

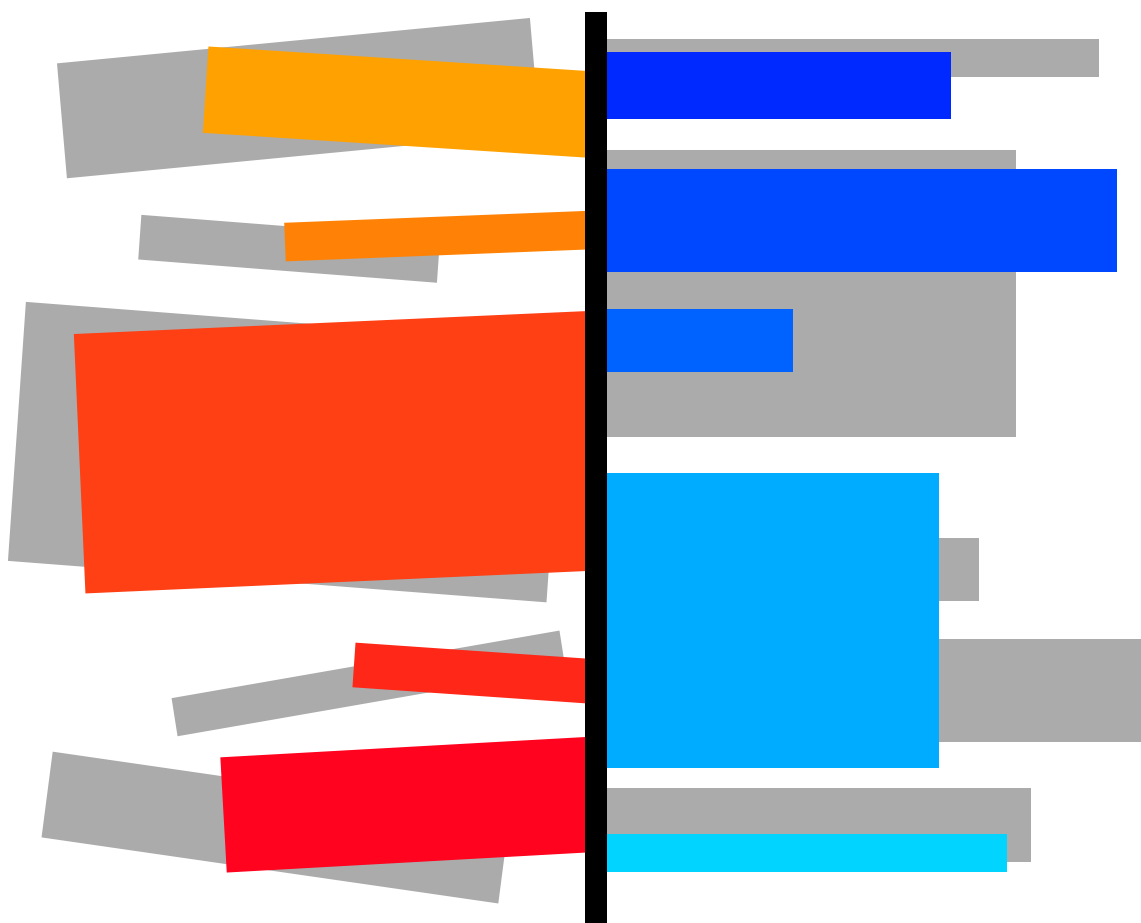
Numero XXI  
Anno 2023



Viaggio nella Scienza

The title "Ithaca" is surrounded by several overlapping circles and arcs of varying sizes and colors (grey, white, and red), creating a complex geometric pattern.

# Ithaca



Sfide, parte B

---

## **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](mailto:ithaca@unisalento.it)

# Ithaca

## Viaggio nella Scienza

---

XXI 2023

**3** Dieci anni

Fisica

**5** L'Universo è un laboratorio di gravità quantistica

Giovanni Amelino-Camelia

Fisica

**9** La Fisica Nucleare Teorica nell'Era dell'Astronomia  
Multimessaggera

Omar Benhar

Ecologia

**15** Restaurare il pianeta blu

Roberto Danovaro

Fisica

**25** Una vibrazione dell'Universo, una avventura per  
l'Europa, una opportunità per la Sardegna

Fernando Ferroni

Fisica

**29** Quo vadis neutrino?

Eligio Lisi

**Chimica**

**35 Il futuro di una disciplina in decadimento**

(sul futuro di radioisotopi e radiofarmaci in medicina)

**Giancarlo Pascali**

**Fisica**

**45 Superconduttività: dalla Fisica delle Particelle all'Adroterapia**

**Lucio Rossi**

**Lezione Mancata**

**49 Energia e quantità di moto in relatività ristretta. Una derivazione elementare**

**Luca Peliti**

---

# Dieci anni

---

Questa è la seconda parte del numero XXI di **Ithaca**, intitolato "Sfide", in cui vari colleghi presentano le loro aspettative riguardanti gli sviluppi futuri del settore scientifico di cui si interessano.

Conclude il volume una *Lezione Mancata* di Luca Peliti, nello spirito della tradizione della nostra rivista.

Buona lettura,  
il Comitato di Redazione



# L'Universo è un laboratorio di gravità quantistica

**Giovanni Amelino-Camelia**

Università di Napoli "Federico II"

---

Il cosiddetto "problema della gravità quantistica" consiste nel fatto che la relatività generale, la descrizione Einsteiniana dei fenomeni gravitazionali, non è compatibile logicamente con il concetto di *quanto*, il concetto centrale della meccanica quantistica. La relatività generale usa una matematica che è specializzata al caso di quantità fisiche continue (come un fluido) mentre la meccanica quantistica descrive tutto in termini di mattoncini fondamentali (come le molecole nell'acqua). La straordinaria scoperta a cui si è giunti con la relatività generale è che c'è un condizionamento reciproco tra le proprietà dello spaziotempo (la sua curvatura) e le proprietà della materia che si trova in quello spaziotempo.

Una equazione di condizionamento reciproco come quella della relatività generale non può avere da un lato quantità quantizzate e dall'altro quantità continue: quando la matematica dice che due cose sono uguali devono essere proprio uguali, mentre c'è una ineludibile profondissima differenza tra grandezze continue e grandezze quantizzate. Una manifestazione molto chiara di questa inadeguatezza sta nel fatto che in relatività generale è necessario associare a ciascun corpo o particella una specifica traiettoria spaziotemporale, mentre in meccanica quantistica, per

le particelle microscopiche, il concetto di traiettoria perde senso, proprio non è possibile associare ad una particella una sua specifica univoca traiettoria spaziotemporale.

Ancora non abbiamo indizi robusti su come debba essere la gravità quantistica. In scienza gli unici indizi affidabili sono i fatti sperimentali ed è molto difficile ottenere fatti sperimentali sulla gravità quantistica. Per spiegare le difficoltà che abbiamo nel provare ad ottenere indizi sperimentali sulla gravità quantistica posso far ricorso ad una analogia con quando Einstein scoprì che l'acqua era fatta di molecole, basandosi sul moto Browniano di granelli di polline sospesi in acqua. La molecola d'acqua ha dimensioni di circa un decimo di miliardesimo di metro e nel 1905, quando Einstein analizzò il moto Browniano, si era ben lontani dal poter osservare direttamente qualcosa con dimensioni così piccole. Non potendo osservare direttamente le molecole, Einstein ne dedusse l'esistenza comprendendo che il moto Browniano dei granelli di polline era dovuto alla esistenza delle molecole d'acqua. Il moto browniano è un moto disordinato che viene causato dai tantissimi urti tra granello di polline e molecole d'acqua: la singola collisione tra molecola d'acqua e granello di polline ha effetti così

minuti da non poter osservati con le tecniche osservative disponibili nel 1905, ma l'effetto cumulativo dei tantissimi urti è osservabile (appunto il moto Browniano). Importante per il successo di Einstein con il moto Browniano fu il fatto che le molecole d'acqua sono circa 100 mila volte più piccole di un granello di polline.

Proviamo ad immaginare cosa sarebbe successo se le molecole d'acqua fossero state ancora più piccole, ad esempio non 100 mila ma un milione di miliardi di volte più piccole dei granelli di polline. In quel caso (assumendo immutata la loro frequenza) anche gli effetti cumulativi dei tanti urti sarebbero stati troppo piccoli per la loro osservazione sperimentale. I quanti di acqua (le molecole) sono molto piccoli ma almeno grandi abbastanza da poter osservare i loro effetti cumulativi in certi contesti sperimentali.

La ricerca in gravità quantistica sta essenzialmente cercando i quanti di spaziotempo ed abbiamo motivo di ritenere che questi quanti siano estremamente piccoli. Le stime più accreditate suggeriscono che i quanti di spaziotempo dovrebbero essere  $10^{-26}$  volte più piccoli delle molecole d'acqua. Sono state formulate numerose proposte di teorie della gravità quantistica, ma senza misure almeno indirette dei quanti di spaziotempo non potremo sapere quale di queste teorie è corretta ed in realtà non possiamo escludere per ora nemmeno l'ipotesi che nessuna di queste teorie sia corretta, che la teoria corretta non sia stata ancora proposta.

Le varie teorie della gravità quantistica attualmente disponibili sono ovviamente solo delle ipotesi, mancandone la conferma sperimentale, ma sono comunque tutto quello che abbiamo per formarci un intuito su cosa potrebbe caratterizzare il regime fisico della gravità quantistica. Alcune delle predizioni più promettenti sono legate al concetto di "schiuma spaziotemporale": un tipo di geometria dello spaziotempo tale che non solo dovremmo trovare la corretta formulazione matematica dei quanti di spaziotempo ma anche esser pronti a gestire la possibilità che nel derivare la sua influenza sulle particelle lo spaziotempo non possa essere gestito come una entità univoca, ma piuttosto come un qualcosa che ha proprietà che fluttuano in maniera caotica, governate esclusivamente da leggi statistiche.

Se si osserva con una buona lente di ingran-

dimento la schiuma che fa il sapone (o anche la schiuma sul cappuccino) si può notare che le bolle si sviluppano e spariscono seguendo comportamenti che individualmente non riusciamo a prevedere, possiamo solo caratterizzarli in modo statistico. Questo è un quadro generale che per certi aspetti è vago ma che poi in alcuni specifici modelli di gravità quantistica viene compiutamente caratterizzato a livello matematico e di predizioni fisiche.

Stabilire le proprietà della schiuma spaziotemporale è difficilissimo perché, come ho già sottolineato, i quanti di spaziotempo sono piccolissimi. Nel 1905 potevamo vedere le molecole d'acqua solo tramite le loro manifestazioni che producono il moto Browniano, ma ora le molecole d'acqua le vediamo proprio, con i nostri attuali potentissimi microscopi. Però siamo comunque lontanissimi dalla possibilità di vedere i quanti di spaziotempo (se davvero sono  $10^{-26}$  volte più piccoli delle molecole d'acqua, come molte analisi suggeriscono). Questo fa sì che l'unica speranza [1,2] di ottenere degli indizi sperimentali sulla gravità quantistica è quella di prendere a modello l'analisi di Einstein del moto Browniano: trovare un qualche meccanismo di amplificazione di una manifestazione della schiuma spaziotemporale, una amplificazione sufficiente a poter trovare traccia di questi effetti piccolissimi in un esperimento realistico. Nel caso del moto Browniano la manifestazione delle molecole d'acqua sono i loro urti con i granelli di polline, mentre l'amplificatore è fornito dal numero elevatissimo di collisioni che anche in una frazione di secondo si verificano tra le molecole d'acqua ed i granelli di polline. L'amplificazione necessaria per studiare la schiuma spaziotemporale deve essere ancora molto più grande, vista la piccolezza dei quanti di spaziotempo.

Arrivati a metà degli anni '90, erano state già analizzate tantissime misure che si possono fare in laboratorio, trovando sempre inevitabilmente che gli effetti della schiuma spaziotemporale erano molto più piccoli di quanto fosse possibile rilevare con la precisione raggiungibile in quegli esperimenti. La svolta che consentì di vedere l'Universo come un (peculiare) laboratorio maturò nel 1997, quando si ebbero [3] alcuni progressi molto significativi in un'area di ricerca apparentemente scollegata dalla gravità quanti-



stica, quella dello studio del fenomeno astrofisico noto come “*gamma-ray bursts*”. I gamma-ray bursts sono potentissime esplosioni, le più potenti che abbiamo osservato nel cosmo, e tipicamente si verificano a distanze grandissime dalla Terra, distanze di miliardi di anni luce. Alcuni gamma-ray bursts hanno durata molto breve, in alcuni casi di circa un secondo. Dal punto di vista spaziotemporale un gamma-ray burst di quel tipo è un segnale stupendo: un enorme numero di fotoni di alte energie che viene emesso quasi simultaneamente e viaggia per miliardi di anni.

Il tipo di manifestazione della schiuma spaziotemporale che si può esplorare con i gamma-ray bursts ha a che fare con il modo in cui i fotoni viaggiano nella schiuma. Nel quadro teorico classico-Einsteiniano lo spaziotempo è descrivibile come una superficie molto ben levigata e le particelle come i fotoni si propagano nello spaziotempo tutte allo stesso modo. Alcuni dei modelli matematici più studiati come formalizzazione del concetto di schiuma spaziotemporale sono tali che invece la propagazione delle particelle risente della struttura quantistica dello spaziotempo in un modo che rassomiglia a quando delle biglie si propagano su una superficie un po' scabra, non ben levigata. Su una superficie scabra anche un gruppo di biglie lanciate simultaneamente e nella stessa direzione faranno un percorso leggermente diverso tra loro, con differenze governate solo da una legge statistica. Ciascuna biglia ha casualmente dei sobbalzi diversi dovuti alla scabrosità della superficie.

L'analisi matematica della sequenza temporale di fotoni osservati da un gamma-ray burst potrebbe essere usata per ottenere delle informazioni sui quanti di spaziotempo. I piccolissimi effetti della schiuma spaziotemporale potrebbero essere osservabili grazie alla amplificazione fornita dai lunghissimi tempi di viaggio. Nella mia analogia delle biglie che viaggiano su una superficie scabra è facile capire che il tempo di viaggio ha il ruolo di amplificatore: più tempo la biglia viaggia sulla superficie scabra più accumula effetti dovuti alla scabrosità della superficie. Purtroppo non è facile fare una stima affidabile su quanto sia probabile la scoperta della schiuma spaziotemporale seguendo questa strategia. La nostra capacità di avere un intuito per questa probabilità di scoperta è limitata dal fatto che esistono

molte descrizioni matematiche alternative della schiuma, con predizioni molto diverse sulla intensità degli effetti, e tutte queste descrizioni alternative paiono essere ugualmente plausibili allo stato attuale. La scoperta dei quanti di spaziotempo tramite osservazioni di gamma-ray bursts sarà possibile nei prossimi 10 o 15 anni solo se la Natura si accorda ai modelli più ottimistici degli effetti in gioco (i modelli matematici della schiuma spaziotemporale che predicono effetti meno piccoli per i gamma-ray bursts). Ed in realtà quanto tempo sarà necessario non dipende solo dalla intensità degli effetti, ma anche da come si comporta il nostro Universo laboratorio.

Quando la fisica fondamentale fa un esperimento in un laboratorio tradizionale tutti gli aspetti dell'esperimento sono pianificati dai fisici, che hanno anche l'opportunità di modificare alcune delle impostazioni della procedura di misura se i primi esiti delle investigazioni incoraggiano tali modifiche. Ma quando il laboratorio è l'Universo ovviamente non abbiamo alcun controllo, non sono misure da noi preparate, siamo piuttosto nella posizione di “pescatori di scienza”: i nostri telescopi sono come canne da pesca, e noi proviamo ad attrezzarci con i migliori telescopi/canne da pesca che siamo in grado di fare, ma se la pesca sarà fruttuosa dipende anche dai pesci, non solo dalle abilità del pescatore e dalla qualità dei suoi attrezzi. Se capita che in zona pesci non ne passano, o passano solo pesci piccoli, la pesca non sarà fortunata. I gamma-ray bursts sono un po' come i pesci, per quanto concerne la gravità quantistica: alcuni gamma-ray bursts sono molto luminosi (e con i loro tanti fotoni possiamo usare potenti metodi di investigazione statistica) ed hanno durata molto breve (avvicinandosi meglio alla idealizzazione di una gara tra fotoni partiti simultaneamente), fornendoci informazioni piuttosto significative per la gravità quantistica, ma molti gamma-ray bursts non sono tanto luminosi ed hanno durata piuttosto lunga (anche centinaia di secondi). Se ad esempio l'Universo laboratorio ci desse una mano con un gamma-ray burst di luminosità record e di brevissima durata si potrebbe avere la scoperta della schiuma spaziotemporale anche immediatamente, ma è piuttosto improbabile.

A volte finisco a pensare al fatto che comunque l'Universo una grande mano già ce l'ha data:

è un Universo vastissimo e quella sua vastità ha reso possibili questi studi. In molti casi il segnale di un gamma-ray burst raggiunge i nostri telescopi dopo un viaggio di oltre 10 miliardi di anni (viaggiati alla velocità della luce!) e per le investigazioni di schiuma spaziotemporale che ho descritto gli effetti in gioco sono così piccoli che un viaggio così lungo ha durata giusto sufficiente a rendere plausibile l'accumulo di effetti di schiuma spaziotemporale a livelli osservabili. Se l'Universo fosse stato più piccolo, ad esempio 100 milioni di anni luce, sarebbe stato comunque vastissimo (grande abbastanza da contenere tantissime galassie) ma non grande abbastanza da consentire queste investigazioni di schiuma spaziotemporale. Se qualcuno mi avesse chiesto di progettare un Universo da usare come laboratorio di gravità quantistica avrei proprio progettato il nostro Universo, almeno nel senso che le sue dimensioni sono giusto quelle necessarie per fare delle investigazioni di schiuma spaziotemporale del tipo che ho descritto.



- [1] G. Amelino-Camelia: *Gravity-wave interferometers as quantum-gravity detectors*, *Nature*, 398 (1999) 216.
- [2] G. Amelino-Camelia: *Quantum theory's last challenge*, *Nature*, 408 (2000) 661.
- [3] G. Amelino-Camelia, J.R. Ellis, N.E. Mavromatos, D.V. Nanopoulos, S. Sarkar: *Tests of quantum gravity from observations of  $\gamma$ -ray bursts*, *Nature*, 393 (1998) 763.



**Giovanni Amelino-Camelia:** si è laureato in Fisica all'Università Federico II di Napoli nel 1990 e ha acquisito il Dottorato di Ricerca presso la Boston University nel 1994. Attualmente è professore ordinario di fisica teorica alla Federico II. La sua ricerca, che concerne prevalentemente l'investigazione del problema della gravità quantistica, ha prodotto studi che sono stati citati complessivamente oltre 15mila volte, collocandolo tra gli studiosi di gravità quantistica più citati al mondo, ed ha ricevuto riconoscimenti dall'Accademia dei Lincei, dalla Gravity Research Foundation e dal Foundational Questions Institute.

# La Fisica Nucleare Teorica nell’Era dell’Astronomia Multimessaggera

**Omar Benhar** INFN e Dipartimento di Fisica - Sapienza Università di Roma

---

**N**egli anni a venire l’Astronomia Multimessaggera fornirà informazioni senza precedenti sulla struttura e la dinamica delle stelle di neutroni. I dati che ci si aspetta di ottenere saranno fondamentali per determinare i limiti di applicabilità del paradigma della Fisica Nucleare Teorica, basata sull’ipotesi che i sistemi nucleari siano descrivibili come aggregati di protoni e neutroni interagenti.

## Introduzione

La rivelazione di radiazione gravitazionale annunciata dalla Collaborazione LIGO/Virgo il 17 Agosto del 2017 [1], seguita a meno di due secondi dall’osservazione del  $\gamma$ -ray Burst GRB 170817A, effettuata dal Fermi Gamma ray Burst Monitor (GBM) [2] e dall’International Gamma-ray Astrophysics Laboratory (INTEGRAL) [3], e undici ore più tardi dalla rivelazione del transiente ottico AT 2017gfo [4], hanno permesso di

attribuire l’evento GW170817 alla coalescenza di un sistema binario di stelle di neutroni nella galassia ellittica NGC 4993, seguito dall’esplosione di una kilonova. Con questa straordinaria dimostrazione della possibilità di utilizzare in modo complementare informazioni contenute in segnali di natura diversa, tanto l’Astrofisica quanto la Fisica Nucleare sono entrate nella nuova era dell’*Astronomia Multimessaggera*<sup>1</sup>.

L’analisi combinata di segnali gravitazionali ed elettromagnetici, rivelati da osservatori installati sia sulla Terra che nello spazio, ha il potenziale di fornire informazioni senza precedenti sulla struttura e la dinamica delle stelle di neutroni, e fare luce su molti problemi aperti della Fisica Nucleare. I dati raccolti saranno fondamentali per la comprensione delle interazioni tra i nucleoni a densità molto maggiori di quella tipica dei nuclei atomici,  $\rho_0 \approx 2.7 \times 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$ , e permetteranno di esplorare sia i limiti di applicabilità

---

<sup>1</sup>L’uso italiano di questa dicitura—traduzione dell’Inglese *Multimessenger Astronomy*—è suggerito dall’Accademia della Crusca [5].

della descrizione dei sistemi nucleari in termini di protoni e neutroni che la possibile comparsa di forme di materia non osservabili sulla Terra, la cui esistenza è prevista dalla teoria fondamentale delle interazioni forti.

## Dinamica Nucleare

Le Teoria Nucleare a Molti Corpi è fondata sull'ipotesi che i nuclei atomici siano aggregati di protoni e neutroni, che si comportano come particelle puntiformi non relativistiche interagenti tramite l'Hamiltoniana

$$H = \sum_i \frac{p_i^2}{2m} + \sum_{i < j} v_{ij} + \dots \quad (1)$$

Nell'equazione sovrastante  $p_i$  e  $m$  indicano, rispettivamente, l'impulso dell' $i$ -esimo nucleone e la sua massa,  $v_{ij}$  è il potenziale agente tra due nucleoni, e i puntini di sospensione indicano la possibile presenza di interazioni irriducibili che coinvolgono più di due particelle.

Il modello a *shell* dei nuclei, capace di predire in modo soddisfacente spin, parità, momento magnetico e momento di quadrupolo elettrico, è basato su una semplice implementazione di questo schema, in cui i potenziali d'interazione tra i nucleoni sono sostituiti da un campo medio, all'interno del quale protoni e neutroni si muovono come particelle indipendenti. La validità di questo scenario è stata ampiamente confermata dallo studio sistematico dei processi di diffusione di elettroni in cui viene emesso un protone dal nucleo bersaglio [6]. Effetti significativi dovuti ad interazioni non descrivibili dal campo medio, che danno origine a forti correlazioni a corto raggio tra i nucleoni, emergono tuttavia chiaramente dai dati disponibili, ed indicano che la descrizione accurata della dinamica nucleare richiede l'uso di un'Hamiltoniana definita come nell'Eq. (1).

Nei modelli più realistici,  $H$  include un potenziale nucleone-nucleone (NN) in grado di descrivere accuratamente le proprietà osservate del sistema di due nucleoni, sia nell'unico stato legato<sup>2</sup> che negli stati di diffusione a energie fino alla soglia di produzione del pione. Per ripro-

<sup>2</sup>Il nucleo di deuterio, o deutone, è formato da un protone e un neutrone in uno stato di spin totale  $S = 1$ .

durre il valore sperimentale dell'energia dello stato fondamentale del nucleo  ${}^3\text{He}$  è necessario aggiungere al secondo membro dell'Eq. (1) un termine contenente il potenziale  $U_{ijk}$ , che descrive interazioni irriducibili tra tre nucleoni (NNN). Il contributo di questo termine all'energia potenziale, che può essere ottenuto risolvendo in modo esatto l'equazione di Schrödinger, risulta essere molto minore di quello del potenziale NN; tipicamente  $\langle U_{ijk} \rangle / \langle v_{ij} \rangle < 5\%$ .

