificava con una teoria del comportamento (pur utilizzando da sempre ipotesi su come agiscono individui e classi sociali). Vedeva piuttosto il suo oggetto come un'analisi di fattori esogeni (in particolare, gli aspetti tecnologici che informano la divisione del lavoro)

che condizionano le società umane nello sviluppo di forme desiderabili di convivenza. Quando si riflette sul perché le relazioni economiche sono strumento di pace, è importante avere presente che la fondamentale premessa analitica, il principio ricardiano dei vantaggi comparati, è indipendente sia dai comportamenti individuali, sia dalle istituzioni che governano le nazioni. Il principio enuncia una proposizione fattuale che si regge solo sull'ipotesi che i soggetti e le collettività sono individualmente differenziate, derivando da ciò che una società trae sempre beneficio dalla divisione del lavoro; che anche un soggetto più efficiente di qualsiasi altro soggetto nello svolgimento di qualsiasi attività produttiva, dividendo il lavoro con soggetti tutti meno efficienti di lui, trae un più ampio benessere che da solo non è in grado di conseguire. Detto altrimenti, ciò che il principio del vantaggio comparato mette in luce è che le ragioni del protezionismo (e, a fortiori, le ragioni della guerra) non sono mai ragioni economiche; le quali, al contrario, militano sempre radicalmente a favore di rapporti pacifici tra gli individui e tra le nazioni. In questo senso, le difficoltà odierne nelle relazioni internazionali rappresentano una sfida per la futura ricerca in economia di tornare a proporsi autenticamente come rinnovata *political economy*.



Michele Grillo: è professore di Economia Politica presso la Facoltà di Giurisprudenza dell'Università Cattolica del Sacro Cuore di Milano. I suoi interessi di ricerca concernono la teoria della concorrenza imperfetta, la disciplina della concorrenza e del mercato, la teoria economica dell'organizzazione e l'analisi economica delle istituzioni democratiche. Tra il 1997 e il 2004 è stato Componente dell'Autorità Garante della Concorrenza e del Mercato.

Sfide per la fisica teorica

Alberto Lerda

*Dipartimento di Scienze e Innovazione Tecnologica, Università del Piemonte Orientale
& Istituto Nazionale di Fisica Nucleare - Sezione di Torino*

La scoperta del bosone di Higgs al Large Hadron Collider (LHC) del CERN di Ginevra nel 2012, e la rivelazione delle onde gravitazionali da parte della collaborazione LIGO-Virgo nel 2015, rappresentano indubbiamente i due eventi più importanti dell'ultimo decennio nel campo della fisica.

Per anni il bosone di Higgs è stato infatti la tessera che mancava per completare il Modello Standard delle interazioni fondamentali e spiegare l'origine della massa delle particelle elementari osservate negli esperimenti. Le onde gravitazionali, invece, sono state una delle più affascinanti predizioni sulla natura dello spazio-tempo della teoria della Relatività Generale di Albert Einstein fin dalla sua pubblicazione nel 1916. Entrambe le scoperte sono quindi una straordinaria conferma della validità delle due principali costruzioni, il Modello Standard e la Relatività Generale, che hanno costituito il paradigma della fisica teorica nel XX secolo. Tuttavia, oggi sappiamo con certezza che né il Modello Standard né la Relatività Generale possono fornire la spiegazione finale di tutti i fenomeni fisici e che è necessario trovare una loro estensione ed eventualmente farne una sintesi. Cerchiamo di capire perché.

Il Modello Standard

Tre delle quattro interazioni fondamentali che conosciamo, cioè l'interazione elettromagnetica, l'interazione nucleare debole e l'interazione nucleare forte, sono spiegate dal Modello Standard

(MS), formulato da Sheldon Glashow, Steven Weinberg e Abdus Salam (premi Nobel per la Fisica nel 1979). Negli anni questo modello è stato ripetutamente confermato con numerosi esperimenti ad altissima precisione, culminati nel 2012 con la scoperta del bosone di Higgs, la cui esistenza era stata teorizzata nel 1964 da Robert Brout, François Englert e Peter Higgs (questi ultimi premiati con il Nobel per la Fisica nel 2013). Nel MS le particelle elementari sono distinte in due grandi categorie: quelle che costituiscono la materia propriamente detta, divise in quarks e leptoni, e quelle che invece mediano le forze e per questo sono chiamate **mediatori**. Fra questi troviamo ad esempio il fotone, che trasmette le interazioni elettromagnetiche, e il gluone, che è responsabile delle interazioni forti. In aggiunta a questi elementi, c'è il bosone di Higgs, l'unico scalare del MS, il cui ruolo è essenzialmente dare massa alle particelle. Tutto ciò è riassunto schematicamente nella figura 1.

Il paradigma fondamentale su cui si basa il MS è la teoria quantistica dei campi, e in particolare le cosiddette *teorie di gauge*. In questo schema, ogni particella elementare, sia essa una particella di materia o un mediatore di forze, è rappresentata da un campo quantistico, cioè da una funzione dello spazio e del tempo che descrive le fluttuazioni dovute alla creazione o alla distruzione della particella elementare rispetto al vuoto. Le proprietà di tutti questi campi sono codificate in una Lagrangiana, una specie di funzione dei campi, che descrive la loro dinamica e le regole con cui essi interagiscono.

La Lagrangiana del MS riassume in modo com-

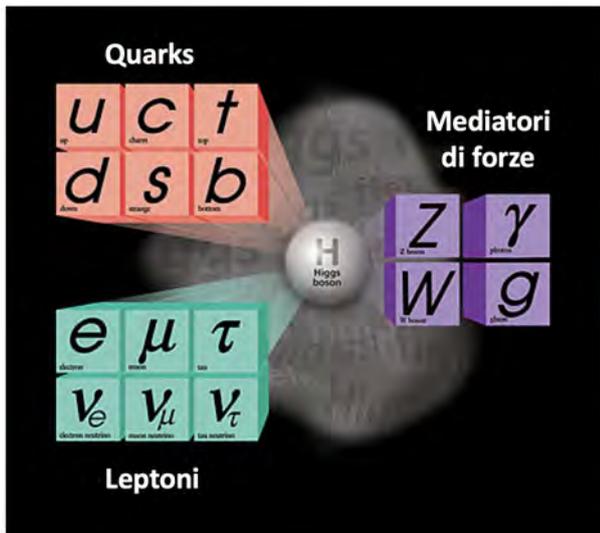


Figura 1: Le particelle del modello standard (immagine adattata da Wikipedia).

patto tutta la fenomenologia delle interazioni elettromagnetiche, deboli e forti e, come abbiamo accennato, è stata confermata sperimentalmente con altissima precisione. Essa è formulata in modo coerente con la meccanica quantistica, rispetta le regole della teoria della relatività ristretta ed è invariante per le cosiddette trasformazioni di gauge, ovvero quelle trasformazioni che cambiano i campi associati alle varie particelle con parametri dipendenti dal punto dello spazio-tempo in cui avvengono. Le trasformazioni di gauge del MS sono di tipo particolare e formano un gruppo di simmetria detto $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$. La richiesta di avere invarianza per trasformazioni di questo tipo vincola notevolmente la forma e la struttura della Lagrangiana, ma non la determina in modo univoco. Per esempio, la scelta delle regole con cui le particelle si trasformano, o la scelta dei parametri che determinano l'intensità degli accoppiamenti, sono in larga misura arbitrarie.

Una delle caratteristiche essenziali del MS è che le interazioni fra le particelle sono locali, cioè sono rappresentate da prodotti di campi valutati nello stesso punto dello spazio-tempo. L'assunzione che le interazioni siano locali va di pari passo con l'ipotesi che le particelle siano puntiformi, cioè che si possano avvicinare arbitrariamente le une alle altre e che quindi non esista una distanza minima sotto la quale non possano andare.

Le interazioni descritte nella Lagrangiana clas-

sica del MS vengono modificate a livello quantistico da processi nei quali vengono prodotte particelle virtuali intermedie che si formano e si ricombinano fra loro. Queste correzioni quantistiche sono descritte dai cosiddetti diagrammi a *loop*, il cui contributo non sempre è semplice da calcolare, specie quando il numero di *loop* è alto. Siccome nel MS le particelle possono avvicinarsi le une alle altre a distanze sempre più piccole (al limite nulle), per il principio d'indeterminazione di Heisenberg, esse possono accedere a energie sempre più grandi (al limite infinite). Di conseguenza, i diagrammi a *loop* sono in genere divergenti, cioè producono contributi infiniti, e per dar loro un significato preciso e rigoroso è necessario ricorrere alla cosiddetta procedura di rinormalizzazione. È stato dimostrato da Gerardus 't Hooft e Martinus Veltman (premi Nobel per la Fisica nel 1999) che le teorie di gauge come il MS sono rinormalizzabili e forniscono risultati finiti per tutte le grandezze fisiche. Nel corso di questa rinormalizzazione, le costanti di accoppiamento che regolano l'intensità delle interazioni cessano di essere costanti e diventano funzioni dell'energia a cui il processo è valutato. In particolare, la costante di accoppiamento delle interazioni forti diventa sempre più piccola al crescere dell'energia e quindi le interazioni forti diventano sempre più deboli, un fenomeno noto come **libertà asintotica** scoperto da David Politzer, David Gross e Frank Wilczek (premi Nobel per la Fisica nel 2004).

Il MS è dunque una teoria pienamente consistente a livello quantistico, descrive accuratamente tre delle quattro interazioni fondamentali ed è assai radicata nelle osservazioni sperimentali. Anche se sembra funzionare alla perfezione, il MS non può però essere considerato una teoria fondamentale per molti motivi. *In primis* perché non descrive la forza di gravità, che è la quarta interazione fondamentale. Come abbiamo accennato in precedenza, il MS può essere estrapolato fino a una scala di energia infinita, o comunque molto elevata (che chiameremo **scala ultravioletta**), dove le forze gravitazionali diventano forti e non possono più essere trascurate. Pertanto, nel regime delle alte energie il MS deve necessariamente essere sostituito da una teoria più generale che incorpori anche la gravità. Anche prescindendo da quest'aspetto, il MS presenta

numerose altre criticità. Per quanto molto solido dal punto di vista teorico, è una costruzione poco elegante dal punto di vista formale poiché richiede diverse scelte *ad hoc* come, per esempio, quella del gruppo di simmetria di gauge o quelle dei molti (circa una ventina) parametri della sua Lagrangiana. Inoltre, il MS non è in grado di spiegare fenomeni assai rilevanti, come quelli della materia oscura o dell'energia oscura, che insieme costituiscono circa il 95% dell'Universo.

A livello più tecnico ma non per questo meno importante, c'è poi il cosiddetto problema della gerarchia, legato al valore della massa del bosone di Higgs, che sperimentalmente risulta essere circa $125 \text{ GeV}/c^2$, cioè dello stesso ordine di grandezza della massa di altre particelle, e quindi molto piccola rispetto alla scala ultravioletta fino a cui la teoria in principio è valida. Nel MS la massa del bosone di Higgs viene calcolata in modo perturbativo, cioè dapprima si ricava il contributo dominante direttamente dalla Lagrangiana classica, e successivamente si calcolano le correzioni dovute a diagrammi a *loop*. Per consistenza, queste correzioni dovrebbero essere via via sempre più piccole e meno importanti a mano a mano che il numero di *loop* aumenta. Però, la necessità di ricorrere alla procedura di rinormalizzazione per rimuovere le divergenze nei *loop*, fa sì che queste correzioni siano in realtà molto grandi, perché proporzionali alla scala ultravioletta. Pertanto, solo assumendo che anche il primo termine della serie perturbativa sia anch'esso molto grande, è possibile rendere consistente l'intera costruzione e alla fine ottenere come risultato un valore piccolo per la massa del bosone di Higgs. Infatti, solo combinando fra loro numeri molto grandi è possibile ottenere un risultato finito e piccolo; se invece si hanno termini sia grandi che piccoli, i primi chiaramente dominano. Per fare questo, però, è necessario un aggiustamento molto particolare e delicato dei numerosi parametri della Lagrangiana del modello che, per quanto non impossibile *a priori*, è altamente innaturale. Questo è il cosiddetto problema del *fine-tuning* che affligge in MS.

Un altro serio problema riguarda la stabilità del MS. Applicando la procedura di rinormalizzazione e usando i valori sperimentalmente misurati della massa del bosone di Higgs e del quark top, si può dimostrare che a energie pros-

sime alla scala ultravioletta, il potenziale del MS sviluppa un minimo più profondo di quello elettrodebole in cui ci troviamo. Quest'ultimo quindi non sarebbe stabile perché avrebbe la possibilità di decadere nel nuovo minimo energeticamente più favorevole. In realtà, come indicato in figura 2, il MS non è del tutto instabile, poiché i valori della massa del bosone di Higgs e del quark top lo collocano nella cosiddetta regione di meta-stabilità. Questo vuol dire che il vuoto del MS potrebbe sì decadere, ma per raggiungere la configurazione energeticamente più favorevole impiegherebbe un tempo enorme, addirittura maggiore della vita dell'universo!

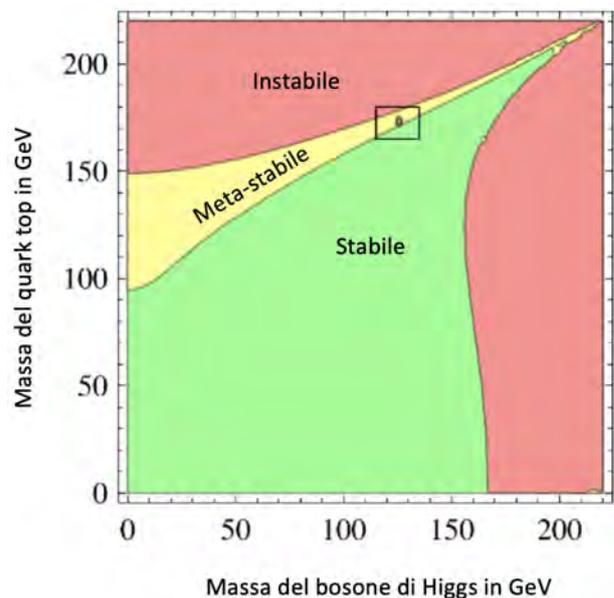


Figura 2: Regioni di stabilità (verde), meta-stabilità (giallo) e instabilità (rosa) del vuoto del MS in dipendenza dalle masse del bosone di Higgs e del quark top. I valori sperimentali della massa del bosone di Higgs e del quark top pongono il MS, evidenziato dal riquadro, all'interno della regione di meta-stabilità (immagine adattata da G. Degrassi et al., JHEP 08 (2012) 098).

Tutta questa analisi è basata sull'assunzione che il MS possa essere estrapolato ad energie elevate senza variazioni, ovvero senza la comparsa di nuova fisica. Questa assunzione sembra al momento confermata dalle osservazioni sperimentali, che infatti non hanno rivelato alcun segnale di nuova fisica oltre il MS, anche se è molto innaturale pensare che non ci sia proprio nulla di nuovo fino alla scala ultravioletta. La situazione, comunque la si voglia considerare, è del tutto

insoddisfacente perché, indipendentemente dalla scoperta o meno di segnali di nuova fisica, è chiaro che il MS così come lo conosciamo non può essere considerato una teoria fondamentale.

La Relatività Generale

Con la teoria della relatività ristretta, pubblicata nel 1905, Albert Einstein ha unificato i concetti di spazio e tempo della fisica classica, sostituendoli con lo spazio-tempo quadridimensionale. Questo spazio-tempo, tecnicamente chiamato spazio-tempo di Minkowski, è un'entità rigida, una sorta di palcoscenico vuoto che ospita la materia facendole semplicemente da sfondo. Con la teoria della Relatività Generale (RG) del 1916, invece, le cose cambiano radicalmente: lo spazio-tempo si deforma, curvandosi in base alla materia in esso contenuta. Quando è presente della materia, infatti, lo spazio-tempo non è più piatto come quello di Minkowski ma diventa curvo, e la curvatura che acquisisce è direttamente legata alla materia presente. Più massa c'è e più lo spazio-tempo si curva! Tutto ciò è riassunto nelle famose equazioni di Einstein, che stabiliscono un legame preciso fra la curvatura dello spazio-tempo e la materia in esso contenuta, fornendo così un'interpretazione geometrica dell'interazione gravitazionale.

Poche settimane dopo la pubblicazione della RG, il fisico tedesco Karl Schwarzschild risolse esplicitamente le equazioni di Einstein nel caso di uno spazio-tempo occupato da una massa M sfericamente simmetrica, ottenendo quella che oggi è conosciuta come la metrica di Schwarzschild. La caratteristica principale di questa soluzione è che alcune componenti della metrica si annullano o diventano infinite quando ci si pone a una particolare distanza dalla massa M , detta raggio di Schwarzschild, definita da

$$R_S = \frac{2GM}{c^2}, \quad (1)$$

dove G è la costante di Newton e c è la velocità della luce. Supponiamo ora che una massa M sia uniformemente distribuita in una sfera di raggio R minore del suo raggio di Schwarzschild R_S , e chiediamoci cosa succede a una distanza r compresa fra R e R_S . Con considerazioni di fisica classica è facile verificare che un oggetto posto

ad una distanza r da M è in grado di vincere la sua forza di attrazione gravitazionale, solo se la sua velocità v soddisfa la relazione

$$v^2 \geq \frac{2GM}{r}. \quad (2)$$

Dal confronto fra (1) e (2) possiamo dedurre che quando $r \leq R_S$ si può sfuggire all'attrazione gravitazionale di M solo con una velocità maggiore di quella della luce. Siccome però nulla può andare più veloce della luce, nessun oggetto ad una distanza r minore del raggio di Schwarzschild è in grado allontanarsi, rimanendo per sempre intrappolato intorno a M . Si ha cioè un buco nero (termine coniato da John A. Wheeler nel 1967). In altre parole, un oggetto le cui dimensioni fisiche sono inferiori al suo raggio di Schwarzschild forma una singolarità nello spazio-tempo circondata da una zona dalla quale nulla, nemmeno la luce, può uscire. Il confine di questa zona è chiamato orizzonte degli eventi. Un ipotetico viaggiatore potrebbe attraversare questo confine senza problemi (a parte il fatto che sentirebbe una forza gravitazionale tremenda), ma, una volta superato il limite, non potrebbe mai più tornare indietro!

Da un punto di vista quantistico, però, un buco nero non è completamente nero, poiché l'orizzonte degli eventi emana una radiazione, scoperta da Stephen Hawking a metà degli anni '70, che è caratterizzata da una temperatura inversamente proporzionale alla massa del buco nero. Il fatto che, usando considerazioni quantistiche, si possa associare una temperatura ai buchi neri è piuttosto sorprendente, e rende evidente un'altra proprietà inattesa, e cioè che i buchi neri si comportano come oggetti termodinamici e, in particolare, hanno un'entropia. L'entropia è una grandezza termodinamica che misura essenzialmente il numero di configurazioni microscopiche corrispondenti a un dato stato macroscopico. Essa dà quindi un'idea quanto ordine (o disordine) è presente in un sistema e, in base al secondo principio della termodinamica, non può mai diminuire spontaneamente. Tipicamente, per i sistemi di particelle che costituiscono la materia ordinaria, l'entropia è proporzionale al loro volume; per i buchi neri, invece, l'entropia è proporzionale all'area A dell'orizzonte degli eventi, come fu dimostrato da Jacob Beckenstein e, indipenden-

temente, da Hawking negli anni '70. Più precisamente, l'entropia di Beckenstein-Hawking di un buco nero è

$$S_{\text{BH}} = k \frac{A}{4\ell_{\text{P}}^2} \quad (3)$$

dove k è la costante di Boltzmann e $\ell_{\text{P}} = \sqrt{\hbar G/c^3}$ è la cosiddetta lunghezza di Planck, essendo \hbar la costante di Planck ridotta.

L'esistenza di un'entropia associata a un buco nero pone una serie di problemi interpretativi di non poco conto. Dal punto di vista termodinamico l'entropia è legata al numero delle configurazioni microscopiche che sono accessibili al sistema. Tuttavia, in base a quanto detto sopra, sembra che le proprietà del buco nero di Schwarzschild dipendano esclusivamente dalla massa M . In verità le equazioni di Einstein ammettono soluzioni di buco nero più generali di quella di Schwarzschild che dipendono da più parametri, ma un teorema, noto come teorema *no-hair*, letteralmente senza capelli, asserisce che tutte le possibili metriche che descrivono un buco nero possono dipendere solo dalla loro massa, dalla loro carica elettrica e dal loro momento angolare di spin. Se questo è vero, sorge spontanea la domanda: da dove vengono tutti i diversi stati microscopici a cui un buco nero macroscopico può corrispondere? In altre parole, qual è l'origine microscopica e statistica dell'entropia dei buchi neri? Rispondere a questa domanda non è semplice.

La RG, dunque, prevede l'esistenza dei buchi neri ma non riesce a spiegare cosa succede al loro interno, dove lo spazio-tempo diventa singolare. La RG, inoltre, è una teoria puramente classica della gravità e non è valida alle corte distanze (per esempio alla scala subatomica) dove necessariamente la meccanica quantistica entra in gioco. D'altra parte, sappiamo dal MS che alla scala subatomica, le interazioni elettromagnetiche, deboli e forti sono molto più intense della forza gravitazionale, che quindi può essere trascurata, ma che a scale più piccole dell'ordine della scala di Planck, l'intensità della forza gravitazionale diventa del tutto paragonabile a quella delle altre forze ed occorre necessariamente tenerne conto. È quindi logico aspettarsi che una formulazione quantistica per la gravità si possa trovare solo nel contesto di una teoria che unifichi tutte le interazioni fondamentali.

Rendere la RG una teoria quantistica compatibile con il MS o, equivalentemente, incorporare in quest'ultimo la forza di gravità, è stato uno dei principali problemi per la fisica teorica moderna e numerosi sono stati i tentativi per risolverlo. Uno di questi consiste nel trattare la RG come una teoria di campo. Come il MS, anche la RG può essere descritta usando una Lagrangiana (detta di Hilbert-Einstein) che permette di ricavare le equazioni di Einstein. Sembrerebbe, dunque, che esistano tutti i presupposti per poter applicare la stessa procedura usata nelle teorie di campo, cioè promuovere la metrica a un campo quantistico e interpretare le fluttuazioni sul vuoto come gravitoni, ovvero i mediatori della forza di gravità. In effetti, procedendo in questo modo si possono ricavare senza grosse difficoltà le regole di accoppiamento fra gravitoni e costruire diagrammi per le interazioni gravitazionali in perfetta analogia con quelli delle interazioni di gauge del MS. Tuttavia, ci sono delle differenze significative fra i due casi, la più importante delle quali è che la RG non è rinormalizzabile, cioè non si possono eliminare in modo consistente i contributi divergenti nei diagrammi a *loop*.

Nonostante questo serio problema, l'approccio diagrammatico alle interazioni gravitazionali si è recentemente rivelato molto utile nello studio delle onde gravitazionali. Come abbiamo accennato all'inizio, l'esistenza delle onde gravitazionali, ovvero di perturbazioni della metrica dello spazio-tempo che si propagano alla velocità della luce, è una delle più affascinanti predizioni delle equazioni di Einstein. Tali onde possono essere causate dalla collisione di due oggetti molto massicci, quali ad esempio due buchi neri ma, poiché la loro intensità è estremamente piccola, è assai difficile osservarle. Tuttavia, grazie alla straordinaria precisione raggiunta dagli interferometri della collaborazione LIGO-Virgo che sono in grado di misurare variazioni di lunghezze anche 10.000 volte più piccole del raggio del protone, per la prima volta nel settembre 2015 è stato rivelato un segnale di onde gravitazionali prodotte dalla collisione di due buchi neri. Come indicato nella figura 3, che si riferisce appunto alla prima onda gravitazionale osservata, si possono distinguere tre fasi: una fase in cui i due buchi neri spiraleggiano uno intorno all'altro (*inspiral*), una fase in cui avviene la vera e propria fusio-

ne (*merger*), e infine una fase di rilassamento (*ring-down*).

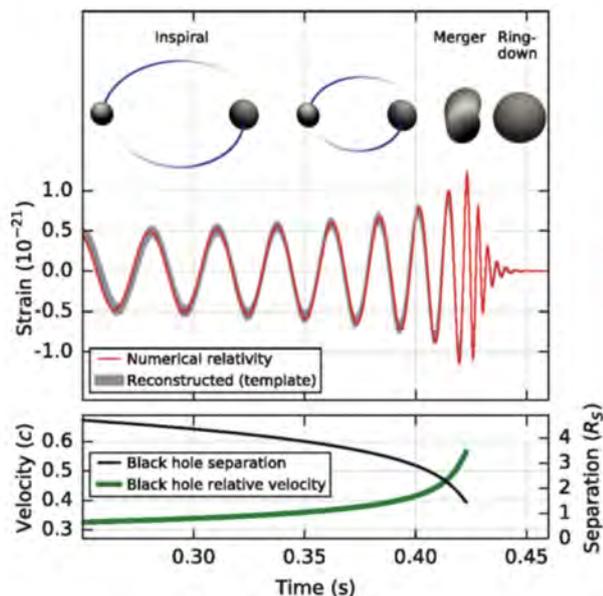


Figura 3: Segnale di onda gravitazionale prodotta dalla fusione di due buchi neri e osservata dalla collaborazione LIGO-Virgo nel settembre 2015 (immagine tratta da B.P. Abbott et al., Phys. Rev. Lett. 116 (2016) 061102).

Nella fase di *inspiral*, dove il segnale appare più regolare, è possibile usare l'approccio diagrammatico perturbativo alla RG a cui abbiamo accennato e trattare i due buchi neri come semplici particelle massive che interagiscono efficacemente scambiandosi gravitoni secondo le regole lagrangiane della RG. Questo è possibile perché in base al teorema *no-hair* i buchi neri sono caratterizzati da pochissimi parametri, massa, carica e spin, proprio come le particelle del MS. Nella fase di *merger*, invece, le forze gravitazionali diventano così intense da richiedere un'analisi delle equazioni di Einstein che al momento è possibile solo con metodi numerici. Infine, nella fase del *ring-down* giocano un ruolo importante i cosiddetti modi quasi-normali, ovvero i modi di vibrazione dissipativi, per determinare i quali occorre risolvere complicate equazioni differenziali. È evidente, quindi, che le onde gravitazionali pur essendo una predizione classica della RG, mettono al contempo in risalto i limiti di questa teoria che da sola non è in grado di descrivere i fenomeni gravitazionali nel regime quantistico.

Una possibilità per superare definitivamente questi problemi è cambiare paradigma.

La Teoria delle Stringhe

Una delle proposte più interessanti e a tutt'oggi più accreditate per realizzare l'unificazione quantistica di tutte le interazioni fondamentali, inclusa la gravità, è la teoria delle stringhe. La caratteristica essenziale di tale teoria è l'ipotesi che i costituenti fondamentali della materia e i mediatori delle forze non siano oggetti puntiformi, ma oggetti unidimensionali come delle piccole corde, dette stringhe, la cui lunghezza tipica è dell'ordine della lunghezza di Planck ℓ_P . A ogni stringa è associata una torre di particelle, corrispondenti alle diverse frequenze di vibrazione della corda, con massa e spin crescenti al crescere della frequenza di vibrazione. Tra le particelle più leggere troviamo il fotone e i bosoni vettori responsabili della trasmissione delle interazioni deboli e forti, ma anche una particella di spin 2 identificabile come il gravitone, la particella mediatrice della forza gravitazionale. Contenendo i mediatori di tutte le forze, la teoria delle stringhe realizza in modo automatico e naturale l'unificazione quantistica di tutte le interazioni fondamentali.