I progressi degli approcci stocastici basati sul metodo di Monte Carlo hanno permesso di utilizzare le Hamiltoniane nucleari costruite nel modo sopra descritto per effettuare calcoli accurati delle energie dello stato fondamentale e dei primi stati eccitati dei nuclei con numero di massa  $A \leq 12$  [7]. L'accordo tra i risultati di questi studi ed i valori sperimentali conferma in modo molto convincente il potere predittivo della teoria nucleare a molti corpi.

## Materia superdensa

L'estensione dello schema descritto nella sezione precedente al caso della materia nucleare superdensa, necessaria per lo studio delle proprietà delle stelle di neutroni, pone problemi non banali, che devono essere analizzati attentamente. In primo luogo, è necessario individuare i limiti di applicabilità della descrizione in termini di protoni e neutroni.

A densità maggiori della densità tipica dei nuclei atomici,  $\rho_0$ , la statistica di Fermi tende a rendere energeticamente favoriti processi in cui i nucleoni, di massa  $M_N \approx 939$  MeV, vengono rimpiazzati da particelle più pesanti aventi stranezza non nulla, come gli iperoni  $\Lambda$  e  $\Sigma$ , le cui masse sono  $M_\Lambda = 1116$  MeV e  $M_\Sigma \approx 1193$  MeV. Al crescere della densità, tipicamente per  $\rho \gtrsim 2\rho_0$ , queste reazioni divengono possibili perchè l'eccesso di massa dovuto agli iperoni prodotti è compensato dalla diminuzione dell'energia cinetica delle particelle che partecipano alla reazione.

Quando la densità di massa-energia della materia nucleare diventa paragonabile a quella dei nucleoni,  $\rho_N \approx 4 \times 10^{15}$  gr cm<sup>-3</sup>  $\approx 15\rho_0$ , la descrizione in termini di nucleoni individuali puntiformi perde ovviamente significato. In questo regime i gradi di libertà rilevanti sono i costituenti elementari di protoni e neutroni, non più

confinati al loro interno. Nel limite  $\varrho \rightarrow \infty$  la materia si riduce a un gas di Fermi di quark non interagenti, come dettato dalla libertà asintotica dalla teoria fondamentale delle interazioni forti.

Lo studio della possibile transizione dalla materia nucleare alla materia iperonica, o alla materia di quark, consiste essenzialmente nel determinare lo stato fondamentale del sistema a densità di numero barionico fissata, con le condizioni aggiuntive di neutralità elettrica ed equilibrio chimico rispetto alle interazioni deboli, che trasformano barioni in leptoni e viceversa. L'elemento fondamentale di questa analisi è l'equazione di stato (EOS), che descrive la dipendenza della pressione dalla densità di massa-energia della materia.

Dato un modello di Hamiltoniana, il formalismo della teoria a molti corpi permette di ottenere l'energia per nucleone della materia nucleare a densità barionica fissata,  $e(\varrho)$ . Nel caso di materia con ugual numero di neutroni e protoni, I risultati di questi calcoli riproducono in modo soddisfacente le proprietà di equilibrio che si ottengono dall'estrapolazione della formula semiempirica delle masse e delle misure di densità di carica dei nuclei [8]. L'EOS,  $P(\epsilon)$ , si calcola a partire dalla  $e(\varrho)$  utilizzando le relazioni

$$P(\varrho) = \varrho^2 \frac{d}{d\varrho} e(\varrho) \quad , \quad \epsilon = \varrho e(\varrho) . \quad (2)$$

La derivata dell'EOS fornisce una misura della compressibilità della materia,  $K_0$ , che a sua volta determina il valore della velocità del suono nel mezzo. Di conseguenza, la richiesta che sia soddisfatta la causalità, cioè che la velocità del suono sia sempre minore della velocità della luce, pone un vincolo alla rigidità, o *stiffness*, predetta dall'EOS.

La *stiffness* dell'EOS è determinata dal modello dinamico utilizzato per descrivere le interazioni tra i costituenti della materia. L'uso dell'approssimazione non relativistica implica però che, indipendentemente dal modello di Hamiltoniana, la causalità venga violata quando la densità supera un valore di soglia, limitando così il regime di applicabilità della teoria a molti corpi.

La comparsa di forme di materia diverse dalla materia nucleare, costituite tanto da iperoni quanto da quark deconfinati, ha come conseguenza una diminuzione della *stiffness* dell'EOS ad al-

ta densità, potenzialmente sufficiente a mitigare il problema della violazione della causalità.

## Stelle di neutroni

Le proprietà osservabili delle stelle di neutroni sono largamente determinate dall'EOS della materia stellare, che riflette sia la sua composizione che la dinamica delle interazioni tra i suoi costituenti.

Per ogni modello di EOS, massa e raggio stellari si ottengono dalla soluzione delle equazioni differenziali di Tolman Oppenheimer e Volkof (TOV) [9, 10], che descrivono l'equilibrio idrodinamico nella teoria della relatività generale, assegnando come condizione iniziale il valore della densità al centro della stella,  $\varrho_c$ . Questa analisi fornisce l'intervallo di valori di massa delle configurazioni stabili supportate dal modello utilizzato, come pure i raggi corrispondenti.

La massa massima è determinata principalmente dalla *stiffness* dell'EOS, che a sua volta dipende dalla struttura e dalla dinamica microscopica del sistema. Il semplice modello adottato nello studio pionieristico di Tolman e Oppenheimer, in cui la materia stellare veniva descritta come un gas di Fermi di neutroni non interagenti, è caratterizzato da una EOS molto soffice. Le masse predette da questo modello dipendono debolmente da  $\varrho_c$  per  $\varrho_c \gtrsim 2\varrho_0$ , e raggiungono il valore massimo  $M_{\max} = 0.8 M_\odot$ , dove  $M_\odot$  è la massa solare [10]. L'analisi delle relazioni massa-raggio ottenute utilizzando modelli diversi indica che, a parità di massa, le EOS più soffice predicono raggi minori.

L'EOS gioca un ruolo importante anche nella coalescenza dei sistemi binari di stelle di neutroni. Nella fase iniziale del processo, nella quale orbitano a grande distanza, i due corpi celesti si comportano come se fossero puntiformi, mentre la struttura interna diventa determinante quando la distanza orbitale è paragonabile alle loro dimensioni.

Il campo gravitazionale generato da una delle stelle induce un momento di quadrupolo di massa sull'altra, che a sua volta agisce allo stesso modo sulla prima, accelerando così il processo di coalescenza. Questo effetto è quantificato dal parametro  $\Lambda$ , chiamato **deformabilità mareale** [11]. Per ogni valore della massa della stella,

$M$ , il valore di  $\Lambda$ , come quello del raggio, è determinato in modo univoco dall'EOS. I risultati degli studi teorici mostrano che, a parità di massa, ai modelli dinamici che predicono EOS più soffici corrispondono valori maggiori di  $\Lambda$ .

## Confronto con le osservazioni

La possibilità di utilizzare dati astronomici per ottenere informazioni sulle proprietà della materia superdensa emerge chiaramente dal confronto tra il risultato dello studio di Oppenheimer e Volkoff discusso nella sezione precedente ed i valori osservati delle masse di stelle di neutroni.

Le masse di circa quaranta stelle di neutroni appartenenti a sistemi binari, formati sia da due stelle di neutroni (NS-NS) che da una stella di neutroni ed una nana bianca (NS-WD), sono state ottenute dalle misure dei parametri orbitali, che possono essere messi in relazione con le masse utilizzando la terza legge di Keplero, e dei parametri detti post-kepleriani, che tengono conto di effetti relativistici.

I valori centrali delle distribuzioni di massa ottenute da queste misure sono  $M = 1.33 M_{\odot}$  per i sistemi NS-NS e  $M = 1.55 M_{\odot}$  per quelli NS-WD [12]. L'incompatibilità tra questi dati e la massa massima ottenuta dall'analisi di Oppenheimer e Volkoff dimostra chiaramente che la materia stellare non si comporta come un gas di neutroni non interagenti. Nelle stelle di neutroni la stabilità non è assicurata solo dalla pressione di degenerazione, come avviene nelle nane bianche, ma richiede il contributo di una pressione aggiuntiva di origine dinamica. Questa osservazione ha importanti implicazioni fenomenologiche, in quanto implica che le misure di massa possono dare informazioni utili per verificare la validità dei diversi modelli usati per descrivere la materia stellare.

La stella di neutroni avente la massa più alta osservata fino ad oggi,  $M = 2.08^{+0.069}_{-0.072} M_{\odot}$ , è la pulsar PSR J0740+6620 [13]. L'esistenza di stelle aventi massa maggiore di due masse solari pone un vincolo stringente sulla *stiffness* dell'EOS, e tende ad escludere i modelli dinamici che predicono una EOS soffice; in particolare quelli che prevedono la comparsa di iperoni nella regione centrale della stella. La materia composta esclusivamente di nucleoni, al contrario, è in grado di

generare pressione sufficiente a supportare stelle di massa compatibile con tutti i dati disponibili.

Vincoli ancora più stringenti si possono ottenere dall'analisi di misure combinate di massa e raggio, recentemente rese possibili dal Neutron Star Interior Composition Explorer (NICER), installato dalla NASA sulla Stazione Spaziale Internazionale. Le osservazioni della pulsar PSR J10030+0451 hanno permesso di determinarne sia la massa,  $M = 1.44^{+0.15}_{-0.14} M_{\odot}$ , che il raggio,  $R = 13.02^{+1.24}_{-1.06}$  km [14]. Questi valori sono ampiamente compatibili con i risultati di calcoli teorici effettuati usando l'approccio basato sulla teoria nucleare a molti corpi, che predice una densità centrale della stella  $\rho_c \sim 3\rho_0$ .

Il raggio della pulsar PSR J0740+6620, la cui densità centrale è  $\rho_c \sim 4\rho_0$ , è stato anch'esso misurato dalla collaborazione NICER, col risultato  $R = 12.39^{+1.30}_{-0.98}$  km. L'osservazione di stelle aventi masse molto diverse e raggi che differiscono di poco indica che la *stiffness* dell'EOS non diminuisce drasticamente per  $3\rho_0 \lesssim \rho \lesssim 4\rho_0$ . Ciò sembra escludere la possibilità di una transizione di fase del prim'ordine alla materia di quark in stelle di massa  $\sim 2 M_{\odot}$ .

Il limite superiore alla *stiffness* dell'EOS, derivante dalla richiesta che la velocità del suono sia inferiore alla velocità della luce nella regione di densità rilevante, è generalmente soddisfatto dai modelli della materia nucleare per stelle di massa compatibile con quella della pulsar PSR J0740+6620.

L'osservazione dell'evento GW170817 [1], che ha segnato l'inizio dell'era lungamente attesa dell'astronomia gravitazionale, ha permesso di ottenere informazioni sulla massa e la deformabilità mareale delle due stelle di neutroni appartenenti ad un sistema binario coalescente. Questa analisi, i cui risultati sono compatibili con le predizioni della teoria nucleare a molti corpi, ha determinato che le masse sono comprese negli intervalli  $1.18 \leq M_1/M_{\odot} \leq 1.36$  e  $1.36 \leq M_2/M_{\odot} \leq 1.58$ . I valori di  $\Lambda_1$  e  $\Lambda_2$  ottenuti favoriscono modelli della materia stellare che predicono valori elevati della compattezza, definita dal rapporto  $M/R$ .

Studi basati sul metodo di Bayes sono stati effettuati per inferire l'EOS della materia stellare dall'insieme di dati ottenuti combinando le osservazioni di segnali gravitazionali ed elettromagnetici [15]. La stessa tecnica è stata anche

utilizzata per determinare i valori dei parametri presenti nei modelli dinamici da cui le EOS vengono derivate, come gli accoppiamenti tra i nucleoni nel regime di alta densità [16, 17].

## Prospettive future

Negli anni a venire, la disponibilità di dati accurati permetterà di fare nuova luce sulla struttura e la dinamica della materia superdensa.

I risultati di analisi bayesiane basate su dati simulati hanno già mostrato che con l'avvento degli osservatori gravitazionali di nuova generazione, come l'Einstein Telescope attualmente in fase di progettazione [18]. Il potenziale di questi studi aumenterà enormemente [19].

Analisi vengono anche eseguite combinando le osservazioni astronomiche con le misure effettuate da esperimenti effettuati nei laboratori terrestri. Molto importanti, in questo contesto, sono le collisioni tra ioni pesanti di alta energia [20] e gli esperimenti di diffusione elettrone-nucleo [21], che permettono di ottenere informazioni sull'energia di simmetria nucleare.

Per concludere, va sottolineato il ruolo dell'analisi delle sezioni d'urto elettrone-nucleo in termini della variabile di scala  $y$  [22], che dimostra che gli elettroni incidenti si accoppiano con particelle di massa uguale a quella del nucleone con impulsi fino a  $\sim 500$  MeV [23]. Dal momento che la presenza di componenti di impulso elevato nella funzione d'onda nucleare è dovuta all'effetto delle correlazioni tra i nucleoni, che localmente danno luogo a fluttuazioni della densità nucleare fino a valori  $\sim 5\rho_0$  [24], l'osservazione dello scaling in  $y$  è consistente con l'ipotesi che il paradigma della Fisica Nucleare Teorica continui ad essere valido fino alle densità tipiche delle stelle di neutroni di massa più elevata.



- [1] B.P. Abbott *et al.* (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration): *GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral*, Phys. Rev. Lett., 119 (2017) 161101.
- [2] A. Goldstein *et al.*: *An Ordinary Short Gamma-Ray Burst with Extraordinary Implications: Fermi-GBM Detection of GRB 170817A*, The Astrophysical Journal Letters, 848 (2017) L14.
- [3] V. Savchenko *et al.*: *INTEGRAL Detection of the First Prompt Gamma-Ray Signal Coincident with the Gravitational-wave Event GW170817*, The Astrophysical Journal Letters, 848 (2017) L15.
- [4] B.P. Abbott *et al.* (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration): *Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger*, The Astrophysical Journal Letters, 848 (2017) L12.
- [5] Per le motivazioni, si consulti la pagina al link: <https://accademiadellacrusca.it/it/contenuti/la-nuova-astronomia--multimessaggera/6203>
- [6] O. Benhar: *Exploring Nuclear Dynamics with ( $e,e'p$ ) Reactions: From LNF to JLab*, Nuclear Physics News, 26 (2016) 15.
- [7] J. Carlson *et al.*: *Quantum Monte Carlo methods for nuclear physics*, Rev. Mod. Phys., 87 (2015) 1067.
- [8] A. Akmal, V.R. Pandharipande: *Spin-isospin structure and pion condensation in nucleon matter*, Phys. Rev. C, 56 (1997) 2261.
- [9] R. C. Tolman: *Static Solutions of Einstein's Field Equations for Spheres of Fluid*, Phys. Rev., 55 (1939) 364.
- [10] J. R. Oppenheimer, G. M. Volkoff: *On Massive Neutron Cores*, Phys. Rev., 55 (1939) 374.
- [11] K.S. Thorne, A. Campolattaro: *Non-Radial Pulsation of General-Relativistic Stellar Models. I. Analytic Analysis for  $L \geq 2$* , The Astrophysical Journal, 149 (1967) 591.
- [12] B. Kiziltan, A. Kottas, M. De Yoreo, S.E. Thorsett: *The Neutron Star Mass Distribution*, The Astrophysical Journal, 778 (2013) 66.
- [13] T.E. Riley *et al.*: *A NICER View of the Massive Pulsar PSR J0740+6620 Informed by Radio Timing and XMM-Newton Spectroscopy*, The Astrophysical Journal Letters, 918 (2021) L27.
- [14] M.C. Miller *et al.*: *The Radius of PSR J0740+6620 from NICER and XMM-Newton Data*, The Astrophysical Journal Letters, 918 (2021) L28.
- [15] G. Raaijmakers *et al.*: *Constraints on the Dense Matter Equation of State and Neutron Star Properties from NICER's Mass-Radius Estimate of PSR J0740+6620 and Multimessenger Observations*, The Astrophysical Journal Letters, 918 (2021) L29.
- [16] A. Maselli, A. Sabatucci, O. Benhar: *Constraining three-nucleon forces with multimessenger data*, Phys. Rev. C, 103 (2021) 065804.
- [17] T. Malik, M. Ferreira, B.K. Agrawal C. Providência: *Relativistic Description of Dense Matter Equation of State and Compatibility with Neutron Star Observables: A Bayesian Approach*, The Astrophysical Journal, 930 (2020) 17.
- [18] M. Maggiore *et al.*: *Science case for the Einstein telescope*, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2020 (2020) 050.
- [19] A. Sabatucci, O. Benhar, A. Maselli, C. Pacilio: *Sensitivity of neutron star observations to three-nucleon forces*, Phys. Rev. D, 106 (2022) 083010.

- [20] P. Russotto *et al.*: *Studies of the equation-of-state of nuclear matter by heavy-ion collisions at intermediate energy in the multi-messenger era*, *La Rivista del Nuovo Cimento*, 46 (2023) 1.
- [21] D. Adhikari *et al.* (PREX Collaboration): *Accurate Determination of the Neutron Skin Thickness of  $^{208}\text{Pb}$  through Parity-Violation in Electron Scattering*, *Phys. Rev. Lett.*, 126 (2021) 172502.
- [22] O. Benhar, D. Day, I. Sick: *Inclusive quasielastic electron-nucleus scattering*, *Rev. Mod. Phys.*, 80 (2008) 189.
- [23] J. Arrington *et al.*: *Inclusive Electron-Nucleus Scattering at Large Momentum Transfer*, *Phys. Rev. Lett.*, 82 (1999) 2056.
- [24] R. Subedi *et al.*: *Probing Cold Dense Nuclear Matter*, *Science*, 320 (2008) 1476.



**Omar Benhar:** Dirigente di Ricerca Emerito dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), ha pubblicato oltre 150 articoli sulla teoria dei sistemi di molti corpi, le interazioni elettrodeboli dei nuclei e le proprietà delle stelle di neutroni. È co-autore, insieme a Stefano Fantoni, della monografia *Nuclear Matter Theory* (CRC Press, 2020).



# Restaurare il pianeta blu

**Roberto Danovaro**

*Dipartimento di Scienze della Vita e dell'Ambiente,  
Università Politecnica delle Marche, Italia  
National Biodiversity Future Centre (NBFC) Italia*

---

**R**estaurare gli ecosistemi distrutti dall'azione dell'Uomo è una delle più grandi sfide del futuro. L'Uomo ha alterato o distrutto oltre il 75% degli habitat naturali terrestri, alterato 2/3 degli oceani. Sono stati danneggiati in maniera significativa tutti gli ambienti marini più vulnerabili e ricchi di biodiversità, a partire da mangrove, scogliere coralline, praterie di fanerogame. Nel decennio dedicato dalle Nazioni Unite al "Restauro degli Ecosistemi" e alla "Scienza degli Oceani per lo Sviluppo Sostenibile" si indica la necessità di affrontare con urgenza anche il restauro degli habitat marini. Tuttavia, il rischio è che non si abbiano ancora informazioni sufficienti per operare il restauro degli ambienti marini. Identificare le storie di successo nel ripristino degli ecosistemi marini e incentivare gli investimenti nel restauro ecologico, sono le chiavi per promuovere il recupero della biodiversità e dei servizi ecosistemici. In moltissime parti del mondo gli interventi di restauro di habitat marini stanno registrando un grande successo (circa il 70%), anche grazie allo sviluppo di nuovi approcci e tecnologie che renderanno sempre più economicamente vantaggiosi questi interventi, permettendo di operare su scale spaziali più ampie, anche in ambienti marini profondi. Tuttavia, resta ancora molto lavoro da

fare per comunicare la necessità di intervenire e spiegare gli enormi benefici alla Natura, all'Economia e alla Salute che possono essere realizzati attraverso il restauro ecosistemico.

## Dai (tanti) problemi alle Soluzioni

L'oceano stabilizza il clima, immagazzina carbonio, produce ossigeno, promuove la biodiversità, e supporta direttamente il benessere dell'umanità grazie a cibo, minerali, e fonti energetiche; garantisce anche servizi culturali e ricreazionali [1]. Per tutti questi e altri benefici, l'Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico (*Organization for Economic Cooperation and Development*, OECD) (trasporto, pesca, turismo ed energia) ha stimato che l'oceano genera 3 trilioni di dollari ogni anno [2] a cui si sommano incalcolabili valori potenziali e intangibili.

Gli impatti dell'Uomo sulla Natura sono diventati evidenti negli ultimi 150 anni e ulteriormente aumentati negli ultimi 50 anni raggiungendo livelli senza precedenti. Gli esseri umani, attraverso molteplici e sinergici impatti diretti e indiretti (sviluppo globale delle infrastrutture, estrazione delle risorse biotiche ed abiotiche, inquinamento e cambiamenti climatici), sono responsabili della progressiva degradazione e perdita di larga parte degli ecosistemi naturali con conseguente perdita di biodiversità [3]. Questi impatti stanno compromettendo il funzionamento degli ecosistemi marini [4, 5]. Oggi, siamo più consapevoli anche delle conseguenze dei cambiamenti clima-



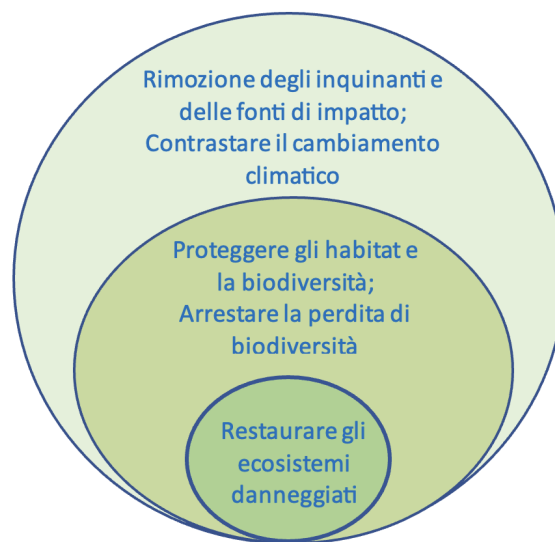
**Figura 1:** Impatti multipli che provocano il degrado o la distruzione degli habitat marini: a) segni di reti da traino sul fondo marino; b) scarico di acque da acquacoltura o impianti di desalinizzazione; c) introduzione di specie non indigene (*Caulerpa* sp.); d) rifiuti marini (plastica e altri rifiuti lungo le spiagge); e) pesca eccessiva di specie target; f) reti fantasma e tramagli su fondali duri (Foto di Chris Smith (a, d); Thanos Dailianis (b, f); Donat Petricioli (c); EPILEXIS/HCMR (e)).

tici e della loro capacità di trasformazione degli ecosistemi marini (Figura 1). Collettivamente, questi impatti hanno già causato il declino in termini di abbondanza di grandi specie marine (principalmente megafauna), il declino della biodiversità locale, l'invasione di specie aliene e hanno ridotto la capacità degli oceani di fornire beni e servizi ecosistemici.

Molti habitat costieri hanno bisogno urgentemente di protezione; praterie di fanerogame marine, barriere coralline, e foreste di kelp sono diminuiti spazialmente dal 25 all'80% o anche più, a seconda del luogo. Le scogliere coralline, ad esempio, sono particolarmente minacciate con ulteriori diminuzioni previste del 70-90% se la temperatura aumenterà, come previsto entro il 2100, di 1.5°C, e con perdite maggiori a 2°C [6]. Alcuni studi hanno documentato un declino del 35% sia negli habitat naturali marini/costieri che nelle zone umide interne tra il 1970 e il 2015 [7]. Il degrado delle praterie di fanerogame ha compromesso alcuni servizi ecosistemici essenziali, come la protezione costiera e il sequestro

del carbonio.