Nella sua formulazione odierna, la teoria delle stringhe comprende in realtà cinque modelli diversi, ciascuno dei quali però può essere interpretato come un particolare aspetto di un'unica teoria fondamentale, detta teoria M (dove M sta per madre). I cinque modelli di stringa hanno una caratteristica in comune: sono consistenti quantisticamente solo se definiti in uno spazio-tempo con 10 dimensioni! L'esistenza di 6 dimensioni in eccesso (solitamente dette dimensioni extra) rispetto alle 4 a cui siamo abituati nella RG, è una delle predizioni più significative e anche più sconcertanti della teoria delle stringhe. Fin da subito questo fatto ha suscitato un acceso dibattito sulla possibilità o meno di usare la teoria delle stringhe per descrivere il mondo reale a 4 dimensioni. Tuttavia, quello che all'apparenza sembra un serio problema risulta in realtà essere una fantastica opportunità che apre nuovi orizzonti interpretativi e ispira nuove idee, quali ad esempio la compattezza e i cosiddetti *brane-worlds*.

Uno dei modi possibili per spiegare come la fisica quadridimensionale possa emergere da uno spazio-tempo con 10 dimensioni è di pensare che

le 6 dimensioni extra, anziché essere estese come quelle ordinarie, siano di lunghezza finita, cioè siano compatte. In altre parole, ad ogni punto dello spazio-tempo quadridimensionale viene fatto corrispondere uno spazio interno a 6 dimensioni, che può avere anche una struttura molto complicata (come in figura 4), e non può essere rivelato se non da molto vicino perché piccolo.

Spazio a 6 dimensioni

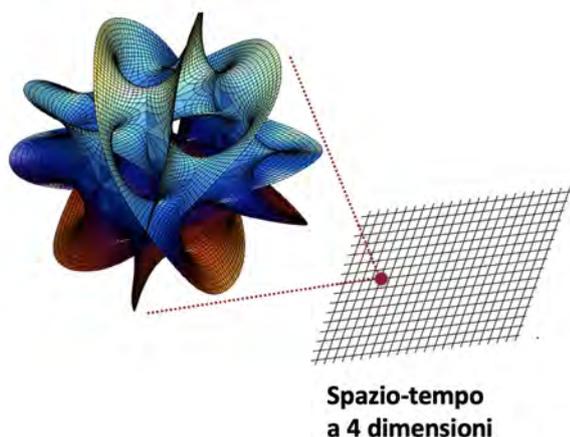


Figura 4: Lo spazio-tempo a 10 dimensioni può essere visto come il prodotto di uno spazio-tempo a 4 dimensioni e di uno spazio interno a 6 dimensioni.

Un'altra possibilità è che lo spazio-tempo che vediamo sia soltanto un'ipersuperficie a 4 dimensioni immersa in un universo più grande a 10 dimensioni. L'esistenza di configurazioni di questo tipo, dette brane (per indicare che sono generalizzazioni multidimensionali delle membrane bidimensionali), è effettivamente prevista dalla teoria M e permetterebbe di spiegare in modo naturale la differenza che osserviamo fra le forze elettrodeboli e forti e la forza gravitazionale. Le prime infatti potrebbero sondare solo le dimensioni longitudinali alla brana che descrive l'universo quadridimensionale che conosciamo, mentre la gravità sarebbe in grado di penetrare l'intero spazio-tempo, rivelando la sua natura multidimensionale, come schematicamente indicato in figura 5.

La presenza di dimensioni extra può avere non solo importanti conseguenze sulle caratteristiche delle interazioni gravitazionali a corte distanze (per esempio potrebbe portare a una deviazione dalla ordinaria legge di gravitazione di Newton),

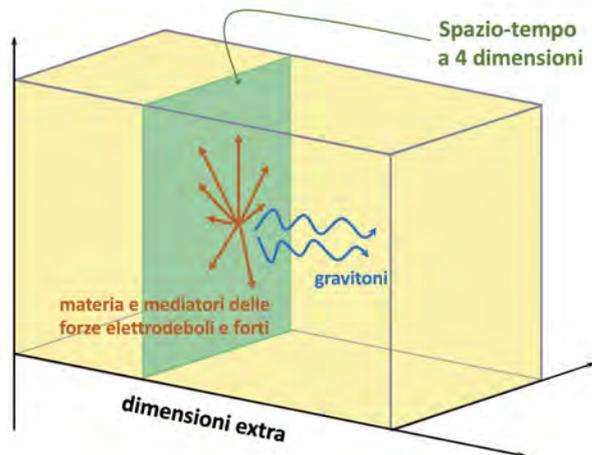


Figura 5: Lo spazio-tempo quadridimensionale visto come una brana immersa in uno spazio con dimensioni extra. Mentre le forze elettrodeboli e forti, descritte dalla teoria di gauge del MS, sarebbero confinate lungo la brana, i gravitoni potrebbero vedere anche le dimensioni extra.

ma anche implicazioni cosmologiche di carattere più ampio. L'esistenza di brane in uno spazio-tempo a più dimensioni permette infatti di studiare le proprietà termodinamiche dei buchi neri che, come abbiamo accennato nella sezione precedente, derivano dalle correzioni quantistiche alla gravità e non trovano spiegazione nell'ambito della RG. In particolare, usando le brane è possibile spiegare l'entropia dei buchi neri, data in eq. (3), ed identificare i microstati che questa entropia conteggia. In questo contesto, infatti, i buchi neri quadridimensionali vengono realizzati con sistemi di brane che si estendono nello spazio a 10 dimensioni arrotolandosi nelle dimensioni extra. Queste configurazioni appaiono come buchi neri classici nelle 4 direzioni visibili, ma hanno proprietà microscopiche diverse a seconda di come le brane sono arrotolate. Ad un singolo buco nero quadridimensionale con una certa area dell'orizzonte degli eventi corrispondono quindi tante configurazioni 10-dimensionali che si possono contare con opportune tecniche matematiche. In questo modo è dunque possibile associare a un buco nero un'entropia che risulta essere proporzionale all'area dell'orizzonte degli eventi, proprio come ipotizzato da Bekenstein e Hawking. Questa derivazione dell'entropia dei buchi neri a partire da un conteggio di stati microscopici di brane arrotolate è uno dei risul-

tati più significativi della teoria delle stringhe nell'ambito della gravità quantistica.

La ricerca recente ha anche ipotizzato che i buchi neri possano essere delle *fuzzballs*, cioè delle palle disordinate costituite da oggetti fondamentali unidimensionali, ovvero da stringhe! In questo approccio, i singoli microstati del buco nero corrisponderebbero a soluzioni con una geometria regolare, mentre la singolarità dello spazio-tempo caratteristica dei buchi neri emergerebbe da un processo di media sui possibili microstati, cioè da una specie di fenomeno collettivo. Un'altra linea di pensiero sempre ispirata dalla teoria delle stringhe prevede che l'orizzonte degli eventi, invece di essere solo una superficie che un ipotetico osservatore potrebbe attraversare senza subire conseguenze (se non quella di non poter più tornare indietro), sarebbe in realtà un *firewall*, un muro di energia che distruggerebbe qualunque oggetto cercasse di oltrepassarlo. Queste proposte sono al momento solo speculazioni astratte, ma in futuro potrebbero essere assai rilevanti perché le *fuzzballs* o i *firewalls* danno origine a segnali di onde gravitazionali diversi da quelli calcolati a partire dal modello classico di buco nero previsto dalla RG. Gli stessi esperimenti che hanno portato alla conferma della teoria di Einstein potrebbero quindi permetterci in futuro di superarla, permettendoci così di esplorare il regime in cui la gravità diventa quantistica e di discriminare fra le varie ipotesi finora formulate.

Corrispondenza Gauge/Gravità

Una delle più interessanti conseguenze della teoria delle stringhe è la corrispondenza (o dualità) fra teorie di gauge e teorie di gravità. Come abbiamo visto, le teorie di gauge sono l'architettura su cui è costruito il MS delle particelle elementari e sono naturalmente definite sulle brane presenti nella teoria delle stringhe. Queste brane però hanno anche la proprietà di curvare lo spazio-tempo in cui sono immerse e quindi, secondo i principi della RG, sono sorgenti di campi gravitazionali. Nel 1997 Juan Maldacena riuscì a dimostrare che la teoria di gauge definita su un insieme di brane e la teoria di gravità che esse determinano deformando lo spazio-tempo, sono equivalenti tanto da poter usare l'una per cal-

colare quantità specifiche dell'altra e viceversa. Questo risultato ottenne subito un'ampissima risonanza e ancora oggi, dopo oltre venticinque anni, l'articolo di Maldacena è il più citato nella letteratura scientifica per quanto riguarda la fisica delle alte energie.

La corrispondenza di Maldacena è abbastanza semplice da formulare quando si considera la zona nelle immediate vicinanze delle brane dove lo spazio-tempo a 10 dimensioni viene percepito come il prodotto di due spazi a 5 dimensioni: uno che assume la forma di una sfera pentadimensionale, e l'altro che ricade in una classe ben nota in matematica detta spazio di Anti-de Sitter (AdS), in onore del matematico olandese Willem de Sitter. Il bordo di questo spazio di AdS è uno spazio-tempo piatto a 4 dimensioni che viene identificato con lo spazio-tempo di Minkowski sul quale è definita la teoria di gauge prodotta dalle eccitazioni a bassa energia delle stringhe.

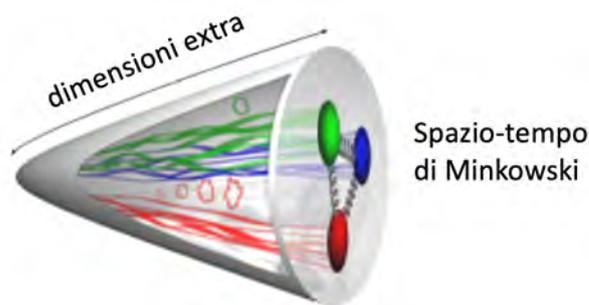


Figura 6: Nella corrispondenza olografica di Maldacena lo spazio-tempo di Minkowski su cui sono definite le teorie di gauge che descrivono le interazioni fondamentali del MS è il bordo di uno spazio più ampio in cui è presente una forma particolare di gravità che descrive la geometria di Anti-de Sitter.

La corrispondenza di Maldacena è dunque una corrispondenza fra una teoria di gravità nello spazio di AdS e una teoria di gauge definita sul suo bordo (come schematicamente indicato in figura 6). Più precisamente, questa corrispondenza è una relazione che collega una teoria di gauge massimamente supersimmetrica nel regime di accoppiamento forte in spazio piatto con una teoria di gravità in AdS debolmente interagente, o viceversa. Questa corrispondenza è dunque altamente non banale poiché stabilisce un legame fra teorie radicalmente diverse e per di più in regimi opposti!

Tale corrispondenza può anche essere interpretata come una dualità olografica, perché la relazione fra le due teorie è analoga a quella che esiste fra un oggetto tridimensionale ed un suo ologramma. Come l'ologramma, pur essendo definito in un piano bidimensionale, contiene tutta l'informazione sull'oggetto tridimensionale che rappresenta, così la teoria di gauge, pur essendo definita solo sul bordo, ha un contenuto di informazione uguale a quello della teoria gravitazionale, che invece è definita nell'intero spazio-tempo. L'idea di un comportamento olografico della gravità fu avanzata già agli inizi degli anni '90 dal premio Nobel G. 't Hooft (lo stesso che dimostrò la rinormalizzabilità delle teorie di gauge), per spiegare il fatto che l'entropia dei buchi neri è proporzionale non al suo volume ma all'area del suo orizzonte degli eventi come indicato in eq. (3). Nell'ambito della teoria delle stringhe questa idea qualitativa trova per la prima volta una precisa realizzazione quantitativa attraverso la dualità di Maldacena.

La corrispondenza gauge/gravità, in linea di principio, può essere usata in entrambe le direzioni: cioè possiamo usare la conoscenza delle teorie di gauge debolmente interagenti per dedurre le proprietà della gravità nel regime in cui essa è forte, oppure al contrario possiamo usare la nostra conoscenza classica della RG (e delle sue generalizzazioni), che è appropriata per descrivere il regime in cui la gravità è debole, per ricavare informazioni sulle teorie di gauge fortemente interagenti. Entrambi questi punti di vista rappresentano un vero e proprio cambio di paradigma concettuale rispetto al passato! Nonostante i numerosi progressi e i moltissimi lavori che sono stati ispirati dalla proposta originale di Maldacena e più in generale dall'idea della corrispondenza olografica gauge/gravità, sono ancora molte le domande che attendono una risposta. La principale fra queste è chiaramente se questo nuovo modo di interpretare le interazioni di gauge come ologramma di una teoria di gravità in dimensioni più alte sia veramente il modo giusto per ottenere il completamento del MS e descrivere le forze che tengono insieme il nostro Universo.

Concludiamo accennando ad un'altra relazione esistente fra le teorie di gauge e la gravità, le cui radici sono ancora una volta nella teoria delle

stringhe, cioè al legame fra la ampiezze gravitazionali calcolate diagrammaticamente usando le regole della RG e le ampiezze perturbative di una teoria di gauge. Anche se la Lagrangiana di una teoria di gauge e la Lagrangiana di Hilbert-Einstein della RG sono radicalmente diverse, le ampiezze di diffusione che si ricavano da esse soddisfano delle straordinarie relazioni per cui un'ampiezza gravitazionale risulta essere il quadrato (definito in modo opportuno) di un'ampiezza di gauge. Questo fatto è veramente sorprendente ma è stato ampiamente verificato. Recentemente questa relazione è stata utilizzata per riversare in ambito gravitazionale l'enorme quantità di informazioni che abbiamo sulle teorie di gauge al fine di ottenere risultati di altissima precisione sulle ampiezze gravitazionali. La speranza è che procedendo sistematicamente in questo modo si possano ottenere informazioni fondamentali per capire meglio il profilo e la forma delle onde gravitazionali originate da collisioni di buchi neri, o più in generale di oggetti massicci, specie nella fase di *inspiral*.

Ottenere un'estensione consistente del MS che includa la gravità e trovare una teoria pienamente soddisfacente per la gravità quantistica sono le due principali sfide che la fisica teorica delle alte energie dovrà affrontare nel prossimo futuro. Le relazioni finora evidenziate fra le teorie di gauge e le teorie di gravità sono certamente un ottimo punto di partenza per fare ulteriori progressi in questa direzione.



Alberto Lerda: È professore ordinario di Fisica Teorica presso l'Università del Piemonte Orientale e ricercatore associato dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN). Dal 2011 al 2019 è stato presidente della Commissione Scientifica Nazionale per la Fisica Teorica dell'INFN e presidente del Comitato Scientifico Internazionale del "Galileo Galilei Institute for Theoretical Physics" di Firenze. Si occupa di teoria delle stringhe, teorie di campo supersimmetriche, teorie conformi e teorie di gauge. È stato ed è coordinatore di numerosi programmi di ricerca dedicati alla teoria delle stringhe e alle sue applicazioni.

Cosa mettono in comune un comunicatore scienziato e il suo pubblico?

Sandra Lucente

Dipartimento Interateneo di Fisica, Università degli Studi di Bari Aldo Moro, Bari

Introduzione

Mi occupo di comunicazione della matematica dal 2007 e dal 2019 di comunicazione della scienza (si veda [1]). In questi anni c'è stata una rivoluzione degli strumenti che consentono di mettere in comune il sapere. Mettere in comune è proprio l'etimo della parola comunicazione, quindi l'analisi di questo cambiamento è imprescindibile per chi promuove la diffusione della conoscenza. Anni fa era il comunicatore a porgere argomenti e approfondimenti, oggi accade spesso il contrario, il pubblico è il protagonista della comunicazione selezionando i contenuti e i contenitori. Questo confronto potrebbe mettere in difficoltà gli scienziati, ma se questi rinunciassero all'attività di divulgatori lascerebbero sì il campo a comunicatori professionisti, ma priverebbero il pubblico del racconto su come si fa ricerca. Sempre più spesso i divulgatori ricorrono all'autobiografismo per consegnare una emozione al pubblico, sempre più spesso il pubblico cerca il coinvolgimento umano tra le equazioni,

le immagini micro e macroscopiche. Per lo scienziato comunicatore questo non è un deterrente, infatti si può facilmente mettere in comune la parte suggestiva del nostro lavoro: la fatica, il successo, l'insuccesso, il caso vissuto in un laboratorio, l'intuizione persa alla scrivania e ritrovata nella *hall* di un centro conferenze. La sfida di cui parliamo è dunque essere scienziati e comunicatori, ampliando il proprio pubblico da quello dei convegni a quello generico che accede alla rete e ai social.

Il comunicatore

Facciamo un passo per volta, partiamo da noi stessi, dal modo e dalle ragioni per cui accettiamo questa sfida. Riflettere sulla comunicazione e non sul contenuto è un po' come occuparsi di metateoria e non di una teoria: non si devono mai mischiare i livelli, altrimenti si genera il paradosso. Mentre si comunica non si deve mai pensare a come si sta comunicando, ma c'è un momento prima e dopo in cui riflettere sul-

l'efficacia del linguaggio (verbale, paraverbale e non-verbale) usato e su come si inserisce la nostra azione (dalla conferenza alla storia Instagram) in un percorso collettivo. Infine occorre un oggettivo confronto con altri comunicatori, un confronto che tenga conto delle differenze tra la comunicazione di una disciplina ed un'altra. Restando sempre sul livello personale, il comunicatore scientifico non deve essere ossessionato dalla originalità ma deve porre attenzione continua alla profondità delle idee che prova a consegnare al suo pubblico. Non è una sfida difficile, basta essere onesti con se stessi e tornare spesso a studiare, cosa che tra l'altro riesce facile ad un comunicatore scienziato.

Esempio 1. Ogni comunicatore matematico dovrà festeggiare il pigreco day. Cosa scrivere che non si sia già scritto su questa costante più affascinante? Il pubblico cerca storie e allora consegnamo loro proprio la storia del numero di Ludolph. Ecco, l'ho appena fatto. Precipitando dalle torte circolari del recente 14 marzo ai tentativi seicenteschi di calcolo delle cifre di pigreco ho incuriosito il lettore. Non è necessario che io prosegua in troppi dettagli sulla questione perché il lettore moderno è munito di cellulare su cui cercare tutto sul matematico tedesco che usava meravigliosamente il fioretto e l'esustione archimedeo. Insomma per comunicare un concetto matematico con profondità bisogna fare una proporzione tra il tempo storico attraversato da questa idea e il tempo individuale che abbiamo dedicato ad essa.

Il pubblico che sceglie

Allarghiamo ora il campo di visione al pubblico più vicino quale può essere un lettore (si veda [2]) o chi partecipa ad un evento. Si tratta di un pubblico che ha scelto l'argomento e il comunicatore. In questo caso è compito del divulgatore mettere in comune le sue conoscenze accettando di mescolarle con la curiosità e gli interessi di chi è presente. Diventa suo il motto di Italo Calvino "chi comanda all'ascolto è l'orecchio". In tanti hanno amato la chimica dopo aver letto "Il sistema periodico" di Primo Levi. Era questo l'intento dell'autore piemontese e la cornice autobiografica un trucco narrativo? Assolutamente no, la

scienza, la vita e la scrittura si intrecciano con ugual peso in quei racconti mirabili. Con questo modello, il comunicatore deve portare in modo personale contenuti fatti propri in una narrazione curata. Per questo un comunicatore non è un presentatore di slide, anzi se deve porsi sullo stesso piano del pubblico che l'ha scelto, è molto meglio usare oggetti. Passando alla materia che conosco meglio, si possono costruire molti oggetti geometrici e dimostrazioni visive con la stampante 3D, ma un matematico è anche molto creativo e quindi può ricorrere a tanti oggetti del quotidiano per spiegare concetti profondi.

Esempio 2. Il tema che preferisco è l'infinito, non solo perché ha attraversato tutta la storia del pensiero umano, ma soprattutto perché appartiene ad ogni ascoltatore (si veda [4]). Chi partecipa ad un laboratorio-gioco sulle le barrette di cioccolata mangiate dimezzando sempre il morso precedente rivela subito di avere il concetto di infinito numerabile. Si passano tra le mani fili paralleli, origami del teorema di Pitagora, si mostrano spirali di terra e di mare: piante e conchiglie. Poi si fanno scomparire portando la mente su autobus di infiniti posti verso hotel di infinite stanze. Certo, il paradosso di Galileo e la definizione di Dedekind cadranno su una slide, ma il divulgatore matematico non punterà tanto a consegnare la scoperta di Cantor, quanto a far scoprire che in chi ascolta una risorsa immaginativa. Ogni uomo ha una visione di infinito, e se la matematica è riuscita a formalizzarle senza confusione, l'ascolto delle varie visioni aiuta il comunicatore a comprendere egli stesso altri aspetti di questo concetto.

Il pubblico ampio

Infine la sfida del pubblico davvero ampio come quello che abbiamo se veniamo intervistati dalla radio o dalla televisione, se scriviamo su un quotidiano ma anche con un semplice post sui social o un blog molto seguito. La sfida ideale è da sempre "far capire che la matematica è bella". A dir la verità questa sfida non me la sono mai posta. Prima di tutto perché la bellezza si percepisce non si capisce, in secondo luogo perché la bellezza della matematica si mostra per caso e quindi non può essere né premio né culmine né pun-

to di arrivo. Immaginiamo di essere catapultati casualmente in un gruppo ed esordire dicendo “la matematica è bellissima”, l’effetto sarebbe lo stesso di entrare in un bar e convincere gli avventori che il romanzo di un autore sconosciuto è emozionante dicendo solo il nome dell’autore e il titolo del romanzo. Come tutti sanno leggere, così tutti hanno fatto esperienza delle basi della matematica, ma come non sono le singole lettere ad emozionarci in una lettura, così non sono le operazioni e le formule di geometria in fondo ai quaderni a rivelare il segreto della regina delle scienze. Se tutti i poeti hanno trascurato di illustrare la scomposizione in sillabe di a-mo-re per cercare di declinare quel sentimento nel loro tempo ricordando poesie di sempre, un comunicatore della matematica lasci stare quello che si insegna nella scuola primaria e punti molto più in alto: scelga un concetto moderno o addirittura un teorema recente! Perché comunicare la scienza è soprattutto mettere in comune le domande e queste sono vive sulle questioni presenti, mentre le risposte fanno da padrone sui concetti già acquisiti. Esempio cardine è dato dalla Fisica che coinvolge moltissimo quando racconta onde gravitazionali, quasi quanto l’Informatica quando profetizza i progressi dell’Intelligenza Artificiale. E la matematica? Comunicare la matematica significa svelare la forza delle sue domande. Stiamo implicitamente asserendo che studiare la matematica significa acquisire chiavi di lettura del mondo. Nella società degli algoritmi, delle distanze siderali e infinitesime questo è ancora più evidente.

Esempio 3. Un concetto adatto ad un ampio pubblico è quello di dimensione (si veda [5]). Tra l’implicita dimensione intera euclidea che non supera tre, la comparsa fisica della dimensione quattro, passando alla formalizzazione topologica di Poincaré e Brower passano duemila anni. Il racconto di questo concetto deve far proprio questo travaglio. Non importa se si utilizza un video o una lezione frontale, una serie di post su FB o un articolo divulgativo, coloro che ci ascoltano devono percepire le domande che hanno portato allo sviluppo del concetto. Ad esempio si può sottolineare che le dimensioni superiori alla quarta sono diventate più naturali nel Novecento, cioè quando le città hanno iniziato a distinguere tra dimensione urbana e dimensione

sociologica, dimensione economica e dimensione culturale, etc. Il passo successivo è quello di raccontare le dimensioni frazionarie e i frattali con le misure di un mondo frastagliato che va dal bordo della foglia alla struttura delle nubi interstellari. Ma il piccolissimo si fa immenso e il lontanissimo si rende vicino se la dimensione frattale si applica in medicina o in teoria delle reti (anche qui urbanistiche e sociali).

Conclusioni

Non so se ho mai fatto sentire quanto la matematica sia bella, forse umilmente questa bellezza si nasconde sotto quella del racconto. So di certo che è bella e che sono belli gli occhi di molti ragazzi che brillano quando guardano tutte le coniche in un flute inclinato; so che esperti di linguaggi che si dichiarano negati per la matematica passerebbero ore a fare laboratori di crittografia; so che nessuno resiste alla magia che decompone un cubo in due dodecaedri rombici stellati e ogni animo poetico diventa collezionista di forme dopo una passeggiata matematica. Ottenere questo effetto non è cosa che si fa senza entusiasmo, c’entra poco con le tabelle di terza missione o con l’auto-promozione del proprio progetto o di se stessi. Il comunicatore scienziato deve credere nel ruolo della scienza nel mondo moderno, nel senso ben descritto da Pietro Greco in [3]. Una scienza necessariamente plurale e collettiva mette in comune quindi comunica. Non saprei descrivere meglio questa sfida che con le parole di Rossella Panarese in [6] “Saper raccontare vuol dire avere a cuore l’ascoltatore, farsi carico dell’attenzione dell’altro, creare un filo comune tra chi parla e chi ascolta. Insomma, costruire una relazione. A me piace usare la metafora del ballo di coppia, che è tale se - e solo se - ognuno dei ballerini è concentrato sui suoi passi, ma in contatto con quelli dell’altro”.



- [1] M. Dabbicco, F. Liuzzi, S. Lucente, M. Trotta: *I corsi di comunicazione scientifica per studenti universitari. Analisi di una esperienza che esprime una necessità*, Quaderni di Comunicazione Scientifica, 1 (2021) 195.
- [2] D. Gouthier: *Scrivere di Scienza. Esercizi e buone pratiche per divulgatori, giornalisti, insegnanti e ricercatori di oggi*, Codice, Torino (2019).

- [3] P. Greco: *Quale comunicazione della scienza per i paesi emergenti*, J. Science Comm., 4 (2005) 1.
- [4] S. Lucente: *Infinite volte, infinite volute*, Incroci, 39 (2019) 81.
- [5] S. Lucente: *Le città invisibili, guidati da Italo Calvino nell'impero della matematica con la sacca del docente*, Ithaca, 18a (2021) 89.
- [6] R. Panarese, *Comunicazione Scientifica*, Introduzione di Chiara Valerio. Treccani (2021).



Sandra Lucente: Sandra Lucente insegna Analisi Matematica e Comunicazione della Scienza presso il Dipartimento Interateneo di Fisica ed è presidente del Museo della Matematica dell'Università di Bari. È membro del Comitato per la Comunicazione e la Divulgazione dell'UMI sulla Comunicazione della matematica e del Raising Public Awareness Committee per la comunicazione della matematica dell'European Mathematical Society.