L'ONU si è impegnata a fermare e invertire il declino della salute e della produttività dell'oceano e dei suoi ecosistemi a livello globale, nonché di proteggere e ripristinare la sua resilienza e integrità ecologica. L'Assemblea Generale delle Nazioni Unite ha dedicato il decennio 2021-2030 alla Scienza degli Oceani per lo Sviluppo Sostenibile e al Restauro degli Ecosistemi proprio per supportare e intensificare gli sforzi volti ad arrestare la degradazione degli ecosistemi di tutto il mondo e a sviluppare la ricerca nel settore marino per rendere sostenibile il suo utilizzo. Appare sempre più urgente lo sviluppo di politiche di protezione degli ecosistemi e l'Agenda 2030 delle Nazioni Unite ha fissato l'obiettivo di proteggere il 30% di mari e oceani entro l'anno 2030, ma molti ambienti marini sono ormai talmente degradati da rendere impossibile o troppo lento un recupero senza l'intervento umano: richiedono azioni di restauro attive.



**Figura 2:** Immagine schematica delle soluzioni per invertire l'attuale degradazione dell'ecosistema marino: approccio concentrico che abbraccia dalla rimozione dei contaminanti e mitigazione del cambiamento climatico al restauro degli habitat marini degradati.

Le Nazioni Unite (Assemblea Generale dell'ONU 2019) hanno definito il restauro dell'ecosistema come

“assistenza nel recupero di ecosistemi degradati, danneggiati e distrutti per recuperare la funzionalità ecologica e

fornire i beni e i servizi che le persone apprezzano”.

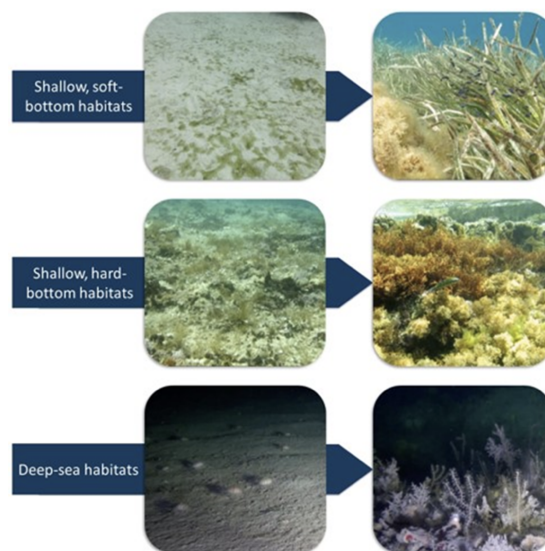
Il Restauro degli Ecosistemi contribuirà anche all'Accordo di Parigi adottato nell'ambito della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici e al raggiungimento dell'Aichi Biodiversity Targets e del quadro globale sulla biodiversità post-2020. Queste iniziative di ripristino incoraggiano tutti i paesi a:

- i) mobilitare risorse, potenziamento delle capacità, e ricerca scientifica, cooperazione, e slancio per il ripristino dell'ecosistema a livello globale, regionale, nazionale, e locale;
- ii) integrare il ripristino dell'ecosistema in politiche e piani per affrontare le attuali priorità e sfide di sviluppo nazionali risultanti dalla degradazione degli ecosistemi marini e terrestri, come perdita di biodiversità e vulnerabilità ai cambiamenti climatici, creando così opportunità per gli ecosistemi di aumentare le loro capacità adattative e migliorare le opportunità di mantenere e i migliori mezzi di sussistenza per tutti;
- iii) sviluppare e rafforzare le iniziative di restauro esistenti al fine di ampliare le buone pratiche;
- iv) promuovere la condivisione di esperienze e buone pratiche in materia di conservazione e ripristino degli ecosistemi.

Esistono tre livelli di risposte per contrastare e invertire l'attuale trend di perdita di habitat e biodiversità nell'oceano: il cosiddetto “inquinamento zero” che può essere tradotto nella rimozione dei contaminanti (inclusi plastica e contaminanti emergenti) e delle fonti di contaminazione degli ecosistemi marini. La rimozione dei fattori di stress degli ecosistemi marini deve necessariamente includere le azioni per 1) mitigare il cambiamento climatico; 2) proteggere gli habitat originari per favorire il recupero delle specie e delle popolazioni; 3) restaurare gli habitat degradati (Figura 2).

Molti governi del mondo e l'Unione Europea (anche attraverso apposite leggi come la “*Nature Restoration Law*”) stanno promuovendo il restauro ecologico come una risposta diretta al degrado e alla distruzione degli ecosistemi, necessario ad

aiutare a proteggere la biodiversità, a migliorare la salute degli ecosistemi e il benessere umano. Il restauro ecologico aumenta la sicurezza alimentare e idrica, fornisce beni, servizi e prosperità economica e sostiene la mitigazione dei cambiamenti climatici [8].



**Figura 3:** Rappresentazione schematica dell'obiettivo del restauro: invertire gli effetti del degrado e convertire gli habitat degradati in habitat diversificati. Le immagini illustrano: i) restauro di praterie di fanerogame marine (sopra); ii) ripristino di foreste algali (in mezzo); iii) restauro di habitat di acque profonde (sotto).

## Restauro ecologico passivo e attivo

Gli Standard Internazionali per la Pratica del Restauro Ecologico [8] indicano il **restauro** come processo di “recupero di ecosistemi degradati, danneggiati o distrutti”, mentre per **recupero di un ecosistema** si intende il raggiungimento di condizioni simili a quelle iniziali o a quelle di un ecosistema di riferimento, in termini di composizione specifica, struttura e funzionale dell'ecosistema (si veda la Figura 3 e gli inserti).

Possiamo parlare sia di **restauro attivo** sia **passivo**. Il **restauro attivo** si basa su interventi attivi, mirati a ricreare un habitat simile a quello originario. Il **restauro passivo** invece sfrutta la resilienza spontanea di un ecosistema e si opera semplicemente rimuovendo le cause di stress o

## Glossario del Restauro Ecosistemico(I)

- **Attività di restauro.** Qualsiasi azione, intervento o trattamento inteso a promuovere il recupero di un ecosistema o di una componente di un ecosistema, incluse le alterazioni del substrato naturale, il controllo delle specie invasive, la struttura dell'habitat, la reintroduzione di specie localmente estinte.
- **Condizioni originarie.** La condizione di un sito di restauro prima degli eventi che lo hanno danneggiato.
- **Continuum ristorativo (Restorative continuum).** Spettro di attività che, direttamente o indirettamente, promuovono, almeno fino a un certo punto, il recupero degli attributi ecosistemici perduti o compromessi.
- **Danno (all'ecosistema).** Un impatto deleterio acuto ed evidente su un ecosistema, spesso associato a mortalità di organismi e/o perdita di habitat.
- **Degradazione (di un ecosistema).** Livello di alterazione degli ecosistemi con perdita di biodiversità, semplificazione della struttura ecosistemica e disfunzionamento, che in genere porta a una riduzione del flusso di servizi ecosistemici.
- **Distruzione (di un ecosistema).** Quando la degradazione o il danno rimuovono tutta la vita macroscopica, e ne alterano in modo significativo l'ambiente fisico.
- **Indicatori (di recupero).** Caratteristiche di un ecosistema che si possono utilizzare per misurare l'efficacia del restauro in un determinato sito (ad esempio: misure di presenza/assenza di specie, qualità di componenti biotiche o abiotiche dell'ecosistema).
- **Recupero.** Processo (parziale o completo) mediante il quale un ecosistema recupera la sua composizione, struttura e funzione rispetto ai livelli identificati per l'ecosistema integro di riferimento.

disturbo che subisce e proteggendolo. La **riabilitazione** invece si pone come obiettivo quello di recuperare le caratteristiche strutturali o funzionali danneggiate da un impatto, e di migliorare il valore sociale ed economico del nuovo ecosistema. Si tratta di un obiettivo meno ambizioso del restauro attivo perché può non raggiungere il pieno recupero dei processi e il ritorno alle condizioni di pre-disturbo.

Il restauro completo di un habitat degradato richiede diversi passaggi, ciascuno dei quali consiste in una serie di azioni e pratiche: a) riduzione degli impatti sociali, b) rimediazione, c) riabilitazione, d) restauro ecologico. Tuttavia, gli esperti del restauro ecologico hanno abbandonato l'idea di un totale recupero, poiché un intervento di restauro può portare l'habitat danneggiato a un percorso di recupero diverso rispetto a quello dell'ecosistema originario.

Storicamente, la ricerca sulle migliori pratiche di restauro ecologico si è focalizzata sugli ecosistemi terrestri e sebbene alcuni dei principi base siano potenzialmente utili a quelli marini, il restauro di questi ultimi ha necessità e caratteristiche profondamente diverse. Per esempio, ora sappiamo che il restauro di un ecosistema marino degradato richiede più risorse e tecnologie rispetto a quello terrestre. Inoltre, cambia profondamente da habitat ad habitat, ragione per cui le azioni di restauro in ambiente marino richiederanno differenti strategie e metodologie.

Sono 4 i principali vincoli che ostacolano il restauro dell'ecosistema marino su ampia scala: 1) tempi lunghi (a volte di diversi decenni) necessari per raggiungere gli obiettivi di restauro; 2) elevati costi per operare in mare; 3) disponibilità di attrezzature e di tecnologie sofisticate, in particolare per gli ambienti marini profondi; e 4) la

## Glossario del Restauro Ecosistemico (II)

- **Resilienza.** Il grado e il tempo di recupero delle proprietà dell'ecosistema / popolamento / popolazione dopo la cessazione delle cause di disturbo, siano esse naturali o antropiche. Nelle comunità vegetali e animali, questa proprietà dipende fortemente dagli adattamenti delle singole specie a disturbi o stress sperimentati durante l'evoluzione della specie.
- **Restauro ecologico attivo.** Reintroduzione di specie localmente perse e assistenza al recupero di un ecosistema degradato, danneggiato o distrutto. Il restauro ecologico si focalizza sulla biodiversità e l'integrità ecologica.
- **Riabilitazione.** Azioni di gestione che mirano a ripristinare un livello di funzionamento dell'ecosistema nei siti degradati, laddove l'obiettivo è la fornitura rinnovata e continua di servizi ecosistemici anziché la biodiversità e l'integrità di un ecosistema di riferimento nativo designato.
- **Rigenerazione assistita.** Un approccio di restauro che punta ad innescare attivamente qualsiasi capacità di rigenerazione naturale del biota nel sito o nelle vicinanze, diverso dal reintrodurre il biota nel sito o lasciare il sito a rigenerarsi. Gli interventi possono includere la rimozione di organismi nocivi e l'installazione di strutture che favoriscono una rapida colonizzazione.
- **Rigenerazione naturale.** Ricolonizzazione da parte del biota compreso le piante, gli animali ed il microbiota, che non coinvolge l'intervento umano.
- **Traslocazione.** Il trasporto intenzionale (da parte dell'uomo) di organismi (generalmente specie strutturanti l'habitat) in un luogo diverso da quello originario per restaurare un habitat degradato.

difficoltà di effettuare il restauro su scale spaziali sufficientemente grandi per ottenere un impatto ecologico significativo.

### Restauro di habitat marini fragili o vulnerabili

Tra gli habitat costieri e di acque profonde più fragili e vulnerabili in Mediterraneo sono inclusi:

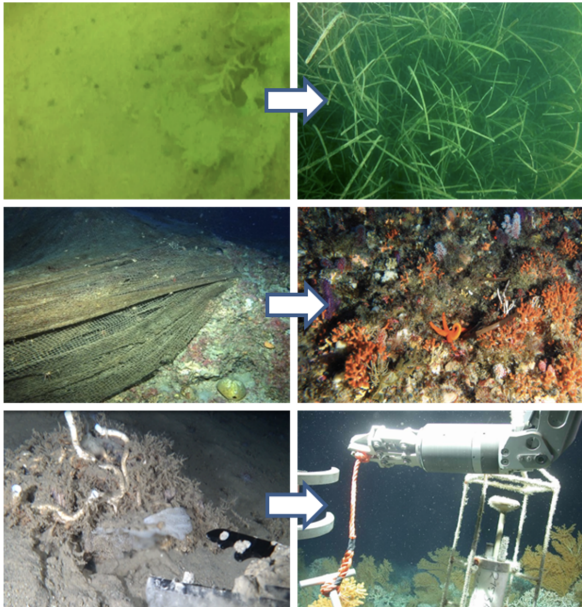
- a) Le praterie di fanerogame (*Zostera marina*, *Z. noltii*, *Cymodocea nodosa*, *Posidonia oceanica*).
- b) Le foreste di alghe.
- c) Il coralligeno (come *Corallium rubrum*, *Paramuricea clavata*, *Eunicella singularis*, *E. cavolini*).
- d) I coralli bianchi profondi (*Callogorgia verticillata*, *Paracalyptrophora josephinae*, *Viminella*

*flagellum*, *Desmophyllum pertusum*), che abitano i canyons e le montagne sottomarine (Figura 4).

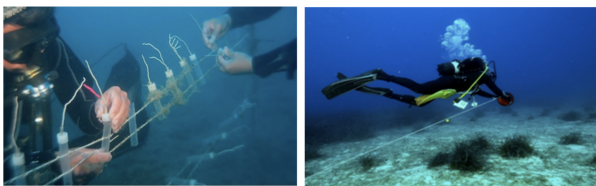
In ambito internazionale, invece i maggiori sforzi si sono rivolti alle scogliere coralline, ai mangrovieti e alle foreste di kelp.

Il restauro ecologico può essere effettuato con differenti pratiche, come la traslocazione delle specie (compreso il trapianto), la semina e la rimozione del pascolo, l'uso di substrati artificiali (o biodegradabili), o la re-introduzione di specie autoctone che possono facilitare il recupero di particolari specie minacciate e habitat (Figura 5).

In generale esistono tre principali approcci: 1) restauro strutturale; 2) restauro fisico e 3) restauro biologico. Il **restauro strutturale** prevede la costruzione di strutture di habitat, in questo caso barriere artificiali. Lo scopo del restauro strutturale è di migliorare la struttura 3D degli habitat disponibili per le specie che colonizzano questi

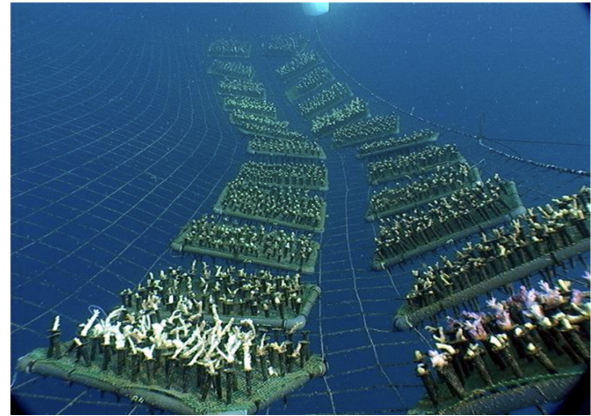


**Figura 4:** Tra i progetti pilota di successo che hanno utilizzato azioni di restauro per invertire gli habitat degradati si annoverano praterie di fanerogame marine (pannelli superiori), affioramenti coralligeni (pannelli centrali) e habitat di acque profonde (pannelli inferiori).



**Figura 5:** Lavoro sul campo con allevamento in situ di gorgonie (a sinistra) e preparazione di interventi di restauro di praterie sommerse (a destra) con operatori scientifici subacquei.

ambienti. Gli ambienti in cui un disturbo ha portato al danneggiamento fisico di un habitat, in generale, richiedono un restauro strutturale. Il **restauro fisico** tende a controllare le condizioni ambientali in cui crescono gli organismi, al fine di migliorare la loro salute, i tassi di crescita, o l'abilità riproduttiva. Il **restauro biologico** di solito consiste nella raccolta di organismi da un ambiente sano/integro, e il loro trapianto in un ambiente degradato. Ad esempio nel restauro delle barriere coralline si può impiegare "coral gardening" ("giardinaggio del corallo") per poi ricollocare i coralli cresciuti nell'ambiente da restaurare. Si tratta di un approccio simile alle piantagioni forestali terrestri [9, 10, 11] (Figura 6).



**Figura 6:** Un esempio di nursery subacquee di corallo per l'allevamento di protuberanze di corallo prima del trapianto (Foto di Buki Rinchevich, progetto REEFRES).

Il successo delle azioni di restauro, come ci si può attendere, cambia da ecosistema a ecosistema. Recenti studi hanno però dimostrato che per aumentare il successo di restauro non basta reintrodurre singole specie ma si devono ricreare le complesse interazioni che sono presenti in un ecosistema, partendo dalle specie **ingegnere degli ecosistemi** ovvero specie in grado di formare un habitat (ad es., [12, 13]).

Di seguito alcuni esempi di restauro di habitat di particolare interesse per il futuro.

### Restauro delle praterie di fanerogame marine

L'estrema vulnerabilità delle praterie di fanerogame marine agli stress antropici sottolinea l'importanza di ridurre o rimuovere questi fattori, come ad esempio l'eutrofizzazione su scala locale, l'ancoraggio, la piccola pesca e le altre attività responsabili della rimozione di porzioni di prateria. Le tecniche di restauro possono variare fra le diverse specie di fanerogame. Per esempio, *Posidonia oceanica*, una specie a crescita lenta, richiede scale temporali più lunghe per il recupero rispetto a *Cymodocea nodosa* e *Zostera marina*, le quali mostrano crescita clonale più rapida. Il restauro delle fanerogame generalmente utilizza due approcci: 1) trapiantare una porzione di fanerogama sana in una località degradata (sia singoli rizomi sia un'intera porzione dell'habitat); 2) con l'impianto di *plantulae* (piante giovani derivate da semi di fanerogame coltivate) in habitat degradati. Recenti studi hanno dimo-  
stra-

to che esistono interazioni positive tra bivalvi e fanerogame [12]. Le piante, infatti, favoriscono la sopravvivenza dei bivalvi fornendo substrato e riparo, mentre i bivalvi facilitano la crescita delle piante stabilizzando e fertilizzando i sedimenti, e riducendo la torbidità dell'acqua attraverso la filtrazione.



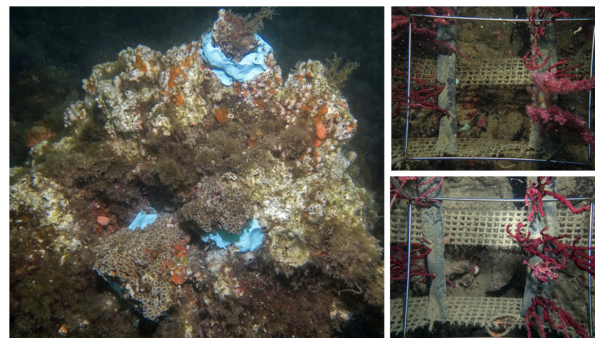
**Figura 7:** Esempio di tecniche raccolta di propaguli di *Cystoseira*. Quando i propaguli crescono sulle basi fino a raggiungere una dimensione visibile (pochi cm) vengono trasferiti nel sito ricevente dove, crescendo, possono colonizzare nuove superfici (Foto di Silvia Bianchelli e Marco Lo Martire, Progetto AFRIMED).

### Restauro delle foreste macroalgali

Gli habitat di macroalghe erette hanno mostrato una significativa diminuzione della loro estensione in diverse aree del Mediterraneo. Il restauro attivo delle macroalghe può essere effettuato con la coltivazione dei propaguli su substrati appropriati e trapiantandoli negli habitat riceventi (Figura 7). Questo approccio può essere combinato con l'eradicazione dei ricci di mare che con il loro pascolo possono compromettere il restauro.

### Restauro degli habitat a coralligeno

Gli impatti meccanici, soprattutto quelli dovuti ad attività di pesca, unitamente ai cambiamenti climatici, stanno mettendo a rischio gli habitat a coralligeno. Il restauro attivo su fondali duri generalmente è focalizzato sul recupero di specie



**Figura 8:** Trapianto di invertebrati sessili: spugne, gorgonie e coralli rossi, vengono prelevati da siti donatori e trapiantati sui substrati da restaurare. (Foto di Carlo Cerrano, Progetto MERCES).

strutturanti, ovvero specie che possono creare un habitat in grado di ospitare molte altre specie. Il restauro di gorgonie, coralli rossi, spugne, avviene con il trapianto, una tecnica semplice e con buoni tassi di successo (Figura 8). In alcuni casi, tuttavia, sono necessari tempi lunghi, anche decenni per gli ottocoralli. Altri taxa, come i briozoi mostrano tassi di crescita molto più rapidi e possono mostrare effetti rilevanti in cinque-dieci anni. La profondità rappresenta il limite principale per il restauro di habitat dei fondali duri (30-40 m) e richiedono utilizzo di sub con notevole esperienza. Gli ambienti più profondi richiedono utilizzo di tecnologie differenti per motivi di sicurezza.

### Restauro degli habitat marini profondi

Il restauro ecologico degli habitat di ambienti profondi è particolarmente difficile e costoso, in quanto richiede tecnologie subacquee avanzate, infrastrutture e logistiche complesse, rispetto agli ambienti poco profondi. In futuro è possibile immaginare un'applicazione ampia di queste tecnologie nel restauro di habitat vulnerabili e critici in acque profonde, come i coralli profondi e le foreste di coralli, o le oasi idrotermali e le sorgenti di metano profonde. Le principali tecniche di restauro includono l'utilizzo di tecniche di trapianto (a seguito di allevamento e acclimatazione; Figura 9), o l'utilizzo di habitat artificiali che migliorano la selezione larvale di alcune specie profonde. Recentemente è stato attuato con successo la tecnica definita **Badminton**, consistente nel recupero di coralli e altri organi-

smi profondi rimasti accidentalmente impigliati nelle reti dei pescatori e la loro ricollocazione in mare dopo averli ancorati su appositi substrati. Il restauro attivo degli ecosistemi marini profondi può essere effettuato in pochi anni, anziché decenni o secoli, con il solo approccio passivo. Tuttavia, una combinazione di attività di restauro passivo e attivo può ottimizzare il successo del restauro e ridurre i costi.



**Figura 9:** Coral gardening per successivo trapianto di invertebrati sessili nel mare profondo (Disegno di Michael Tangherlini, Progetto MERCES).

## Il futuro del restauro degli ecosistemi marini

Il restauro degli ecosistemi marini richiede un aggiornamento continuo delle metodologie per essere in grado di migliorarne il successo anche in un contesto di cambiamento climatico e espansione urbana e umana a mare. Le azioni di restauro dovrebbero essere supportate da azioni in grado di ridurre le pressioni antropiche e una maggiore protezione degli ambienti marini.

La “Biodiversity Strategy 2050” promuove la protezione del capitale naturale e il restauro degli habitat marini e della loro biodiversità per il loro essenziale contributo al benessere umano e prosperità economica. La salute dei mari offre molteplici benefici e servizi ecosistemici, compreso il mantenimento della salute ambientale, l’approvvigionamento alimentare, l’abbattimento degli inquinanti, e altri prodotti necessari per il nostro benessere, oltre che benefici culturali, educativi, e ricreazionali.

Nonostante le azioni di restauro degli ecosistemi marini stiano registrando una forte espansione in molte aree del mondo, il loro tasso di

successo varia enormemente. Le ragioni di queste differenze variano dalla biologia ed ecologia delle specie, dalle loro interazioni e dalle aree di intervento. Da qui la necessità di sviluppare metodologie robuste ed efficaci per il restauro degli habitat marini, in grado di fornire tutti i potenziali benefici di conservazione e socio-economici.