Le malattie delle piante tra robot, AI e reti neurali

Andrea Luvisi Dipartimento Scienze e Tecnologie Biologiche e Ambientali, Università del Salento, Lecce

Nel futuro, non ci sono patologi vegetali: o meglio, la letteratura e la filmografia *mainstream* che si cimenta ad immaginare una realtà più o meno lontana, rappresenta raramente neanche l'agricoltore, forse impegnato nella gestione computerizzata di immaginifiche serre-laboratorio sepolte nei meandri di città-alveare o in fattorie spaziali che orbitano attorno a pianeti più o meno morenti. Di certo, nessuno usa la zappa, annaffia la terra o controlla se quella necrosi sulla foglia è da imputarsi ad un fastidioso parassita: per quello, anche se lo scrittore o sceneggiatore di turno non lo hanno specificato, ci penserà sicuramente un robot, antropomorfo o meno che sia, guidato da una allenata intelligenza artificiale.

Pertanto, tutto abbastanza semplice da immaginare e, sicuramente, coerente con l'evoluzione attesa per l'umanità, caratterizzata almeno da tre elementi principali: riduzione dell'impegno manuale, interventi da remoto, automazione sempre più spinta dei processi decisionali. Un mondo ben diverso da quello in cui viveva Heinrich Anton De Bary, nato a Francoforte nel 1831 e considerato uno dei padri della patologia vegetale. Personaggio sconosciuto ai più, abitava un mondo ancora pieno di incertezze in cui fattori soprannaturali, teorie sulla generazione spontanea e tesi umoraliste continuavano ad inquinare il dibattito scientifico sul ruolo dei patogeni delle piante, all'epoca circoscritti ai sostanzialmente ai funghi. Il suo sguardo verso il futuro lo porterà

a descrivere definitivamente il ciclo della peronospora della patata, affermando che la muffa è la causa della malattia e non la sua conseguenza. Sembra roba da poco, ma quel terribile patogeno aveva causato, negli anni '40 dell'800, terribili carestie in Europa, con particolari ripercussioni in Irlanda: ancora oggi si ricorda la "Great Famine", causa di almeno un milione di morti sugli otto che popolavano l'isola. Fatti lontani, così lontani e terribili che nel nostro presente sembrano non trovare asilo, quantomeno nelle società così dette avanzate. Di certo eventi come l'epidemia in Europa di *Xylella fastidiosa* hanno richiamato l'attenzione ad un agroecosistema non così imperturbabile come, almeno dal secondo dopoguerra, ci piacerebbe immaginare, ma resta sostanzialmente immutata un'ottimistica visione – almeno di alcuni – verso una agricoltura che sempre più si distacca da quel concetto di fatica a cui è ancestralmente legata.

E qui interviene la macchina a scandire le diverse rivoluzioni industriali che si sono succedute e che, con una certa dilazione temporale, hanno riverberato anche nell'agricoltura, la quale non si sottrae certamente alla fascinazione financo della sua ultima incarnazione, quell'Industria 4.0 fatta di *advanced manufacturing solution*, realtà aumentata, *big data analytics* e quant'altro sta sempre più permeando il nostro vivere. Sui vantaggi, almeno concettuali, c'è poco da aggiungere: riuscire a definire in tempo

reale un ambiente complesso come quello di coltivazione e predire la sua evoluzione, monitorare le condizioni fisiologiche e salutari delle piante in modo automatizzato, effettuare interventi da remoto per la gestione e la protezione delle colture – magari anche minimizzando l'impiego di personale – sono solo alcune ipotesi che accenderebbero l'interesse di qualsiasi imprenditore agricolo. In realtà, l'elemento di interesse è che, in diversi casi, non si tratta solo di ipotesi, ma di realtà.

Facendo specifico riferimento alla gestione delle piante ed alla loro protezione, l'agricoltura di precisione risulta essere l'ambito applicativo attualmente più rilevante: basti pensare alle operazioni di semina o messa a dimora delle piante con seminatrici o trapiantatrici ad elevata automazione, piuttosto che a sistemi per la potatura, la distribuzione dell'acqua, dei fertilizzanti o dei prodotti fitosanitari in grado di differenziare i quantitativi in base alle effettive esigenze. Difatti le macchine agricole connesse e geolocalizzate rappresentano buona parte di ciò che consideriamo agricoltura 4.0 (in Italia rappresentano oltre il 70% del fatturato dell'agritech innovativo), ma dobbiamo anche ricordare che tali soluzioni affondano le loro radici negli anni '90 del secolo scorso e, pur oggetto di una profonda e continua evoluzione, non possono essere ascrivibili a soluzioni robotizzate più avveniristiche e recenti che, diversamente, impattano per circa il 2% della spesa 4.0. Altre soluzioni che trovano significative applicazioni sono quelle riferite all'IT ed all'Internet of Things, seppur con quote nazionali di fatturato pari a circa un quarto rispetto alle macchine agricole. Subito dopo troviamo le soluzioni derivanti dall'impiego di software gestionale, sottolineando alcuni ambiti di applicazione principali come programmi per la razionalizzazione degli input e degli strumenti produttivi (es. monitoraggio macchine, gestione acqua e fertilizzanti), modelli previsionali per le malattie e gestionali aziendali. Tutto questo può essere poi ritrovato, anche in forme tecnologicamente più raffinate e con maggiore precisione di intervento, nell'ambito delle colture protette – le serre – dove l'ambiente confinato consente un capillare impiego di sensoristica funzionale anche ad una gestione *real time* di alcuni importanti parametri di coltivazione come la

temperatura, l'umidità e l'irraggiamento ed una generale maggiore applicazione del concetto di automazione.

Fin qui le soluzioni più comuni che, come possiamo intuire, lambiscono soltanto la gestione delle malattie delle piante e rendono il robot-patologo qualcosa di ancora forse lontano. Eppure, la letteratura scientifica degli ultimi anni, non è certo risultata priva di numerose evidenze sperimentali sul tema. Molto è stato – ed è – sperimentato per l'implementazione di sistemi automatizzati di diagnosi sintomatologica, ovvero di metodi in grado di leggere e interpretare le immagini raccolte sia manualmente che da apparecchiature più avanzate (es. droni, mezzi semoventi, robot) su piante mostranti un quadro sintomatologico alterato. Si tratta, evidentemente, della chiave di volta per una patologia vegetale futuribile: inquadrare con una fotocamera o strumento analogo una pianta ed avere immediatamente il responso sull'identità del responsabile del danno. Facile da immaginare, un po' meno da realizzare. Come detto, la letteratura è sempre più ampia e mostra l'avvalersi di strumenti e soluzioni d'avanguardia e diversificate: per l'acquisizione dei dati si va dalle più semplici immagini RGB a quelle multispettrali od iperspettrali, mentre per l'interpretazione delle stesse si sperimentano sistemi di machine learning e deep learning. Eppure si tratta di soluzioni che raramente hanno avuto una effettiva applicazione pratica, ovvero sono limitatissimi i trovati con un risvolto commerciale e che, pertanto, risultano effettivamente utilizzati dagli agricoltori in modo ordinario. Una delle motivazioni è riferibile all'attendibilità dei risultati nelle applicazioni reali, ovvero al di fuori del contesto sperimentale. In particolare, l'elemento di criticità è, molto spesso, il raggiungimento di una elevata specificità analitica, soprattutto durante le prime fasi di sviluppo della malattia ed in contesti complessi dove i fattori di stress (biotici ed abiotici) sono più d'uno. In altri termini, tali soluzioni possono risultare poco efficienti nel distinguere malattie differenti, confondendo patogeni tra loro o scambiando stress biotici con fattori ambientali. In verità il riscontrarsi di tale problematica è del tutto logica e, in un certo senso, attesa, in quanto limitati sono i casi in cui, in natura, i patogeni determinano sintomi a carattere patognomoni-

co, ovvero così caratteristici da portare ad una diagnosi certa. Sicuramente più comune è il caso di una più o meno accentuata convergenza sintomatologica, dove fattori causali differenti determinano quadri per certi versi simili. E ciò è ancor più spiccato proprio nelle prime fasi di sviluppo di una malattia, quando i sintomi risultano ancora limitati e deboli. Non desta pertanto meraviglia il fatto che, ormai da diversi decenni, il patologo vegetale non sia più soltanto un osservatore di sintomi ma un analista che deve ricorrere ad accurate analisi diagnostiche laboratoriali per scoprire il colpevole: in definitiva, né più né meno di quanto accade dopo una prima visita ambulatoriale dal proprio medico di base e la successiva necessità di effettuare delle analisi del sangue. L'occhio e l'esperienza, pur rimanendo elementi fondamentali per guidare il processo diagnostico, non sono più sufficienti per soddisfare la richiesta di accuratezza che una agricoltura moderna necessita.

La consapevolezza di questi limiti fa sì che la patologia vegetale 4.0 non si limiti ad esplorare nuove soluzioni per la diagnosi sintomatologica, ma cerchi di sviluppare sistemi avanzati anche di diagnosi biologica finalizzati, ad esempio, ad accelerare e semplificare la determinazione degli agenti causali: si pensi a soluzioni *lab-on-chip*, ovvero sistemi miniaturizzati in grado di riprodurre analisi convenzionali (es. analisi del DNA, piuttosto che di tipo immunoenzimatico) in piccoli e maneggevoli apparecchi che possono essere utilizzati direttamente in loco ed in grado di fornire dei risultati analitici nel giro di pochi minuti, piuttosto che strumenti in grado di valutare i diversi profili di composti volatili emessi da una pianta ed associabili a processi alterativi ben definiti. In questi casi, trattandosi di diagnosi biologiche, le problematiche connesse al raggiungimento di soddisfacenti livelli di sensibilità e specificità, sono perlopiù vincolate a fattori di costo, di miniaturizzazione o semplicità d'uso. Indipendentemente dal sistema diagnostico prescelto, resta poi la questione dell'automazione del monitoraggio dello stato sanitario delle piante, ovvero lo sviluppo di piattaforme hardware mobili – terrestri od aeree – in grado di interagire con la pianta, ovvero di riconoscerla, attuare il protocollo diagnostico, manipolarla od effettuare financo l'intervento fitoiatrico. Qui, naturalmen-

te, robotica e sensoristica la fanno da padrona, con soluzioni già oggi particolarmente sofisticate ed efficienti, ma anche in questo caso, con alcuni limiti quando si guarda all'applicazione in ambito agricolo: il campo, ed in minor misura la serra, risulta essere un ambiente particolarmente stressante per la componentistica *high-tech* (es. terra, polveri, umidità, acqua, fango), oltre ad essere soggetto ad un'alta variabilità e mutevolezza di condizioni (si pensi all'illuminazione, alla forma e dimensione delle piante, alla comparsa di flora spontanea) che possono complicare la definizione di elementi stabili utili a semplificare la mobilità e l'interazione delle macchine.

Se questi sono alcuni sguardi sulla gestione delle malattie delle piante nell'ambito dell'agricoltura 4.0, il risvolto pratico e concreto lo possiamo forse meglio riassumere prendendo in considerazione la superficie agricola che si stima sia effettivamente coltivata con strumenti 4.0: superficie che, a livello nazionale, si aggira attorno al 4%. Una stima che non deve di certo allarmare né far immaginare ad una sorta di falsa partenza: è chiaro come si sia solo nelle prime fasi di una potenziale rivoluzione, e che questa abbia bisogno di tempo, oltre che di una evoluzione tecnologica in grado di permeare il settore. Perché, oltre ad alcuni limiti tecnologici di cui si è accennato, non dobbiamo dimenticare altri due fattori che, in qualche modo, possono rappresentare una forma di rallentamento all'adozione di queste soluzioni: la mentalità dell'agricoltore ed i costi. L'agricoltura è una attività antropica che, generalmente, trova forza e conforto nella tradizione e sull'esperienza dell'agricoltore stesso e della comunità in cui opera: elementi che, fra l'altro, sono comunemente trasferiti anche sul carattere identitario del prodotto. È pertanto comune ritrovare, se non una diffidenza, quantomeno uno slancio più cauto verso cambiamenti sostanziali, soprattutto quando si parla di gestione delle piante. L'agricoltura non è fatta di salti nel vuoto, ma di scelte ponderate, di tempi lenti, di dialogo con l'ambiente, oltre che di cura ed amore verso la terra, le piante e quel territorio che si va a plasmare. Di certo, il ricambio generazionale in atto – sempre più aziende vedono ai vertici giovani agricoltori – non potrà che agevolare l'adozione di soluzioni oggettivamente distanti da quelle utilizzate ordinariamente oggi. Infine, co-

me accennato, c'è l'aspetto economico, ovvero che tali soluzioni possono rappresentare dei costi talvolta significativi e, anche quanto mirano a generare risparmi d'esercizio, possono necessitare di investimenti iniziali cospicui. Il discorso si fa evidentemente complesso e lontano dal recinto di discussione prefissato, ma appare evidente come lo spazio di manovra per investimenti eccedenti a quelli funzionali per la consueta pratica agricola risultano, molto frequentemente, di difficile attuazione, restando confinati a grandi realtà aziendali od operanti in ambiti ad alto valore aggiunto. Il quadro economico, che risulta anche periodicamente stressato da fattori esterni, non rende pertanto il comparto agricolo il migliore dei contesti dove osservare la ricaduta di trovati 4.0, ma non dobbiamo per questo scoraggiarci ed abbandonare ogni fantasticazione sulle futuribili fattorie orbitanti con cui abbiamo introdotto il tema. L'ondata di cambiamento tecnico-scientifico a cui stiamo assistendo negli ultimi decenni è così impetuosa da risultare inevitabile anche dove sembra ci siano oggi argini insuperabili. Quindi, se nel frattempo vi capiterà di vedere un patologo intento a camminare tra filari di vite, soffermandosi ad osservare i margini di una foglia ed inarcare un sopracciglio, riflettendo sul quesito che la pianta gli pone, non allarmatevi: va tutto bene, siamo solo ancora nel presente



Andrea Luvisi: è professore di I fascia in Patologia Vegetale presso l'Università del Salento. È Presidente del Consiglio Didattico del Corso di Laurea in Viticoltura ed Enologia dell'Università del Salento (2020-2024), membro della Giunta del Coordinamento Universitario Nazionale dei Corsi di Laurea in Viticoltura ed Enologia (CU-VE) (2022-2023), Accademico aggregato dell'Accademia dei Georgofili, Accademico corrispondente dell'Accademia Italiana della Vite e del Vino, Membro del Comitato Tecnico-Scientifico per il contenimento di *Xylella fastidiosa* della Regione Puglia, Membro del Collegio di Dottorato in Scienze e Tecnologie Biologiche e Ambientali dell'Università del Salento, Responsabile del Laboratorio di Patologia Vegetale dell'Università del Salento.

Prospettive per nuovi orizzonti nell'astrofisica

Maurizio Spurio

*Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Bologna
INFN - Sezione di Bologna*

L'astrofisica ha avuto sviluppi straordinari negli ultimi 80 anni grazie all'avvento di nuove bande osservative nella radiazione elettromagnetica; dai radiotelescopi e telescopi all'infrarosso sulla superficie della Terra, ai telescopi per raggi ultravioletti, raggi-X e raggi-gamma trasportati fuori dall'atmosfera terrestre da satelliti. Buona parte, se non la totalità, della radiazione rilevata dai tradizionali telescopi ottici e da questi nuovi strumenti viene emessa da processi che coinvolgono elettroni. Tuttavia, l'Universo è elettricamente neutro e altrettanti protoni sono presenti. I protoni, essendo più massivi degli elettroni, emettono meno radiazione elettromagnetica. Sinora, l'astrofisica ha ricevuto poche informazioni sui processi di alta energia che coinvolgono protoni, nuclei e particelle instabili che, come protoni e neutroni, sono composte da quark. Complessivamente, le particelle con struttura a quark sono chiamate adroni. Gli ultimi anni hanno visto la nascita di due nuove tecniche osservative dell'Universo: i telescopi per neutrini e i rivelatori di onde gravitazionali. I neutrini possono essere prodotti solo da processi che coinvolgono adroni. Anche le onde gravitazionali sono emesse da oggetti massivi e

compatti, tra cui le stelle di neutroni. In definitiva, sia i neutrini che le onde gravitazionali trasportano informazioni relative alle regioni dell'Universo dove dominano i processi che coinvolgono adroni. Nei prossimi anni, le nuove generazioni di telescopi di neutrini e onde gravitazionali permetteranno di avere informazioni sulle proprietà degli oggetti astrofisici in cui le interazioni degli adroni lasciano un segnale più visibile di quello degli elettroni, e che sinora non eravamo capaci di osservare. In questo articolo, passo brevemente in rassegna lo stato e le possibili prospettive di questo settore di ricerca.

I due Modelli Standard

Gran parte della nostra conoscenza dell'Universo e della sua storia evolutiva si fonda sull'osservazione della radiazione elettromagnetica, di cui la luce visibile costituisce una piccola porzione. Per un tempo estremamente lungo, l'occhio umano è stato l'unico strumento utilizzato per studiare l'Universo. Dal 1610, con Galileo, è iniziata l'epoca degli strumenti ottici, dal suo piccolo cannocchiale ai giganteschi telescopi odierni. Solo dopo la fine della seconda guerra mondiale, altri strumenti sono stati inventati e utilizzati per estendere la visione fuori dall'intervallo della luce visibile.

La comprensione dei processi che coinvolgono la produzione e propagazione della radiazione elettromagnetica dal punto di vista della fisica classica si è completata attorno al 1860. Nei successivi 60 anni, nuove tecniche osservative portarono a evidenziare i limiti della teoria classica nel descrivere i fenomeni atomici e molecolari prima, e nucleari poi. Nasce così la meccanica quantistica, il primo tassello per la costruzione del quadro di riferimento attuale per la descrizione del microcosmo, che è chiamato **Modello Standard**.

Lo studio sperimentale del macrocosmo, e in particolare della struttura dell'Universo, nasce intorno agli '30 del secolo scorso, con la osservazione della recessione delle galassie fatta da E. Hubble [1]. Ma il vero punto di partenza della cosmologia osservativa è la scoperta della radiazione cosmica di fondo (CMB) avvenuta nel 1964 da parte di A. Penzias e R.W. Wilson. Grazie alla possibilità di studiare questa radiazione fuori dall'atmosfera terrestre per mezzo di satelliti, abbiamo acquistato una visione della storia evolutiva dell'Universo dal Big Bang a oggi che ha superato diverse verifiche sperimentali e ha portato a un Modello Standard del macrocosmo.

Dalle osservazioni, sappiamo che l'Universo è composto da materia, e non da materia e antimateria come invece ci si aspetterebbe dai processi di conversione energia-massa nei laboratori di alta energia in base alla relazione einsteiniana $E=mc^2$. Ad esempio, una particella neutra come il fotone, che se ha sufficiente energia, può generare una coppia particella-antiparticella. Perché il Big Bang in cui inizialmente parte dell'energia si trasforma in massa porti alla formazione di un Universo solo fatto di materia e non materia e antimateria, è uno dei misteri che deve essere ancora risolto dal Modello Standard del microcosmo delle particelle elementari. Un Universomateria è costituito principalmente da atomi di idrogeno con un protone (composto da quark) nel nucleo e un elettrone orbitante. Un Universo-antimateria è costituito principalmente da atomi di anti-idrogeno con un antiprotone (composto da antiquark) nel nucleo e un positrone orbitante.

Dal punto di vista di un fisico sperimentale che si occupa di astrofisica delle particelle (quale io sono) noto una particolarità: il settore dei

Modello Standard delle Particelle Elementari

tre generazioni della materia (fermioni)			mediatori delle forze / interazioni (bosoni)		
	I	II	III		
massa	$=2.2 \text{ MeV}/c^2$	$=1.28 \text{ GeV}/c^2$	$=173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$=124.97 \text{ GeV}/c^2$
carica	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	u up	c charm	t top	g gluone	H higgs
	d down	s strange	b bottom	γ fotone	
	e elettrone	μ muone	τ tauone	Z bosone Z	
	ν_e neutrino elettronico	ν_μ neutrino muonico	ν_τ neutrino tauonico	W bosone W	

Figura 1: Tabella riassuntiva del modello standard delle particelle elementari, con i costituenti ultimi della materia, in base alle nostre conoscenze. Per ogni particella è riportata massa, carica e spin. A sinistra, le tre generazioni della materia (o famiglie di particelle) che sentono le interazioni. La prima famiglia (I) contiene l'elettrone e il suo neutrino e i quark u e d di cui sono costituiti protone e neutrone. Le tre famiglie di particelle hanno in corrispondenza tre famiglie di antiparticelle. A destra, le particelle che scambiano le interazioni. Per queste, non sussiste distinzione tra particella e antiparticella.

quark (vedi Figura 1) è molto studiato nel Modello Standard del microcosmo, e molto meglio conosciuto del settore dei leptoni (che contiene l'elettrone). Tra i leptoni, vi sono i neutrini che sono molto difficili da studiare a causa della loro piccola probabilità d'interazione e la necessità quindi di utilizzare rivelatori di dimensioni molto grandi.

Ad esempio, conosciamo molto bene il diverso comportamento nei processi di decadimento che coinvolgono quarks ed antiquarks: in gergo tecnico, si chiama violazione di CP [2]. Dagli anni '60 si sospettava che l'asimmetria osservata nell'Universo tra materia e antimateria potesse essere legata a questa violazione di CP nel settore dei quark. Oggi sappiamo che la violazione che esiste ed è osservata tra quark è troppo piccola per poter spiegare l'asimmetria presente. È quindi possibile, ad esempio, che la scomparsa dell'antimateria nell'Universo sia stata originata

da qualche meccanismo concernente una asimmetria tra il comportamento dei neutrini e degli antineutrini (violazione di CP nel settore leptonic). Comprendere questo aspetto usando i neutrini è uno degli obiettivi dello studio del settore leptonic nei prossimi decenni.

Viceversa, nel Modello Standard del macrocosmo la situazione è completamente rovesciata a favore dei leptoni. Qui, gran parte di quello che sinora è noto scaturisce dai meccanismi d'interazione degli elettroni, ossia i leptoni carichi più leggeri. È infatti la perdita di energia degli elettroni a dare i segnali elettromagnetici studiati dall'astronomia. Viceversa, è quasi nullo il segnale rilevato dagli astronomi, prodotto da protoni, neutroni e nuclei. Scherzando, ai colleghi astronomi del mio Dipartimento spiego che il loro lavoro è giustificato solo dagli elettroni nell'Universo, e le proprietà dell'altra metà del cielo (quella legata ai protoni) è loro totalmente sconosciuta. Nel seguito dell'articolo, cerco di spiegarvi il motivo per cui i prossimi anni saranno centrati anche sull'astronomia prodotta da meccanismi che coinvolgono i protoni.

L'astronomia tradizionale

Elettrone e protone sono le particelle che formano l'atomo d'idrogeno, l'elemento che costituisce il 90% della massa ordinaria dell'Universo. Esse hanno carica elettrica uguale (con segno opposto) ma masse molto differenti: il protone ha massa 1840 volte quella dell'elettrone. Questo provoca una asimmetria nel loro comportamento. Infatti, i meccanismi elettromagnetici di emissione di energia, quelli, per intenderci, che producono la radiazione, dalla frequenza delle onde radio rilevate dai radiotelescopi a quella dei raggi-X rilevati con satelliti, dipendono dall'accelerazione e dalla carica elettrica della particella interessata. Poiché l'accelerazione di una particella, a parità di forza agente e carica elettrica, è inversamente proporzionale alla massa, l'elettrone più leggero perde enormemente più energia dei protoni nelle regioni in cui le particelle stesse vengono accelerate. È questa la ragione del fatto che menzionavo: l'emissione rilevata dal radio fino ai raggi-X osservata con strumenti sulla Terra è principalmente legata ai meccanismi di emissione di radiazione da parte degli elettroni

carichi. Una immagine eloquente di questo fatto è illustrata nella Fig. 2.

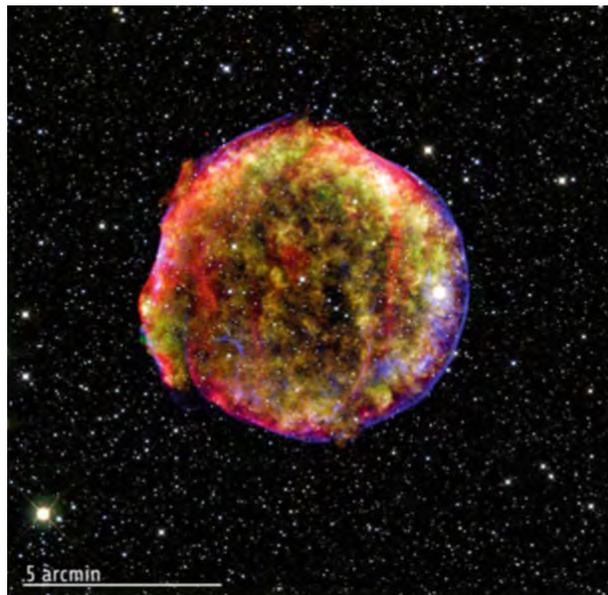


Figura 2: Questa immagine mostra la regione dove avvenne l'esplosione di una stella brillante testimoniata da Tycho Brahe e altri astronomi di quell'epoca (1574). L'immagine combina osservazioni a raggi X e infrarossi ottenute rispettivamente con l'Osservatorio a raggi X Chandra della NASA e il telescopio spaziale Spitzer, e all'Osservatorio di Calar Alto, in Spagna. Tutta l'emissione è dovuta al moto di elettroni nella regione in cui sono presenti intensi campi magnetici. Crediti: Raggi X: NASA/CXC/SAO, Infrarossi: NASA/JPL-Caltech; Ottico: MPIA, Calar Alto. [3]

Ogni volta che è aumentata la sensibilità di un telescopio, o aperta l'osservazione di una nuova finestra osservativa, nuovi orizzonti si sono aperti nelle nostre conoscenze. I primi grandi telescopi ottici degli anni '30 del secolo scorso portarono alla scoperta che l'Universo era composto di tante galassie come la nostra. La radioastronomia sviluppata dagli anni '50 con le tecniche di rivelazione delle onde radio nate durante la seconda guerra mondiale, ha portato alla scoperta delle pulsar (stelle di neutroni), dei quasar e delle galassie con nucleo attivo. Le osservazioni nell'infrarosso hanno offerto la possibilità di studiare come si formano le stelle. Le osservazioni con raggi X, possibili dopo l'avvento dell'era spaziale con la possibilità di trasportare telescopi fuori dall'atmosfera terrestre, hanno portato alla scoperta dei buchi neri di massa stellare. In

tutti questi casi, di nuovo, sappiamo ciò che gli elettroni, accelerati in qualche modo da oggetti astrofisici, ci dicono rilasciando energia.

Sino a poco tempo fa, non eravamo capaci di leggere quello che i protoni (e i nuclei) potevano dirci. Conosciamo sin dal 1912 che un flusso di raggi cosmici (Figura 3), prevalentemente composto da protoni e nuclei, arriva sulla Terra a energie così elevate da non poter essere mai eguagliate da nessun acceleratore terrestre. Come questi raggi cosmici siano originati, e da quali processi astrofisici abbiano origine, è ancora un mistero. Potrebbero essere coinvolti oggetti di classi già note agli astronomi, oppure qualcosa di inaspettato.