Massimizzare l’impatto e l’efficienza degli sforzi di restauro richiede sicuramente un migliore coordinamento tra azioni e politiche nazionali e internazionali. L’Agenda 2030 delle Nazioni Unite offre un’opportunità senza precedenti di avviare un processo di restauro di mari e oceani a larga scala anche come strumento di rilancio di un’economia blu sostenibile [14].



- [1] L. Pendleton, K. Evans, M. Visbeck: *Opinion: We need a global movement to transform ocean science for a better world*, P. Nat. Acad. Sci. USA, 117 (2020) 9652.
- [2] OECD, Development Co-operation Report 2023: Debating the Aid System, OECD Publishing, Paris (2023), <https://doi.org/10.1787/f6edc3c2-en>
- [3] UN DESA. The Sustainable Development Goals Report 2016, New York, USA (2016): UN DESA. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2016/>
- [4] V. Gerovasileiou et al.: *Habitat mapping in the European Seas - is it fit for purpose in the marine restoration agenda?*, Marine Policy, 106 (2019) 103521.
- [5] T. Bekkby et al.: *Habitat Features and Their Influence on the Restoration Potential of Marine Habitats in Europe*, Front. Mar. Sci., 7 (2020) 184.
- [6] D. Souter et al.: *Status of coral reefs of the world: 2020 report*, Global Coral Reef Monitoring Network (GCRMN) and International Coral Reef Initiative (ICRI). (eds) (2021).
- [7] R. Gardner et al.: *Global Wetland Outlook: State of the World’s Wetlands and Their Services to People*. (2018). <https://medwet.org/publications/ramsar-global-wetland-outlook-2018/>
- [8] G.D. Gann et al.: *International principles and standards for the practice of ecological restoration*. Second edition. Restoration Ecology (2019) S1-S46
- [9] B. Rinkevich: *Conservation of coral reefs through active restoration measures: recent approaches and last decade progress*, Environmental Science & Technology, 39 (2005) 4333.
- [10] B. Rinkevich: *The coral gardening concept and the use of underwater nurseries; lesson learned from silvics and silviculture* W.F. Precht (Ed.), Coral Reef Restoration Handbook, CRC Press, Boca Raton, Florida (2006), 291.



- [11] B. Rinkevich: *Management of coral reefs: we have gone wrong when neglecting active reef restoration*, Marine Pollution Bulletin, 56 (2008) .
- [12] K. Gagnon et al.: , Facilitating foundation species: The potential for plant-bivalve interactions to improve habitat restoration success, J. Appl. Ecol. (57) 2020. 1161
- [13] S. Reeves et al.: *How Positive Species Interactions Can Improve Oyster Reef Restoration*, Frontiers in Marine Science, 7 (2020) 10.3389.
- [14] World Bank, 2017. World Bank The potential of the Blue Economy: *Increasing long-term benefits of the sustainable use of marine resources for small island developing states and coastal least developed countries*. World Bank, Washington DC (2017), 6.



**Roberto Danovaro:** è professore di Biologia marina, Restauro Ecosistemi Marini e Sostenibilità ambientale presso l'Università Politecnica delle Marche. Dal 2013 al 2022 è stato Presidente della Stazione Zoologica Anton Dohrn, Istituto Nazionale di Biologia Ecologia e Biotecnologie Marine. Past-President della Società Italiana di Ecologia, della Società Italiana di Limnologia e Oceanografia e della Federazione Europea delle Società Scientifiche. Membro dell'Accademia Europaea e membro dell'Accademia delle Scienze EU. Membro dell'Inspiration Board di Slow Food. È autore di oltre circa 500 pubblicazioni e diversi libri scientifici e divulgativi. Top Italian Scientists nel settore Natural & Environmental Sciences, ha ricevuto numerosi premi e riconoscimenti internazionale (BMC Biology, Società Francese di Oceanografia e ENI Award "Protezione dell'Ambiente". ExpertScape lo ha indicato come il più influente scienziato in "Oceani e mari per il decennio 2010-2020".



# Una vibrazione dell'Universo, una avventura per l'Europa, una opportunità per la Sardegna

**Fernando Ferroni** *Gran Sasso Science Institute, L'Aquila, Italy*

---

L'Universo è popolato da strani oggetti. Buchi neri grandi come una provincia e massicci decine di volte la nostra amata stella, il Sole. Stelle di neutroni grandi come una capitale europea che hanno una massa poco maggiore del Sole. E non solo vagano nelle galassie che li ospitano ma spesso decidono di costituire un sistema binario, di girare uno intorno all'altro, beh intorno al loro centro di massa per essere pignoli, in una danza che si rivela alla lunga essere mortale. Nel loro moto emettono un po' di energia sotto forma di onde gravitazionali e quindi si avvicinano tra loro. Ma secondo Keplero allora vanno più veloci e così emettono più energia fino a quando ormai quasi relativistici, a una velocità che è una frazione importante di quella della luce, si toccano e una assorbe l'altra o, come si dice meglio, avviene una coalescenza. E in quello spasmo finale una quantità importante di energia viene emes-

sa sotto forma di una increspatura del tessuto dello spazio-tempo che poi si propaga in tutte le direzioni sotto forma di un'onda di gravità che, seppur attenuata, ha una possibilità di giungere fino a noi, esseri umani che grazie al genio di Albert Einstein ne siamo venuti a conoscenza!

E, nel 2015, 100 anni dopo la predizione di Einstein, la pervicacia di quegli studiosi che non si arrendono mai ha permesso la costruzione di imponenti interferometri che hanno infine vibrato sotto l'effetto della deformazione prodotta dal passaggio della perturbazione gravitazionale. In sé non sarebbe stupefacente, nella scienza si lavora sodo per fare scoperte e portare avanti la frontiera della conoscenza, ma in questo caso c'è qualcosa di profondamente emozionante. Il segnale prodotto dal passaggio dell'onda rilevata dagli interferometri in funzione è stato, in termini di deformazione provocata, di 1 parte su  $10^{22}$ .

È un numero ridicolmente piccolo. Per farci una idea, mettiamola così. La distanza Terra-Sole è di 150 milioni di chilometri. Un atomo ha dimensioni di un decimiliardesimo di metro. Beh, quel numero sopra corrisponde a confrontare la distanza tra Terra e Sole con le dimensioni di un atomo.

Tre grandi installazioni sono in funzione e lavorano attivamente in uno spirito di competizione e collaborazione. Due negli Stati Uniti (LIGO) rispettivamente in Luisiana e nello stato di Washington e uno a Cascina vicino a Pisa (VIRGO). Quest'ultimo è frutto di una collaborazione franco-italiana tra CNRS e INFN recentemente arricchitasi da una significativa partecipazione olandese. Sono degli strumenti concettualmente semplici ma vista la sensibilità richiesta di una complessità enorme nei loro dettagli. Un fascio LASER infrarosso viene diviso in due e inviato lungo due bracci lunghi qualche kilometro (3 per VIRGO, 4 per LIGO) e poi riflesso grazie a degli specchi con una fantastica efficienza. I due fasci vengono ricombinati in controfase e la luce letta da un fotodiodo. Quindi normalmente non c'è alcun segnale. La perturbazione dello spazio-tempo, generata dall'onda gravitazionale, arriva allo strumento e ne deforma i due bracci in maniera differente. Questo provoca un cambiamento nella fase relativa tra i fasci di luce che percorrono i due bracci e appare un segnale sul rivelatore di luce. Semplice, no? Eccetto che persino voi, passeggiando vicino all'interferometro provochereste un segnale maggiore di quello di un'onda gravitazionale! La soluzione è quella di avere tre differenti strumenti posti a migliaia di chilometri di distanza l'uno dall'altro che devono rilevare lo stesso segnale nello stesso momento. Per altro, il segnale di coalescenza ha una forma inconfondibile. I due corpi che danzano l'uno intorno all'altro producono un segnale periodico con una frequenza che aumenta col tempo poiché si avvicinano e vanno più veloci. E poiché la velocità aumenta anche la quantità di radiazione gravitazionale aumenta e quindi il segnale si intensifica col tempo.

Ora, dopo un centinaio di eventi raccolti negli anni trascorsi dalla scoperta tra i quali uno singolo, sebbene spettacolare, dovuto a una coalescenza di stelle di neutroni e accompagnato da un getto di fotoni (Gamma Ray Burst), è il

momento di cominciare a disegnare il futuro di questa scienza. Capire cosa c'è da migliorare e gettare le basi per strumenti più potenti. Si parte da alcune semplici riflessioni. La prima è la necessità dell'indipendenza dell'Europa dagli Stati Uniti. I due rivelatori LIGO sono entrati in funzione prima di VIRGO, sono più lunghi e quindi più potenti e sebbene non permettano la localizzazione delle sorgenti per la quale un terzo interferometro è indispensabile sono però auto sufficienti per osservare un segnale. La lunghezza dei bracci è poi determinante così come un altro elemento, la capacità di disaccoppiamento del rumore sismico a bassa frequenza. Ed ecco da dove nasce il disegno del nuovo strumento pensato per l'Europa.

Un triangolo di 10 km di lato con tre coppie di interferometri ospitati in un tunnel scavato a più di 100 metri di profondità. Questa soluzione risponde a tutte le possibilità di miglioramento discusse. È più lungo, è multiplo ed essendo sotterraneo fornisce un disaccoppiamento importante rispetto ai rumori sismici e antropici. È anche a uno stadio più avanzato di progettazione e studio rispetto agli sforzi americani. Ecco dunque il progetto **Einstein Telescope**.

Una vasta comunità si riconosce in questo progetto. Sotto la direzione italiana (INFN) e olandese (NIKHEF) un gruppo di paesi ha sottomeso il progetto al comitato europeo che si occupa di infrastrutture di ricerca (ESFRI) e ne ha ottenuto l'approvazione. Oggi più di 10 paesi partecipano al progetto con quasi 100 istituti universitari e di ricerca.

La comunità scientifica è al lavoro per mettere a punto il disegno finale attraverso un processo di ricerca e sviluppo di nuove tecnologie anche grazie a importanti finanziamenti. L'Italia ad esempio finanzia questi studi con più di 50 milioni di euro messi a disposizione grazie al PNRR. Dettaglio non irrilevante è la stima di costo dell'intero progetto che si situa, ottimisticamente, intorno ai due miliardi di euro, metà circa dei quali per il solo scavo del tunnel e che per un patto esplicito dovranno essere a carico del paese ospitante. Ma dove lo si farà dunque? Ci sono al momento due siti candidati a ospitare questa infrastruttura, uno in Limburgo (Paesi Bassi meridionali, presso Maastricht) e uno in Sardegna, nella Barbagia.

Un requisito fondamentale per la scelta, oltre alla disponibilità del finanziamento che è imprescindibile, è la minimizzazione del rumore sismico e antropico. La Sardegna da questo punto di vista sarebbe la scelta ottimale.

La decisione sarà un misto di valutazione scientifica e volontà politica. Per l'Italia è una battaglia da condurre con convinzione e energia. Non solo il sito è ideale ma le ricadute prevedibili e quantificabili sul territorio di un progetto di queste dimensioni appaiono enormi e tali da aiutare lo sviluppo di una Regione sfavorita sulla scala del panorama europeo.

Un misto di finanziamenti governativi e di utilizzo dei fondi strutturali europei renderebbero non solo credibile ma darebbero una grande forza a questa candidatura.

Tra le ricadute possiamo facilmente individuare quelle a breve termine come lo scavo e l'allestimento dell'infrastruttura sotterranea e degli edifici e laboratori in superficie e la mano d'opera locale coinvolta. A medio e lungo termine ci saranno le posizioni tecniche e amministrative per la gestione del laboratorio, la manutenzione e i servizi associati.

Ci sarà un impatto sulla ricettività e in modo strutturale nuove strade di accesso, una centrale solare e un progetto per l'accumulo di energia in modo da rendere ecologicamente compatibile l'infrastruttura, un centro visite, una scuola internazionale. Certo un arricchimento del territorio.

Ecco come scienza ed economia si saldano in una opportunità importante che può portare a grandi scoperte e a uno sviluppo sostenibile del territorio.



**Fernando Ferroni:** è professore al Gran Sasso science Institute. È stato Presidente dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare dal 2011 al 2019. È attualmente uno dei Direttori del Progetto Einstein Telescope.



# Quo vadis neutrino?

**Eligio Lisi** Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sez. di Bari

---

**P**roverò a identificare alcune possibili traiettorie della futura fisica dei neutrini, con un occhio attento soprattutto al lettore non esperto in fisica, ma semplicemente incuriosito da questo campo di ricerca. Per semplicità farò riferimento, oltre ai precedenti articoli di Ithaca sull'argomento, ad alcune voci di Wikipedia (con i loro pregi e difetti).

## Lungo la via tracciata da Enrico Fermi

Enrico Fermi ha avuto un impatto così vasto e profondo nella fisica moderna, che al suo nome sono associati decine di fenomeni o quantità fisico-matematiche [1]. In particolare, i costituenti fondamentali della materia (leptoni e quark) sono chiamati fermioni e, fra questi, i neutrini (indicati con il simbolo  $\nu$ ) sono stati battezzati così proprio da Fermi nel 1933, anno in cui egli teorizzò le loro interazioni deboli [2, 3].

Fin da allora, studiare questi particolarissimi fermioni senza carica elettrica (neutri), di massa piccolissima se non nulla (-ini) e sfuggenti nelle loro interazioni (deboli) si è rivelata una sfida affascinante, caratterizzata da straordinarie scoperte che hanno aperto nuove frontiere nella nostra comprensione della natura. Fra queste, la "scoperta delle oscillazioni dei neutrini, che mostrano che i neutrini hanno massa" [4] ha portato Takaaki Kajita e Art McDonald al premio Nobel per la fisica nel 2015, anno in cui un intero numero di Ithaca è stato dedicato ai neutrini [3],[5]-[14]. Successivi articoli in Ithaca hanno ulteriormente approfondito il ruolo dei neutri-

ni in fisica, spaziando dalle basse energie in cosmologia [15] alle altissime energie in astrofisica [16]-[20].

Sfogliando questi articoli si può apprezzare come i neutrini rappresentino una miniera inesauribile di informazioni su fenomeni naturali fondamentali, che spaziano dalla fisica subnucleare all'astrofisica e alla cosmologia, e che tuttora sfuggono in parte alla nostra comprensione. Quali sono i problemi irrisolti? Quali direzioni prenderanno le future ricerche? Quali nuovi orizzonti potranno aprirsi? In breve: "Quo Vadis Neutrino" ?

## Oscillazioni di neutrino: come sarà completato il puzzle?

Grazie alla loro leggerezza e alla debolezza delle loro interazioni, i neutrini giungono a noi indisturbati, e quasi alla velocità della luce, da molte possibili sorgenti diverse. Usando sia neutrini di origine naturale (solari, atmosferici) che artificiale (da reattori nucleari e da acceleratori di particelle), sappiamo che i tre tipi di neutrini conosciuti ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ) si trasformano l'uno nell'altro nel loro percorso. Questo fenomeno di oscillazione, predetto da Bruno Pontecorvo negli anni '50-'60 del secolo scorso, richiede che  $\nu_e, \nu_\mu$  e  $\nu_\tau$  siano sovrapposizioni quantistiche di tre neutrini ( $\nu_1, \nu_2$  e  $\nu_3$ ) con masse differenti ( $m_1, m_2, m_3$ ) [5, 6].

Per descrivere precisamente queste sovrapposizioni, c'è bisogno di ben sette nuovi parametri fondamentali. Cinque di essi sono stati misurati sperimentalmente: si tratta di due differenze di

masse al quadrato ( $\delta m^2, \Delta m^2$ ) che determinano le frequenze di oscillazione, e di tre angoli di mescolamento ( $\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}$ ), che ne determinano le ampiezze [5].

Mancano ancora due tasselli per completare il puzzle. Il primo è il segno di  $\Delta m^2$ , che distingue fra un ordinamento delle masse dei neutrini di tipo normale ( $+\Delta m^2$ , ovvero  $m_1 < m_2 < m_3$ , come per i quark) oppure inverso ( $-\Delta m^2$ , ovvero  $m_3 < m_1 < m_2$ ). Il secondo tassello è una possibile fase  $\delta$  che potrebbe rendere differenti le oscillazioni di neutrini e antineutrini, contribuendo in parte, secondo alcune teorie, alla prevalenza della materia sull'antimateria nel nostro universo primordiale. In generale, le oscillazioni dei neutrini sono intimamente connesse ad alcuni grandi problemi aperti nella fisica teorica, come la peculiare struttura delle masse e dei mescolamenti dei fermioni [7, 13].

Sebbene ci siano già alcuni indizi a favore dell'ordinamento normale ( $+\Delta m^2$ ) e di una fase  $\delta$  non nulla, la somma di indizi non costituisce una prova. Per raggiungere prove convincenti sono già in fase di costruzione esperimenti ancora più grandi e sofisticati con neutrini da reattore (JUNO in Cina [21], sensibile a  $\pm\Delta m^2$ ), da acceleratore (DUNE negli Stati Uniti [11, 22] e Hyper-Kamiokande in Giappone [23], sensibili sia a  $\delta$  che a  $\pm\Delta m^2$ ), e atmosferici (come il rivelatore sottomarino KM3-Net ORCA [12, 24], sensibile a  $\pm\Delta m^2$ ). Si può ragionevolmente prevedere che, nell'arco di uno o due decenni, questi ed altri esperimenti riescano ad identificare gli ultimi due tasselli mancanti nel puzzle, oltre a migliorare le misure di quelli già noti. Avremmo così un quadro sperimentale completo del fenomeno delle oscillazioni, con importanti implicazioni sui modelli teorici interpretativi.

Questo ampio programma di ricerca procede su un tracciato ben definito, ma che potrebbe rivelare delle sorprese. Per esempio, eventuali discordanze fra i risultati di diversi esperimenti di oscillazione potrebbero suggerire l'esistenza di nuove interazioni o tipi di neutrini [13], su cui pure non mancano alcuni (controversi) indizi. In questo caso, ci troveremo di fronte ad un puzzle più grande del previsto, dai bordi indefiniti e con molti altri tasselli sconosciuti. Inoltre, durante la vita pluridecennale degli esperimenti in costruzione, si può sperare nell'imprevedibile

osservazione di un evento astrofisico piuttosto raro nel nostro vicinato galattico ma eccezionalmente interessante, come lo è stato l'esplosione della supernova SN 1987A [9]. L'enorme flusso di neutrini generato da una futura supernova (ne dovrebbero esplodere un paio ogni secolo nella nostra galassia) fornirebbe miniere di preziosissimi dati sperimentali, la cui analisi teorica impegnerebbe generazioni di ricercatori, spero anche la mia! Infine, ci sono altre proprietà sconosciute dei neutrini e delle loro sorgenti, che non sono osservabili tramite le oscillazioni: eccone alcuni esempi rilevanti.

## Quanto è neutro il neutrino? L'ipotesi di Majorana

Nel mondo microscopico delle particelle elementari, la carica elettrica (positiva, negativa o nulla) è solo una fra le possibili cariche che distinguono una particella dalla sua antiparticella (con tutte le cariche opposte). Se tutte le cariche del neutrino -non solo quella elettrica- fossero nulle, esso sarebbe indistinguibile dal suo antineutrino, così come la particella di luce, il fotone, è identico all'antifotone. L'ipotesi di identità di neutrini e antineutrini, formulata da Ettore Majorana nel 1937, è tuttora oggetto di ricerche in tutto il mondo [7]. Se fosse provata, avrebbe implicazioni molto profonde, più di quanto Majorana stesso potesse immaginare. In particolare, secondo l'attuale modello standard delle interazioni fondamentali, ogni particella riceve la sua massa tramite una interazione con il bosone di Higgs [25], con la sola eccezione di eventuali neutrini di Majorana, la cui massa richiederebbe inevitabilmente nuova fisica oltre il meccanismo di Higgs. Questa fisica, presumibilmente connessa a scale di energia molto alte, spiegherebbe perché i neutrini sono così leggeri e potrebbe contribuire alla genesi dell'asimmetria materia-antimateria [7, 14].

L'unico modo realistico per sondare questa affascinante possibilità consiste nel rivelare un peculiare decadimento nucleare (detto "doppio decadimento beta senza emissione di neutrini") che può avvenire e se e solo se i neutrini soddisfanno l'ipotesi di Majorana, e soltanto in particolari isotopi nucleari [7]. Si tratta di un fenomeno ra-



rissimo (ammesso che avvenga in natura), che richiede di monitorare grandi masse di isotopi con sofisticati esperimenti, ben protetti dal rumore dei raggi cosmici in laboratori sotterranei. Queste difficilissime ricerche non hanno ancora dato esito positivo, ma ci sono ottime ragioni per continuare: la scoperta di questo decadimento sarebbe certamente epocale e degna di un premio Nobel.

Recentemente, nella comunità scientifica si è raggiunto un generale consenso sulla necessità di proseguire le ricerche monitorando masse dell'ordine di una tonnellata per almeno un decennio, usando isotopi differenti e tecnologie diversificate. Si raggiungerebbe così una sensibilità alla massa dei neutrini di Majorana fino cento volte superiore a quella attuale. Fra i progetti futuri più accreditati citiamo nEXO (con Xenon), CUPID (con Molibdeno) e LEGEND (con Germanio) [26], con almeno uno degli ultimi due presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso.

Personalmente sono molto ottimista sul potenziale scientifico di questa nuova generazione di esperimenti per la ricerca del doppio decadimento beta, e mi auguro di vedere provata l'ipotesi di Majorana nei prossimi due decenni, magari qui in Italia sotto il Gran Sasso. Ma in questo campo le traiettorie della fisica dei neutrini cominciano ad intersecarsi con aspetti in parte imponderabili, che ci ricordano quanto profondamente umana, e quindi incerta, sia l'avventura scientifica. La produzione, la disponibilità e il commercio di ingenti masse di peculiari isotopi di grande purezza sono nelle mani di un ristretto numero di paesi, in parte collegati, direttamente o indirettamente, all'attuale conflitto fra Russia e Ucraina. C'è da aspettarsi che la Cina intenda giocare un ruolo sempre più importante in questo campo, anche con la costruzione di un nuovo laboratorio sotterraneo. Aspetti geopolitici ed economici potrebbero dunque orientare le grandi collaborazioni internazionali verso direzioni e scelte difficili da prevedere, e non solo nella fisica dei neutrini: si trovano di fronte a situazioni analoghe anche la fisica subnucleare, con il suo prossimo grande collisore di particelle, e l'astrofisica di alta energia, con le sue impegnative missioni satellitari. Fra i molti dubbi ci rimane una sola certezza: tutti i paesi che riusciranno a collaborare in questi ed altri grandi progetti internazionali, potran-

no beneficiare dei valori universali insiti nella ricerca scientifica, superando, almeno in questo campo, (e non è poco!), le divisioni geografiche, politiche ed economiche.

## Come sarà determinata la massa assoluta dei neutrini?

Le oscillazioni dei neutrini sono sensibili alle differenze fra le masse dei neutrini  $m_{1,2,3}$  ma non ai loro valori assoluti. Enrico Fermi (ancora lui!) osservò che, in linea di principio, la massa assoluta dei neutrini si può determinare misurando con precisione lo spettro di energia dei ben noti decadimenti beta nucleari. Gli esperimenti di questo tipo non hanno ancora trovato un segnale positivo: l'ultimo e il più grande (KATRIN), tuttora in corso in Germania [12, 27], indica che i neutrini hanno masse inferiori a circa un milionesimo di quella dell'elettrone. Prima o poi un segnale dovrà pur emergere, ma non si può escludere che la sua osservazione richieda un futuro esperimento, ancora più sensibile di KATRIN. Le crescenti difficoltà sperimentali non consentono ancora previsioni ben definite ed impongono un approccio a passi successivi, per sondare tecniche differenti e affrontare gli imprevisti che emergono di volta in volta. Possiamo dunque dire che la strada del decadimento beta tracciata da Fermi deve essere percorsa fino in fondo, ma non è ben chiaro come si riuscirà a procedere per arrivare alla meta.