Solo negli ultimi anni, con le osservazioni dei neutrini e delle onde gravitazionali stiamo imparando a decifrare quello che le particelle più pesanti (protoni, nuclei) ci dicono della struttura e storia dell'Universo, confermando, ampliando o revisionando quello che ci hanno detto gli elettroni.

Neutrini e Raggi Cosmici

Il neutrino è la particella più elusiva che conosciamo: quando fu ipotizzato da W. Pauli nel 1930, si temeva che non potesse essere mai rivelato. Il motivo è che esso è privo di carica elettrica, e la sua probabilità d'interazione con la materia ordinaria è molto piccola. Oggi sappiamo che neutrini, oltre che dalla radioattività, sono prodotti dai processi di fusione nucleare che mantengono in vita le stelle, dalle esplosioni conseguenti il collasso gravitazionale stellare, dalle interazioni tra particelle cariche accelerate da meccanismi astrofisici. Alcuni dei meccanismi astrofisici connessi con la produzione di neutrini sono anche all'origine dei raggi cosmici (RC).

I RC sono semplicemente particelle cariche (principalmente, protoni e nuclei) estremamente energetiche che permeano la Galassia e, in più piccola parte, l'Universo [5, 6]. La presenza di elettroni nei RC è minimale (vedi Figura 3). Nulla differenza un protone dei RC da un ordinario protone nell'atomo d'idrogeno: solo la sua enorme energia cinetica. Questa energia cinetica deve essere fornita alle particelle da qualche meccanismo di accelerazione di oggetti astrofisici presenti nella nostra Galassia e in galassie

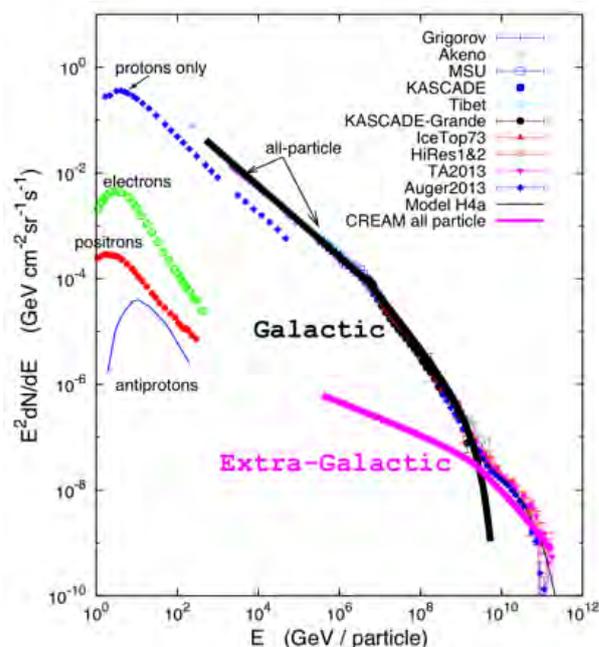


Figura 3: Flusso di raggi cosmici (RC) in arrivo sulla Terra in funzione dell'energia. I RC sono particelle stabili, in prevalenza protoni e nuclei, accelerati da sorgenti galattiche ed extragalattiche. Le due curve (nera e viola) rappresentano i contributi relativi di queste due componenti. La frazione di elettroni nei RC (punti verdi) è minoritaria. Gli elettroni non riescono a sfuggire dalle regioni di accelerazione a causa dei meccanismi di perdita di energia. Nei RC sono presenti anche antiparticelle: positroni (ossia, anti-elettroni punti rossi) e antiprotoni (linea blu). Queste anti-particelle sono prevalentemente prodotte dall'interazione dei RC con il mezzo interstellare. La figura è presa da una compilazione didattica della Collaborazione IceCube utile da consultare [4].

lontane. Schematicamente, basandoci sulle osservazioni, ciascuna galassia produce i suoi RC che rimangono per molto tempo confinati dentro la galassia stessa. Pian piano, buona parte di questi RC esce dalla galassia d'origine (con tempi medi delle decine di milioni di anni) e si propaga nell'Universo. I tempi di permanenza nella galassia di origine dipendono dall'energia: tanto più energetico è un RC, tanto prima fuoriesce. Noi sulla Terra, in un punto periferico della Galassia, osserviamo i RC da oltre 100 anni ma non sappiamo da chi e come vengano prodotti, ovvero quali siano gli straordinari meccanismi di accelerazione coinvolti, figura 4.

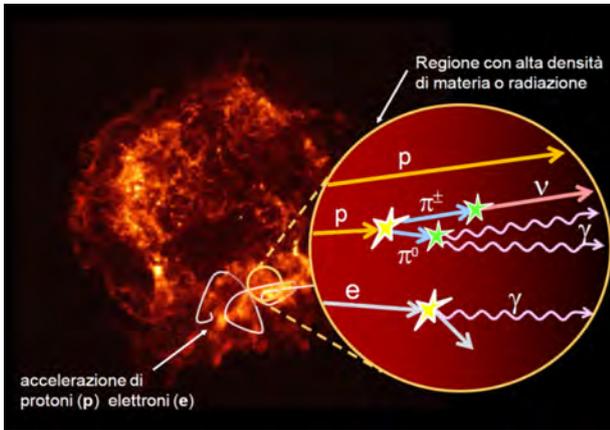


Figura 4: Interconnessione tra raggi cosmici (RC), raggi gamma (γ) e neutrini (ν). Sorgenti astrofisiche possono accelerare RC (protoni, elettroni e nuclei) a enormi energie. Gli elettroni dissipano gran parte della loro energia localmente. Una frazione dei protoni e nuclei diffonde all'esterno della regione di accelerazione, si propaga nello spazio galattico (o intergalattico, se la sorgente è esterna alla Galassia) e può giungere sulla Terra. I RC carichi non viaggiano in linea retta a causa delle deflessioni dovute a campi magnetici. La misura della direzione di arrivo dei RC non permette quindi di determinare la posizione della sorgente. Una frazione di protoni (o nuclei) accelerati può invece interagire con la materia o coi campi elettromagnetici che circondano la sorgente. In questo caso, il decadimento di particelle secondarie neutre (principalmente π^0) produce una coppia di raggi- γ , mentre il decadimento di particelle cariche (principalmente π^+ oppure π^-) produce neutrini. L'interazione di elettroni con la materia o radiazione produce solo raggi- γ . Quindi, la rivelazione di neutrini dalla direzione di una sorgente è un modo univoco per scoprire quali sono le sorgenti acceleratrici di protoni e nuclei.

Il problema è che la Galassia (e anche le regioni di spazio tra le galassie) ospita campi magnetici che deflettono i RC carichi. Quindi, osservare la direzione apparente di provenienza di un protone, elettrone o nucleo non permette di individuare la sorgente che lo ha accelerato, figura 5. Per questo, occorre ricorrere a sonde neutre, che non possono essere deflesse dai campi magnetici. Le uniche particelle prive di carica elettrica provviste dalla natura capaci di percorrere regioni dell'Universo molto estese sono i fotoni e

i neutrini (e come vedremo più avanti, le onde gravitazionali).

Esperimenti che misurano con precisione raggi gamma sono entrati in funzione nell'ultima decade [7]. Uno dei problemi dell'astronomia con raggi gamma, tuttavia, è il fatto che questi possono essere assorbiti dalla materia che si frappone tra la sorgente e la Terra. I neutrini, invece, risentono molto meno della presenza di materiale assorbente. Tuttavia, il flusso di neutrini di origine cosmica in arrivo su una certa superficie decresce molto al crescere della loro energia: occorrono quindi esperimenti di scala gigantesca per potere rivelare i neutrini di energia estrema [8, 9].

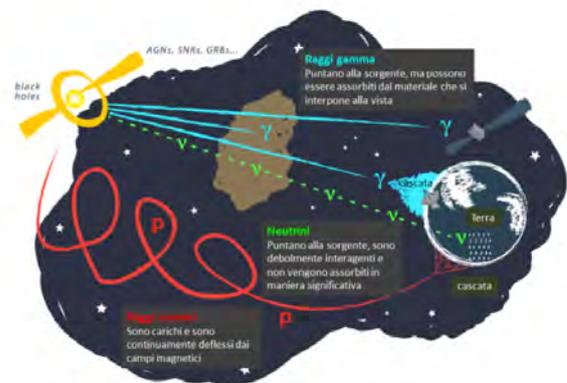


Figura 5: Schema di propagazione dalle possibili sorgenti (nella galassia o extragalattiche) alla Terra di raggi cosmici carichi (principalmente, protoni), raggi gamma e neutrini. Raggi gamma e neutrini sono particelle neutre e si propagano in linea retta, ma hanno caratteristiche di propagazione differenti. Immagine: Juan Antonio Aguilar and Jamie Yang. IceCube/WIPAC (adattata in italiano).

Telescopi per Neutrini

L'idea che portò alla realizzazione di quelli che oggi chiamiamo telescopi di neutrini fu del russo M.A. Markov [10], che all'inizio degli anni '60 propose di disporre un numero molto elevato di rivelatori ottici, chiamati fotomoltiplicatori (PMT), sotto un grande spessore di acqua marina o di un lago, attrezzando un volume dell'ordine di 1 km^3 . L'acqua rappresenta il mezzo (gratuito) in cui i neutrini di altissima energia interagiscono. Le particelle cariche prodotte dall'interazione del neutrino generano luce Cherenkov

nel mezzo attraversato e, poiché, alle lunghezze d'onda interessate, l'acqua è trasparente, la luce può essere raccolta dai PMT. Infine, ponendo la strumentazione in profondità, si ha la schermatura necessaria per ridurre di molti ordini di grandezza la radiazione di luce solare e il flusso di particelle prodotte dall'interazione dei RC in arrivo. Attualmente, i telescopi di neutrini [11] in funzione o in costruzione nel mondo sono IceCube in Antartide (Figura 6: il ghiaccio a grande profondità è trasparente come e più dell'acqua), GVD in un lago della Siberia, e KM3NeT nel mar Mediterraneo. Un predecessore di KM3NeT a scala più piccola (ANTARES) ha terminato di funzionare, dopo molti anni di presa dati, sempre nel Mediterraneo nel 2022 [12]. IceCube è stato completato nel 2010; GVD è in avanzato stato di costruzione; KM3NeT è in costruzione e dovrebbe superare la sensibilità di IceCube nel 2026.

Le proprietà del neutrino (energia, direzione di provenienza, famiglia) possono essere dedotte solo se un neutrino interagisce in prossimità del rivelatore e produce particelle cariche. Queste si muovono nella direzione di provenienza del neutrino e trasportano buona parte della sua energia. Poiché sono particelle cariche, lasciano segnali rivelabili negli apparati sperimentali. Si è sicuri che sono davvero particelle indotte dall'interazione del neutrino quando provengono dal basso e si dirigono verso l'alto. Solo il neutrino, infatti, può attraversare il diametro terrestre senza essere assorbito e, occasionalmente, interagire in prossimità del rivelatore. Oppure, l'interazione è dovuta all'arrivo nel neutrino se non si vede entrare nulla nell'apparato sperimentale, e a un certo punto si osserva la nascita di particelle cariche nella regione interna. Anche in questo caso, solo il neutrino può produrre eventi di questo tipo. L'unico fondo che simuli l'arrivo di un neutrino cosmico è infatti l'arrivo di un neutrino di origine atmosferica. Questi sono neutrini prodotti da RC che arrivano sulla sommità dell'atmosfera e producono neutrini con gli stessi processi mostrati in Fig. 4. Poiché le direzioni dei RC carichi sono modificate in modo casuale dai campi magnetici interstellari, questi neutrini secondari non ci danno informazioni astrofisiche, ma il loro studio è stato fondamentale per la fisica delle particelle.

Tenendo conto del fondo dovuto ai RC secondari (principalmente muoni) che si propagano verso il basso e dei neutrini atmosferici in arrivo da tutte le direzioni, neutrini di origine astrofisica possono essere selezionati in tre modalità:

- Metodo direzionale: evidenziando un eccesso di eventi provenienti da una specifica posizione nel cielo. Questo è possibile usando prevalentemente la direzione ricostruita delle particelle cariche indotte dall'interazione di un neutrino proveniente dal basso e diretto verso l'alto. Per questo tipo di eventi, generalmente la misura dell'energia è imprecisa.
- Metodo energetico: evidenziando un eccesso di eventi di più alta energia rispetto a quanto aspettato nei neutrini atmosferici, prevalentemente usando neutrini che interagendo inducono cascate di particelle secondarie. In questo caso, anche eventi provenienti dall'alto possono essere studiati, se l'interazione avviene entro il rivelatore. In generale, la misura della direzione è però imprecisa.
- Metodo multi-messaggero: selezionando eventi in coincidenza con altri segnali, dovuti a raggi gamma, onde gravitazionali o altro. L'energia o la direzione possono essere imprecise, in base alla topologia dell'evento.

Stato attuale delle osservazioni e prospettive

IceCube ha osservato neutrini di origine astrofisica in tutti e tre i modi sopra citati. A partire dal 2013 ha infatti evidenziato un eccesso di eventi di alta energia dovuti a interazioni di neutrini non spiegabili dai soli neutrini atmosferici (metodo energetico)[13]. Dunque, neutrini di origine cosmica esistono, e il numero in arrivo è numericamente vicino al valore massimo che ci si poteva aspettare. Tuttavia, i neutrini che interagendo producono cascate e che permettono una buona misura dell'energia, non permettono una altrettanto buona determinazione della direzione di provenienza e quindi una determinazione accurata delle possibili sorgenti.

Il 22 settembre 2017 (il mese successivo all'osservazione di un altro evento molto importante di cui dirò nel paragrafo successivo), IceCube ha rivelato una traccia indotta da un neutrino di circa 300 TeV, circa 30 volte l'energia che i protoni hanno nell'acceleratore LHC del CERN, generando automaticamente un messaggio di allerta distribuito entro un minuto a tutti gli altri telescopi [14]. L'allerta ha provocato ricerche correlate da parte di molti esperimenti. Il telescopio su satellite Fermi-LAT ha riportato che la direzione del neutrino era coincidente con una sorgente di raggi gamma nota, la galassia con nucleo attivo (AGN) conosciuta come TXS 0506+056. Questo AGN è classificato come blazar dall'inglese *blaze* (vampata): ossia, il getto prodotto del nucleo attivo punta in direzione della Terra. Questo blazar era osservato in uno stato particolarmente attivo al momento dell'arrivo del neutrino. In aggiunta, anche il telescopio per raggi gamma MAGIC (situato a terra, nelle Isole Canarie), ha rivelato fotoni di energie fino a 400 GeV dalla direzione del blazar. Le osservazioni sono state completate anche alle lunghezze d'onda dai raggi X al radio; quelle nell'ottico hanno permesso la determinazione del redshift (ossia, la distanza) della galassia da cui il neutrino è partito. La correlazione del neutrino con l'attività registrata di TXS 0506 + 056 è stata classificata come statisticamente significativa a livello di 3 deviazioni standard. Questo è il primo caso di studio simultaneo di una sorgente di alta energia usando neutrini e sonde elettromagnetiche. Infine, durante il 2022 la collaborazione IceCube, dopo aver selezionato 110 sorgenti di raggi gamma potenzialmente capaci di emettere anche neutrini, ha cercato dalla direzione di ogni sorgente un possibile eccesso di neutrini rispetto al fondo atteso. Tra queste, ha trovato un eccesso di 79 ± 22 neutrini associati alla vicina galassia attiva NGC 1068: l'eccesso ha una significatività statistica di 4.2 deviazioni standard [15]. Esso è interpretato come prova diretta dell'emissione di neutrini aventi energie dell'ordine del TeV da un AGN (active galactic nucleus). Il flusso di neutrini determinato supera il flusso di raggi gamma delle energie del TeV di almeno un ordine di grandezza. Attualmente, almeno altre 4 sorgenti sono molto vicine a evidenziare una significatività statistica di oltre 4 deviazioni standard.



Figura 6: Schema del rivelatore IceCube al Polo Sud. Oltre ad una matrice di rivelatori posti a grande profondità sotto il ghiaccio, sono visibili anche dei rivelatori posti sopra la superficie. Nella foto a destra: in alto uno dei moduli ottici inseriti nel ghiaccio, con un PMT e l'elettronica necessaria per il funzionamento. In basso, uno dei buchi perforati nel ghiaccio con l'inserimento di una delle stringhe. Cortesia della collaborazione IceCube.

Le osservazioni di IceCube hanno prodotto un notevole impatto. Nell'immediato futuro, due nuovi osservatori potranno estendere gli studi di IceCube. Il telescopio GVD costruito nel lago siberiano di Baikal è in stato avanzato di costruzione. Purtroppo, la qualità (trasparenza) delle acque di un lago non è tale da permettere la ricostruzione della direzione con precisione sufficiente per risalire alla posizione delle sorgenti. Questo è invece possibile con il telescopio KM3NeT [16], ancorato alla profondità di circa 3500 m nelle acque del mar Mediterraneo, al largo della Sicilia orientale (figura 7). Il telescopio è attualmente finanziato per un blocco di 115 stringhe, che dovrebbe essere operativo entro il 2027. Oggi (marzo 2023) sono già attive e in presa dati 21 stringhe. Nella configurazione finale di un blocco, KM3NeT ha una sensibilità confrontabile (se non superiore) a quella di IceCube. Un secondo blocco è previsto, ma non ancora finanziato.

Il vantaggio di KM3NeT è quello di essere posizionato in maniera tale da avere il centro della Galassia sotto l'orizzonte. Questo significa che i neutrini eventualmente prodotti da sorgenti Galattiche possono indurre eventi diretti verso l'alto la cui direzione può essere misurata con accuratezza elevata, permettendo la ricerca attraverso

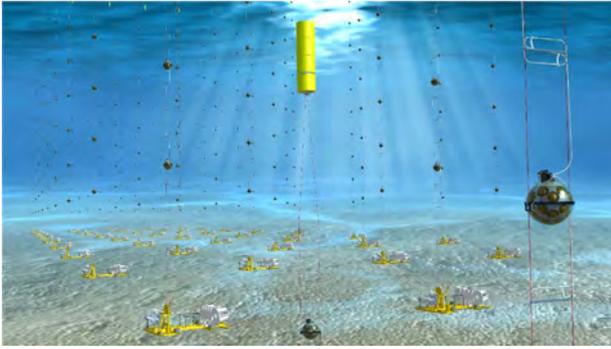


Figura 7: Vista sottomarina di un blocco del telescopio KM3NeT. Un blocco è composto da 115 stringhe. Ciascuna stringa consiste di 18 moduli ottici (la sfera che si vede in primo piano a destra). Ciascuna sfera contiene 31 PMT, i piccoli occhi elettronici che captano la luce. La distanza verticale tra i moduli ottici è di circa 36 m, la distanza orizzontale tra le stringhe di circa 90 m. Appoggiato al fondo marino alla profondità di 3500 m vi è un'ancora per ciascuna stringa. Ogni stringa (700 m di altezza) viene tenuta in tensione da una boa gialla, una delle quali è ben visibile nella parte centrale. (Disegno di Edward Berbee/ Nikhef). Si ricordi che a 3500 m di profondità l'assorbimento della luce solare è praticamente totale. Un telescopio analogo, ma con stringhe e sfere più ravvicinate è in costruzione al largo delle coste di Tolone (Francia) con l'obiettivo di studiare le proprietà fisiche del neutrino. Cortesia della collaborazione KM3NeT.

il metodo direzionale. Attualmente, la nostra Galassia è un deserto per quanto riguarda i neutrini. Ma questo è solo un effetto dovuto al non idoneo posizionamento di IceCube per le sorgenti Galattiche: è come se volesse osservare la stella Polare con un telescopio ottico al polo Sud.

Onde gravitazionali

La teoria della relatività di Einstein ha, sin dalla sua formulazione, affascinato moltissimo l'opinione pubblica per le sue conseguenze sulla percezione dello spazio e del tempo. Per moltissimo tempo una delle predizioni della relatività generale, ossia l'esistenza delle onde gravitazionali (GW), è sembrata una irraggiungibile chimera. Per decenni vi è stato il dubbio teorico che queste onde potessero davvero esistere (lo stesso Einstein era inizialmente dubbioso). Una prima indicazione indiretta dell'esistenza delle

onde gravitazionali si è avuta osservando sistemi astrofisici composti da due stelle di neutroni (il sistema binario scoperto da Hulse e Taylor nel 1973). A partire dagli anni '80, sono nati progetti (negli USA e in Europa) per costruire strumenti con la sensibilità sufficiente a rivelare GW.

Finalmente, dopo quasi 40 anni di sviluppo di tali rivelatori, il 14 settembre 2015 i due interferometri dell'esperimento LIGO negli USA (situati in due stati diversi, siti distanti circa 3000 km l'uno dall'altro) hanno rivelato contemporaneamente lo stesso segnale di onda gravitazionale. Ma la cosa più stupefacente non è stato tanto l'aver confermato la predizione della relatività di Einstein, ma di aver dimostrato che con le onde gravitazionali si può fare astrofisica. Lo chiarisco prendendo (tradotto in italiano) l'*abstract* dello storico articolo (apparso l'11 Febbraio 2016) sul *Physical Review Letter* che annuncia la scoperta [17]:

“Il 14 settembre 2015 alle 09:50:45 UTC i due rivelatori *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory* (LIGO) hanno osservato simultaneamente un segnale transitorio dovuto a onde gravitazionali. Il segnale aumenta in frequenza da 35 a 250 Hz con una intensità di picco dell'onda gravitazionale di 1.0×10^{-21} . Questa corrisponde alla forma d'onda prevista dalla relatività generale per lo spiraleggiamento e la fusione di una coppia di buchi neri e lo smorzamento del segnale dovuto alla produzione risultante di un singolo buco nero. Il segnale osservato ha probabilità che sia prodotto casualmente da un evento di fondo inferiore a 1 evento su un intervallo di 203000 anni, equivalente a una significatività statistica maggiore di 5.1 deviazioni standard. La sorgente si trova a una distanza di luminosità corrispondente a un redshift di $z = 0.09^{+0.03}_{-0.04}$. Le masse iniziali dei buchi neri sono $36 \pm 5 M_{\odot}$ e $29 \pm 4 M_{\odot}$ e la massa del buco nero finale è $62 \pm 4 M_{\odot}$, con una quantità di energia pari a $3.0 \pm 0.5 M_{\odot}$ irradiata sotto forma di onde gravitazionali. Tutte le incertezze definiscono intervalli credibili del 90%.

Queste osservazioni dimostrano l'esistenza di sistemi binari di buchi neri di massa stellare. Questo è il primo rilevamento diretto di onde gravitazionali e la prima osservazione di una fusione di buchi neri binari."

Se avete avuto la pazienza di leggere la sintesi dell'articolo, avrete notato che misurando come varia l'intensità del segnale in funzione della frequenza, si ricava:

1. la massa iniziale dei due buchi neri;
2. la distanza di luminosità dei due oggetti, che corrisponde a circa 420 Mpc dalla Terra;
3. la massa del buco nero formato dalla fusione dei due;
4. il fatto che la somma di due masse pari a 36+29 masse solari dia 62 masse solari (e non 65!), perché circa $3 M_{\odot}$ si sono convertite in energia trasportata dall'onda gravitazionale. Oltre, ovviamente al fatto che
5. aver osservato in maniera diretta onde gravitazionali; e
6. che buchi neri possono accrescere fondendosi tra di loro! Prima di allora, nessuno sospettava l'esistenza di buchi neri di massa superiore a 20 masse solari.

La rivelazione ha aperto una pagina totalmente sconosciuta all'astrofisica che ha ripercussioni sul modello di evoluzione dell'Universo, che ora deve spiegare l'esistenza di tanti buchi neri così massicci (Figura 8). Giustamente il comitato Nobel ha immediatamente premiato tre tra i protagonisti di questa storia. L'osservazione di onde gravitazionali ha suscitato una enorme emozione tra gli addetti ai lavori. Io stesso ne sono stato particolarmente eccitato. In un articolo divulgativo che ho scritto per la rivista INFN *Asimmetrie* [18] riportavo:

"L'osservazione simultanea di un evento cosmico con onde gravitazionali, radiazione elettromagnetica e neutrini sarebbe epocale. Ci si aspetta che le onde gravitazionali e quelle elettromagnetiche si propagano alla stessa velocità

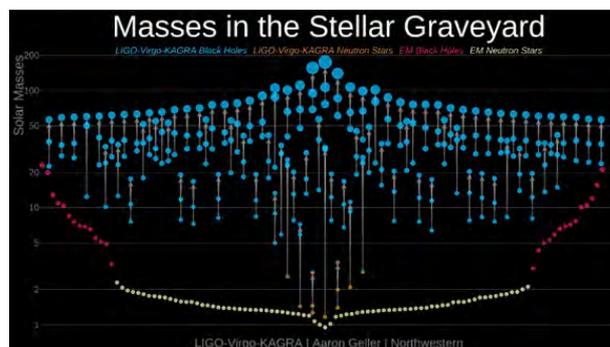


Figura 8: Stato della nostra conoscenza attuale di buchi neri di massa stellare e stelle di neutroni dopo i tre periodi di presa dati dei rivelatori di onde gravitazionali dal 2015 al 2020. Ogni insieme blu contiene tre punti: le masse (in unità di masse solari, scala in ordinata) dei buchi neri prima della fusione, e la massa del buco nero dopo la fusione. Le masse dei buchi neri conosciute prima dell'avvento degli interferometri per onde gravitazionali sono in rosso (a sinistra e destra). L'esistenza di buchi neri di massa > 20 masse solari era inaspettata prima dell'avvento di questi strumenti. I pochi punti in arancio in basso sono invece le coalescenze di stelle di neutroni, e i punti in giallo in basso sono le stelle di neutroni la cui massa era stimata tramite l'osservazione delle onde elettromagnetiche. Crediti: LIGO-Virgo / Aaron Geller / Northwestern University.

e che i neutrini dovrebbero leggermente ritardare a causa della loro (piccola) massa. Tali verifiche sperimentali toccano di per sé aspetti fondamentali dello studio della natura. Una situazione di tale tipo è prevista nel caso di coalescenza di due stelle di neutroni. Grazie all'osservazione dell'onda gravitazionale, è possibile ricavare i valori delle masse degli oggetti in gioco, la loro distanza dalla Terra, le proprietà connesse alla rotazione degli oggetti stessi. Nell'atto della coalescenza, certificato da un lampo di raggi gamma, potrebbe formarsi un buco nero, o un oggetto compatto con proprietà solo teorizzate (uno stato in cui i quark si uniscono non per formare un protone o neutrone, ma una specie di zuppa chiamata plasma di quark e gluoni). Nell'energia trasferita dal sistema ai suoi componenti, si dovrebbe

bero formare gli elementi più pesanti della tavola periodica, incluso l'oro e il platino. Nelle settimane successive la produzione di questi elementi, dovrebbe manifestarsi l'emissione di radiazione elettromagnetica caratteristica dei nuclei appena formati. L'osservazione congiunta di onde gravitazionali, fotoni e neutrini provenienti da questi oggetti aprirebbe un nuovo capitolo per lo studio delle interazioni di particelle in arrivo con energie irraggiungibili con tecniche terrestri. ”

Mi sembra incredibile, ma è bastato aspettare meno di un anno per vedere realizzato (quasi) tutto quello che descrivevo. Il 17 agosto 2017, gli interferometri LIGO e Virgo (in Italia) registravano un evento dovuto alla coalescenza di due stelle di neutroni in contemporanea (differenza di tempo di circa 2 secondi) con un lampo di raggi gamma registrato dai satelliti Fermi e Integral [19]. La simultaneità di questi due eventi ha portato circa 80 diversi esperimenti in cielo, terra, mare e ghiaccio a studiarne l'origine (figura 9). Si è così avuto la conferma che gli elementi pesanti (oro e platino) si formano proprio dalla coalescenza di due stelle di neutroni. Questa era una ipotesi astrofisica che necessitava di supporto sperimentale. Inoltre, si è osservato che radiazione elettromagnetica e onde gravitazionali si propagano alla velocità della luce (tenendo conto che la luce impiega poco più di un secondo per uscire dalla zuppa di particelle prodotta dalla coalescenza). L'evento è servito anche per stimare il valore della costante di Hubble, la grandezza che esprime la velocità di espansione dell'Universo e che attualmente è misurata con due tecniche sperimentali diverse che producono due numeri praticamente incompatibili tra loro.

Nella mia lista dei desideri sopra riportata, mancano i neutrini. Non perché non ci fossero, ma perché questi sono emessi in un getto di apertura piuttosto stretto che non intercettava la linea di vista della Terra. L'osservazione di neutrini avrebbe permesso di testare in maniera ancora più accurata i modelli astrofisici, e soprattutto (misurando il ritardo nell'arrivo) di determinare un valore per le loro masse. E, purtroppo, gli interferometri per la rivelazione di onde gravitazionali non avevano ancora la sen-

sibilità sufficiente (ad alte frequenze delle onde gravitazionali) per testare la eventuale presenza della zuppa di quark e gluoni sulla superficie dell'oggetto che si forma nello stato finale, o verificare se si è formato un buco nero o una nuova stella di neutroni.

La ricerca, fortunatamente non si arresta. I rivelatori LIGO negli USA e VIRGO in Italia si sono fermati nel marzo 2020 (forse la data ricorda qualcosa, anche se molti fanno finta che il Covid-19 non ci sia mai stato), e da allora hanno subito un processo di revisione e aggiornamento. A maggio 2023 (tra pochissime settimane) è previsto il loro riavvio, insieme a un nuovo arrivato, l'interferometro KAGRA in Giappone. Il nuovo periodo di presa dati congiunto porterà sicuramente nuove sorprese.

Conclusioni

La presenza di un flusso abbondante di raggi cosmici rappresenta la testimonianza che protoni e nuclei vengono accelerati da processi astrofisici che ancora non conosciamo bene (o, forse, non conosciamo affatto). Neutrini possono essere solo prodotti dall'interazione di adroni (protoni, nuclei). Neutrini diffusi di origine cosmica (ossia, di cui non si conosce con esattezza la direzione di provenienza) sono stati evidenziati con certezza dal telescopio IceCube e confermati con minore significatività statistica dei telescopi nel lago Baikal e da ANTARES nel mar Mediterraneo. Solo una piccola frazione (stimata dell'ordine del 10%) di questi neutrini è originata da sorgenti note, ossia che conosciamo perché emettono onde elettromagnetiche indotte dal moto di elettroni. Ciò significa che le sorgenti di neutrini potrebbero essere oggetti ancora parzialmente sconosciuti o poco studiati, oppure semplicemente che la scarsa precisione angolare del telescopio al polo Sud abbia condizionato le conclusioni. Inoltre, mentre un flusso abbondante di raggi cosmici carichi è prodotto da sorgenti nella nostra Galassia, nessun neutrino di origine galattica è stato sinora individuato in maniera non ambigua. In questo caso, quasi sicuramente il motivo è la posizione non adeguata del telescopio al polo Sud per osservare la regione centrale della Galassia, dove potenzialmente sono posizionate le possibili sorgenti. Il telescopio di neutrini nel

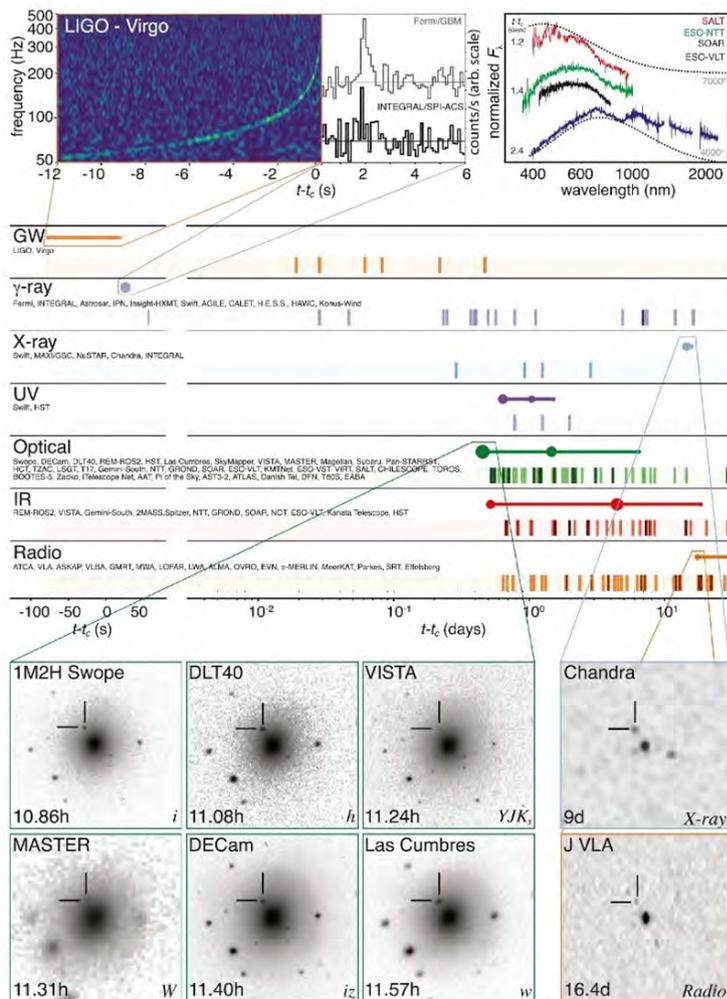


Figura 9: Uno dei simboli dell'astrofisica multi-messaggera [19]: la sequenza temporale della scoperta dell'onda GW170817 e del GRB 170817A. I due segnali sono arrivati in maniera indipendente a un centro di smistamento delle informazioni centralizzato. La caccia alla galassia che ospitava l'evento da parte di telescopi ottici ha avuto successo dopo circa una decina di ore (quando il Sole si è eclissato dalla zona interessata). La galassia coinvolta si trova a circa 40 Mpc dalla Terra. Nei giorni seguenti, la radiazione in arrivo era compatibile con i processi di formazione di elementi rari, come oro e platino (una quantità pari a circa la massa della Terra). Per chi fosse interessato a usare quella miniera, si ricordi che viaggiando alla velocità della luce si impiega 120 milioni di anni per arrivare sul posto. L'articolo in cui compare la figura comprende circa 3500 co-autori di 80 esperimenti diversi.

Mediterraneo, che opererà per almeno una decina di anni a partire dal suo completamento nel 2027, contribuirà sicuramente a chiarire molti di questi punti oscuri.

Le onde gravitazionali hanno recentemente aperto una finestra osservativa sull'Universo che sembrava impensabile e che ha potenzialità di miglioramento notevoli. Il nuovo periodo di presa dati di LIGO e VIRGO, con l'aggiunta di KAGRA, dovrebbe continuare per tutto il 2024. Dopo una fase di ulteriore miglioramento tecnico, i tre rivelatori dovrebbero riprendere con un ultimo periodo di acquisizione tra il 2026 e 2029 prima di passare il testimone alla prossima generazione di telescopi. Poiché i protoni possono produrre particelle secondarie neutre come i neutrini e i raggi gamma, e gli oggetti molto massivi produrre onde gravitazionali, lo studio dei fenomeni astrofisici in cui intervengono queste particelle pesanti passa necessariamente per l'astrofisica multimessaggera [20]. Questa metodologia per

lo studio di questi fenomeni straordinariamente affascinanti consiste nello studio del macrocosmo anche con le tecniche sperimentali usate in fisica delle particelle, usando le più moderne tecnologie di comunicazione tra diversi gruppi di ricerca. Sarà la sinergia tra i diversi gruppi di ricercatori ad aprirci nuovi orizzonti nel prossimo decennio su meccanismi ancora poco conosciuti in azione nell'Universo.

Ringraziamenti. L'autore ringrazia sentitamente il prof. Vincenzo Flaminio che mi ha invitato a scrivere il presente documento, e per i commenti alla prima versione. Il prof. Flaminio è stato inoltre un volontario, accuratissimo e utilissimo revisore del libro [20], e non saprò mai ringraziarlo a sufficienza per questo.



- [1] E. Hubble: *A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae*, in Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 15 Issue 3, 15 marzo 1929, pp. 168-173.
- [2] A.D. Sakharov: *Violation of CP invariance, C asymmetry, and baryon asymmetry of the universe*, Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters, 5 (1967) 24.
- [3] Immagine archivio NASA: <http://chandra.harvard.edu/photo/2005/tycho/>
- [4] <https://masterclass.icecube.wisc.edu/en/analyses/cosmic-ray-energy-spectrum>
- [5] I. A. Grenier, J.H. Black, A. W. Strong: *The Nine Lives of Cosmic Rays in Galaxies*, Annu. Rev. Astron. Astrophys., 53 (2015) 199.
- [6] R. Battiston: *High precision cosmic ray physics with AMS-02 on the International Space Station*, La Rivista del Nuovo Cimento, 43 (2020) 319.
- [7] F. M. Rieger, E. de Ona-Wilhelmi, F. A. Aharonian: *TeV Astronomy*, Special issue of "Frontiers of Physics" on "High Energy Astrophysics" (eds. B. Zhang and P. Meszaros). <https://arxiv.org/abs/1302.5603>
- [8] T. K. Gaisser, T. Stanev: *Neutrinos and cosmic rays*, Astroparticle Physics, 39-40 (2012) 120.
- [9] M. Spurio: *Neutrini in profondità: Vita, morte e miracoli dei neutrini rivelati sotto terra, sotto i ghiacci o in fondo al mare*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1609.06710>
- [10] M.A. Markov: *On high energy neutrino physics*. Proc. 1960 Ann. Int. Conf. on High Energy Physics, Rochester 1960.
- [11] T. Chiarusi and M. Spurio: *High-energy astrophysics with neutrino telescopes*, Eur. Phys. J. C, 65 (2010) 649.
- [12] M. Spurio for the ANTARES Collaboration: *Highlights from the ANTARES neutrino telescope*, PoS NOW2022 (2023) 053 <https://pos.sissa.it/421/053>
- [13] IceCube Collaboration: *Observation of High-Energy Astrophysical Neutrinos in Three Years of IceCube Data*, Phys. Rev. Lett., 113 (2014) 101101.
- [14] IceCube Collaboration: *Neutrino emission from the direction of the blazar TXS 0506+056 prior to the IceCube-170922A alert.*, Science, 361 (2018) 147.
- [15] IceCube Collaboration: *Evidence for neutrino emission from the nearby active galaxy NGC 1068*, Science, 378 (2022) 538.
- [16] Km3NeT Collaboration: *Letter of Intent for KM3NeT 2.0.*, Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 43 (2016) 084001.
- [17] LIGO Scientific Collaboration, the Virgo Collaboration: *Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger*, Phys. Rev. Lett., 116 (2016) 061102.
- [18] M. Spurio: *Tutte le voci dell'universo*, Asimmetrie, 21 (2016) 21. <https://www.asimmetrie.it/archivio>
- [19] B. P. Abbott et al.: *Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger*, Astrophys. J. Lett., 848 (2017) L12.
- [20] M. Spurio: *Probes of Multimessenger Astrophysics. Charged cosmic rays, neutrinos, γ -rays and gravitational waves.*, Springer, Astronomy and Astrophysics Library, Berlino (2018). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-96854-4>



Maurizio Spurio: è professore di fisica Sperimentale a Bologna. L'attività di ricerca verte sulla fisica astroparticellare. Dopo aver partecipato all'esperimento MACRO al Gran Sasso, dal 2001 è coinvolto nelle attività relative ai telescopi per neutrini nel mar Mediterraneo (ANTARES e KM3NeT). Dell'esperimento ANTARES è viceportavoce dal 2014. Ha pubblicato oltre 240 articoli, tra cui articoli di rassegna. È autore di alcuni libri, tra cui "Probes of Multimessenger Astrophysics" (Springer). È stato membro nel Senato Accademico UniBo e si occupa di divulgazione scientifica.

Indici dei primi 20 numeri

Riassumiamo in questi indici quanto è stato pubblicato nei dieci anni di attività di **Ithaca**.

L'**Indice generale** è la collezione degli articoli pubblicati nei vari numeri della rivista, in ordine storico. Poiché i numeri XVII e XVIII erano ponderosi, sono stati suddivisi in due parti, A e B, e con queste sigle vengono identificati negli indici successivi al generale,

Con **Quaderni** abbiamo raggruppato per grandi tematiche i vari articoli. È un'operazione che ha richiesto una valutazione personale del contenuto degli articoli e molti di questi appaiono in più di un **Quaderno**. Anche la scelta dell'ordine degli articoli all'interno del singolo **Quaderno** non è stata banale. Abbiamo optato per l'ordine alfabetico del titolo, non considerando l'eventuale articolo iniziale.

Ovvio l'**Indice degli Autori**, in cui si indica il volume e la pagina dell'articolo. Meno scontato è l'**Indice analitico**. Abbiamo inserito termini e nomi di persone che in qualche modo sono presentati in maniera articolata, non quelli semplicemente citati. **In questo indice è presentato il volume e la pagina in cui inizia l'articolo che contiene il termine, NON la pagina dove appare.** Se accanto al termine appare solo il numero romano indicante il volume scritto in grassetto, ad esempio **XII**, significa che il termine identifica il contenuto di tutto il volume.

Accanto al nome dell'articolo, nell'**Indice Generale** e nei **Quaderni** appaiono delle sigle in oca con il seguente significato.

BC Breve comunicazione. Sono articoli scritti per presentare un evento di recente interesse, e quindi ben focalizzati su un particolare argomento, e brevi.

C Nei numeri **Educational** questi sono gli interventi degli studenti.

DT Doppio testo. L'articolo è presentato nella lingua originale e nella sua traduzione italiana, normalmente a cura della redazione.

Ed Educational (solo per i **Quaderni**). Si tratta di articoli presentati nella sezione **Educational**.

F Forum. Il solo caso precedente al presente numero riguarda XVII-A 109.

L Nei numeri **Educational** questi sono gli interventi dei docenti.

LM Lezione mancata. Si tratta di articoli che non trattano argomenti di ricerca innovativi. Sono argomenti particolari che spesso non si riesce a trattare a lezione, per mancanza di tempo.

Ci auguriamo che questo lavoro di sintesi possa essere utile a voi lettori, e possa anche mettere in evidenza la presenza di temi che quando sono apparsi nella rivista sono rimasti nascosti.

il Comitato di Redazione

Indice generale

Ithaca

I - 2013 - Il bosone di Higgs

- 5 *Il bosone di Higgs*
Paolo Ciafaloni
- 12 *La scoperta del bosone di Higgs*
Aleandro Nisati
- 19 *LHC dopo il bosone di Higgs*
Edoardo Gorini
- 22 *ATLAS: un esperimento al CERN di Ginevra*
Andrea Ventura
- 25 *Esperimenti a LHC come motori di innovazione*
Gabriele Chiodini
- 35 *Sociologia e psicologia nella fisica sperimentale (DT)*
John Hauptman
- 45 *La condanna dell'Aquila: cattiva giustizia, cattiva scienza o negligenza?*
Francesco Paparella
- 57 *La legge di reciprocità quadratica (LM)*
Rocco Chirivì

II - 2013 - Calcolo delle variazioni

- 7 *Il problema di Newton dei profili aerodinamici ottimi*
Giuseppe Buttazzo
- 17 *Calcolo delle Variazioni e segmentazione di immagini*
Michele Carriero, Antonio Leaci, Franco Tomarelli
- 29 *Il problema isoperimetrico*
Alessio Figalli
- 33 *Integrale di Feynman e limite classico*
Matteo Beccaria
- 41 *Il principio variazionale nella fisica dei sistemi quantistici a molti corpi*
Giampaolo Co'
- 49 *Adam Smith, John Nash, il prezzo dell'anarchia e la decadenza della società moderna*
Vittorio Bilò
- 57 *La fine del ghiaccio artico ed il futuro del clima*
Francesco Paparella
- 67 *L'equazione di Eulero-Lagrange (LM)*
Rocco Chirivì

III - 2014 - Arte e scienza

- 5 *Arte e scienza. Dal futurismo all'arte moltiplicata*
Luca Zaffarano

- 15 *Un matematico passeggia per l'Alhambra (DT)*
Rafael Pérez Gómez
- 25 *La fisica della musica*
Giampaolo Co'
- 33 *Una geometrizzazione dello spazio degli accordi*
Mattia G. Bergomi, Riccardo D. Jadanza, Alessandro Portaluri
- 47 *Bosoni, Fermioni e ...*
Luigi Martina
- 61 *Fermioni di Majorana in sistemi a due dimensioni?*
Pasquale Scarlino
- 67 *Breve storia dei numeri primi (LM)*
Alessandro Zaccagnini

IV - 2014 - Arte e scienza

- 5 *La matematica nella Cupola Santa Maria del Fiore a Firenze*
Giuseppe Conti
- 13 *Il complesso intreccio tra scienza ed arte*
Giuseppe Maruccio
- 27 *Al confine fra matematica, biologia e arte: la morfogenesi di Turing*
Francesco Paparella
- 37 *Riflessioni sulle riflessioni,*
Giuseppe De Cecco
- 45 *Sociologia e dimensione sociale della scienza*
Maria Luisa Dell'Atti
La lezione mancata
- 53 *L'analisi armonica e le serie di Dirichlet (LM)*
Rocco Chirivì

V - 2015 - Gravitazione

- 5 *Cent'anni di relatività*
Lorenzo Fatibene
- 19 *Macro / micro / retro lensing gravitazionale*
Francesco De Paolis, Mosè Giordano, Gabriele Ingrosso, Luigi Manni, Achille Nucita, Francesco Strafella
- 35 *Meccanica quantistica e lensing gravitazionale*
Claudio Corianò, Marta Dell'Atti, Luigi Delle Rose, Matteo Maria Maglio
- 47 *Scienza e bellezza*
Paolo Ciafaloni
- 53 *La realtà tra percezione e fisica*
Marco Mazzeo

- 67 *La legatura dell'Evangelario Marciano Lat III,111: storia di un felice connubio fra arte e scienza*
Armida Sodo
- 79 *Maxwell tra archeologia ed investigazioni forensi*
Carlotta Ferrara, Pier Matteo Barone

VI - 2015 - Neutrini

- 3 *Cosmic Gall (Sfrontatezza Cosmica) (DT)*
John H. Updike
- 7 *Neutrini ed interazione debole (LM)*
Giampaolo Co'
- 19 *Le oscillazioni del neutrino*
Daniele Montanino
- 37 *Breve storia della ricerca delle oscillazioni nei neutrini solari ed atmosferici*
Francesco Ronga
- 47 *La domanda di Majorana*
Francesco Vissani
- 59 *Interazione dei neutrini con la materia*
Maria Benedetta Barbaro, Omar Benhar, Carlotta Giusti
- 69 *Neutrini e Supernovae*
Alessandro Mirizzi
- 75 *I neutrini in astrofisica*
Vincenzo Flaminio
- 97 *Esperimenti di Neutrini negli USA*
Camillo Mariani
- 101 *L'Europa dei neutrini*
Francesco Terranova
- 109 *La frontiera dei neutrini sterili*
Paolo Bernardini
- 117 *Neutrini: messaggeri di nuova fisica*
Eligio Lisi

VII - 2016 - Luce

- 5 *Il lato oscuro della luce*
Marco Mazzeo
- 59 *Iride*
Luigi Martina
- 83 *Luce e Quantum Dot*
Vittorianna Tasco, Luigi Carbone
- 99 *Organic Light-Emitting Diodes: la nuova era della luce*
Fabrizio Mariano
- 119 *I Metamateriali: Invisibilità e Rifrazione Negativa in Mezzi Nanochirali*
Marco Esposito, Francesco Todisco
- 131 *Strong Coupling: l'entanglement tra luce e materia*
Armando Genco
- 147 *Neutrini e Cosmologia*
Gianpiero Mangano

- 167 *Ascoltando l'Universo di onde gravitazionali: implicazioni e prospettive dopo la scoperta*
Paola Leaci
- 175 *Le equazioni dell'onda, del calore e di Laplace. (LM)*
Stefano De Leo

VIII - 2016 - Convezione

- 5 *La convezione da cima a fondo (DT)*
Edward A. Spiegel
- 17 *Convezione in fluidi stratificati: il caso delle dita di sale*
Francesco Paparella
- 27 *L'esplorazione del sottosuolo alla ricerca di correnti convettive*
Gianluca Gola
- 37 *Convezione Atmosferica*
Silvana Di Sabatino, Francesco Barbano
- 53 *Convezione nel Mantello (DT)*
John A. Whitehead
- 69 *La convezione nelle stelle (DT)*
Michaël Bazot
- 95 *Martingala: l'origine di un nome*
Carlo Sempi
- 101 *Le equazioni dell'onda, del calore e di Laplace. (LM)*
Stefano De Leo

IX - 2017 - Scienza e pseudoscienza

- 5 *Scienza ed epistemologia*
Mario Castellana
- 13 *Considerazioni storico-epistemologiche sul principio cosmologico*
Vincenzo Fano, Giovanni Macchia
- 21 *Scienza senza certezze*
Dario Antiseri
- 33 *Diversi modi di fare scienza e la grande teoria della vita*
Ferdinando Boero
- 43 *Dietro le quinte*
Giampaolo Co'
- 49 *L'insostenibile leggerezza della pseudoscienza*
Paolo Ciafaloni
- 55 *La diffusione dell'ideologia antivaccinista*
Antonella De Donno, Alessandra Panico, Giovanni Gabutti
- 65 *Pregiudizi a-scientifici e spesa farmaceutica*
Chiara Gerardi, Silvio Garattini

X - 2017 - Vuoto

- 5 *La storia infinita delle pressioni estremamente basse e della loro misura*
Anita Calcatelli
- 23 *La tecnologia del vuoto*
Gabriele Chiodini

- 39 *L'effetto Casimir, una forza dal vuoto*
Piergiorgio Antonini
- 49 *Il vuoto come cristallo Birifrangente: l'esperimento PVLAS*
Guido Zavattini
- 67 *La ricerca di nuova fisica nel vuoto quantistico*
Marco Incagli
- 79 *All'origine della massa: la QCD e il suo vuoto*
Luca Girlanda
- 89 *La più grande cantonata di Einstein*
Paolo Ciafaloni
- 95 *La quantità del nulla*
Lorenzo Dello Schiavo, Anna Baccaglioni-Frank
- 109 *Etica senza verità*
Dario Antiseri
- 113 *Sfere e gruppi topologici (LM)*
Francesco Esposito

XI - 2018 - I sistemi Integrabili

- 7 *Sistemi Integrabili*
Luigi Martina
- 39 *Trasendenti di Painlevé e integrabilità*
Davide Guzzetti
- 51 *Solitoni e Triangolazioni Triangulations and solitons (DT)*
Yuji Kodama
- 71 *Onde anomale*
Petr Georgievich Grinevich, Paolo Maria Santini
- 85 *Simmetrie di Lie e Lie-Bäcklund per equazioni differenziali*
Decio Levi
- 103 *Sull'integrabilità della termodinamica dell'equilibrio*
Antonio Moro
- 117 *Superintegrabilità*
Danilo Riglioni
- 125 *Statistica, entropia e temperatura (DT)*
Giampaolo Co'

XII - 2018 - Gravità

- 5 *Le onde gravitazionali nella fisica moderna*
Maurizio Gasperini
- 23 *La nascita dell'astronomia delle onde gravitazionali: Virgo e LIGO (DT)*
Matteo Lorenzini, Shane L. Larson, Riccardo De Salvo
- 71 *Il telescopio Einstein: l'osservatorio di onde gravitazionali di 3a generazione (DT)*
Michele Punturo
- 93 *Da LISA Pathfinder a LISA: il primo osservatorio di onde gravitazionali dallo spazio*
Daniele Vetrugno
- 107 *Alla ricerca dei pianeti extrasolari*
Francesco De Paolis, Achille Nucita, Gabriele Ingrosso, Francesco Strafella, Domenico Licchelli

- 117 *La Materia Oscura*
Marco Cirelli
- 129 *Energia Oscura, il motore dell'Universo*
Massimo Pietroni
- 135 *La scoperta dell'espansione del cosmo. Quando la cosmologia cominciò a essere scienza*
Silvio A. Bonometto e Marino Mezzetti
- 145 *L'universo emergente della gravità quantistica*
Daniele Oriti
- 161 *Stringhe, Brane e (Super)Gravità*
Augusto Sagnotti
- 183 *Loop Quantum Gravity ed i buchi neri esplosivi*
Simone Speziale
- 193 *La Natura è naturale?*
Paolo Ciafaloni
- 199 *La formula di de Moivre – Stirling (LM)*
Carlo Sempi

XIII - 2019 - Probabilità

- 5 *Probabilità e meccanica statistica*
Angelo Vulpiani
- 17 *Modelli di occupazione*
Carlo Sempi
- 21 *Problemi epistemologici in meccanica quantistica*
Claudio Garola
- 33 *Gli spazi metrici probabilistici*
Carlo Sempi
- 41 *Il Teorema di Liouville sull'integrabilità (LM)*
Luigi Martina
- 47 *L'ombra del buco nero in M87 (BC)*
Francesco De Paolis, Gabriele Ingrosso, Achille Nucita

XIV - 2020 - Nanoscienze

- 5 *Macchine molecolari*
Alberto Credi, Vincenzo Balzani
- 19 *Il microscopio a scansione tunnel: una finestra sul mondo quantistico*
Davide Iaia
- 27 *Le nuove frontiere per la (nano)elettronica*
Anna Grazia Monteduro, Silvia Rizzato, Giuseppe Maruccio
- 49 *Nanotecnologie per la medicina*
Giuseppe Maruccio, Elisabetta Primiceri, Maria Serena Chiriaco
- 59 *Nuove tecnologie per studiare il cervello con la luce*
Massimo De Vittorio, Ferruccio Pisanello
- 67 *Nanomateriali a base di carbonio per la rimediazione ambientale*
Antonio Turco