Se l'ipotesi di Majorana fosse corretta, anche la strada del doppio decadimento beta consentirebbe di esplorare le masse assolute dei neutrini, sebbene con maggiori incertezze teoriche [7]. In entrambi i casi (decadimento beta o doppio beta) potremmo dover aspettare ben più di un decennio per una osservazione convincente in nuovi esperimenti di laboratorio. In questo lasso di tempo, una misura delle masse dei neutrini potrebbe arrivare da un settore completamente diverso: quello delle indagini cosmologiche sulla distribuzione di fotoni e di materia nell'universo [15].

Sappiamo con certezza che il nostro universo è pervaso da un fondo cosmico di neutrini generati poco dopo il big bang. Poiché ogni massa è una sorgente di gravità, anche i neutrini cosmici

primordiali producono effetti gravitazionali, con un'intensità proporzionale alla somma delle loro masse,  $\Sigma = m_1 + m_2 + m_3$ . Gli effetti associati a queste piccole masse alterano la distribuzione sia dei fotoni cosmici (radiazione di fondo a microonde) sia della materia osservabile (strutture a grande scala nell'universo) [15]: analizzando queste distribuzioni in grande dettaglio si può dunque determinare  $\Sigma$ . I dati cosmologici pongono già dei limiti sulla massa dei neutrini più stringenti di quelli analoghi di KATRIN, e con esperimenti di prossima generazione potrebbero portare ad un primo segnale positivo per  $\Sigma$  entro un decennio: sarebbe un risultato sensazionale.

Riusciranno i cosmologi a piantare la prima bandiera nel territorio della massa assoluta dei neutrini, precedendo i fisici delle particelle? Forse sì. In questo caso, prevedibilmente si aprirà una approfondita discussione sul modello cosmologico attuale, implicitamente assunto. Non dimentichiamo che questo modello descrive con grande accuratezza la storia dell'universo osservabile, a patto di parametrizzare nel modo più semplice possibile le due maggiori sorgenti attuali di gravità: la materia oscura e l'energia oscura, di cui conosciamo assai poco [28]. Se la descrizione di queste importanti sorgenti oscure dovesse essere più complessa di quanto supposto finora, allora anche la descrizione di una sorgente minore, come il fondo cosmico di neutrini, ne risentirebbe, e dunque la misura cosmologica di  $\Sigma$  andrebbe ridiscussa. La stima cosmologica delle masse dei neutrini sarà dunque legata a doppio filo con gli auspicabili progressi nella comprensione della materia oscura e dell'energia oscura.

Personalmente sarei ben contento di poter vedere entro il prossimo decennio un primo segnale cosmologico positivo per  $\Sigma$ , e di partecipare alla discussione scientifica che ne seguirà. Penso che, a lungo termine, una misura convincente della massa dei neutrini richiederà la convergenza fra le osservazioni cosmologiche ed almeno una misura di laboratorio, tramite decadimento nucleare beta o doppio beta. Viceversa, eventuali discordanze punterebbero verso nuova fisica, con prospettive imprevedibili. Sempre nel lungo termine, un segnale cosmologico della massa dei neutrini darebbe ulteriore impulso a quella che forse rappresenta la sfida più difficile e lun-

ga in fisica del neutrino: la possibile rivelazione diretta del fondo cosmico di neutrini primordiali [7, 29], su cui ritornerò in conclusione.

## I neutrini come sonde della materia e messaggeri dell'universo: nuove frontiere?

Quanto più conosciamo le proprietà intrinseche dei neutrini e le loro interazioni con la materia, tanto più possiamo usarli come sonde di sorgenti difficilmente accessibili, dai nuclei alle stelle all'universo primordiale. Gli orizzonti e le sfide aperte in questo campo sono molteplici.

La fisica nucleare di interesse per i neutrini è in fermento. Numerose ricerche teoriche e sperimentali cercano di migliorare gli attuali modelli nucleari al livello di precisione richiesto dalle nuove generazioni di esperimenti di neutrini, siano essi da reattore, da acceleratore, atmosferici, o da decadimenti nucleari, integrando una vasta mole di informazioni differenti [8]. Si tratta di un percorso complesso e faticoso, ma assolutamente necessario. Fra i molti sviluppi promettenti si possono citare, a livello teorico, i progressi computazionali nei modelli nucleari *ab initio* [30], e a livello sperimentale il fiorire di nuove tecniche di rivelazione, fra cui quelle che consentono di studiare la diffusione elastica coerente dei neutrini sui nuclei a bassissime energie [31].

Anche lo studio delle sorgenti di neutrini, specialmente in campo astrofisico, sta conoscendo uno sviluppo straordinario. Rimanendo nel campo delle basse energie, le osservazioni di neutrini solari hanno confermato la nostra comprensione dei meccanismi di fusione nucleare nel nucleo del Sole [32]; le misure dei flussi di geoneutrini sono risultate in accordo con i modelli geochimici dell'interno della Terra [33]; e le osservazioni di neutrini dalla supernova del 1987, pur con una statistica limitata, hanno confermato a grandi linee i modelli di esplosione stellare [9]. In futuro, misure ancora più accurate renderanno i neutrini delle sonde insostituibili di queste sorgenti inaccessibili, ad un livello tale da poter discriminare diverse varianti dei relativi modelli teorici.

All'estremo opposto troviamo i neutrini astrofisici di altissima energia [10], presumibilmente associati ad eventi particolarmente violenti che

hanno luogo nel nostro universo, e che coinvolgono sorgenti ove la materia e lo spazio-tempo raggiungono situazioni estreme. Gli stessi eventi possono produrre, oltre ai neutrini, anche fotoni e onde gravitazionali [34, 35]: abbiamo dunque a disposizione tre possibili messaggeri, carichi di informazioni diverse e preziosissime su fenomeni altrimenti inaccessibili [16]-[19]. La moderna astronomia multi-messaggero di alta energia può già contare sulla osservazione associata di fotoni e neutrini, come pure di fotoni e onde gravitazionali, ed è sulla buona strada per poter osservare, magari con un pizzico di fortuna, la produzione contemporanea dei tre messaggeri [20]: sarebbe un evento eccezionale, a cui spero di poter assistere in futuro! Anche in questo campo, ulteriori ricerche richiederanno non solo telescopi sempre più grandi per la rivelazione separata di ciascuno dei tre messaggeri (neutrini, fotoni e onde gravitazionali), ma anche un crescente coordinamento internazionale con condivisione reciproca dei dati, per consentire la rivelazione sinergica di almeno due messaggeri in uno stesso evento. Sarà un bellissimo esempio di cooperazione mondiale, con importanti implicazioni etiche in aggiunta a quelle scientifiche.

Concludo ritornando ad una sorgente di bassissima energia, e cioè al fondo cosmico di neutrini primordiali [15, 29]. La loro difficilissima osservazione diretta, se sarà mai possibile, congiunta a quella attuale del fondo cosmico di fotoni [15], e a quella futura del previsto fondo primordiale di onde gravitazionali [35], contribuirà a fornire la più profonda sonda multi-messaggero dell'universo primordiale. Realizzare questa impresa potrà richiedere alcune generazioni, come in passato poteva esserlo l'edificazione di una grande cattedrale. Per chi avrà il privilegio di salire sul tetto di questa moderna costruzione scientifica, la visione contemporanea di ben tre lontanissime frontiere del nostro universo sarà di una bellezza da togliere il fiato.

## Quo vadis ...

La fisica del neutrino ha un passato ricco di scoperte, e ne ha in serbo molte altre per il futuro. Le prossime sfide richiedono sia di percorrere strade già tracciate verso traguardi ben definiti, sia di esplorare nuovi sentieri verso obietti-

vi appena intravisti, o suggeriti da indizi inattesi. Lungo queste vie, la comunità scientifica vedrà una crescente integrazione fra fisica nucleare, subnucleare, astrofisica e cosmologia, sia teorica che sperimentale. La dimensione delle sfide ancora aperte richiederà, a molti uomini e donne di paesi diversi, di investire le loro energie in una varietà di progetti, collaborazioni e nuove idee. La "piccola particella neutra" di Enrico Fermi continuerà a guidarci, attraversando molte generazioni, verso grandi orizzonti.

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



- [1] [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_things\\_named\\_after\\_Enrico\\_Fermi](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_things_named_after_Enrico_Fermi)
- [2] [https://it.wikipedia.org/wiki/Interazione\\_di\\_Fermi](https://it.wikipedia.org/wiki/Interazione_di_Fermi)
- [3] G. Co': *Neutrini ed interazione debole*, Ithaca, VI (2015) 7.
- [4] <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2015/summary/>
- [5] D. Montanino: *Le oscillazioni di neutrino*, Ithaca, VI (2015) 19.
- [6] F. Ronga: *Breve storia della ricerca delle oscillazioni nei neutrini solari ed atmosferici*, Ithaca, VI (2015) 37.
- [7] F. Vissani: *La domanda di Majorana*, Ithaca, VI (2015) 47.
- [8] M. B. Barbaro, O. Benhar, C. Giusti: *Interazione dei neutrini con la materia*, Ithaca, VI (2015) 59.
- [9] A. Mirizzi: *Neutrini e Supernovae*, Ithaca, VI (2015) 69.
- [10] V. Flaminio: *I neutrini in astrofisica*, Ithaca, VI (2015) 75.
- [11] C. Mariani: *Esperimenti di neutrini negli USA*, Ithaca, VI (2015) 97.
- [12] F. Terranova: *L'Europa dei neutrini*, Ithaca, VI (2015) 101.
- [13] P. Bernardini: *La frontiera dei neutrino sterili*, Ithaca, VI (2015) 109.
- [14] E. Lisi: *Neutrini: messaggeri di nuova fisica*, Ithaca, VI (2015) 117.

- [15] G. Mangano: *Neutrini e Cosmologia*, Ithaca, VII (2016) 147.
- [16] P. Lipari: *I Raggi Cosmici e l'universo delle alte energie*, Ithaca, XIX (2022) 5.
- [17] A. De Angelis: *Raggi cosmici ieri, oggi, domani*, Ithaca, XIX (2022) 35.
- [18] C. Distefano, F. Vissani: *L'importanza dei neutrini cosmici di altissima energia*, Ithaca, XIX (2022) 103.
- [19] A. Castellina: *Astroparticelle di altissima energia*, Ithaca, XIX (2022) 115.
- [20] M. Spurio: *Prospettive per nuovi orizzonti nell'astrofisica*, Ithaca, XIX (2023) 79.
- [21] [https://en.wikipedia.org/wiki/Jiangmen\\_Underground\\_Neutrino\\_Observatory](https://en.wikipedia.org/wiki/Jiangmen_Underground_Neutrino_Observatory)
- [22] [https://en.wikipedia.org/wiki/Deep\\_Underground\\_Neutrino\\_Experiment](https://en.wikipedia.org/wiki/Deep_Underground_Neutrino_Experiment)
- [23] <https://en.wikipedia.org/wiki/Hyper-Kamiokande>
- [24] <https://en.wikipedia.org/wiki/KM3NeT>
- [25] P. Ciafaloni: *Il bosone di Higgs*, Ithaca, I (2013) 7.
- [26] [https://en.wikipedia.org/wiki/Neutrinoless\\_double\\_beta\\_decay](https://en.wikipedia.org/wiki/Neutrinoless_double_beta_decay)
- [27] <https://en.wikipedia.org/wiki/KATRIN>
- [28] M. Gasperini: *Teoria Gravitazionale e Applicazioni Cosmologiche: Sviluppi Futuri*, Ithaca, XXI (2023) 47.
- [29] [https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic\\_neutrino\\_background](https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_neutrino_background)
- [30] A. Bracco: *Struttura e reazioni nucleari e l'origine degli elementi*, Ithaca, XXI (2023) 19.
- [31] <https://en.wikipedia.org/wiki/CONUS-Experiment>
- [32] [https://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_neutrino](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_neutrino)
- [33] <https://en.wikipedia.org/wiki/Geoneutrino>
- [34] P. Leaci: *Ascoltando l'Universo di onde gravitazionali*, Ithaca, VII (2016) 167.
- [35] [https://en.wikipedia.org/wiki/Gravitational\\_wave](https://en.wikipedia.org/wiki/Gravitational_wave)



**Eligio Lisi:** è Dirigente di Ricerca presso la Sezione di Bari dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN). Le sue ricerche hanno riguardato aspetti teorici e fenomenologici delle interazioni elettrodeboli, con particolare attenzione alla fisica dei neutrini ed astro-particellare. Nel 2018 ha ricevuto, assieme a Gianluigi Fogli, il Premio Internazionale "Bruno Pontecorvo" per la fisica delle particelle elementari.

# Il futuro di una disciplina in decadimento

(sul futuro di radioisotopi e radiofarmaci in medicina)

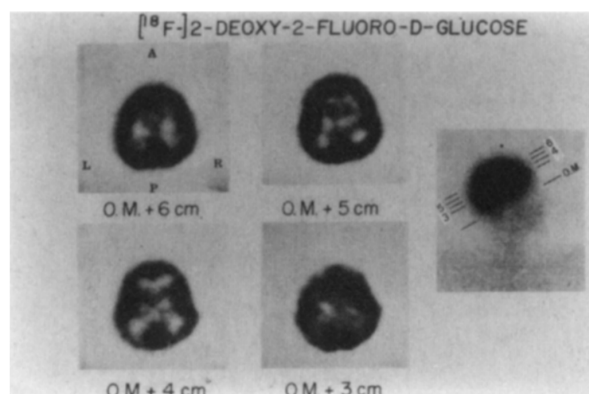
**Giancarlo Pascali**

Dip. di Chimica, Università del Nuovo Galles del Sud, Kensington, NSW, Australia  
Australian Nuclear Science and Technology Organisation, Lucas Heights, NSW, Australia

## I giganti sulle spalle dei quali guardiamo al futuro

Le tecniche di immagine di Medicina Nucleare hanno aperto la strada alla conoscenza approfondita di numerose malattie. Forse uno dei momenti più eclatanti fu attorno al 1976 quando la molecola di  $[^{18}\text{F}]\text{FDG}$ , prodotta in un laboratorio del Brookhaven National Laboratory [1], venne spedita per aereo alla università di Pennsylvania, dove un recente prototipo di scanner PET permise di vedere, per la prima volta, la distribuzione del glucosio nel cervello di un soggetto sano [2]. Data la bassa resa radiochimica del metodo elettrofilico di sintesi utilizzato, la distanza tra i siti (BNL a Long Island, New York e PennUni a Philadelphia, 1 ora di volo senza spostamenti da e per l'aeroporto), l'emivita del  $^{18}\text{F}$  (110 min), e la bassa sensibilità dello scanner, non oso pensare a quante volte questo esperimento sia stato tentato e sia fallito. I più curiosi lo potrebbero chiedere a Johanna Fowler, insignita dal presidente Obama della National Medal of Science nel 2008, ed ancora oggi al lavoro come professore emerito presso l'Università di Stony Brook (vicino Long Island).

Questo momento storico ha fatto capire come fosse possibile vedere molecole all'interno di un corpo, e dare un significato biochimico alle seppur sfuocate immagini ottenute (Figura 1). L'ov-



**Figura 1:** Immagine tratta da Ref. [3]

vio interesse delle case farmaceutiche e dei vari specialisti medici hanno poi continuato su questa via, e l'utilizzo di radiofarmaci sempre più complessi, l'affinamento delle caratteristiche degli scanner e la costruzione di modelli correlativi fra accumulo radioattivo e funzione d'organo hanno permesso di aumentare il significato e valore diagnostico dell'indagine PET. In parole povere, questa scoperta ha diretto ed ispirato molte delle attività ed innovazioni nel campo della Medicina Nucleare.

La mia domanda è: a quasi 50 anni dopo i risultati eclatanti degli anni '70, abbiamo assistito ad eventi di simile portata, che sono destinati a cambiare il futuro? Nei paragrafi seguenti indicherò la mia personalissima selezione di scoperte ed

innovazioni che hanno suscitato recente interesse e che potrebbero indirizzare rilevanti sviluppi futuri.

## Una (radio)chimica più democratica

Dal punto di vista prettamente chimico, realizzare reazioni di marcatura (cioè, legare un dato radioisotopo in un punto preciso di una molecola) pone diversi problemi, tra i quali:

- a) grosso sbilanciamento stechiometrico tra reagenti ed agente marcante (in forte difetto),
- b) bassa emivita di molti radioisotopi di utilità medica,
- c) necessità di processi ripetibili e robusti,
- d) sicurezza nel maneggiare materiali radioattivi.

Questi aspetti hanno fatto sì che tali processi, e i radiofarmaci così prodotti, siano disponibili solo in siti altamente attrezzati e qualificati.

## Kit di marcatura

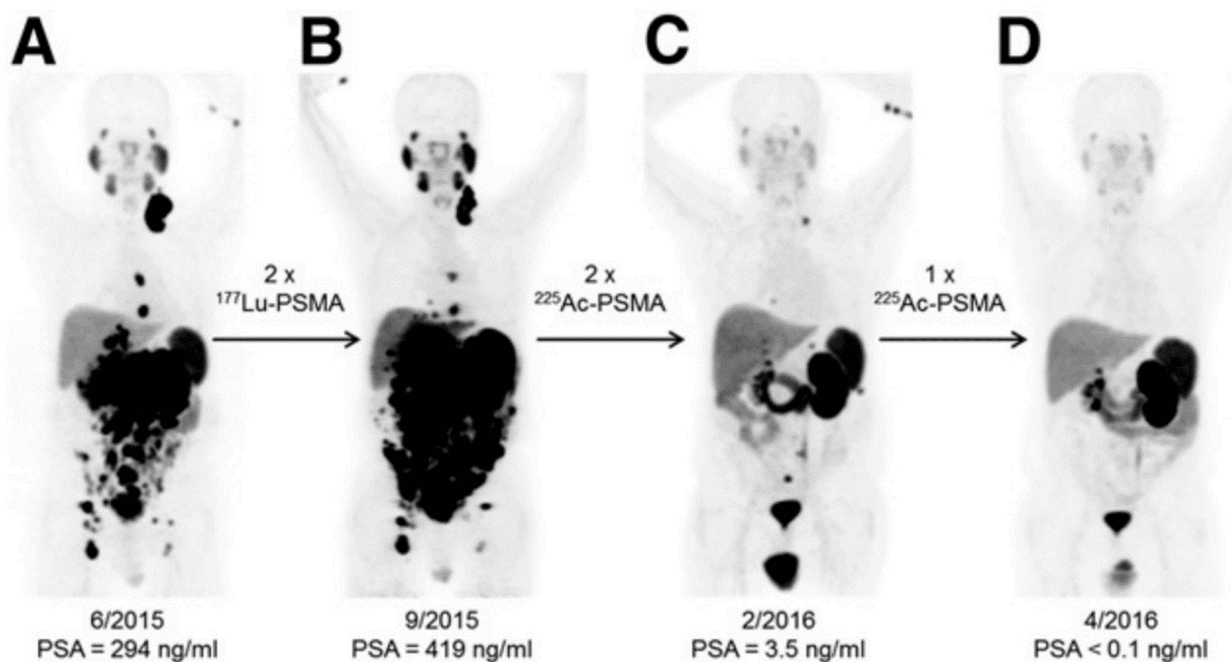
Uno dei principali modi per rendere più abbordabili tali processi è creare *kit* di marcatura che possano essere utilizzati da personale con poca esperienza e richiedano strumentazione minima. In breve, tale approccio richiede che l'operatore aggiunga una soluzione radioattiva standardizzata ad un flacone contenente tutti i reagenti chimici che permettono una marcatura efficiente (previa attesa di un lasso di tempo, o veloce riscaldamento). Nella sua implementazione più comune, l'operatore non dovrà poi effettuare alcuna purificazione, perché la formulazione realizzata è già adatta per somministrazione in paziente. Questo approccio è correntemente utilizzato [4] per la preparazione di prodotti per SPECT a base di  $^{99m}\text{Tc}$ , ed è reso possibile dalla intima comprensione dei parametri cruciali per ottenere una marcatura efficiente. Recentemente, tale possibilità è stata recensita per i prodotti a

base di  $^{68}\text{Ga}$ [5], e si capisce che vari altri radiofarmaci a base di radiometalli raggiungeranno simili livelli di semplicità. La disponibilità di semplici *kit* di marcatura renderà disponibili molti radiofarmaci in maniera capillare ed *on demand*, come attualmente per i tecnezati, previa disponibilità di soluzioni standard di radioisotopi metallici.

## Nuovi radioisotopi metallici

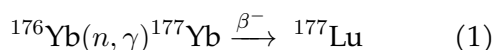
La tavolozza di radioisotopi interessanti si è ingrandita considerevolmente in questi ultimi anni, in seguito all'utilizzo di radiofarmaci contenenti tali elementi per terapia radionuclidica bersagliata. Tale approccio prevede l'utilizzo di molecole vettore note per accumularsi in tessuti tumorali con eccellente specificità; questa conoscenza può derivare dall'aver preventivamente marcato tali molecole con un radioisotopo per *imaging* nucleare (es.  $^{68}\text{Ga}$ ) e registrato questo accumulo preferenziale. Dimostrato ciò, marcare tali strutture con radioisotopi emittenti particelle  $\alpha$  o  $\beta^-$  di energia opportuna ad arrecare danno cellulare, può essere visto come la creazione di proiettili intelligenti per la distruzione di tumori. Ovviamente, tali radiofarmaci non sparano solo quando raggiungono il tessuto tumorale, ma durante tutta la loro vita, ovvero mentre viaggiano nei vari organi prima di raggiungere il tessuto *target*, ed in seguito raggiungendo gli organi atti al metabolismo e all'escrezione. Occorre perciò avere una fine conoscenza del fatto farmacologico di questi agenti per essere sicuri che rechino più benefici che danni. Tuttavia, come mostrato nella Figura 2, studi clinici cominciano a dimostrare l'utilità di tale concetto.

Tuttavia, i radioisotopi metallici utilizzabili in questo paradigma (es.  $^{177}\text{Lu}$ ,  $^{225}\text{Ac}$ ) sono elementi artificiali, creati in reattori nucleari o acceleratori di vario tipo e potenza (es. ciclotroni). In particolare, queste sorgenti producono particelle ad alta energia (tipicamente reattori producono neutroni, acceleratori producono protoni) usate per bombardare elementi isotopicamente arricchiti e indurre la reazione nucleare che porta poi a generare il radioisotopo desiderato. La reazione nucleare non è quantitativa, ovvero non tutto il materiale bersaglio si trasforma in prodotto d'interesse, perciò bisognerà separare



**Figura 2:** Immagine tratta da Ref. [6] evidenzia la differente capacità di uccidere cellule tumorali usando lo stesso veicolo (PSMA), ma un diverso radiometallo.

chimicamente i due (o più) elementi chimici.



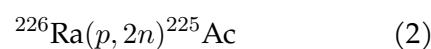
Per esempio, nel processo di produzione per  ${}^{177}\text{Lu}$  [7], indicato sopra dall'equazione (1), un *target* contenente  ${}^{176}\text{Yb}$  (per esempio, ossido) viene bombardato con neutroni ad alta energia per produrre  ${}^{177}\text{Yb}$ , che a sua volta decade nel prodotto desiderato con una emivita di 1.9 ore. Perciò, basterà calare in un reattore nucleare una ampolla contenente qualche grammo di  ${}^{176}\text{Yb}$ , bombardarlo per qualche ora con neutroni, recuperare l'ampolla e, dopo aver atteso un giorno, rompere l'ampolla e recuperare il  ${}^{177}\text{Lu}$  prodotto? Non esattamente.