XV - 2020 - Cambiamenti Climatici

- 5 *Nuovo Coronavirus: conoscenze work in progress*
Antonella De Donno, Alessandra Panico
- 13 *Cause ed effetti dei cambiamenti climatici*
Roberto Battiston
- 25 *Il cambiamento climatico e la questione degli eventi estremi*
Sergio Pinna
- 37 *La nostra specie, le leggi della natura e le priorità scientifiche*
Ferdinando Boero
- 47 *Cambiamento climatico e protezione delle coste*
Marco Delle Rose, Corrado Fidelibus, Mario Marcello Miglietta
- 57 *Crisi climatica e inquinamento atmosferico*
Cristina Mangia, Pierina Ielpo, Rita Cesari, Maria Cristina Facchini
- 69 *Clima e risorse idriche tra atmosfera e sottosuolo*
Paolo Martano, Marco Delle Rose
- 81 *Tecnologie fotovoltaiche innovative per ridurre il costo dell'elettricità*
Cosimo Gerardi
- 105 *La fusione nucleare controllata e il cambiamento climatico*
Danilo Dongiovanni, Lori Gabellieri, Piero Martin, Angelo Antonio Tuccillo, Gregorio Vlad, Fulvio Zonca
- 125 *Dai pattern ai frattali, passando per il caos*
Deborah Lacitignola
- 135 *L'attrattore di Lorenz (LM)*
Mario Leo

XVI - 2020 - Intelligenza artificiale

- 7 *Tanto rumore per nulla? Il ruolo delle fluttuazioni nella dinamica delle reti nervose*
Paolo Del Giudice, Maurizio Mattia
- 25 *L'elaborazione d'informazione nelle reti neurali*
Elena Agliari, Adriano Barra
- 39 *Reti neurali e forme di apprendimento*
Daniele Tantari
- 51 *La macchina di Boltzmann: quando il modello di Ising incontra il Machine Learning (DT)*
Aurélien Decelle
- 71 *Machine Learning: accuratezza, interpretabilità e incertezza (DT)*
Guido Sanguinetti
- 83 *Piccole reti neurali crescono*
Carlo Lucibello
- 91 *La Rilevanza nell'Apprendimento Statistico*
Matteo Marsili
- 99 *Inferenza ad alta dimensionalità: una prospettiva di meccanica statistica (DT)*
Jean Barbier
- 139 *Metodi di massima entropia (DT)*
Michele Castellana
- 151 *I Computer e il Linguaggio Naturale*
Valerio Basile
- 167 *Machine Learning nella Fisica delle Alte Energie (DT)*
Konstantinos Bachas, Stefania Spagnolo

- 183 *Casualità, causalità e Machine Learning nel contenimento epidemico*
Alfredo Braunstein, Luca Dall'Asta, Alessandro Ingrosso
- 195 *Reti Neurali in grado di apprendere*
Giorgio Buttazzo
- 209 *La meccanica statistica dei sistemi complessi (LM)*
Elena Agliari, Adriano Barra

XVII - 2021 - Dare i numeri - (ab)usi della matematica

Parte A

- 5 *Non sempre 2 è il doppio di 1*
Paolo Ciafaloni
- 15 *Dinamica e controllo del COVID-19: commenti da due matematici (DT)*
Bernhelm Booß-Bavnbek, Klaus Krickeberg
- 39 *Il trattamento per gruppi*
Christian Genest, Christiane Rousseau
- 45 *Applicazioni del Formalismo Quantistico alle Scienze Cognitive*
Sandro Sozzo
- 63 *Big Data, profezie, assicurazione: una prospettiva sociologica*
Alberto Cevolini
- 69 *Linguaggio nei numeri e numeri nel linguaggio. Linguistica, Matematica e Cryptonalisi (DT)*
Thomas Christiansen
- 93 *La Fisica e la Matematica negli Studi di Chopin*
Massimo Blasone
- 109 *Galileo, la matematica, la natura (F)*

Parte B

- 5 *Matematica epidemiologica per COVID-19*
Simone Bianco, Sara Capponi, James H. Kaufman
- 13 *L'arte e la scienza di imparare dai dati: la biostatistica, dalle mutazioni genetiche all'intelligenza artificiale.*
Serena Arima
- 21 *Meccanica statistica per reti complesse*
Tiziano Squartini
- 35 *Materiali fatti di molecole macroscopiche: dai granulari alla materia attiva*
Andrea Puglisi
- 47 *Le nuove frontiere del volo spaziale: Nanotecnologie e Biomedicina*
Giada Graziana Genchi, Gianni Ciofani
- 55 *Perché la Regina aveva torto, pur avendo ragione*
Michele Grillo
- 63 *Dante e l'ipersfera*
Giuseppe De Cecco

XVIII - 2021 - Fisica, Matematica e Medicina

Parte A

- 5 *Biomolecole e circuiti elettrici: la sfida Proteotronica*
Rosella Cataldo
- 17 *Microscopia a forza atomica per lo studio delle proprietà citomeccaniche*
Mariafrancesca Cascione, Valeria De Matteis, Rosaria Rinaldi

- 31 *Reti Neurali e Medicina di Precisione*
Michele Caselle
- 39 *Morfogenesi: una sfida interdisciplinare*
Silvia Grigolon
- 55 *Il sistema immunitario attraverso la lente dell'inferenza statistica*
Barbara Bravi
- 73 *Evoluzione e probabilità*
Luca Peliti
- 85 *La frontiera tra le scienze della vita e la fisica teorica.*
Mario Nicodemi Arte e Scienza
- 89 *Le città invisibili, guidati da Italo Calvino nell'impero della matematica con la sacca del docente*
Sandra Lucente

Parte B

- 5 *Effetti biologici delle radiazioni*
Giampaolo Co'
- 13 *La scoperta dei raggi X e del fenomeno della radioattività e le loro ricadute sul mondo medico*
Alberto Del Guerra
- 27 *Tecnologie diagnostiche con raggi X: avvento, sfide attuali e nuove frontiere*
Maria Evelina Fantacci, Patrizio Barca
- 41 *Immagini dall'antimateria: la tomografia ad emissione di positroni.*
Nicola Belcari, Valeria Rosso, Giancarlo Sportelli
- 59 *... dacci oggi la nostra dose quotidiana e liberaci dai mali ... (Sull'utilizzo di radioisotopi e radiofarmaci in medicina)*
Giancarlo Pascali
- 73 *Organ-on-chip e nuove prospettive per la ricerca medica e farmacologica*
Anna Grazia Monteduro, Silvia Rizzato, Giusi Caragnano, Andrea Margari, Noemi Petese, Giuseppe Maruccio
- 85 *Una breve storia della radioterapia (DT)*
M. Anguiano, A. M. Lallena
- 123 *Le moderne tecniche di radioterapia*
Maria Giuseppina Bisogni, Fabio Di Martino
- 139 *Nuovi approcci per la adroterapia basati su 100 anni di radioterapia e collaborazione (DT)*
Manjit Dosanjh, Monica Necchi, Alberto Degiovanni, Elena Benedetto
- 177 *Un'escursione nell'universo in alta dimensione (LM)*
Christian Genest, Johanna G. Nešlehová

2022. Numero XX, Raggi Cosmici

- 5 *I Raggi Cosmici e l'universo delle alte energie*
Paolo Lipari
- 35 *Raggi cosmici, ieri, oggi, domani*
Alessandro De Angelis
- 51 *Caratteristiche principali degli esperimenti per la misura dei raggi cosmici da terra*
Andrea Chiavassa
- 63 *Osservazione dei raggi cosmici dallo spazio*
Mirko Boezio, Riccardo Munini
- 79 *UHECR: raggi cosmici di energia ultra elevata*
Sergio Petrerá, Francesco Salamida

- 93 *Come sono accelerati i raggi cosmici?*
Stefano Gabici
- 103 *L'importanza dei neutrini cosmici di altissima energia*
Carla Distefano, Francesco Vissani
- 115 *Astroparticelle di altissima energia*
Antonella Castellina
- 131 *Sul tetto del mondo per studiare la radiazione cosmica*
Paolo Bernardini
- 137 *Machine Learning: principi di funzionamento e applicazioni in medicina*
Giorgio De Nunzio
- 169 *Il valore dell'informazione*
Luca Peliti

2022. Numero XX, Missioni spaziali

- 5 *Esplorando il nostro sistema solare (DT)*
Christina Plainaki, Eleonora Ammanito
- 37 *LISA: un osservatorio per le onde gravitazionali nello spazio*
Philippe Jetzer
- 45 *A caccia di antimateria nello spazio*
Roberto Battiston
- 53 *Drain Brain: monitorando il drenaggio cerebrale negli astronauti per prevenire problemi cardiovascolari*
S. Mari, G. Valentini, G. Mascetti, S. Pignataro, A. Taibi, A. Proto, E. Menegatti, P. Zamboni
- 63 *Spazzatura spaziale: origine, pericoli, che fare*
Giulio Avanzini
- 71 *Siamo soli nell'universo?*
Paolo Saraceno
- 83 *È possibile comprendere la Meccanica Quantistica?*
Claudio Garola

Ithaca educational

2019. Numero I

- 7 *Brevi note sul metodo scientifico (L)*
Paolo Bernardini
- 15 *Il peso dell'osservare: il ruolo del soggetto nel Metodo Scientifico (L)*
Mario Angelelli
- 23 *Grandezze arbitrariamente definite nella scienza: il caso dell'energia (L)*
Giampaolo Co'
- 27 *Evoluzionismo, diritto e linguaggio (L)*
Francesca Lamberti
- 35 *Evoluzione dell'Evoluzionismo in Biologia (C)*
Giorgia Luceri
- 39 *Evoluzione delle formazioni sociali (C)*
Simonetta Serio, Chiara De Masi, Flavia Papadia, Giada Invidia
- 47 *Evoluzione della concezione dell'istituto del matrimonio (C)*
Matteo Muci, Serena Notaro, Francesco Ribezzo, Altea Tafuro

- 53 *Storia e applicazioni delle GPU (C)*
Andrea D'Urbano, Alessandro Fasiello
- 67 *La traduzione nell'era dei Big Data (C)*
Caterina Milone, Aurora Paladini, Lorenzo Pellegrino
- 77 *I Big Data tra Diritto ed Economia (C)*
Simona Lamusta, Caterina Luceri
- 81 *Big Data e Assicurazioni. Regolamentazione dei Mercati e Tutela Giuridica (C)*
Giulia De Giorgi, Francesco De Masi
- 87 *Al confine di ciò che è noto (C)*
Francesco Merenda
- 93 *Valutazione statistica della prestazione energetica degli edifici nella provincia di Lecce (C)*
Matteo Viscoti, Antonella Sarcinella, Michele Ingrosso

Ithaca educational

2020. Numero II

- 5 *Riduzionismo ed olismo nelle scienze (L)*
Ferdinando Boero, Giampaolo Co'
- 15 *Pollicino e la Bella Addormentata (L)*
Luigi Martina
- 35 *Riduzionismo metodologico vs riduzionismo ontologico (L)*
Claudio Garola
- 41 *La complessità e la sua entrata in scena da pensiero laterale (L)*
Mario Castellana
- 51 *Il mondo fatto a scale. Spazio geografico e complessità (L)*
Stefano De Rubertis
- 59 *La società come sistema: dalla cibernetica alla teoria dei sistemi sociali (L)*
Gianpasquale Preite
- 67 *Discussione (F)*
Ferdinando Boero, Giampaolo Co', Claudio Garola, Marco Mazzeo
- 79 *Diverse concezioni dell'entropia (LM)*
Gaia Sacquegna

Quaderni

Ambiente e clima

- | | | | |
|------|------|-----|---|
| 2020 | XV | 47 | <i>Cambiamento climatico e protezione delle coste</i>
Marco Delle Rose, Corrado Fidelibus, Mario Marcello Miglietta |
| 2020 | XV | 25 | <i>Il cambiamento climatico e la questione degli eventi estremi</i>
Sergio Pinna |
| 2020 | XV | 13 | <i>Cause ed effetti dei cambiamenti climatici</i>
Roberto Battiston |
| 2016 | VIII | 37 | <i>Convezione Atmosferica</i>
Silvana Di Sabatino, Francesco Barbano |
| 2016 | VIII | 53 | <i>Convezione nel Mantello (DT)</i>
John A. Whitehead |
| 2020 | XV | 47 | <i>Crisi climatica e inquinamento atmosferico</i>
Cristina Mangia, Pierina Ielpo, Rita Cesari, Maria Cristina Facchini |
| 2020 | XV | 69 | <i>Clima e risorse idriche tra atmosfera e sottosuolo</i>
Paolo Martano, Marco Delle Rose |
| 2016 | VIII | 27 | <i>L'esplorazione del sottosuolo alla ricerca di correnti convettive</i>
Gianluca Gola |
| 2013 | II | 57 | <i>La fine del ghiaccio artico ed il futuro del clima</i>
Francesco Paparella |
| 2020 | XV | 105 | <i>La fusione nucleare controllata e il cambiamento climatico</i>
Danilo Dongiovanni, Lori Gabellieri, Piero Martin, Angelo Antonio Tuccillo,
Gregorio Vlad, Fulvio Zonca |
| 2020 | XV | 37 | <i>La nostra specie, le leggi della natura e le priorità scientifiche</i>
Ferdinando Boero |

Arte e scienza

2014	IV	27	<i>Al confine fra matematica, biologia e arte: la morfogenesi di Turing</i> Francesco Paparella
2014	III	5	<i>Arte e scienza. Dal futurismo all'arte moltiplicata</i> Luca Zaffarano
2021	XVIII-A	89	<i>Le città invisibili, guidati da Italo Calvino nell'impero della matematica con la sacca del docente</i> Sandra Lucente
2014	IV	13	<i>Il complesso intreccio tra scienza ed arte</i> Giuseppe Maruccio
2020	XVI	151	<i>I Computer e il Linguaggio Naturale</i> Valerio Basile
2021	XVII-B	63	<i>Dante e l'ipersfera</i> Giuseppe De Cecco
2014	III	25	<i>La fisica della musica</i> Giampaolo Co'
2021	XVII-A	93	<i>La Fisica e la Matematica negli Studi di Chopin</i> Massimo Blasone
2014	III	33	<i>Una geometrizzazione dello spazio degli accordi</i> Mattia G. Bergomi, Riccardo D. Jadanza, Alessandro Portaluri
2015	V	67	<i>La legatura dell'Evangelario Marciano Lat III,111: storia di un felice connubio fra arte e scienza</i> Armida Sodo
2014	IV	5	<i>La matematica nella Cupola Santa Maria del Fiore a Firenze</i> Giuseppe Conti
2015	V	79	<i>Maxwell tra archeologia ed investigazioni forensi</i> Carlotta Ferrara, Pier Matteo Barone
2014	III	15	<i>Un matematico passeggia per l'Alhambra (DT)</i> Rafael Pérez Gómez
2015	V	53	<i>La realtà tra percezione e fisica</i> Marco Mazzeo
2015	V	47	<i>Scienza e bellezza</i> Paolo Ciafaloni

Biologia

2014	IV	27	<i>Al confine fra matematica, biologia e arte: la morfogenesi di Turing</i> Francesco Paparella
2017	IX	33	<i>Diversi modi di fare scienza e la grande teoria della vita</i> Ferdinando Boero
2021	XVIII-B	5	<i>Gli effetti biologici delle radiazioni</i> Giampaolo Co'
2019	EI	35	<i>Evoluzione dell'Evoluzionismo in Biologia (C)</i> Giorgia Luceri
2021	XVIII-A	73	<i>Evoluzione e probabilità</i> Luca Peliti
2021	XIII-A	85	<i>La frontiera tra le scienze della vita e la fisica teorica.</i> Mario Nicodemi
2020	XV	37	<i>La nostra specie, le leggi della natura e le priorità scientifiche</i> Ferdinando Boero

Epistemologia

2019	EI	87	<i>Al confine di ciò che è noto (C)</i> Francesco Merenda
2019	EI	7	<i>Brevi note sul metodo scientifico (L)</i> Paolo Bernardini
2020	EII	41	<i>La complessità e la sua entrata in scena da pensiero laterale (L)</i> Mario Castellana
2017	IX	13	<i>Considerazioni storico-epistemologiche sul principio cosmologico</i> Vincenzo Fano, Giovanni Macchia
2020	EII	79	<i>Discussione sulla complessità (F)</i> Ferdinando Boero, Giampaolo Co', Claudio Garola, Marco Mazzeo
2017	X	109	<i>Etica senza verità</i> Dario Antiseri
2019	EI	23	<i>Grandezze arbitrariamente definite nella scienza: il caso dell'energia (L)</i> Giampaolo Co'
2016	VIII	59	<i>Iride</i> Luigi Martina
2020	EII	51	<i>Il mondo fatto a scale. Spazio geografico e complessità (L)</i> Stefano De Rubertis
2018	XII	193	<i>La Natura è naturale?</i> Paolo Ciafaloni
2021	XVII-B	55	<i>Perché la Regina aveva torto, pur avendo ragione</i> Michele Grillo
2019	EI	15	<i>Il peso dell'osservare: il ruolo del soggetto nel Metodo Scientifico (L)</i> Mario Angelelli
2020	EII	15	<i>Pollicino e la Bella Addormentata (L)</i> Luigi Martina
2019	XIII	21	<i>Problemi epistemologici in meccanica quantistica</i> Claudio Garola
2017	X	95	<i>La quantità del nulla</i> Lorenzo Dello Schiavo, Anna Baccaglini-Frank
2020	EII	35	<i>Riduzionismo metodologico vs riduzionismo ontologico (L)</i> Claudio Garola
2020	EII	5	<i>Riduzionismo ed olismo nelle scienze (L)</i> Ferdinando Boero, Giampaolo Co'
2015	V	53	<i>La realtà tra percezione e fisica</i> Marco Mazzeo
2017	IX	5	<i>Scienza ed epistemologia</i> Mario Castellana
2017	IX	21	<i>Scienza senza certezze</i> Dario Antiseri

Fisica delle alte energie

2022	XX	45	<i>A caccia di antimateria nello spazio.</i> Roberto Battiston
2017	X	79	<i>All'origine della massa: la QCD e il suo vuoto</i> Luca Girlanda
2022	XIX	115	<i>Astroparticelle di altissima energia</i> Antonella Castellina
2013	I	22	<i>ATLAS: un esperimento al CERN di Ginevra</i> Andrea Ventura
2015	VI	37	<i>Breve storia della ricerca delle oscillazioni nei neutrini solari ed atmosferici</i> Francesco Ronga
2013	I	5	<i>Il bosone di Higgs</i> Paolo Ciafaloni
2022	XIX	51	<i>Caratteristiche principali degli esperimenti per la misura dei raggi cosmici da terra</i> Andrea Chiavassa
2022	XIX	93	<i>Come sono accelerati i raggi cosmici?</i> Stefano Gabici
2015	VI	45	<i>La domanda di Majorana</i> Francesco Vissani
2013	I	25	<i>Esperimenti a LHC come motori di innovazione</i> Gabriele Chiodini
2015	VI	97	<i>Esperimenti di Neutrini negli USA</i> Camillo Mariani
2015	VI	101	<i>L'Europa dei neutrini</i> Francesco Terranova
2015	VI	109	<i>La frontiera dei neutrini sterili</i> Paolo Bernardini
2022	XIX	103	<i>L'importanza dei neutrini cosmici di altissima energia</i> Carla Distefano, Francesco Vissani
2015	VI	59	<i>Interazione dei neutrini con la materia</i> Maria Benedetta Barbaro, Omar Benhar, Carlotta Giusti
2013	I	19	<i>LHC dopo il bosone di Higgs</i> Edoardo Gorini
2020	XVI	167	<i>Machine Learning nella Fisica delle Alte Energie (DT)</i> Konstantinos Bachas, Stefania Spagnolo
2018	XII	193	<i>La Natura è naturale?</i> Paolo Ciafaloni
2016	VII	147	<i>Neutrini e Cosmologia</i> Gianpiero Mangano
2015	VI	7	<i>Neutrini ed interazione debole (LM)</i> Giampaolo Co'
2015	VI	69	<i>Neutrini e Supernovae</i> Alessandro Mirizzi
2015	VI	75	<i>I neutrini in astrofisica</i> Vincenzo Flaminio
2015	VI	117	<i>Neutrini: messaggeri di nuova fisica</i> Eligio Lisi
2015	VI	19	<i>Le oscillazioni del neutrino</i> Daniele Montanino
2022	XI	63	<i>Osservazione dei raggi cosmici dallo spazio</i> Mirko Boezio, Riccardo Munini
2022	XIX	35	<i>Raggi cosmici, ieri, oggi, domani</i> Alessandro De Angelis

2022	XIX	5	<i>I Raggi Cosmici e l'universo delle alte energie</i> Paolo Lipari
2017	X	67	<i>La ricerca di nuova fisica nel vuoto quantistico</i> Marco Incagli
2013	I	12	<i>La scoperta del bosone di Higgs</i> Aleandro Nisati
2022	XIX	131	<i>Sul tetto del mondo per studiare la radiazione cosmica</i> Paolo Bernardini
2022	XI	79	<i>UHECR: raggi cosmici di energia ultra elevata</i> Sergio Petrerá, Francesco Salamida

Fisica teorica

2017	X	79	<i>All'origine della massa: la QCD e il suo vuoto</i> Luca Girlanda
2021	XVII-A	45	<i>Applicazioni del Formalismo Quantistico alle Scienze Cognitive</i> Sandro Sozzo
2014	III	47	<i>Bosoni, Fermioni e ...</i> Luigi Martina
2020	EII	79	<i>Diverse concezioni dell'entropia (LM)</i> Gaia Sacquegna
2018	XII	129	<i>Energia Oscura, il motore dell'Universo</i> Massimo Pietroni
2022	XX	83	<i>È possibile comprendere la Meccanica Quantistica?</i> Claudio Garola
2014	III	61	<i>Fermioni di Majorana in sistemi a due dimensioni?</i> Pasquale Scarlino
2021	XIII-A	85	<i>La frontiera tra le scienze della vita e la fisica teorica.</i> Mario Nicodemi
2013	II	33	<i>Integrale di Feynman e limite classico</i> Matteo Beccaria
2015	V	35	<i>Meccanica quantistica e lensing gravitazionale</i> Claudio Corianò, Marta Dell'Atti, Luigi Delle Rose, Matteo Maria Maglio
2018	XII	193	<i>La Natura è naturale?</i> Paolo Ciafaloni
2018	XII	5	<i>Le onde gravitazionali nella fisica moderna</i> Maurizio Gasperini
2013	II	41	<i>Il principio variazionale nella fisica dei sistemi quantistici a multicorpi</i> Giampaolo Co'
2017	X	89	<i>La più grande cantonata di Einstein</i> Paolo Ciafaloni
2017	X	67	<i>La ricerca di nuova fisica nel vuoto quantistico</i> Marco Incagli
2018	XII	183	<i>Loop Quantum Gravity ed i buchi neri esplosivi</i> Simone Speziale
2021	XVII-B	35	<i>Materiali fatti di molecole macroscopiche: dai granulari alla materia attiva</i> Andrea Puglisi
2020	XVI	209	<i>La meccanica statistica dei sistemi complessi (LM)</i> Elena Agliari, Adriano Barra
2021	XVII-B	21	<i>Meccanica statistica per reti complesse</i> Tiziano Squartini
2019	XIII	21	<i>Problemi epistemologici in meccanica quantistica</i> Claudio Garola
2018	XI	125	<i>Statistica, entropia e temperatura (LM)</i> Giampaolo Co'
2018	XI	103	<i>Sull'integrabilità della termodinamica dell'equilibrio</i> Antonio Moro
2018	XI	117	<i>Superintegrabilità</i> Danilo Riglioni
2018	XII	161	<i>Stringhe, Brane e (Super)Gravità</i> Augusto Sagnotti
2018	XII	145	<i>L'universo emergente della gravità quantistica</i> Daniele Oriti
2022	XIX	169	<i>Il valore dell'informazione</i> Luca Peliti

Matematica applicata

2013	II	49	<i>Adam Smith, John Nash, il prezzo dell'anarchia e la decadenza della società moderna</i> Vittorio Bilò
2014	IV	27	<i>Al confine fra matematica, biologia e arte: la morfogenesi di Turing</i> Francesco Paparella
2020	XV	135	<i>L'attrattore di Lorenz (LM)</i> Mario Leo
2013	II	17	<i>Calcolo delle Variazioni e segmentazione di immagini</i> Michele Carriero, Antonio Leaci, Franco Tomarelli
2016	VIII	5	<i>La convezione da cima a fondo (DT)</i> Edward A. Spiegel
2016	VIII	17	<i>Convezione in fluidi stratificati: il caso delle dita di sale</i> Francesco Paparella
2020	XV	125	<i>Dai pattern ai frattali, passando per il caos</i> Deborah Lacitignola
2020	XVI	25	<i>L'elaborazione d'informazione nelle reti neurali</i> Elena Agliari, Adriano Barra
2016	VII	175	<i>Le equazioni dell'onda, del calore e di Laplace (LM)</i> Stefano De Leo
2014	III	33	<i>Una geometrizzazione dello spazio degli accordi</i> Mattia G. Bergomi, Riccardo D. Jadanza, Alessandro Portaluri
2020	XVI	99	<i>Inferenza ad alta dimensionalità: una prospettiva di meccanica statistica (DT)</i> Jean Barbier
2020	XVI	51	<i>La macchina di Boltzmann: quando il modello di Ising incontra il Machine Learning (DT)</i> Aurélien Decelle
2020	XVI	71	<i>Machine Learning: accuratezza, interpretabilità e incertezza (DT)</i> Guido Sanguinetti
2014	IV	5	<i>La matematica nella Cupola Santa Maria del Fiore a Firenze</i> Giuseppe Conti
2014	III	15	<i>Un matematico passeggia per l'Alhambra (DT)</i> Rafael Pérez Gómez
2021	XVII-B	21	<i>Meccanica statistica per reti complesse</i> Tiziano Squartini
2020	XVI	209	<i>La meccanica statistica dei sistemi complessi (LM)</i> Elena Agliari, Adriano Barra
2020	XVI	139	<i>Metodi di massima entropia (DT)</i> Michele Castellana
2019	XIII	5	<i>Probabilità e meccanica statistica</i> Angelo Vulpiani
2020	XVI	83	<i>Piccole reti neurali crescono</i> Carlo Lucibello
2020	XVI	39	<i>Reti neurali e forme di apprendimento</i> Daniele Tantari
2020	XVI	91	<i>La Rilevanza nell'Apprendimento Statistico</i> Matteo Marsili
2018	XI	71	<i>Onde anomale</i> Petr Georgievich Grinevich, Paolo Maria Santini
2013	II	7	<i>Il problema di Newton dei profili aerodinamici ottimi</i> Giuseppe Buttazzo
2014	IV	37	<i>Riflessioni sulle riflessioni</i> Giuseppe De Cecco

2018	XI	7	<i>Sistemi Integrabili</i> Luigi Martina
2018	XI	51	<i>Solitoni e Triangolazioni</i> <i>Triangulations and solitons</i> (DT) Yuji Kodama
2018	XI	103	<i>Sull'integrabilità della termodinamica dell'equilibrio</i> Antonio Moro
2018	XI	117	<i>Superintegrabilità</i> Danilo Riglioni
2020	XVI	7	<i>Tanto rumore per nulla? Il ruolo delle fluttuazioni nella dinamica delle reti nervose</i> Paolo Del Giudice, Maurizio Mattia