*In primis*, bisognerà ottenere quantità sufficienti di Yb con grande arricchimento in  ${}^{176}\text{Yb}$ , in quanto ogni isotopo presente nell'ampolla subirà una reazione nucleare con i neutroni, e vogliamo selezionare, quanto più possibile, solo la reazione che portano  ${}^{177}\text{Yb}$ <sup>1</sup>; questo isotopo

<sup>1</sup>Per esempio, l'isotopo con maggiore abbondanza è  ${}^{174}\text{Yb}$  (32%); se ci fosse troppo di questo isotopo nell'ampolla, potremmo creare  ${}^{175}\text{Yb}$  in seguito a bombardamento da  $n$  (se la sezione d'urto fosse simile o maggiore a quella del  ${}^{176}\text{Yb}$ ). Tale prodotto decade, con emivita di 4 giorni, in  ${}^{175}\text{Lu}$  che è un elemento stabile, e non

*target* (stabile) ha una abbondanza naturale di 13%, e perciò sarà relativamente costoso arricchirlo e purificarlo isotopicamente. *In secundis*, dopo il bombardamento, l'ampolla conterrà una miscela di  ${}^{177}\text{Lu}$  e  ${}^{176}\text{Yb}$  (e potenzialmente quantità in tracce di altri metalli), e sarà necessario separare chimicamente questi due elementi; separazione particolarmente complicata data la incredibile similitudine chimica dei due elementi in questione.

Ancora peggiore è il caso per  ${}^{225}\text{Ac}$ , che è stato considerato come isotopo utile solo recentemente, ed è disponibile da sorgenti di  ${}^{229}\text{Th}$ . A parte i comuni problemi di separazione Ac/Th (leggermente meno complicati che per Yb/Lu), tali sorgenti derivano dal decadimento di depositi di  ${}^{233}\text{U}$ , che fu prodotto fino al 1970 (per potenziale uso bellico), e ha perciò disponibilità estremamente limitata. Questo ha creato una specie di carenza mondiale di  ${}^{225}\text{Ac}$ , e perciò alcuni gruppi stanno studiando metodi alternativi di produzione per tale radiometallo [8], per esempio tramite ciclotrone con la via descritta sotto:



Tale promettente metodo di produzione servirebbe allo scopo di sparare ai tessuti tumorali.

vede l'utilizzo di un materiale target radioattivo ( $^{226}\text{Ra}$ ) e, come sempre, separazione del prodotto da tutti gli altri radioisotopi prodotti contestualmente alla reazione nucleare.

Come si capisce da questi esempi, la produzione di tali nuovi radioisotopi metallici ha non pochi problemi di approvvigionamento e chimici. È estremamente probabile perciò che nuove idee verranno studiate nel campo di reazioni nucleari che richiedano materiali *target* più facili da reperire, ma soprattutto, metodi di separazione chimica che siano più selettivi ed efficienti e che permettano di recuperare/riciclare il costoso elemento target in una forma riutilizzabile per un successivo bombardamento. Tali ricerche saranno costose e lunghe; ma vale veramente la pena di spendere tante forze, fondi ed energie in questo?

## Il caso di $^{18}\text{F}$

L'applicazione del concetto di *kit* rasenta l'impossibile quando si voglia applicarlo a radiofarmaci basati su  $^{18}\text{F}$ , che rappresentano la stragrande maggioranza dei traccianti utilizzati in diagnostica PET. Nonostante alcuni tentativi di parziale successo [9], che sfruttano nuclei  $[^{18}\text{F}]\text{AlF}^{+2}$  usando tecniche tradizionali di complessazione di metalli, la formazione di legami covalenti con  $^{18}\text{F}$  richiede condizioni drastiche di reazioni e non è generale o flessibile. In questi casi, il chimico deve modificare la struttura chimica per rendere possibile l'introduzione del  $^{18}\text{F}$  nella posizione desiderata, creando un apposito precursore. Data la breve emivita di questo nuclide, lo scenario ideale prevederebbe che tale radiomarcatura avvenga come ultimo *step* di sintesi; questo richiederebbe che tale reazione possa avvenire in presenza di numerosi gruppi funzionali già installati. Tale eventualità è tipicamente negata dalla necessità di usare condizioni di radiofluorazione tradizionalmente aggressive, che degraderebbero tali gruppi. Perciò, in generale bisognerà marcare precursori con molti gruppi funzionali protetti, effettuare una successiva deprotezione ed infine purificare e formulare il prodotto (dato che la resa non è mai quantitativa, a differenza del caso dei radiometalli). Tale lungo e complesso processo rende la produzione di radiofarmaci con  $^{18}\text{F}$  poco efficiente. Lo studio di

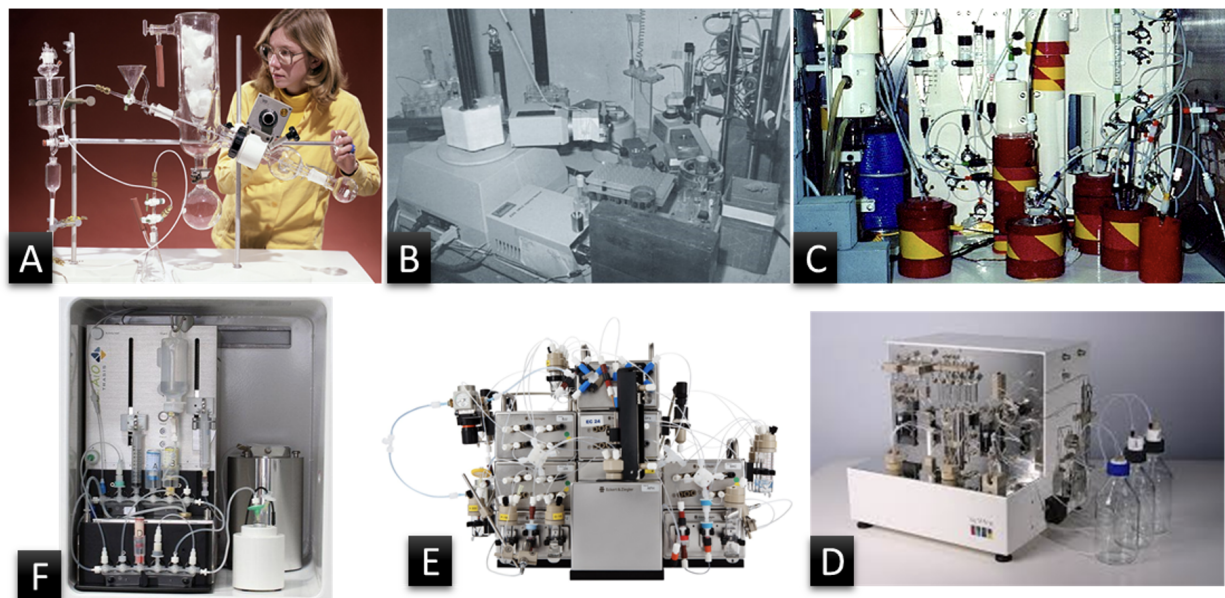
nuovi concetti di radiofluorazione, che siano più selettivi e funzionino in condizioni blande, potrebbe alleviare tale inefficienza.

Da una parte, si potrebbero cominciare ad adottare fonti di radiofluoruro alternative; in ogni caso, tali fonti dovranno inevitabilmente provenire dalla tradizionale soluzione acquosa irradiata nel ciclotrone, ma dovranno essere più facili da impiegare e trasportabili in siti remoti. Un esempio di tali reagenti è il  $[^{18}\text{F}]\text{ESF}$  [10] che, come altri intermedi a base di sulfonilfluoruri [11], è in grado di effettuare radiofluorurazioni su precursori standard eliminando alcuni delicati step (distillazione azeotropica) e perciò riducendo la strumentazione necessaria. Rispetto alle altre soluzioni tuttavia,  $[^{18}\text{F}]\text{ESF}$  può essere facilmente contenuto e trasportato in siti lontani dal ciclotrone.

D'altra parte, si potrebbero studiare nuove reazioni di fluorurazione. In questo campo stanno emergendo diversi concetti che mettono in evidenza (nuovamente) come il calore sia una fonte di energia sicuramente facile da attivare, ma molto grossolana come rendimento. Infatti, modificare lo stato red-ox di semplici precursori, in modo da permettere ad un fluoruro di attaccare tale stato attivato, si sta rivelando cruciale nello sviluppo di metodi *photo redox*, che utilizzano l'attivazione di un apposito catalizzatore nell'attivare in maniera accurata e specifica la fluorurazione di precisi siti molecolari [12]. Oltre a questo, altri gruppi stanno cominciando a testare l'uso diretto di potenziali elettrici per creare tali precursori attivati [13]; nonostante ancora poco utilizzato, questo metodo permetterebbe di ottenere risultati simili ai metodi *photo redox* senza l'aggiunta di un reagente aggiuntivo (il catalizzatore), che andrebbe poi rimosso.

Un'ultima possibilità risiede nell'espandere il ventaglio di molecole utilizzabili verso strutture recanti un legame di F con eteroatomi (ovvero elementi non-metallici diversi dal C). Recente interesse ha suscitato la marcatura di gruppi contenenti [14] Si-F, B-F, ed in particolare S-F [15] e P-F [16], per la possibilità di realizzare radiofluorurazioni con alte rese, in condizioni blande e con precursori facilmente reperibili.





**Figura 3:** Evoluzione delle apparecchiature per processi radiochimici, da sistemi manuali (A), robotici (B), fluidici custom (C), fluidici commerciali (D), modulari (E), a cassetta (F)

Attualmente non è possibile pronosticare quale di queste strategie avrà più successo nel semplificare la produzione di radiofarmaci con  $^{18}\text{F}$ , ed è molto probabile che tutte queste opzioni (nuove fonti di  $^{18}\text{F}$ , nuovi paradigmi reattivi, nuove molecole fluorurate) avranno un impatto diverso a seconda della necessità diagnostica d'interesse. Tuttavia, quello che sembra certo è che tali processi dovranno essere eseguiti su sistemi automatici di sintesi.

## Automazione di sintesi

Manipolare piccole quantità di reagenti chimici, alcuni dei quali anche radioattivi, per effettuare velocemente reazioni di sintesi e successive purificazioni, richiederebbe delle capacità manuali notevoli; tradizionalmente tali scenari non sono presenti nella educazione chimica accademica e, personalmente, ho dovuto imparare a lavorare in queste condizioni durante il mio progetto di tesi. Questo mi ha fatto capire un aspetto fondante della ricerca e pratica radiochimica: la necessità di utilizzare automazione di sintesi. Questo vuol dire accettare di non manipolare direttamente (es. con pipette, spatole) i reagenti chimici, ma disegnare una struttura connessa di recipienti, tubi e valvole, controllabile in remoto, che implementa tutti gli *step* di processo necessari. Per utilizzare tale approccio, bisogna perciò lascia-

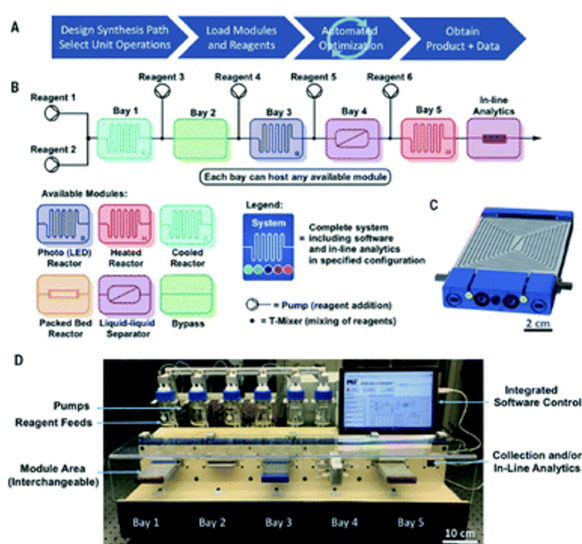
re in sottofondo gli aspetti prettamente chimici del problema, e lavorare con elementi meccanici, elettronici e *software* per ottimizzare l'operatività di tali sistemi, per poi tornare al problema chimico solo in seguito, quando la "macchina non fa sorprese".

Ovviamente, in alcuni casi fortunati di processi estremamente semplici (vedi: *kit*), l'automazione può essere assente o presente in maniera semplificata, ma in casi più generali, l'uso di sistemi automatici è obbligato per ragioni di radioprotezione, sicurezza e ripetibilità. Tali sistemi si sono evoluti fin dagli anni '70 (Figura 3), fino a raggiungere una semplicità di utilizzo estrema, grazie ad approcci *hardware* semplificati (es. a cassetta) e *software* intuitivi nel creare processi diversi.

In questo campo, probabilmente l'approccio più promettente è l'utilizzo di sistemi microfluidici; infatti, tale approccio permette di manipolare con grande precisione quantità minute di reagenti chimici. Tale concetto, in qualche maniera mutuato dai numerosi sistemi già sviluppati per applicazioni biologiche, permette anche di ottenere rese più alte [17] e, in principio, di produrre dosi di radiofarmaci dedicate all'utilizzo per un determinato paziente (es. *Dose on Demand* [18]). Purtroppo, dopo un interesse iniziale, non troppe ditte hanno investito nella commercializzazione di sistemi microfluidici di sintesi. Tut-

tavia, recentemente PMB-Alcen ha cominciato a commercializzare un concetto totale di produzione radiofarmaceutica basato su mini-ciclotrone e micro-chimica [19], e tale concetto si sta rivelando particolarmente interessante, specialmente per siti o laboratori che cominciano ora a lavorare in questo campo.

Un'altra promettente innovazione, che si vedrà sempre di più in futuro, è la creazione di sistemi di sintesi stampati in 3D; in una recente pubblicazione, gli autori hanno persino creato un sistema completo basato su reattori microfluidici [20]. Questa è sicuramente la nuova frontiera nella costruzione di automazione per radiochimica, specialmente perché permetterebbe incredibile flessibilità di disegno, basso utilizzo di fondi, e l'accesso a sistemi usa-e-getta, caratteristica estremamente importante in campo farmaceutico e radiologico (es. eliminazione di cross-contaminazione chimica e radioattiva).



**Figura 4:** Esempio di sistema fluidico per ottimizzazione automatica (da Ref. [22]).

Ma la vera rivoluzione sta avvenendo in questi mesi, ed è legata ad un utilizzo migliorato dei dati di sintesi. Infatti, l'impatto di metodi statistici avanzati per pianificare esperimenti chimici (correlato a concetti di *Machine Learning* ed *Intelligenza Artificiale*) ha cominciato a realizzarsi in campo chimico da qualche anno [21], ed è basato sulla possibilità di creare un ciclo: controllo dell'apparato sintetico, analisi dei prodotti, individuazione algoritmica di parametri di sintesi migliori, aggiornamento del controllo dell'apparato sintetico. Tale ciclo si ripete fino a quando

l'analisi rivela efficienza massima (o desiderata), ed è implementabile in maniera automatica, previa disponibilità dei reagenti partenza e di utili algoritmi di ottimizzazione (Figure 4). In campo radiochimico si sta cominciando a vedere l'utilizzo di "Design of Experiment" [23], ma l'utilizzo di ottimizzatori Bayesiani è già in fase di sviluppo, come anche la raccolta di dati radiofarmaceutici per ottenere Intelligenze Artificiali che possano inventare la miglior struttura e metodo di sintesi (automatizzata), dato un particolare quesito di imaging (es. trovami il tracciante più efficiente per monitorare pazienti di Alzheimer).

## Uno scanner più performante

Un campo che sta vedendo progressi interessanti in questi anni è sicuramente la costruzione di nuovi *scanner*. Oltre alla tradizionale ricerca di sensibilità sempre più spinte, l'innovazione più interessante è stata la creazione di un sistema Total-Body PET; cioè uno *scanner* con un campo di vista lungo 2m, e che perciò permette di effettuare un *imaging* contemporaneo su tutto il paziente [24]. Siccome quasi tutti i fotoni vengono registrati dai rivelatori, tale macchinario permette non solo di usare fino a 40 volte meno radioattività, ma anche di usare la stessa dose di radiofarmaco a bassa emivita, ma di registrare immagini per tempi più lunghi. Inoltre, tale approccio permette di rilevare accumuli radioattivi in qualsiasi zona del corpo; tale capacità è di cruciale importanza quando si voglia studiare nuovi traccianti, per i quali non sono ancora noti accumuli off-target. Tale innovazione ha richiesto un enorme sforzo ingegneristico, per aggiungere e controllare un numero molto più elevato di rivelatori, nonché gestire una enorme quantità di dati; ma la fisica è rimasta la stessa.

Concetti fisici diversi potrebbero guidare la costruzione di nuovi scanner PET, basati sull'imaging di positronio. Infatti, è noto che i positroni emessi dai radiofarmaci interagiscono con gli elettroni della materia circostante; la PET usa il fenomeno di annichilazione, e rivela i due fotoni generati per rilevare la locazione originaria del radiofarmaco. Tuttavia, la coppia elettrone-positrone forma, nel 40% dei casi, uno stato di

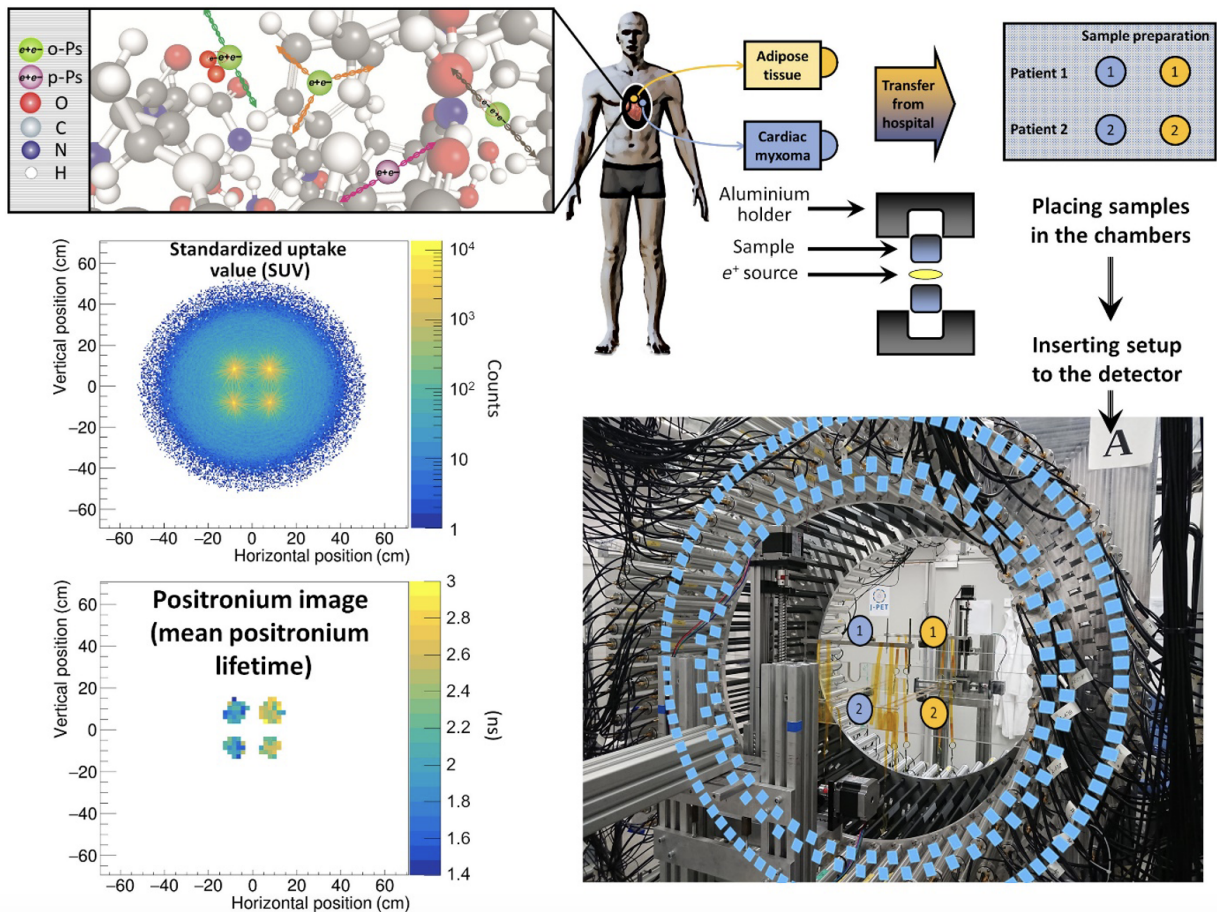


Figura 5: Concetto dell'imaging di positronio (da Ref. [25])

positronio (Ps), che tramuta in parapositronio (p-Ps, 25%) o ortopositronio (o-Ps, 75%); a questo punto p-Ps decade in 2 fotoni e o-Ps decade in 3 fotoni. La cosa interessante è che l'emivita di tali stati è diversa a seconda del tessuto in cui si trovano [25]. Senza andare troppo nei dettagli (che sono ancora in fase di studio), l'imaging di positronio potrebbe permettere di semplificare il sistema di rivelatori, localizzare con più precisione il radiofarmaco, e qualificare caratteristiche locali dei tessuti.

## Onestà futura

Mi preme ora tornare alla domanda precedente, se valga la pena investire tempo e denaro nella ottimizzazione della produzione di nuovi radiometalli terapeutici. Il concetto espresso precedentemente ha un fascino indiscutibile: la creazione di proiettili intelligenti sembrerebbe la panacea nella cura dei tumori. Tuttavia, occorre ricordare che tali molecole distruggono sì i tessuti tumorali

con precisione molecolare, ma non fanno nulla nel modificare i processi biochimici che hanno causato il tumore. Effettivamente, tali approcci possono essere visti più oggettivamente come bisturi molecolari con i quali effettuare precise operazioni di resezione; ma, esattamente come nella chirurgia oncologica tradizionale, ritenere che questi trattamenti curino il cancro è una conclusione molto azzardata. I casi di recidiva sono sempre possibili; inoltre, si stanno evidenziando un numero di condizioni per le quali il target di tali proiettili intelligenti scompare col tempo, realizzando una pseudo resistenza a tali trattamenti. Come succede spesso in casi simili, la promessa curativa è stata ingrandita da numerose ditte farmaceutiche [27], che possono giustificare prezzi estremamente elevati, data la difficile reperibilità e logistica di tali prodotti. Con questo non voglio dire che queste molecole saranno abbandonate: ritengo che avranno un loro posto (probabilmente meno *hyped*) tra gli strumenti disponibili a trattare varie patologie

oncologiche.

La scelta dei campi di ricerca su cui investire è una componente essenziale di sostenibilità; dati gli alti costi dello sviluppo radiofarmaceutico, è importante capire l'impatto a lungo termine, non solo nei paesi sviluppati, ma anche in quelli in via di sviluppo. Detto questo, è importante ricordare come la popolazione mondiale stia diventando sempre più vecchia, e molti futuristi pensano che l'uomo raggiungerà molto più spesso età oltre i 100 anni [28], possibilmente con meno acciacchi di vecchiaia. Infine, stiamo assistendo ad una pandemia silente di fenomeni depressivi e psichiatrici che colpiscono al cuore la parte più produttiva della società presente e futura: gli adolescenti ed i giovani adulti [29].

Le metodiche di *imaging* nucleare permettono di comprendere in dettaglio i meccanismi biochimici alla base di molte patologie, e per questo potrebbero essere uno strumento cruciale nel creare terapie adatte. A mio parere, particolare importanza rivestiranno in futuro lo studio di malattie infettive e meccanismi immunologici [30], di metodi per allungare una sana e funzionale vita [31], e come modificare i delicati equilibri neurorecettoriali per contrastare patologie depressive e psichiatriche [32]. Per fare ciò, occorrerà una interazione molto stretta tra i vari campi della conoscenza medica, la chimica e l'ingegneria.