Matematica fondamentale

2014	IV	53	<i>L'analisi armonica e le serie di Dirichlet (LM)</i> Rocco Chirivì
2014	III	67	<i>Breve storia dei numeri primi (LM)</i> Alessandro Zaccagnini
2013	II	67	<i>L'equazione di Eulero–Lagrange (LM)</i> Rocco Chirivì
2018	XII	199	<i>La formula di de Moivre – Stirling (LM)</i> Carlo Sempi
2013	I	57	<i>La legge di reciprocità quadratica (LM)</i> Rocco Chirivì
2019	XIII	17	<i>Modelli di occupazione</i> Carlo Sempi
2013	II	29	<i>Il problema isoperimetrico</i> Alessio Figalli
2017	X	95	<i>La quantità del nulla</i> Lorenzo Dello Schiavo, Anna Baccaglini-Frank
2018	XI	85	<i>Simmetrie di Lie e Lie-Bäcklund per equazioni differenziali</i> Decio Levi.
2017	X	113	<i>Sfere e gruppi topologici (LM)</i> Francesco Esposito
2019	XIII	33	<i>Gli spazi metrici probabilistici</i> Carlo Sempi
2019	XIII	41	<i>Il Teorema di Liouville sull'integrabilità</i> Luigi Martina
2018	XI	39	<i>Trasendenti di Painlevé e integrabilità</i> Davide Guzzetti
2019	XVIII-B	177	<i>Un'escursione nell'universo in alta dimensione (LM)</i> Christian Genest, Johanna G. Nešlehová

Medicina

2021	XVIII-A	5	<i>Biomolecole e circuiti elettrici: la sfida Proteotronica</i> Rosella Cataldo
2020	XVI	183	<i>Casualità, causalità e Machine Learning nel contenimento epidemico</i> Alfredo Braunstein, Luca Dall'Asta, Alessandro Ingrosso
2021	XVIII-B	59	<i>... dacci oggi la nostra dose quotidiana e liberaci dai mali ...</i> (Sull'utilizzo di radioisotopi e radiofarmaci in medicina) Giancarlo Pascali
2017	IX	55	<i>La diffusione dell'ideologia antivaccinista</i> Antonella De Donno, Alessandra Panico, Giovanni Gabutti
2021	XVII-A	15	<i>Dinamica e controllo del Covid-19: commenti da due matematici (DT)</i> Bernhelm Booß-Bavnbek, Klaus Krickeberg
2022	XX	53	<i>Drain Brain: monitorare il drenaggio cerebrale negli astronauti</i> per prevenire problemi cardiovascolari S. Mari, G. Valentini, G. Mascetti, S. Pignataro, A. Taibi, A. Proto, E. Menegatti, P. Zamboni
2021	XVIII-A	73	<i>Evoluzione e probabilità</i> Luca Peliti
2021	XVIII-B	41	<i>Immagini dall'antimateria: la tomografia ad emissione di positroni.</i> Nicola Belcari, Valeria Rosso, Giancarlo Sportelli
2022	XIX	137	<i>Machine Learning: principi di funzionamento e applicazioni in medicina</i> Giorgio De Nunzio
2021	XVIII-A	17	<i>Microscopia a forza atomica per lo studio delle proprietà citomeccaniche</i> Mariafrancesca Cascione, Valeria De Matteis, Rosaria Rinaldi
2021	XVIII-B	123	<i>Le moderne tecniche di radioterapia</i> Maria Giuseppina Bisogni, Fabio Di Martino
2021	XVIII-A	39	<i>Morfogenesi: una sfida interdisciplinare</i> Silvia Grigolon
2020	XIV	49	<i>Nanotecnologie per la medicina</i> Giuseppe Maruccio, Elisabetta Primiceri, Maria Serena Chiriaco
2020	XIV	59	<i>Nuove tecnologie per studiare il cervello con la luce</i> Massimo De Vittorio, Ferruccio Pisanello
2021	XVIII-B	139	<i>Nuovi approcci per la adroterapia basati su 100 anni di radioterapia e collaborazione (DT)</i> Manjit Dosanjh, Monica Necchi, Alberto Degiovanni, Elena Benedetto
2021	XVII-B	47	<i>Le nuove frontiere del volo spaziale: Nanotecnologie e Biomedicina</i> Giada Graziana Genchi, Gianni Ciofani
2020	XV	5	<i>Nuovo Coronavirus: conoscenze work in progress</i> Antonella De Donno, Alessandra Panico
2017	IX	65	<i>Pregiudizi a-scientifici e spesa farmaceutica</i> Chiara Gerardi, Silvio Garattini
2021	XVIII-A	31	<i>Reti Neurali e Medicina di Precisione</i> Michele Caselle
2021	XVIII-B	13	<i>La scoperta dei raggi X e del fenomeno della radioattività e le loro ricadute sul mondo medico</i> Alberto Del Guerra
2021	XVIII-A	55	<i>Il sistema immunitario attraverso la lente dell'inferenza statistica</i> Barbara Bravi
2021	XVIII-B	27	<i>Tecnologie diagnostiche con raggi X: avvento, sfide attuali e nuove frontiere</i> Maria Evelina Fantacci, Patrizio Barca
2021	XVII-A	39	<i>Il trattamento per gruppi</i> Christian Genest, Christiane Rousseau

Sociologia e Scienza

2021	XVII-A	45	<i>Applicazioni del Formalismo Quantistico alle Scienze Cognitive</i> Sandro Sozzo
2021	XVII-B	13	<i>L'arte e la scienza di imparare dai dati: la biostatistica, dalle mutazioni genetiche all'intelligenza artificiale.</i> Serena Arima
2021	XVII-A	63	<i>Big Data, profezie, assicurazione: una prospettiva sociologica</i> Alberto Cevolini
2019	EI	77	<i>I Big Data tra Diritto ed Economia (C)</i> Simona Lamusta, Caterina Luceri
2020	XV	25	<i>Il cambiamento climatico e la questione degli eventi estremi</i> Sergio Pinna
2020	XV	47	<i>Cambiamento climatico e protezione delle coste</i> Marco Delle Rose, Corrado Fidelibus, Mario Marcello Miglietta
2020	XV	13	<i>Cause ed effetti dei cambiamenti climatici</i> Roberto Battiston
2020	XVI	151	<i>I Computer e il Linguaggio Naturale</i> Valerio Basile
2013	I	45	<i>La condanna dell'Aquila: cattiva giustizia, cattiva scienza o negligenza?</i> Francesco Paparella
2017	IX	43	<i>Dietro le quinte</i> Giampaolo Co'
2017	IX	55	<i>La diffusione dell'ideologia antivaccinista</i> Antonella De Donno, Alessandra Panico, Giovanni Gabutti
2021	XVII-A	15	<i>Dinamica e controllo del Covid-19: commenti da due matematici (DT)</i> Bernhelm Booß-Bavnbek, Klaus Krickeberg
2017	IX	33	<i>Diversi modi di fare scienza e la grande teoria della vita</i> Ferdinando Boero
2017	X	109	<i>Etica senza verità</i> Dario Antiseri
2019	EI	47	<i>Evoluzione della concezione dell'istituto del matrimonio (C)</i> Matteo Muci, Serena Notaro, Francesco Ribezzo, Altea Tafuro
2019	EI	39	<i>Evoluzione delle formazioni sociali (C)</i> Simonetta Serio, Chiara De Masi, Flavia Papadia, Giada Invidia
2017	IX	49	<i>L'insostenibile leggerezza della pseudoscienza</i> Paolo Ciafaloni
2016	VIII	59	<i>Iride</i> Luigi Martina
2016	VIII	5	<i>Il lato oscuro della luce</i> Marco Mazzeo
2021	XVII-B	5	<i>Matematica epidemiologica per COVID-19</i> Simone Bianco, Sara Capponi, James H. Kaufman
2021	XVII-A	5	<i>Non sempre 2 è il doppio di 1</i> Paolo Ciafaloni
2017	IX	65	<i>Pregiudizi a-scientifici e spesa farmaceutica</i> Chiara Gerardi, Silvio Garattini
2015	V	53	<i>La realtà tra percezione e fisica</i> Marco Mazzeo
2017	IX	21	<i>Scienza senza certezze</i> Dario Antiseri
2022	XX	51	<i>Siamo soli nell'universo?</i> Paolo Saraceno
2020	EII	59	<i>La società come sistema: dalla cibernetica alla teoria dei sistemi sociali (L)</i> Gianpasquale Preite

2014	IV	45	<i>Sociologia e dimensione sociale della scienza</i> Maria Luisa Dell'Atti
2013	I	35	<i>Sociologia e psicologia nella fisica sperimentale (DT)</i> John Hauptman
2022	XIX	131	<i>Sul tetto del mondo per studiare la radiazione cosmica</i> Paolo Bernardini
2020	XV	81	<i>Tecnologie fotovoltaiche innovative per ridurre il costo dell'elettricità</i> Cosimo Gerardi
2021	XVII-A	39	<i>Il trattamento per gruppi</i> Christian Genest, Christiane Rousseau

Spazio, Gravitazione, Cosmologia

- 2022 XX 45 *A caccia di antimateria nello spazio.*
Roberto Battiston
- 2018 XII 117 *Alla ricerca dei pianeti extrasolari*
Francesco De Paolis, Achille Nucita, Gabriele Ingrosso, Francesco Strafella, Domenico Licchelli
- 2016 VII 167 *Ascoltando l'Universo di onde gravitazionali: implicazioni e prospettive dopo la scoperta*
Paola Leaci
- 2022 XIX 115 *Astroparticelle di altissima energia*
Antonella Castellina
- 2022 XIX 51 *Caratteristiche principali degli esperimenti per la misura dei raggi cosmici da terra*
Andrea Chiavassa
- 2015 V 5 *Cent'anni di relatività*
Lorenzo Fatibene
- 2022 XIX 93 *Come sono accelerati i raggi cosmici?*
Stefano Gabici
- 2016 VIII 69 *La convezione nelle stelle (DT)*
Michaël Bazot
- 2018 XII 129 *Energia Oscura, il motore dell'Universo*
Massimo Pietroni
- 2022 XIX 5 *Esplorando il nostro sistema solare. (DT)*
Christina Plainaki, Eleonora Ammanito
- 2022 XIX 103 *L'importanza dei neutrini cosmici di altissima energia*
Carla Distefano, Francesco Vissani
- 2018 XII 183 *Loop Quantum Gravity ed i buchi neri esplosivi*
Simone Speziale
- 2022 XX 37 *LISA: un osservatorio per le onde gravitazionali nello spazio.*
Philippe Jetzer
- 2015 V 19 *Macro / micro / retro lensing gravitazionale*
Francesco De Paolis, Mosè Giordano, Gabriele Ingrosso, Luigi Manni, Achille Nucita, Francesco Strafella
- 2018 XII 13 *La Materia Oscura*
Marco Cirelli
- 2015 V 35 *Meccanica quantistica e lensing gravitazionale*
Claudio Corianò, Marta Dell'Atti, Luigi Delle Rose, Matteo Maria Maglio
- 2018 XII 23 *La nascita dell'astronomia delle onde gravitazionali: Virgo e LIGO (DT)*
S. Larson, Matteo Lorenzini, Riccardo De Salvo
- 2018 XII 193 *La Natura è naturale?*
Paolo Ciafaloni
- 2016 VII 147 *Neutrini e Cosmologia*
Gianpiero Mangano
- 2015 VI 69 *Neutrini e Supernovae*
Alessandro Mirizzi
- 2015 VI 75 *I neutrini in astrofisica*
Vincenzo Flaminio
- 2019 XIII 47 *L'ombra del buco nero in M87 (BC)*
Francesco De Paolis, Gabriele Ingrosso, Achille Nucita
- 2018 XII 5 *Le onde gravitazionali nella fisica moderna*
Maurizio Gasperini
- 2022 XI 63 *Osservazione dei raggi cosmici dallo spazio*
Mirko Boezio, Riccardo Munini
- 2017 X 89 *La più grande cantonata di Einstein*
Paolo Ciafaloni
- 2022 XIX 5 *I Raggi Cosmici e l'universo delle alte energie*
Paolo Lipari

2022	XIX	35	<i>Raggi cosmici, ieri, oggi, domani</i> Alessandro De Angelis
2022	XX	51	<i>Siamo soli nell'universo?</i> Paolo Saraceno
2022	XIX	131	<i>Sul tetto del mondo per studiare la radiazione cosmica</i> Paolo Bernardini
2018	XII	135	<i>La scoperta dell'espansione del cosmo. Quando la cosmologia cominciò a essere scienza</i> Silvio A. Bonometto, Marino Mezzetti
2018	XII	161	<i>Stringhe, Brane e (Super)Gravità</i> Augusto Sagnotti
2018	XII	71	<i>Il telescopio Einstein: l'osservatorio di onde gravitazionali di 3a generazione (DT)</i> Michele Punturo
2018	XII	145	<i>L'universo emergente della gravità quantistica</i> Daniele Oriti
2022	XI	79	<i>UHECR: raggi cosmici di energia ultra elevata</i> Sergio Petrerà, Francesco Salamida

Storia della Scienza

2022	XX	45	<i>A caccia di antimateria nello spazio.</i> Roberto Battiston
2021	XVIII-B	85	<i>Una breve storia della radioterapia (DT)</i> Marta Anguiano, Antonio Miguel Lallena
2015	VI	37	<i>Breve storia della ricerca delle oscillazioni nei neutrini solari ed atmosferici</i> Francesco Ronga
2017	IX	55	<i>La diffusione dell'ideologia antivaccinista</i> Antonella De Donno, Alessandra Panico, Giovanni Gabutti
2019	EI	27	<i>Evoluzionismo, diritto e linguaggio (L)</i> Francesca Lamberti
2021	XVII-A	69	<i>Linguaggio nei numeri e numeri nel linguaggio. Linguistica, Matematica e Cryptonalisi (DT)</i> Thomas Christiansen
2016	VIII	95	<i>Martingala: l'origine di un nome</i> Carlo Sempi
2021	XVIII-B	13	<i>La scoperta dei raggi X e del fenomeno della radioattività e le loro ricadute sul mondo medico</i> Alberto Del Guerra
2022	XIX	35	<i>Raggi cosmici, ieri, oggi, domani</i> Alessandro De Angelis
2019	EI	53	<i>Storia e applicazioni delle GPU (C)</i> Andrea D'Urbano, Alessandro Fasiello
2017	X	5	<i>La storia infinita delle pressioni estremamente basse e della loro misura</i> Anita Calcatelli

Tecnologia

2019	EI	81	<i>Big Data e Assicurazioni. Regolamentazione dei Mercati e Tutela Giuridica (C)</i> Giulia De Giorgi, Francesco De Masi
2019	EI	77	<i>I Big Data tra Diritto ed Economia (C)</i> Simona Lamusta, Caterina Luceri
2022	XIX	51	<i>Caratteristiche principali degli esperimenti per la misura dei raggi cosmici da terra</i> Andrea Chiavassa
2017	X	39	<i>L'effetto Casimir, una forza dal vuoto</i> Piergiorgio Antonini
2021	XVIII-B	59	<i>... dacci oggi la nostra dose quotidiana e liberaci dai mali ...</i> <i>(Sull'utilizzo di radioisotopi e radiofarmaci in medicina)</i> Giancarlo Pascali
2018	XII	93	<i>Da LISA Pathfinder a LISA: il primo osservatorio di onde gravitazionali dallo spazio</i> Daniele Vetrugno
2013	I	25	<i>Esperimenti a LHC come motori di innovazione</i> Gabriele Chiodini
2015	VI	97	<i>Esperimenti di Neutrini negli USA</i> Camillo Mariani
2015	VI	101	<i>L'Europa dei neutrini</i> Francesco Terranova
2020	XV	105	<i>La fusione nucleare controllata e il cambiamento climatico</i> Danilo Dongiovanni, Lori Gabellieri, Piero Martin, Angelo Antonio Tuccillo, Gregorio Vlad, Fulvio Zonca
2015	V	67	<i>La legatura dell'Evangelario Marciano Lat III,111: storia di un felice connubio fra arte e scienza</i> Armida Sodo
2021	XVIII-B	41	<i>Immagini dall'antimateria: la tomografia ad emissione di positroni.</i> Nicola Belcari, Valeria Rosso, Giancarlo Sportelli
2016	VII	83	<i>Luce e Quantum Dot</i> Vittorianna Tasco, Luigi Carbone
2020	XVI	167	<i>Machine Learning nella Fisica delle Alte Energie (DT)</i> Konstantinos Bachas, Stefania Spagnolo
2020	XIV	5	<i>Macchine molecolari</i> Alberto Credi, Vincenzo Balzani
2015	V	79	<i>Maxwell tra archeologia ed investigazioni forensi</i> Carlotta Ferrara, Pier Matteo Barone
2016	VII	119	<i>I Metamateriali: Invisibilità e Rifrazione Negativa in Mezzi Nanochirali</i> Marco Esposito, Francesco Todisco
2021	XVIII-B	123	<i>Le moderne tecniche di radioterapia</i> Maria Giuseppina Bisogni, Fabio Di Martino
2020	XIV	19	<i>Il microscopio a scansione tunnel: una finestra sul mondo quantistico</i> Davide Iaia
2018	XII	23	<i>La nascita dell'astronomia delle onde gravitazionali: Virgo e LIGO (DT)</i> S. Larson, Matteo Lorenzini, Riccardo De Salvo
2020	XIV	67	<i>Nanomateriali a base di carbonio per la rimediazione ambientale</i> Antonio Turco
2020	XIV	49	<i>Nanotecnologie per la medicina</i> Giuseppe Maruccio, Elisabetta Primiceri, Maria Serena Chiriaco
2020	XIV	27	<i>Le nuove frontiere per la (nano)elettronica</i> Anna Grazia Monteduro, Silvia Rizzato, Giuseppe Maruccio
2021	XVII-B	47	<i>Le nuove frontiere del volo spaziale: Nanotecnologie e Biomedicina</i> Giada Graziana Genchi, Gianni Ciofani
2020	XIV	59	<i>Nuove tecnologie per studiare il cervello con la luce</i> Massimo De Vittorio, Ferruccio Pisanello

2021	XVIII-B	139	<i>Nuovi approcci per la adroterapia basati su 100 anni di radioterapia e collaborazione</i> (DT) Manjit Dosanjh, Monica Necchi, Alberto Degiovanni, Elena Benedetto
2016	VII	99	<i>Organic Light-Emitting Diodes: la nuova era della luce</i> Fabrizio Mariano
2021	XVIII-B	73	<i>Organ-on-chip e nuove prospettive per la ricerca medica e farmacologica</i> Anna Grazia Monteduro, Silvia Rizzato, Giusi Caragnano, Andrea Margari, Noemi Petese, Giuseppe Maruccio
2022	XIX	63	<i>Osservazione dei raggi cosmici dallo spazio</i> Mirko Boezio, Riccardo Munini
2020	XVI	195	<i>Reti Neurali in grado di apprendere</i> Giorgio Buttazzo
2022	XX	63	<i>Spazzatura spaziale: origine, pericoli, che fare</i> Giulio Avanzini
2019	EI	53	<i>Storia e applicazioni delle GPU</i> (C) Andrea D'Urbano, Alessandro Fasiello
2017	X	5	<i>La storia infinita delle pressioni estremamente basse e della loro misura</i> Anita Calcatelli
2016	VII	131	<i>Strong Coupling: l'entanglement tra luce e materia</i> Armando Genco
2019	EI	67	<i>La traduzione nell'era dei Big Data</i> (C) Caterina Milone, Aurora Paladini, Lorenzo Pellegrino
2017	X	23	<i>La tecnologia del vuoto</i> Gabriele Chiodini
2021	XVIII-B	27	<i>Tecnologie diagnostiche con raggi X: avvento, sfide attuali e nuove frontiere</i> Maria Evelina Fantacci, Patrizio Barca
2020	XV	81	<i>Tecnologie fotovoltaiche innovative per ridurre il costo dell'elettricità</i> Cosimo Gerardi
2018	XII	71	<i>Il telescopio Einstein: l'osservatorio di onde gravitazionali di 3a generazione</i> (DT) Michele Punturo
2017	X	49	<i>Il vuoto come cristallo Birfrangente: l'esperimento PVLAS</i> Guido Zavattini
2019	EI	93	<i>Valutazione statistica della prestazione energetica degli edifici nella provincia di Lecce</i> (C) Matteo Viscoti, Antonella Sarcinella, Michele Ingrosso

Indice degli autori

A

Agliari, Elena: XVI 25, XVI 209.
Ammanito, Eleonora: XX 5.
Angelelli, Mario: EI 15.
Anguiano, Marta: XVIII-B 85.
Antiseri, Dario: IX 21, X 109.
Antonini, Piergiorgio: X 39.
Arima, Serena: XVII-B 13.
Avanzini, Giulio: XX 64.

B

Baccaglioni-Frank, Anna: X 95.
Bachas, Konstatinos: XVI 167.
Balzani, Vincenzo: XIV 5.
Barbano, Francesco: VIII 37.
Barbaro, Maria Benedetta: VI 59.
Barca, Patrizio: XVIII-B 27.
Barone, Pier Matteo: V 79.
Barra, Adriano: XVI 25, XVI 209.
Barbier, Jean: XVI 99.
Basile, Valerio: XVI 151.
Battiston, Roberto: XV 13, XX 45.
Beccaria, Matteo: II 33.
Belcari, Nicola: XVIII-B 27.
Benedetto, Elena: XVIII-B 139.
Benhar, Omar: VI 59.
Bergomi, Mattia, III 33.
Bernardini, Paolo: VI 109, XIX 131, EI 7.
Bianco, Simone: XVII-B 5.
Bisogni, Maria Giuseppina: XVIII-B 123.
Bilò, Vittorio: II 49.
Blasone, Massimo: XVII-A 93.
Boero, Ferdinando: IX 33, XV 37, XVII-A 110, EII 5, EII 67.
Bonometto, Silvio A.: XII 135.
Booß-Bavnbek, Bernhelm: XVII-A 15.
Boezio, Mirko: XIX 63.
Bossi, Fabio, XVII-A 110.
Braunstein, Alfredo: XVI 183.
Bravi, Barbara: XVIII-A 55.
Buttazzo, Giorgio: XVI 195.
Buttazzo, Giuseppe: II 7.

C

Calcatelli, Anita: X 5.
Capponi, Sara: XVII-B 5.
Carganano, Giusi: XVIII-B 73.
Carbone, Luigi: VII 83.
Carriero, Michele: II 17.
Caselle, Michele: XVIII-A 31.
Cascione, Mariafrancesca: XVIII-A 17.

Castellana, Mario: IX 5, XVII-A 111, EII 41.
Castellana, Michele: XVI 139.
Castellina, Antonella: XIX 115.
Cesari Rita: XV 57.
Cataldo, Rosella: XVIII-A 5.
Cevolini, Alberto: XVII-A 63.
Chiavassa, Andrea: XIX 51.
Chiodini, Gabriele: I 25, X 23.
Chirivì, Rocco: I 57, II 67, IV 53.
Ciafaloni, Paolo: I 5, V 47, IX 49, X 89, XII 193, XVII-A 5.
Cirelli, Marco: XII 117.
Christiansen, Thomas: XVII-A 69.
Co', Giampaolo: II 41, III 25, VI 7, IX 43, XI 125, XVII-A 112, XVIII-B 5, EI 23, EII 5, EII 67.
Conti, Giuseppe: II 5.
Corianò, Claudio: V 35.
Credi, Alberto: XIV 5.

D

Dall'Asta, Luca: XVI 183.
De Angelis, Alessandro: XIX 35.
De Cecco, Giuseppe: IV 37, XVII-B 63.
Decelle Aurélien: XVI 51.
De Donno, Antonella: IX 55, XV 5.
De Giorgi, Giulia: EI 81.
Degiovanni, Alberto: XVIII-B 139.
De Leo, Stefano: VII 175.
Del Giudice, Paolo: XVI 7.
Del Guerra, Alberto: XVIII-B 13.
Dell'Atti, Maria Luisa: IV 45.
Dell'Atti, Marta: V 35.
Delle Rose, Luigi: V 35.
Delle Rose, Marco: XV 47, XV 69.
Dello Schiavo, Lorenzo: X 95.
De Matteis, Valeria: XVIII-A 17.
De Nunzio, Giorgio: XIX 137.
De Paolis, Francesco: V 19, XII 107, XIII 47.
De Rubertis, Stefano: XVII-A 112, EII 51.
De Masi, Chiara: EI 39.
De Masi, Francesco: EI 81.
De Salvo, Riccardo: XII 23.
De Vittorio, Massimo: XIV 59.
Di Martino, Fabio: XVIII-B 123.
Di Sabatino, Silvana: VIII 37.
Distefano Carla: XIX 103.
Dongiovanni, Danilo: XV 105.
Dosanjh, Manjit: XVIII-B 139.
D'Urbano, Andrea: EI, 53.

E

Esposito, Francesco: X 113.

Esposito, Marco: VII 119.

F

Facchini, Maria Cristina: XV 57.
Fantacci, Maria Evelina: XVIII-B 27.
Fatibene, Lorenzo: V 5.
Fano, Vincenzo: IX 13.
Fasiello, Alessandro: EI, 53.
Ferrara, Carlotta: V 79.
Fidelibus, Corrado: XV 47.
Figalli, Alessio: II 29.
Flaminio, Vincenzo: VI 75.

G

Gabellieri, Lori: XV 105.
Gabici, Stefano: XIX 93.
Gabutti, Giovanni: IX 55.
Garattini, Silvio: IX 65.
Garola, Claudio: XIII 21, XX 83, EII 35, EII 67.
Gasperini, Maurizio: XII 5.
Genest, Christian: XVII-A 39, XVIII-B 177.
Genco, Armando: VII 131.
Gerardi, Chiara: IX 65.
Gerardi, Cosimo: XX 81.
Giordano, Mosè: V 19.
Giusti, Carlotta: VI 59.
Girlanda, Luca: X 79.
Gola, Gianluca: VIII 27.
Gorini, Edoardo: I 19.
Grigolon, Silvia: XVIII-A 39.
Grillo, Michele: XVII-B 55.
Grinevich, Petr Georgievich: XI 71.

H

Hauptmann, John: I 35.

I

Iaia, Davide: XIV 19.
Ielpo, Pierina: XV 57.
Incagli, Marco: X 67.
Ingrosso, Alessandro: XVI 183.
Ingrosso, Gabriele: V 19, XII 107, XIII 47.
Ingrosso, Michele: EI 93.
Invidia, Giada: EI 39.

J

Jadanza, Riccardo: III 33.
Jetzer, Philippe: XX 37.

K

Kaufman, James H.: XVII-B 5.
Kodama, Yuji: XI 51.
Krickeberg, Klaus: XVII-A 15.

L

Lacitignola, Deborah: XV 125.
Lallena, Antonio Miguel: XVIII-B 85.
Lamberti, Francesca: EI 27.
Lamusta, Simona: EI 77.
Larson, S. : XII 23.
Leaci, Antonio: I 17.
Leaci, Paola: VII 167.
Leo, Mario: XV 135.
Levi, Decio: XI 85.
Lichelli, Domenico: XII 107.
Lipari, Paolo: XIX 5.
Lisi, Eligio: VI 117.
Lorenzini, Matteo: XII 23.
Lucente, Sandra: XVII-A 113, XVIII-A 89.
Luceri, Caterina: EI 77.
Luceri, Giorgia: EI 35.
Lucibello, Carlo: XVI 83.