Tuttavia, dal mio punto di vista prettamente (radio)chimico, supportare tali ricerche ed innovazioni, richiederà di essere in grado di sintetizzare e radiomarcare qualsiasi molecola d'interesse, quasi come si volesse creare una stampante molecolare 3D, ed il fatto che tali concetti comincino già ad emergere è un buon segno [33].



- [1] T. Ido et al. : *Labeled 2-deoxy-D-glucose analogs.  $^{18}\text{F}$ -labeled 2-deoxy-2-fluoro-D-glucose, 2-deoxy-2-fluoro-D-mannose and  $^{14}\text{C}$ -2-deoxy-2-fluoro-D-glucose*, Journal of Labelled Compounds and Radiopharmaceuticals, 14 (1978) 175.
- [2] S. Hess, P. F. Høilund-Carlsen, A. Alavi: *Interesting Images Historic Images in Nuclear Medicine 1976 The First Issue of Clinical Nuclear Medicine and the First Human FDG Study*, Clinical Nuclear Medicine, 39 (2014) 701.
- [3] M Reivich et al. : *The [ $^{18}\text{F}$ ]fluorodeoxyglucose method for the measurement of local cerebral glucose utilization in man*, PubMed, 44 (1979) 127.
- [4] International Atomic Energy Agency: *Technetium-99m Radiopharmaceuticals: Manufacture of Kits Technical Report Series N. 466*, Vienna (2008). [TRS466\(iaea.org\)](https://www.iaea.org/RS466)
- [5] N. Lepareur: *Cold Kit Labeling: The Future of  $^{68}\text{Ga}$  Radiopharmaceuticals?*, Frontiers in Medicine, 9 (2012) 812050.
- [6] Clemens Kratochwil et al. :  *$^{225}\text{Ac}$ -PSMA-617 for PSMA-Targeted  $\alpha$ -Radiation Therapy of Metastatic Castration-Resistant Prostate Cancer*, Journal of Nuclear Medicine, 57 (2016) 1941.
- [7] A. Dash, M. R. A. Pillai, F. F. Knapp Jr.: *Production of  $^{177}\text{Lu}$  for Targeted Radionuclide Therapy: Available Options*, Nucl. Med. Mol. Imaging, 49 (2015) 85.
- [8] A. K. Henderson-Robertson, C. F. Ramogida, P. Schaffer, V. Radchenko: *Development of  $^{225}\text{Ac}$  Radiopharmaceuticals: TRIUMF Perspectives and Experiences*, Curr. Radiopharm., 11 (2018) 156.
- [9] S. J. Archibald, L. Allott: *The aluminium- $^{18}\text{F}$ fluoride revolution: simple radiochemistry with a big impact for radiolabelled biomolecules*, EJNMMI radiopharm. chem., 6 (2021) 30.
- [10] B. Zhang et al. :  *$^{18}\text{F}$ Ethenesulfonyl Fluoride as a Practical Radiofluoride Relay Reagent*, Chemistry A European Journal, 25 (2019) 7163.
- [11] D. Zhou et al. :  *$^{18}\text{F}$ Tosyl fluoride as a versatile [ $^{18}\text{F}$ ]fluoride source for the preparation of  $^{18}\text{F}$ -labeled radiopharmaceuticals*, Scientific Reports, 13 (2023) 3182.
- [12] W. Chen et al. : *Direct arene C-H fluorination with  $^{18}\text{F}$  - via organic photoredox catalysis*, Science, 364 (2019) 1170.
- [13] D. Hernández-Valdés, S. Sadeghi: *Electrochemical Radiofluorination of Small Molecules: New Advances*, The Chemical Record, 21 (2021) 2397.
- [14] K. R. Scroggie, M. V. Perkins, J. M. Chalker: *Reaction of [ $^{18}\text{F}$ ]Fluoride at Heteroatoms and Metals for Imaging of Peptides and Proteins by Positron Emission Tomography*, Front. Chem., 23 (2021) 687678.
- [15] G. Pascali et al. : *Sulfur - fluorine bond in PET radiochemistry*, EJNMMI radiopharm. chem., 2 (2017) 9.
- [16] H. Hong et al. : *Rapid one-step  $^{18}\text{F}$  - radiolabeling of biomolecules in aqueous media by organophosphine fluoride acceptors*, Nature Commun., 10 (2019) 989.
- [17] G. Pascali, P. Watts, P. A. Salvatori: *Microfluidics in radiopharmaceutical chemistry*, Nuclear Medicine and Biology, 40 (2013) 776.
- [18] G. Pascali et al.: *Microfluidic approach for fast labeling optimization and dose-on-demand implementation*, Nuclear Medicine and Biology, 37 (2010) 547.
- [19] <https://www.imagine.com/en/products/imagine>
- [20] F. Menzel et al.: *FOMSy: 3D-printed flexible open-source microfluidic system and flow synthesis of PET-tracer*, J. Flow Chem., (2023) . <https://doi.org/10.1007/s41981-023-00267-z>

- [21] C. Mateos, M. J. Nieves-Remacha, J. A. Rincón: *Automated platforms for reaction self-optimization in flow*, *Reaction Chemistry & Engineering*, 4 (2019) 1536.
- [22] A.-C. Bédard et al.: *Reconfigurable system for automated optimization of diverse chemical reactions*, *Science*, 361 (2018) 1220.
- [23] G. D. Bowden, N. Chailanggar, B. J. Pichler, A. Maurer: *Scalable  $^{18}\text{F}$  processing conditions for copper-mediated radiofluorination chemistry facilitate DoE optimization studies and afford an improved synthesis of [ $^{18}\text{F}$ ]olaparib*, *Org. Biomol. Chem.*, 19 (2021) 6995.
- [24] S. Cherry et al.: *Total-Body PET: Maximizing Sensitivity to Create New Opportunities for Clinical Research and Patient Care*, *J. Nucl. Med.*, 59 (2018) 3.
- [25] P. Moskal et al.: *Positronium imaging with the novel multiphoton PET scanner*, *Science Advances*, 7 (2021) eabh4394.
- [26] E. Sayar et al.: *Reversible epigenetic alterations mediate PSMA expression heterogeneity in advanced metastatic prostate cancer*, *JCI Insight*, 8 (2023) e162907.
- [27] K. Jensen: *Novartis wins FDA OK for radiopharmaceutical drug, cashing in on Endocyte deal*, <https://www.biopharmadive.com/news/novartis-fda-approval-pluvicto-prostate-cancer-endocyte/620973/>
- [28] Emily Willingham: *Humans Could Live up to 150 Years, New Research Suggests*, *Scientific American*, May 25 (2021) <https://www.scientificamerican.com/article/humans-could-live-up-to-150-years-new-research-suggests/#>
- [29] J. Pasman et al.: *Epidemiological overview of major depressive disorder in Scandinavia using nationwide registers*, *The LANCET Regional Health. Europe*, (March 27, 2023) [https://www.thelancet.com/journals/lanepa/article/PIIS2666-7762\(23\)00039-X/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/lanepa/article/PIIS2666-7762(23)00039-X/fulltext)
- [30] W. Wei et al.: *ImmunoPET: Concept, Design, and Applications*, *Chem. Rev.*, 120 (2020) 3787.
- [31] J. M. Coughlin et al.:  *$^{18}\text{F}$ -XTRA PET for Enhanced Imaging of the Extrathalamic  $\alpha 4\beta 2$  Nicotinic Acetylcholine Receptor*, *Journal of Nuclear Medicine*, 59 (2018) 1603.
- [32] M. V. Vargas: *Psychedelics promote neuroplasticity through the activation of intracellular 5-HT<sub>2A</sub> receptors*, *Science*, 379 (2023) 700.
- [33] D. Blair et al.: *Automated iterative Csp<sup>3</sup>-C bond formation*, *Nature*, 604 (2022) 92.

una tesi sul  $^{18}\text{F}$  e da allora ha svolto attività di ricerca nel campo della radiochimica PET. Dopo aver conseguito il dottorato di ricerca sotto la supervisione di P.A. Salvadori (IFC-CNR, Italia) e W.C. Eckelman (NIH, USA), ha lavorato sia in ambito di ricerca che commerciale, in diversi paesi europei, concentrandosi sempre sullo sviluppo di nuovi radiofarmaci PET. È entrato in ANSTO (Sydney, Australia) come leader del team di radiochimica nel 2013; mentre ancora parte di ANSTO, ha assunto la posizione di Principal Radiopharmaceutical Scientist presso il Prince of Wales Hospital e di Professore Associato Conjoint presso la School of Chemistry (UNSW), al fine di aumentare ulteriormente l'efficienza dei percorsi traslazionali. È inoltre membro attivo e componente del consiglio di amministrazione di diverse associazioni professionali nel campo della chimica, dei radiofarmaci e dell'imaging molecolare. L'esperienza di Giancarlo spazia dai metodi di radiomarcatura, alla progettazione e ottimizzazione di radiofarmaci, alle tecniche di imaging, alle normative di produzione (GMP) e agli approcci di automazione. In quest'ultimo campo rappresenta uno dei pionieri nell'utilizzo di sistemi microfluidici nei processi radiochimici e tuttora studia questo campo. I suoi interessi attuali sono diretti a migliorare l'accesso di una migliore diagnostica e terapia radioattiva ad una popolazione più ampia, studiando nuove molecole, inventando nuovi metodi e ideando nuovi nuovi strumenti.

---

**Giancarlo Pascali:** è un leader di fama internazionale nelle scienze radiofarmaceutiche, in particolare, nella ricerca e sviluppo di nuovi traccianti, metodi radiochimici e strategie di automazione. Il Dott. Giancarlo Pascali si è laureato presso l'Università di Pisa (Italia) nel 2001 con



# Superconduttività: dalla Fisica delle Particelle all'Adroterapia

**Lucio Rossi**

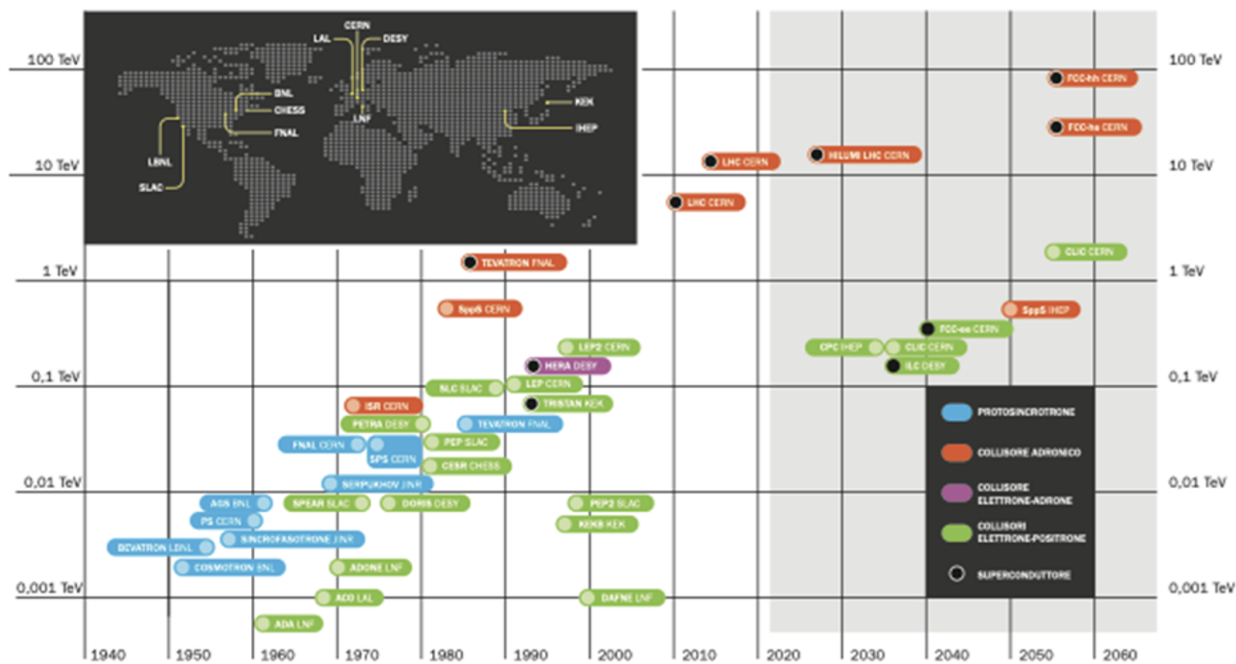
*Dipartimento di Fisica, Università di Milano  
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sez. di Milano, Milano, Italia*

---

**L**a superconduttività ha accompagnato la crescita esponenziale dell'energia e della luminosità degli acceleratori di particelle negli ultimi 50 anni e da lì è penetrata nella società. In particolare i magneti superconduttori sono l'applicazione con maggior impatto: basti pensare ai circa 5000 grandi magneti superconduttori che ogni anno vengono costruiti per altrettanti sistemi di diagnostica medica basata su immagine per risonanza magnetica. Gli acceleratori di particelle, in particolare i grandi collisori adronici o i LINAC per elettroni, vanno riconosciuti come un volano che ha generato lo sviluppo della tecnologia superconduttiva.

Lo sviluppo dei magneti superconduttori, ed ugualmente delle cavità a radiofrequenza (RF) superconduttive, [1, 2], richiede uno sforzo costante e continuo per decenni, come tipicamente richiesto dai grandi progetti per fisica delle particelle o per la fusione termonucleare controllata. Per esempio il Large Hadron Collider (LHC) del CERN di Ginevra, è stato il culmine di 40 anni di

sviluppi, prima per il collisore Tevatron al Fermilab, poi HERA al Desy e infine RHIC a Brookhaven. LHC stesso ha richiesto un R&D specifico di oltre dieci anni e poi altri venti per industrializzazione, costruzione e *commissioning*. Il progetto High Luminosity LHC (HiLumi o HL-LHC), pur essendo solo un upgrade di LHC, ha richiesto ben 15 anni di R&D per poter aumentare i campi magnetici dagli 8 T di LHC ai 12 T necessari nei magneti delle inserzioni ad alta luminosità (ATLAS e CMS) [3]. E già da diversi anni sono iniziati gli studi per il post-LHC collider. Potrebbe essere un circolare basato su magneti superconduttori ancora più potenti, 16 T, inseriti nel tunnel LHC (progetto detto High-Energy LHC o HE-LHC) oppure installati nel nuovo tunnel da quasi 100 km che il CERN e la comunità Europea dei fisici delle Particelle han proposto come Future Circular Collider (FCC). Oppure potrebbe essere un acceleratore lineare tipo l'International Linear Collider (ILC) propugnato dal Giappone con il supporto di numerose altre frange della comunità di fisica delle alte energie. Entrambi i progetti si fondano su tecnologie basate sulla superconduttività: magneti superconduttori potentissimi e possibilmente a basso consumo nel caso dei collisori circolari tipo FCC e cavità RF



**Figura 1:** La storia degli acceleratori e collisori. Energia del centro di massa rispetto all'anno di funzionamento. I cerchi neri indicano le macchine superconduttrici. (INFN-Communication Office: © Infn-Asimmetrie(Hylab))

di basso consumo e grande efficacia nel caso di acceleratori lineari. In figura 1 si mostra come lo sviluppo degli ultimi 30 anni ma anche il futuro nei prossimi 20 anni sia dominato da acceleratori superconduttivi sia per adroni che - quasi sempre - anche per leptoni.

## Dai quark alla medicina

Fino a qualche anno fa la superconduttività aveva una relativa bassa diffusione nelle tecnologie medico-sanitarie, eccetto che per la risonanza magnetica, come sopra citato. Alcuni ciclotroni o sincrociclotroni con magneti superconduttivi sono stati costruiti e utilizzati, principalmente per adroterapia, cioè per uso diretto delle particelle pesanti per eliminare zone tumorali lasciando, quasi, intatto il tessuto circostante. L'uso di particelle di qualche centinaio di MeV per nucleone è una tecnica ben nota per la cura per esempio di tumori radioresistenti e quindi non curabili con i classici raggi X [4]. Ci sono ben 24 centri di adroterapia in Europa (105 nel mondo). Ebbene di questi solo quattro in Europa (e solo 12 nel mondo) utilizzano ioni pesanti, come il carbonio: tutti gli altri usano solo protoni. Questo

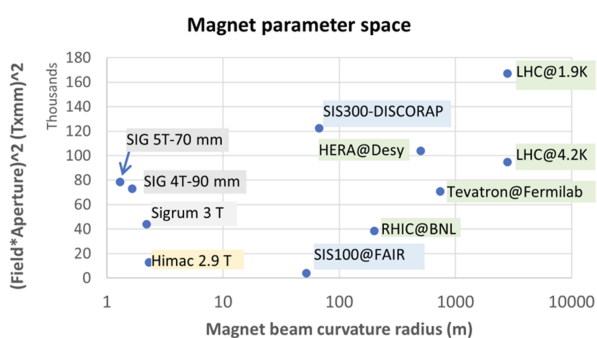
nonostante che la maggior efficacia terapeutica degli ioni pesanti rispetto ai protoni sia ben stabilita. La causa di questa difficoltà ad imporsi della cura con ioni pesanti risiede nel fatto che le dimensioni dell'acceleratore e delle linee di fascio sono molto maggiori per gli ioni carbonio che per i protoni (e senza confronto con la piccola taglia, da sala operatoria, di un acceleratore che produce raggi X tramite elettroni).

Una ulteriore considerazione è che quasi tutti i centri che usano protoni hanno un sistema ruotante di puntamento del fascio sul paziente (chiamato gantry), che permette di irraggiare la zona tumorale da direzioni multiple e non complanari, esattamente come il trattamento a raggi X, mentre pochissimi centri per ioni pesanti hanno un gantry. Per ora solo un centro in Europa (Heidelberg, Germania) ha installato un gantry ruotante per ioni. Il suo esempio non è stato seguito per la sua mole enorme (660 tonnellate, per 26 m di diametro) e i conseguenti costi altissimi sia per lo strumento in sé sia per l'impianto (ingegneria civile, potenza elettrica, impianti tecnici). Una soluzione parziale è stata recentemente trovata in Giappone, un paese all'avanguardia nelle tecnologie fisiche per la medicina, anche a causa



della elevata età media (l'unico a superare l'Italia tra i grandi paesi). La soluzione sperimentata dall'industria Toshiba qualche anno fa al centro HIMAC (a sud di Tokyo) è basata sull'uso di magneti superconduttori con un numero notevole di cryocooler (27) per evitare l'uso di elio liquido. Il gantry pesa solo 300 tonnellate sviluppate su 13 m ed è stato riprodotto con miglioramenti graduali recentemente con l'installazione alla Yamagata University (50 km nord di Fukushima) sempre per opera di Toshiba.

In Europa si è recentemente formata una collaborazione per esplorare la possibilità di utilizzare magneti superconduttori con tecnologie derivate dai collisori adronici per fisica delle particelle, tipo LHC. Infatti i magneti per collisori sono relativamente sottili e lunghi e si sono dimostrati molto affidabili (basti pensare alle migliaia di magneti installati e funzionanti quotidianamente in LHC: quasi 2 mila da 5 a 15 m di lunghezza, 8T, e quasi 8 mila di più piccola taglia da 2-3 T).



**Figura 2:** Vari magneti del passato e del futuro (SIG and Sigum) in uno speciale spazio dei parametri.

## Il gantry superconduttore europeo per ioni pesanti

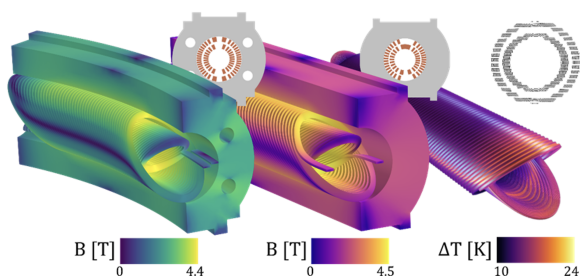
Lo sforzo europeo è volto a progettare e costruire un gantry avanzato entro il presente decennio, di tipo innovativo: la taglia dovrebbe essere minore di 100 tonnellate e il diametro di 7-10 m. Il gantry è basato su magneti superconduttori da 4 T, con una apertura magnetica di 80 mm su una lunghezza di 1.5 m ciascuno e con curvatura ridotta, circa 1.5 m, per tenere il gantry molto compatto. Quest'ultima caratteristica, la curvatura così piccola, è la grande novità rispetto ai collisori per

fisica fondamentale, talmente e lunghi da avere raggi di curvatura da 100 m (FAIR SIS100) a 3000 m (LHC), quindi praticamente dritti. Non solo un raggio di curvatura così serrato richiede uno studio e una ingegneria del magnete molto complessi, ma anche il *ramping rate* che passa dai 0.01T/s di LHC a 0.4 T/s richiesto dall'adroterapia pone una sfida addizionale notevole perché non si vuole utilizzare elio liquido in un ambiente con pazienti (inoltre l'elio liquido bifasico mal si adatta a un sistema ruotante). Nella Figura 2 è visualizzato nello spazio dei parametri il punto operativo del magnete dipolare SIG studiato in collaborazione da INFN e CERN da un lato e da CNAO (Pavia) e MedAustron (Vienna) dall'altro, questi ultimi essendo due tra i maggiori centri di adroterapia con ioni nel mondo. SIG è situato nel punto più difficile, dove l'energia del magnete (proporzionale al quadrato dell'apertura per il campo) è alta e il raggio di curvatura piccolissimo. A parte la curvatura e il *ramping rate*, SIG è basato su tecnologie LHC, con magneti detti CosTheta e cavo superconduttore tipo Rutherford. Si vuole arrivare a collaudare un dimostratore<sup>1</sup> SIG entro due anni [5].

Oltre a questa collaborazione ristretta e molto focalizzata, una vasta collaborazione europea cofinanziata da EC-H2020 con i programmi HITRplus e IFAST, sta esplorando una via parallela per raggiungere lo scopo che ci si è prefisso: la via del CCT (Canted CosTheta) [8]. Questa nuova configurazione è stata messa a punto per la prima volta per l'uso in un acceleratore per il progetto HiLumi [9], ad un livello di campo di 3 T, per campi statici e in configurazione dritta. Se funzionasse a 4 T e con raggi di curvatura e *ramping rate* come SIG, la configurazione a CCT avrebbe il vantaggio di essere meno costosa e più facile da attuare che non la classica CosTheta di SIG. Proprio per questa promessa di aprire un nuovo filone per magneti superconduttori meno costosi e più semplici, la collaborazione HITRplus e IFAST per il CCT, guidata da INFN-Milano-LASA come per SIG, è molto più vasta, comprendendo 8 Istituti e diverse industrie. Anche qui son previsti entro il 2025 ben tre dimostratori, di cui uno in HTS (High Temperature Superconductors) come test tecnologico. Questi

<sup>1</sup>Un dimostratore è un prototipo dell'apparato ma in scala ridotta

dimostratori in CCT saranno comunque meno vicini a un impiego diretto in un gantry di quanto non lo sia il dimostratore SIG. In Figura 3 sono condensati schematicamente i tre dimostratori dei programmi HITRIPlus e IFAST [10].



**Figura 3:** Sezioni trasversali e prospetto 3D dei campi magnetici dei CCT Nb-Ti HITRIplus curvi (sinistra), diretto combinato CCT Nb-Ti IFAST (centro), e margini di temperatura di CCT basato su HTS IFAST (destra).

Comunque vada, attraverso un magnete CosTheta oppure CCT, il futuro e sviluppo di una terapia di punta come l'adroterapia con ioni pesanti passa quindi da un trasferimento tecnologico dalle fisica delle particelle alla medicina, a ulteriore dimostrazione di come la ricerca fondamentale sia anche un volano tecnologico senza pari.