M

Macchia, Giovanni: IX 13.
Maglio, Matteo Maria: V 35.
Mangano, Gianpiero: VII 147.
Mangia, Cristina: XV 57.
Manni, Luigi: V 19.
Mari, Silvia: XX 53.
Margari, Andrea: XVIII-B 73.
Mariano, Fabrizio: VII 99.
Mariani, Camillo: VI 97.
Martano, Paolo: XV 69.
Martin, Piero: XV 105.
Martina, Luigi: III 47, VII 53, XI 7, EII 15.
Maruccio, Giuseppe: IV 13, XIV 27, XVIII-B 73.
Martina, Luigi: XIII 41, XVII-A 114.
Marsili, Matteo: XVI 91.
Mascetti, Gabriele: XX 53.
Mattia, Maurizio: XVI 7.
Mazzeo, Marco: V 53, VII 5, XVII-A 115, EII 67.
Menegatti, Elena: XX 53.
Merenda, Francesco: EI 87.
Mezzetti, Marino: XII 135.

Miglietta, Marco Marcello: XV 47.
Milone, Caterina: EI 67.
Mirizzi, Antonio: VI 69.
Montanino, Daniele: VI 19.
Monteduro, Anna Grazia: XIV 27, XVIII-B 73.
Moro, Antonio: XI 103.
Muci, Matteo: EI 47.
Munini, Riccardo: XIX 63.

N

Necchi, Monica: XVIII-B 139.
Nešlehová, Johanna G., XVIII-B 177.
Nicodemi, Mario: XVIII-A 85.
Nisati, Aleandro: I 12.
Notaro, Serena: EI 47.
Nucita, Achille: V 19, XII 107, XIII 47.

O

Oriti, Daniele: XII 145.

P

Panico, Alessandra: IX 55, XV 5.
Papadia, Flavia: EI 39.
Paparella, Francesco: I 45, II 57, IV 27, VIII 17.
Pascali, Giancarlo: XVIII-B 59.
Paladini, Aurora: EI 67.
Pellegrino, Lorenzo: EI 67.
Peliti, Luca: XVIII-A 73, XIX 169.
Pérez Gómez, Rafael: III 17.
Petra, Sergio: XIX 79.
Petese, Andrea: XVIII-B 73.
Pinna, Sergio: XV 25.
Pietroni, Massimo: XII 129.
Pignataro, Salvatore: XX 53.
Pisanello, Ferruccio: XIV 59.
Plainaki, Christina: XX 5.
Portaluri Alessandro: III 33.
Preite, Gianpasquale, EII 59.
Primavera, Margherita: XVII-A 116.
Proto, Antonino: XX 53.
Puglisi, Andrea: XVII-B 35.
Punturo, Michele: XII 74.

R

Ribezzo, Francesco: EI 47.
Riglioni, Danilo: XI 117.
Rinaldi, Rosaria: XVII-A 17.

Rizzato, Silvia: XIV 27, XVIII-B 73.
Ronga, Francesco: VI 37.
Rosso, Valeria: XVIII-B 27.
Russeau, Christiane: XVII-A 39.

S

Sacquegna, Gaia, EII 79.
Sagnotti, Augusto: XII 161.
Salamida, Francesco: XIX 79.
Sanguinetti, Guido: XVI 71.
Santini, Paolo Maria: XI 71.
Saraceno, Paolo: XX 71.
Sarcinella Antonella: EI 93.
Scarlino, Pasquale: III 61.
Sempi, Carlo: VIII 95, XII 199, XIII 17, XIII 33.
Serio Simonetta: EI 39.
Sodo, Armida: V 67.
Sozzo, Sandro: XVII-A 45.
Spagnolo, Stefania: XVI 167.
Speziale, Simone: XII 183.
Spiegel, Edward A. VIII 5.
Sportelli, Giancarlo: XVIII-B 27.
Squartini, Tiziano: XVII-B 21.
Strafella, Francesco: V 19, XII 107.

T

Tafuro, Altea: EI 47.
Taibi, Angelo: XX 53.
Tantari, Daniele: XVI 39.
Tasco Vittoriana: VII 83.
Terranova, Francesco: VI 101.
Ticozzi, Marco: XVII-A 116.
Todisco, Francesco: VII 119.
Tomarelli, Franco: II 17.
Tuccillo, Angelo Antonio: XV 105.
Turco, Antonio: XIV 67.

U

Updike, John H.: VI 3.

V

Valentini, Giovanni: XX 53.
Ventura, Andrea: I 22.

Vetrugno, Daniele: XII 93.
Viscotti Matteo: EI 93.
Vissani, Francesco: VI 47, XIX 103.
Vlad, Gregorio: XV 105.
Vulpiani, Angelo: XIII 5.

W

Whitehead, John A.: VIII 53.

Z

Zamboni, Paolo: XX 53.
Zaccagnini, Alessandro: III 67.
Zaffarano, Luca: III 5.
Zavattini, Guido: X 49.
Zonca, Fulvio: XV 105.

Indice analitico

A

Acceleratori cosmici: XIX 93.
Acceleratori in medicina: XVIII-B 85.
Accordi musicali: III 33.
ACE-CRIS: XIX 63.
Ades, Dawn: IV 13.
Adroterapia: XVIII-B 85, XVIII-B 139.
Aereodinamica: II 7.
Aereosol: XV 57.
AFM: IV 13.
Alfén, onde di: XV 105.
Algoritmo non adattativo: XVII-A 39.
Alhambra: III 17.
Alluvioni: XV 25.
Airy, funzione di: VII 59.
ALICE: I 19.
AMS: XX 45.
Anarchia: II 49.
Angelou, Maya: I 35.
Angiografia: XVIII-B 27.
ANTARES: VI 75.
Antigene: XVIII-A 55.
Anyoni: III 47, III 61.
Appendimento statistico: XVI 91, XVI 195.
Aquila, L': I 45.
Archeologia: V 79.
Arcobaleno: VII 53.
Armoniche: III 25.
Arte: **III**.
Artico: II. 57.
ARGO-YBJ: XIX 131.
Assicurazioni: XVII-A 63,
Associaedri: XI 51.
Aspect, esperimento di: VII 5.
Astrofisica multi-messaggeri: XIX 5.
Astrometria: XII 107.
ATLAS: I 12, I 19, I 22, XVI 167.
Atmosfera: VIII 37.
Attamero: XVII-A 5.
Attrattore di Lorentz, strano: XV 135.
Auger Pierre, osservatorio: XIX 79, XIX 115.
Azione quantistica: II 33.

B

Balla, Giacomo: III 5.
Bachelard, Gaston: IX 5.
Bäcklung, simmetrie: XI 85.
Ballocco Mario: III 5.
Banks Michelle: IV 13.
Bayes, teorema di: XVII-B 13.
Becquerel, Henry: XVIII-B 13.
Bell, disuguaglianza: VII 5, XIII 21, XX 83.

Bellezza: V 47.
Bernoulli, numeri di: IV 53.
Bessel, funzioni di: VII 59.
Beta, decadimento: VI 7.
Beta, doppio decadimento: VI 47, VI 117.
Bibbia: IX 23.
Biblioteca Marciana di Venezia: V 67.
Big-Data: XVII-A 63.
Big-bang: XII 193, XII 23.
Bi-isotropi, mezzi: VII 119.
Binning, Gerd, IV 13.
Biodiversità: XV 37.
Biologia: IX 33.
Biomolecole: XVIII-A 5.
Biostatistica: XVII-B 13.
Biotecnologie: XVII-B 47.
Birifrangenza: X 49.
Black carbon: XV 57.
Blake & Zisserman, funzionale: II 17.
Blasar: VI 75.
Bragg, picco di: XVIII-B 139.
Bohm, variabili nascoste di: VII 5.
Boltzmann, macchine di: XVI 39, XVI 51.
Boone (Mini): VI 109.
Boro, terapia: XVIII-B 139.
Bose-Einstein, condensazione: VII 131.
Bosone di Higgs: I.
Bosoni: III 47.
Brachistocrona: II, 67.
Brachiterapia: XVIII-B 85.
Brahe, Tyco: V 47.
Brane: XII 161.
Brewster, angolo di: VII 59.
Brunelleschi, Filippo: IV 5.
Buchi neri: V 19, V 35, XII 5, XII 74, XII 183, XIII 47.
Burst, gamma-ray: VI 75.

C

Calatrava Santiago: IV 13.
Calore, equazione: VII 175.
CALET: XIX 63.
Calvino, Italo: XVIII-A 89.
Cartesio: V 53.
Camera oscura: VII 5.
Cammino, integrale: II, 33.
Caos deterministico: XIII 5, XV 125, XV 135.
Carbonio, allotropico: XIV 67.
Casimir, forza di: X 39.
Catenaria: II, 67, IV 5.
Causalità: VII 5.
CD, lettore di: VII 5.
Cecchini, Loris: IV 13.
Cefeidi: XII 135.
Cella solare: XV 81.
Čerenkov, effetto: VI 19.

Cerere: XX 5.
CERN: I 5, I, 12, I, 13.
Cervello: XIV 59, XX 53.
Chiralità: VI 7, VII 119.
Chopin: XVII-A 93.
Ciclo del carbonio: XV 13.
Ciclo idrologico: XV 69.
Cicloide: II, 67.
Clima: II 57, XV
Climatologia storica: XV 25.
Citochine: XVIII-A 5.
Citomeccanica: XVIII-A 17.
Cloud: I 25.
Cluster algebra: XI 51.
CMS: I 12, I 13, XVI 167.
CNO, ciclo: VIII 69.
Cobalto, terapia al: XVIII-B 85.
Cognitive, scienze: XVII-A 45.
Collasso stellare: VI 69.
Colombo Gianni: III 5.
Confinamento quantistico: VII 83.
Conggettura di Riemann: III 67.
Contestualità in Meccanica Quantistica: XX 83.
Copenhagen, interpretazione di: V 53., VII 5, XX 83.
Copernico: V 47.
Corona virus: XV 5.
Cosmologia: VII 147, IX 13, XII 5, XII 135, XII 193.
Coste, protezione: XV 47.
Covarianza, principio di: V 5.
COVID-19: XV 5, XVII-A 5, XVII-A 15, XVII-A 39, XVII-B 5.
CNAO: XVIII-B 139.
CP, violazione di: VI 19.
Criptografia: XVII-A 69.
CUORE: VI 101.
Curie, Pierre e Marie: XVIII-B 13, XVIII-B 85.
Curie-Weiss, modello di: XVI 99, XVI 209.

D

Dalì, Salvador: IV 13.
DAMPE: XIX 63.
Dana Richard: IV 13.
Dante: XVII-B 63.
Darwin, Charles: IX 33.
Dawn, missione: XX 5.
Debole, interazione: VI 7.
Decibel: III 25.
Decodifica dei codici: XVII-A 69.
Diadi: III 33.
Diedrale, gruppo: IV 37.
Deep learning: XVI 71.
de Moivre: XII 199.
Diffrazione: VII 5.
Dinamica molecolare: XIII 5.
Dingle, Herbert: IX 13.

Dirac, Paul Adrien Maurice: III 47.
Dirichlet, Peter Gustav Lejeune: IV 53.
Dispersione della luce: VII 59.
Doppia fenditura, esperimento: V 53.
Dosimetria: XVIII-B 5, XVIII-B 85.
Dove Heinrich: IV 13.
DSA: XVIII-B 27.
Dualità: XII 161.
DUNE: VI 97.
Dunn, Greg: IV 13.

E

EAS, *extensive air shower* : XIX 51.
Einstein, telescopio: XII 74.
Ecologia: XV 37.
Economia: XVII-B 55.
Elettroluminescenza: VII 99.
Elettronica molecolare: XIV 27.
Elettroscopio: XIX 35.
Elicità: VI 7.
Energia oscura: XII 129.
Enriques, Federigo: IX 5.
Entanglement: V 53, VII 5, VII 131.
Entropia: XI 125, XVI 139, XVI 209.
Entropia di Shannon: XVI 99, XVI 139, XVI 209, XVII-B 21.
Eulero-Lagrange, equazione: II 67.
Epidemia, XV 5, XVI 183., XVII-A 5., XVII-A 15, XVII-A 39, XVII-B 5.
Epistemologia: IX 5, XIII 21, XVII-B 5, XVII-B 55, XX 83.
Equilibrio termico: XI 125.
Equivalenza, principio di: V 5.
Erdős: XVII-B 21.
Ergodicità: XII 11.
Ernia congenita diaframmatica: XIX 137.
Etere: VII 5.
Etica: X 109.
Evangelario Marciano: V 67.
Eventi estremi: XV 25.
Evoluzione, teoria dell': IX 23, XVIII-A 73.
Extrasolari, pianeti: V 19.

F

Fabry-Perot, cavità: VII 131.
Faglia: I 45.
Fallibilismo: IX 21.
Farmaci: IX 65, XVIII-B 59, XVIII-B 73.
Fénéon, Felix: IV 13.
Fermat, principio di: VII 5.
Fermi, accelerazione dei raggi cosmici: XIX 93.
Fermi, costante di accoppiamento: VI 7.
Fermioni: III 47.
Fermi, paradosso: XX 71.

Fermi-Pasta-Ulam: XI 7.
Ferrofluido: IV 13.
Feynman, cammini di: VII 5.
Feynman, integrale di: II 33.
Filogenetica: XVII-B 13.
Flash, effetto: XVIII-B 85, XVIII-B 123.
Fluidodinamica: VIII 5.
Fluorescenza: VII 99.
Fotoelettrico, effetto: VII 5, XV 81.
Fotomoltiplicatori a stato solido: I 25.
Fotoni: VII 5.
Fotovoltaico: XV 81.
Frattali: XV 125, XVIII-A 89.
Friedmann, legge di: X 89.
Fusione nucleare: XV 105.
Futurismo: III 5.

G

g-2: X 67.
Galileiani satelliti: XX 5.
Galileo Galilei: V 47, V 53.
Gamma-ray burst: XIX 5.
Ganimede: XX 5.
Geodetiche: II 67.
Genoma: XVIII-A 85.
Georadar: V 79.
Geotermia: VIII 27.
Ghiaccio artico: II 57.
Giochi, teoria dei: II 49, XVII-B 55.
Giove: XX 5.
Gittata di proiettili: II, 7
Gloria: VII 59.
Grafici, teoria dei: XVII-B 21.
Granulari, materiali: XVII-B 35.
Gramsci, Antonio: IX 5.
Grande macchia di Giove: XX 5.
Grassmaniane, varietà: XI 51.
Grassi, Orazio: V 53.
Gravità quantistica: XII 145, XII 183.
Gravitoni: XII 5.
Green's function Monte Carlo: II 41.
Grid: I 25.
Gruppi cristallografici: III 17.
Gruppi, teoria dei: XI 85.
Guericke, Otto von: X 5.
Gutenberg-Richter, legge: I 45.

H

Hartree-Fock: II 41.
Hausdorff, misura di: II 17.
Hawking, Stephen: XII 183.
Hebb, regola di: XVI 39, XVI 195.
HESS: XIX 51.
Hertz, Heinrich: VII 5.

Higgs, bosone: I, XII 193.
Hillas, Michaels: XIX 93.
Hopfield, modello di: XVI 99, XVI 195, XVIII-A 31.
Hubble, costante: V 19, X 89, XII 135.
Huyghens, Christian: VII 5, IX 13.

I

Ice Cube: IV 75, XIX 103.
Iconale, equazione: VII 5.
Immagine digitale: II 17.
Immunitario, sistema: XVIII-A 55.
Immunoterapia: XVIII-A 55.
Inferenza statistica: XVI 99, XVIII-A 55.
Informazione ed entropia: XVI 99.
Inpainting: II 17.
Inquinanti: XIV 67.
Intelligenza artificiale: XVI, XVII-B 13.
Io: XX 5.
ISS: XX 53.
ITER: X 23.

J

Jerram, Luke: IV 13.
JIRAM: XX 5.
JUNO: XX 5.

K

Kadomtsev-Petviashvili, equazione: XI 51.
Kaluza-Klein: XII 161.
Kamiokande: VI 19.
KATRIN: VI 101.
Keplero: V 47.
Khun, Thomas: IV 45, IX 5.
Kilonova: XIX 5.
Knudsen, numero di: X 23.
Kodama, Sachiko: IV 13.
Kohonen, reti di: XVI 195.
Korteweg - de Vries, equazione di: XI 7.

L

Laplace, equazione di: VII 175.
Large Hadron Collider (LHC): I 12, I 19, I 22.
Latiano Jonathan: IV 13.
Latour, Bruno: IV 45.
Legatura del codice Lat III, 111: V 67.
Legendre, funzioni di: VII 59.
Lensing gravitazionale: V 19, V 35.
Lie, simmetrie: XI 85.
Linsely, John: XIX 93.
Liouville, teorema: XIII 41.
LISA: XII 93, XX 37.
LHAASO: XIX 51.

LHC: X 23, XVI 167.
LIGO: VII 167, X 23, XII 23, XII 93.
Limite centrale, teorema: XVII-A 5.
Linguaggio naturale: XVI 151.
Linguistica: XVI 151, XVII-A 69.
Linguistica computazionale: XVI 151.
Logica quantistica: XII 21.
Lotka-Volterra, equazione: XV 37.
LSND: VI 109.
Luce: VII.
Luminescenza: VII 83.
Lyapunov, esponenti: XV 135.

M

M87: XIII 47.
Macchine molecolari: XIV 5.
Machine learning: XVI 51, XVI 71, XVI 167, XVI 183, XIX 137.
MACHO: V 19, XII 117.
MACRO: VI 37.
Majorana, fermioni: III 47, III 61, VI 47, VI 117
Mammografia: XVIII-B 27.
Mantello: VIII 53.
Marinetti, Filippo: III 5.
Martingala: VIII 95.
Materia oscura: X 67, XII 117.
Matroidi: XI 51.
Maxwell, James Clark: V 79, VII 5, VII 119, XI 103.
Mc Cabe, Jonathan: IV 27.
Mc Crea, William: IX 13.
Meccanica Quantistica: XII 21, XX 83.
Meccanica Statistica: XI 125, XIII 5.
Media: XVII-A 5.
Medicane: XV 47.
Medicina di precisione: XVIII-A 31.
Merlau-Ponty, Maurice: IX 13.
Metamateriali: VII 119.
Metano: XV 57.
Metodo scientifico: V 47.
Michelson e Morley, esperimento: VII 5.
Microcavità: VII 131.
Microensing: XII 107.
Microscopio a effetto tunnel: IV 13, XIV 19.
Microscopio a forza atomica: IV 13, XVIII-A 19.
Milne, Edward Arthur: IX 13.
Minerva: VI 97.
MINOS: VI 97.
Möbius, nastro: III 33.
Modello Standard: I 5, I 12, X 67.
Molticorpi, problema quantistico: II 41.
Molti mondi, interpretazione: VII 5.
MOND: XII 117.
Monossido di carbonio: XV 57.
Monte Carlo, metodo: XIII 5, XVI 183.
Morfogenesi: IV 27, XVIII-A 39.

Mosaici: III 17.
MSM, equazione di: VI 19.
Motori freddi: XV 37.
Mumford & Shah, funzionale: II 17.
Munari, Bruno: III 5.
Musica: III 25, XVII-A 93.

N

Nanoascensore: XIV 5.
Nanochirali, materiali: VII 119.
Nash, John: II 49.
Naturalezza: XII 193.
Navette molecolari: XIV 5.
Nano elettronica: XIV 27.
Neuroni: XVI 7, XVI 25.
Neutrini, massa dei: VI 19, VI 47, VI 117.
Neutrini atmosferici: VI 19.
Neutrini cosmici: VI 75, XIX 103.
Neutrini solari: VI 19.
Neutrini sterili: VI 19, VI 109.
Newton, problema dei profili: II 7.
Non-località della Meccanica Quantistica: VII 5.
Note musicali: III 25.
Nova: VI 97.
Nubi: VIII 37.
Nuclei galattici attivi: VI 75, XIX 5.
Nucleosintesi del Big Bang: VII 147.
Numeri primi: III 67.

O

Occam, rasoio di: VII 5.
Ohm, legge del vuoto di: X 23.
OLED: VII 99.
Onda, equazione: VII 175.
Onde anomale: XI 71.
Onde gravitazionali: VII 167, XII 5, XII 23, XII 93, XX 37.
OPERA: IX 43, IX 49.
Orbifolds: III 33.
Orecchio: III 25.
ORCA: VI 101.
Ottica, geometrica, ondulatoria: VII 5.
Oscillazione dei neutrini: VI 19, VI 59.
Ozono: XV 57.

P

PAMELA: XIX 63.
Painlevé, trascendenti di: XI 39.
Panspermia: XX 71.
Paleoclimatologia: XV 13.
Parità: VI 7.
Particelle Elementari: I 5.
Particolato: XV 57.

Pauli, Wolfgang, lettera: VI 7.
Pascal, Blaise: X 5.
Pattern recognition, XIX 137.
Percezione: V 53.
Percettore binario: XVI 83.
Percettrone: XIX 137.
PET: XVIII-B 13, XVIII-B 27.
Pianeti extrasolari: XII 107.
Piaget, Jean: IX 5.
Pietre preziose: V 67.
Plateau, problema di: II, 67.
PLED: VII 99.
Pompe da vuoto: X 23.
Pontecorvo, Bruno: VI 19.
Popper, Karl: IV 45, IX 5, IX 21, X 109.
Pozzi: VIII 27.
Prandtl, numero di: VIII 69.
Prospettiva: VII 5.
Proteotronics: XVII-A 5.
Prigioniero, dilemma del: II 49, XVII-B 55.
Prigogyne, Ilya: IV 13.
Pubblicazione, di articoli scientifici: IX 43.
Pulsar: VI 75.
PVLAS: X 49.

Q

QCD: X 79, XII 161.
QED: X 67.
Quadriadi: III 33.
Quadrinomio, gruppo: III 37.
Quantum dots: VII 83.
Quark: X 79.
Quasars: VI 75.
Quasi-particelle, III 61.

R

Radiazione Cosmica di Fondo: VII 147, IX 13.
Radiazioni, effetti biologici: XVIII-B 5, XVIII-B 123.
Radiofarmaceutica: XVIII-B 59.
Radioisotopi: XVIII-B 59.
Radioterapia: XVIII-B 85, XVIII-B 123.
Raggi cosmici: VI 75, **XIX**
Raman, spettroscopia: V 67.
Rayleigh, numero di: VIII 69.
Rayleigh-Bénard, convezione di: VIII 69.
Recettori, modello di: XVIII-A 55.
Relatività: V, 5, VII 5.
Relatività generale: XII 23, XII 129.
Reti neurali: XVI 7, XVI 25, XVI 39, XVI 71, XVI 83,
XVI 195, XVII-B 21, XVIII-A 31.
Reynolds, equazioni di: VIII 69.
Riflessione della luce: VII 5.
Riflessioni, IV 37.
Rifrazione della luce: VII 5, VII 59, VII 119.

Rindler, Wolfgang: IX 13.
Rivelatori a pixel ibridi: I 25.
Rohrer, Heinrich, IV 13.
Röntgen, Wilhelm: XVIII-B 13.
Rottura spontanea della simmetria: I 5.
Rugosità: XV 125.
Ruska, Ernst: IV 13.

S

Sale, dita di sale: VIII 17.
Santa Maria del Fiore: IV 5.
Scale musicali: III 25.
Schrödinger, equazione di: VII 175.
Schrödinger, eq. non-lineare di: XI 7, XI 71.
Schwarzschild, criterio di: VIII 69.
Screabin, codice di: XVII-A 93.
See-saw, meccanismo di: VI 117.
Sentenza dell'Aquila: I 45.
Serie di Dirichlet: IV 53.
Seurat, George: IV 13.
Simmetrie in fisica: XII 5.
Sine-Gordon: XI 7.
Shannon, entropia: XVI 99, XIX 169.
Sherrington-Kirkpatrick, modello di: XVI 99, XVI
209.
Simmetrie di gauge: I 5.
Sinapsi: XV 7.
Sistemi integrabili: **XI**
Slater, determinante: II 41.
Sloan Digital Sky Survey: V 19.
Smalti: V 67.
Smith, Adam: II 49.
Sociologia: IV 45.
Solfati: XV 57.
Spazio-tempo: XII 145.
Spazi metrici: XIII 33.
Spazi quoziente: III 33.
Spazzatura spaziale: XX 64.
Specchio: IV 37.
Spettro della radiazione e.m.: VII 59.
Spike, modello di Wigner: XVI 99.
Spin: III 47.
Spintronica: XIV 27.
Solitoni: XI 7, XI 51.
Sonde criogeniche: I 25.
Sottosuolo: VIII 27.
Spike, proteina: XV 5.
Standard, modello: VI 7.
Stati puri e miscele: XX 83.
Stelle di neutroni: XII 23, XII 74.
Stirling, approssimazione di: XI 125, XII 199.
STM: IV 13.
Stringhe, teoria delle: XII 5, XII 161.
Suono: III 25.
Supergravità: XI 117, XII 161.

Superintegrabilità: XI 117.
Supernovae: VI 69.
Supersimmetria: XII 161.
SUSY: I 19.
Szilard, macchina di: XIX 169.

T

Temperatura: XI 125, XVI 209.
Tempo: V 5.
Teoria dei campi: I 5, V 35.
Termodinamica: XI 103, XI 125.
Terremoto: I 45.
Tesseracto: XVIII-B 177.
Tettonica: VIII 53.
Tez: IV 27.
Thompson, D'Arcy Wentworth: IV 13.
Tokamak: XV 105.
Tomografia: XVIII-B 27.
Tomosintesi: XVIII-B 27.
Tornado: XV 25.
Torricelli: X 5.
Transizioni di fase: XI 103.
Trascrittoma: XVIII-A 31.
Trasformata integrante: XI 7.
Triadi: III 33.
Trombina: XVII-A 5.
Turing, Alan: IV 27.

U

UFO: XX 71.
UHECR: XIX 63, XIX 79, XIX 115.

V

$V - A$, accoppiamento: VI 7.
Vaccini: IX 55.
van der Waals: XI 103.
Varianza: XVII-A 5.
Variazionale, principio: II 41
Variazioni: II.
Veronesi, Luigi: III 5.
Vesta: XX 5.
VIRGO: VII 167, X 23, XII 23, XII 93.
Virus: IX 55.
Visione, processo di: V 53.
Volterra: XV 37.
Vuoto: X
Vuoto quantistico: X 67.

X

XFR - X ray Fluorescence: V 67.
X, raggi: XVIII-B 13, XVIII-B 27.

W

W^\pm , bosoni: VI 7.
Weber, Max: X 109.
White, Corrie: IV 13.

Y

Young, Thomas: VII 5.

Z

Z^0 , bosone: VI 7, VI 109.
zero: X 95.

Numero XXI Anno 2023

Viaggio nella Scienza

Ithaca



Sfide, parte A