- [1] L. Rossi: *Technical Challenges for Future Accelerators* In: Bonolis, L., Maiani, L., Pancheri, G. (eds.) Bruno Touschek 100 Years. Springer Proceedings in Physics, vol 287 (2023), Springer, Berlino (2023). [https://doi.org/10.1007/978-3-031-23042-4\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-031-23042-4_14)
- [2] L. Rossi, L. Bottura: *Superconducting Magnets for Particle Accelerators*, Review of Accelerator Science and Technology, 5 (2012) 51.
- [3] O. Brüning, L. Rossi: *The High-Luminosity Large Hadron Collider*, Nature Reviews - Physics, Comments, 11 (2019) 241.
- [4] A. Degiovanni, U. Amaldi: *History of Hadron Therapy Accelerators*, Physica Medica, 31 (2015) 322.
- [5] M. Prioli et al.: *Design of a 4 T Curved Demonstrator Magnet for a Superconducting Ion Gantry*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 33 (2023) 1.
- [6] <https://www.hitriplus.eu/>
- [7] <https://ifast-project.eu/>
- [8] E. De Matteis et al.: *Straight and Curved Canted Cosine Theta Superconducting Dipoles for Ion Therapy: Comparison Between Various Design Options and Technologies for Ramping Operation*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 33 (2023) 4401205.

[9] O. Brüning, Lucio Rossi eds.: *The High Luminosity Large Hadron Collider - The New Machine for Illuminating the Mysteries of Universe*, WORLD SCIENTIFIC, Singapore (2015).

[10] L. Rossi et al.: *Magnet technology and design of superconducting magnets for heavy ion gantry for hadron therapy*, Presented at Int. Particle Accelerator Conference IPAC2023, Venezia 8-12 May 2023,



**Lucio Rossi:** è Professore Ordinario di Fisica Sperimentale all'Università di Milano dove si è laureato nel 1980 e ha iniziato gli studi lavorando su superconduttività per acceleratori e rivelatori di particelle. Dal 2001 al 2020, al CERN di Ginevra, ha diretto la costruzione dei magneti superconduttori per LHC e ha fondato e diretto il progetto High Luminosity LHC. Dal 2020, tornato all'Università di Milano, al laboratorio LASA dell'INFN, conduce diversi progetti per l'adroterapia, per il Muon Collider, e ha proposto e coordina il progetto PNNR-IRIS, una infrastruttura di ricerca per la superconduttività distribuita in sei centri, di cui uno è all'Università del Salento.

# Energia e quantità di moto in relatività ristretta. Una derivazione elementare

**Luca Peliti**

*Santa Marinella Research Institute, Santa Marinella (Rm), Italia*

---

**I**l modo in cui i testi introduttivi derivano le espressioni della quantità di moto e dell'energia in relatività ristretta è spesso insoddisfacente. In alcuni si fa ricorso a considerazioni quantistiche o elettrodinamiche, mentre in altri si introducono concetti non elementari, o addirittura fuorvianti, come la “massa relativistica”. È invece possibile ottenere, seguendo delle idee descritte da Einstein nel 1935, una derivazione del tutto elementare di queste espressioni basandosi soltanto sulle trasformazioni di Lorentz, sulle leggi di conservazione, e sul limite Newtoniano. Il ragionamento così ottenuto fornisce un'introduzione chiara e logicamente coerente ai concetti fondamentali della dinamica relativistica.

## 1. Introduzione

Molti testi forniscono una derivazione elementare della cinematica della relatività ristretta, ba-

sandosi in ultima analisi sulla prima parte del lavoro fondamentale di Einstein del 1905 [1]. Partendo dai due postulati dell'equivalenza totale dei sistemi di riferimento inerziali, e della costanza della velocità della luce in tutti questi sistemi, è in effetti facile ottenere l'espressione delle trasformazioni di Lorentz delle coordinate spazio-temporali. Una derivazione semplice ed elegante fa uso del cosiddetto  $k$ -calcolo di Bondi [2], basato a sua volta sull'effetto Doppler. Tuttavia il passaggio dalla cinematica (le trasformazioni di Lorentz) alla dinamica, e in particolare alle espressioni relativistiche della quantità di moto e dell'energia, viene spesso compiuto facendo uso di concetti più sofisticati, come quello di quadrivettore, o di considerazioni quantistiche. (Un esempio di questo approccio è la “derivazione elementare” suggerita da F. Rohrlich [3], che fa uso delle espressioni della quantità di moto e dell'energia di un fotone di frequenza  $\nu$ .) Lo stesso Einstein aveva inizialmente derivato la relazione fra massa ed energia mediante un uso esplicito dell'elettrodinamica [4], e non limitandosi alle considerazioni cinematiche sviluppate

nella prima parte del suo lavoro del 1905, che si basano sulla costanza della velocità della luce, ma non dipendono altrimenti dalle equazioni di Maxwell.

Einstein aveva notato questo problema, e propose nel 1935 una derivazione elementare della relazione fra massa ed energia indipendente dal suo argomento del 1905, motivandola con le seguenti parole [5]:

“La teoria della relatività ristretta origina dalle equazioni elettromagnetiche di Maxwell. Di conseguenza anche nella derivazione dei concetti meccanici e delle loro relazioni la considerazione dei concetti relativi al campo elettromagnetico ha svolto un ruolo essenziale. È naturale porsi a domanda se queste relazioni ne siano indipendenti, perché la trasformazione di Lorentz, che è la base reale della relatività ristretta, non ha di per sé niente a che fare con la teoria di Maxwell e perché non sappiamo fino a che punto i concetti di energia della teoria di Maxwell possano essere mantenuti di fronte ai dati della fisica molecolare. Nelle considerazioni che seguono, a parte la trasformazione di Lorentz, ci baseremo soltanto sull’assunzione dei principi di conservazione della quantità di moto e dell’energia.”

Il ragionamento di Einstein sfrutta un esperimento ideale introdotto da G. N. Lewis e R. C. Tolman [6] e discusso ulteriormente da P. S. Epstein [7], in cui si considerano urti fra coppie di particelle in diversi sistemi di riferimento, e si cercano le espressioni della quantità di moto e dell’energia postulandone la conservazione. È interessante notare che l’articolo di Lewis e Tolman, così come quello di Epstein, considerano solo urti elastici, ed ottengono così l’espressione relativistica della quantità di moto, mentre forniscono un argomento insoddisfacente per l’equivalenza massa-energia considerando la variazione della “massa relativistica” in funzione della velocità. La “massa relativistica” è in effetti un concetto piuttosto problematico [8, 9], e c’è un consenso crescente ad evitarne l’introduzione nell’insegnamento della relatività. Invece Einstein ottiene l’equivalenza semplicemente estendendo l’argo-

mento agli urti anelastici. L’efficacia di questo approccio per introdurre i concetti fondamentali della relatività speciale è stata ben notata da R. F. Feynman che, nelle sue *Lectures* [10, Vol. I. Secs. 16-4, 16-5], ottiene le espressioni relativistiche della quantità di moto e dell’energia in un modo che assomiglia da vicino a quello di Einstein. (Tuttavia, la derivazione di Feynman è viziata dal suo uso della “massa relativistica”.) L’argomento di Einstein è stato più recentemente discusso da F. Flores [11], che identifica entro il concetto dell’equivalenza fra massa ed energia tre affermazioni collegate ma distinte, e confronta l’argomento di Einstein del 1935 con la sua derivazione originale e con la derivazione ottenuta da Friedman nel 1983 [12, p. 142ss], che si basa sulla considerazione delle equazioni di Newton in relatività ristretta.

In questa nota, presento questa linea di pensiero nella speranza che la si possa trovare utile per la presentazione di questi concetti fondamentali della relatività ristretta in corsi introduttivi per studenti di fisica e matematica. Mentre la derivazione dell’espressione relativistica della quantità di moto nella sezione è vicina agli argomenti di Epstein e Feynman, la discussione dell’espressione dell’energia cinetica e dell’equivalenza massa-energia è più vicina all’argomentazione di Einstein.

## 2. Trasformazioni di Lorentz e postulati dinamici

Seguendo il lavoro di Einstein del 1905 [1, §2], i concetti cinematici della relatività ristretta si basano sui seguenti postulati:

- (i) Le leggi che governano le trasformazioni degli stati dei sistemi fisici hanno la stessa forma in sistemi di riferimento animati da moto traslazionale uniforme l’uno rispetto all’altro.
- (ii) Esiste una classe di tali sistemi di riferimento (*i sistemi di riferimento inerziali*) in cui la velocità della luce assume lo stesso valore  $c$ , indipendentemente dallo stato di moto della sua sorgente.

Scegliamo d’ora in poi unità di misura in cui  $c = 1$  e limitiamoci a considerare sistemi inerziali. Ba-

sandosi su questi postulati, è facile ottenere le trasformazioni di Lorentz nella forma seguente. Consideriamo due sistemi di riferimento,  $K$  e  $K'$ , tali che  $K'$  è animato di moto traslazionale uniforme nella direzione degli  $x$  positivi e con velocità  $V$  rispetto a  $K$ . Allora l'evento di coordinate  $(t', x', y', z')$  in  $K'$  ha le coordinate  $(t, x, y, z)$  in  $K$ , dove

$$\begin{aligned} t &= \gamma(V) (t' + Vx'), \\ x &= \gamma(V) (x' + Vt'), \\ y &= y', \\ z &= z', \end{aligned} \quad (1)$$

ed abbiamo definito

$$\gamma(V) = \frac{1}{(1 - V^2)^{1/2}}. \quad (2)$$

La stessa relazione vale per i differenziali  $dt, dx$ , ecc. Dividendo per  $dt$ , otteniamo le regole della trasformazione delle velocità:

$$\begin{aligned} u_x &= \frac{dx}{dt} = \frac{u'_x + V}{1 + u'_x V}, \\ u_y &= \frac{dy}{dt} = \frac{u'_y}{\gamma(V) (1 + u'_x V)}, \\ u_z &= \frac{dz}{dt} = \frac{u'_z}{\gamma(V) (1 + u'_x V)}. \end{aligned} \quad (3)$$

Per introdurre concetti dinamici abbiamo ovviamente bisogno di ulteriori postulati. Faremo dunque le seguenti ipotesi:

- (iii) La quantità di moto  $\mathbf{P}$  e l'energia  $E$  di una particella animata dalla velocità  $\mathbf{u}$  nel sistema di riferimento  $K$  hanno rispettivamente le espressioni

$$\mathbf{P} = m\mathbf{u} F(u), \quad E = E_0 + m G(u), \quad (4)$$

dove  $E_0$  è una costante, che può essere chiamata l'energia a riposo,  $m$  è una costante positiva (che è relativisticamente invariante, cioè non cambia al cambiare di sistema di riferimento, ed è quindi indipendente dalla velocità della particella) che chiameremo semplicemente la massa della particella, e dove  $F(u)$  e  $G(u)$  sono funzioni universali e monotone crescenti di  $u = |\mathbf{u}|$ .

- (iv) Per  $u \ll 1$  queste espressioni si riducono alle note espressioni classiche. Si ha in

particolare

$$F(u) = 1 + O(u^2), \quad G(u) = \frac{1}{2}u^2 + O(u^4). \quad (5)$$

(Se, come è ragionevole supporre,  $F(u)$  and  $G(u)$  sono funzioni analitiche di  $\mathbf{u}$ , il loro sviluppo di Taylor contiene solo potenze pari di  $u$ .)

- (v) La quantità di moto totale  $\mathbf{P}^{\text{tot}}$  e l'energia totale  $E^{\text{tot}}$  di un sistema di particelle sono date rispettivamente dalla somma di  $\mathbf{P}$  e di  $E$  su tutte le particelle del sistema (questo esclude ogni interazione a distanza).
- (vi) *Conservazione della quantità di moto e dell'energia:* Supponiamo che in un sistema di particelle abbiano luogo degli urti, elastici o inelastici. Allora, in ogni sistema di riferimento,  $\mathbf{P}^{\text{tot}}$  ed  $E^{\text{tot}}$  conservano lo stesso valore prima e dopo ogni urto.

Come corollario, la velocità di ogni particella rimane costante in assenza di urti, poiché si possono considerare sistemi costituiti da particelle singole e indipendenti.

### 3. Urti elastici e quantità di moto relativistica

Consideriamo adesso una coppia di particelle, cioè un sistema costituito da due particelle di uguale massa. Supponiamo che in un sistema di riferimento  $K$  esse abbiano velocità opposte  $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2 = -\mathbf{u}_1$ . Supponiamo inoltre che le particelle subiscano un urto elastico, in seguito al quale esse assumano rispettivamente le velocità  $\mathbf{w}_1$  e  $\mathbf{w}_2$ . Per la conservazione della quantità di moto si deve avere  $\mathbf{w}_1 = -\mathbf{w}_2$ , indipendentemente dalla forma della funzione  $F(u)$ . In effetti, si ha  $\mathbf{P}_{\text{in}}^{\text{tot}} = 0$  prima dell'urto. Per la legge di conservazione si deve avere, dopo l'urto,

$$\mathbf{P}_{\text{out}}^{\text{tot}} = 0 = m\mathbf{w}_1 F(w_1) + m\mathbf{w}_2 F(w_2). \quad (6)$$

Quindi i vettori  $\mathbf{w}_1$  e  $\mathbf{w}_2$  sono antiparalleli, e si ha

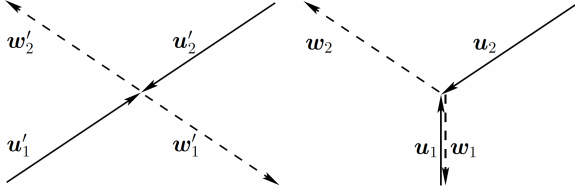
$$\frac{|\mathbf{w}_1|}{|\mathbf{w}_2|} = \frac{F(w_2)}{F(w_1)}. \quad (7)$$

Poiché la funzione  $F(u)$  è monotona crescente, questa relazione può essere soddisfatta solo se

$|\mathbf{w}_1| = |\mathbf{w}_2|$ , e si ha quindi  $\mathbf{w}_1 = -\mathbf{w}_2$ . Ora la conservazione dell'energia impone

$$w \equiv |\mathbf{w}_{1,2}| \equiv |\mathbf{w}_1 - \mathbf{w}_2| = |\mathbf{u}_1 - \mathbf{u}_2| \equiv |\mathbf{u}_{1,2}| \equiv u.$$

Infatti, l'energia cinetica totale prima dell'urto è data da  $2mG(u)$ , e dopo l'urto è data da  $2mG(w)$ . Dato che  $G(u)$  è una funzione monotona crescente di  $u$ , questa condizione può essere soddisfatta solo se  $w = u$ .



**Figura 1:** Urto di una coppia di particelle di uguale massa. A sinistra: nel sistema di riferimento  $K'$ . A destra: nel sistema di riferimento  $K$ . Le figure sono schematiche e non implicano nessuna relazione quantitativa.

Consideriamo ora il caso speciale in cui la variazione della velocità è parallela all'asse  $y$ . (Questo esclude le collisioni frontali, in cui le particelle scambiano semplicemente le loro velocità.) Siano rispettivamente  $\mathbf{u}'_1 = (V', v', 0)$  e  $\mathbf{u}'_2 = -\mathbf{u}'_1$  (vedi Fig. 1) le velocità delle particelle nel sistema di riferimento  $K'$ . Consideriamo ora l'urto nel sistema di riferimento  $K$ , che si muove rispetto a  $K'$  con velocità  $V'$  nella direzione  $x$ . In questo sistema di riferimento, le velocità  $\mathbf{u}_{1,2}$  delle particelle sono date rispettivamente da

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_1 &= (0, v, 0), \\ \mathbf{u}_2 &= (-V, -w, 0), \end{aligned} \quad (8)$$

dove

$$\begin{aligned} V &= \frac{2V'}{1 + V'^2}, \\ v &= \frac{v'}{\gamma(V')(1 - V'^2)}, \\ w &= \frac{v'}{\gamma(V')(1 + V'^2)}. \end{aligned} \quad (9)$$

È facile verificare che

$$\gamma(V) = \frac{1}{(1 - V^2)^{1/2}} = \frac{1 + V'^2}{1 - V'^2}, \quad (10)$$

e quindi che

$$v = w \gamma(V). \quad (11)$$

Si può ottenere questa relazione anche applicando l'eq. (3) alla trasformazione dal sistema di riferimento  $K'$  al sistema  $K''$ , animato, rispetto al sistema  $K'$ , da un moto traslazionale di velocità  $-V'$  parallela all'asse  $x$ . In questo sistema di riferimento la componente  $x$  della velocità  $\mathbf{u}''_2$  si annulla, mentre quella della velocità  $\mathbf{u}''_1$  è pari a  $V'$ , e così le velocità delle due particelle sono scambiate.

Consideriamo adesso la conservazione della quantità di moto. La variazione  $\Delta\mathbf{P}_1$  della quantità di moto della particella 1 è data da

$$\Delta\mathbf{P}_1 = -2mv F(v) \mathbf{e}_y, \quad (12)$$

dove  $\mathbf{e}_y$  è il versore dell'asse  $y$ . La quantità corrispondente per la particella 2 è data da

$$\Delta\mathbf{P}_2 = 2mw F(u_2) \mathbf{e}_y, \quad (13)$$

dove  $u_2 = \sqrt{V^2 + w^2}$ . Assumiamo momentaneamente che  $v, w \ll V$ : allora  $F(v) \simeq 1$  e  $u_2 \simeq V$ . Dalla conservazione della quantità di moto otteniamo  $\Delta\mathbf{P}_1 + \Delta\mathbf{P}_2 = 0$ , che implica

$$mv = mw F(V). \quad (14)$$

Poiché  $w = v/\gamma(V)$ , otteniamo

$$F(V) = \gamma(V) = \frac{1}{\sqrt{1 - V^2}}. \quad (15)$$

Avendo ottenuto questo risultato per  $v, w \ll V$ , è facile vedere che esso vale anche per valori più elevati di  $v$  e  $w$ , sostituendo a  $V$  la velocità della corrispondente particella. Abbiamo infatti

$$mv F(v) = mw F(w) = \frac{mv}{\gamma(V)} F(u_2), \quad (16)$$

da cui segue

$$F(u_2) = F(v)\gamma(V), \quad (17)$$

e cioè

$$\frac{1}{\sqrt{1 - u_2^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2}} \frac{1}{\sqrt{1 - V^2}}, \quad (18)$$

un'identità che è facile verificare direttamente.

In molti testi elementari si preferisce scrivere-

re l'espressione della quantità di moto  $\mathbf{P}$  di una particella animata dalla velocità  $\mathbf{u}$  nella forma

$$\mathbf{P} = M(u) \mathbf{u}, \quad (19)$$

dove  $M(u)$  (che corrisponde a  $mF(u)$  nell'eq. (4)) è la "massa relativistica". Questa espressione si trova in diversi testi elementari, ma è del tutto fuorviante. L'opinione di Einstein al riguardo è ben espressa in una sua lettera del 1948 [13]:<sup>1</sup>

"Non è bene parlare di  $M = m/\sqrt{1 - v^2/c^2}$  come della massa di un corpo in movimento, dato che non si può dare alcuna chiara definizione di  $M$ . È meglio limitarsi al concetto di massa a riposo  $m$ . Si possono quindi dare le espressioni della quantità di moto e dell'energia, quando si sia specificato il comportamento inerziale di corpi animati da grandi velocità."

La "massa relativistica" venne introdotta per cercare di conservare l'espressione della legge di Newton nella forma

$$\mathbf{F} = M \mathbf{a}, \quad (20)$$

dove  $\mathbf{a} = d\mathbf{v}/dt$  è l'accelerazione. Tuttavia questa relazione non può valere in meccanica relativistica. Infatti, se *definiamo* la forza  $\mathbf{F}$  mediante la relazione

$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{P}}{dt}, \quad (21)$$

(corrispondente all'originale legge di Newton) un breve calcolo mostra che si ottiene

$$\mathbf{F} = \gamma m [\mathbf{a} + \gamma^2 (\mathbf{v} \cdot \mathbf{a}) \mathbf{v}]. \quad (22)$$

In particolare, si ha

$$\mathbf{F} = \frac{m}{\sqrt{1 - v^2}} \mathbf{a}, \quad (23)$$

se  $\mathbf{F}$  è perpendicolare a  $\mathbf{v}$ , mentre

$$\mathbf{F} = \frac{m}{(1 - v^2)^{3/2}} \mathbf{a}, \quad (24)$$

se  $\mathbf{F}$  è parallelo a  $\mathbf{v}$ . Quindi la proporzionalità fra  $\mathbf{F}$  ed  $\mathbf{a}$  non può essere espressa da uno scalare

<sup>1</sup>Ho tradotto direttamente dall'originale tedesco. Il testo inglese citato in [9] è leggermente diverso.

come la "massa relativistica".

## 4. Conservazione dell'energia cinetica

Consideriamo una particella animata dalla velocità  $\mathbf{u}' = (u', 0, 0)$ , parallela all'asse  $x$ , nel sistema di riferimento  $K'$ . La sua velocità  $\mathbf{u}$  nel sistema  $K$ , che è animato di moto traslazionale uniforme rispetto al sistema  $K'$  con velocità  $V$  nella direzione dell'asse  $x$  negativo, è data da  $\mathbf{u} = (u, 0, 0)$ , con

$$u = \frac{u' + V}{1 + u'V}. \quad (25)$$

Si vede facilmente che

$$\gamma(u) = (1 + u'V) \gamma(u') \gamma(V). \quad (26)$$

Se  $\mathbf{u}'$  non è parallelo all'asse  $x$ , ma si ha invece  $\mathbf{u}' = (u'_x, u'_y, u'_z)$ , si ha la relazione più generale

$$\gamma(u) = (1 + u'_x V) \gamma(u') \gamma(V), \quad (27)$$

che può essere ottenuta con un po' di algebra. È anche facile vedere che

$$\begin{aligned} u_x \gamma(u) &= (u'_x + V) \gamma(u') \gamma(V), \\ u_y \gamma(u) &= u'_y \gamma(u'), \\ u_z \gamma(u) &= u'_z \gamma(u'). \end{aligned} \quad (28)$$

Consideriamo adesso una coppia di particelle, animate da velocità opposte  $\mathbf{u}'_1, \mathbf{u}'_2 = -\mathbf{u}'_1$  nel sistema  $K'$ . Quindi  $u' = |\mathbf{u}'_1| = |\mathbf{u}'_2|$  è il valore comune del modulo delle loro velocità nel sistema  $K'$ . Indichiamo con  $\mathbf{u}_1$  e  $\mathbf{u}_2$  le rispettive velocità nel sistema  $K$ . Otteniamo

$$\gamma(u_1) + \gamma(u_2) = 2\gamma(u') \gamma(V). \quad (29)$$

Abbiamo visto che un urto elastico nel sistema  $K'$  non può cambiare il valore comune  $u'$  del modulo delle loro velocità. Quindi il secondo membro di questa uguaglianza non può cambiare in occasione di un urto elastico. Ma allora neanche il suo primo membro può cambiare. Indicando con  $\mathbf{w}_1$  e  $\mathbf{w}_2$  le velocità delle particelle nel sistema  $K$  dopo l'urto, otteniamo

$$\gamma(u_1) + \gamma(u_2) = \gamma(w_1) + \gamma(w_2). \quad (30)$$

Come sottolineato da Einstein [5, p. 227], queste equazioni hanno la forma di leggi di conservazione. Possiamo quindi interpretare  $^2 m (\gamma(u) - 1)$  come l'energia cinetica di una particella di massa  $m$  animata da una velocità  $\mathbf{u}$ . Per piccoli valori di  $u$  questa quantità è quindi data da

$$T = m (\gamma(u) - 1) \simeq \frac{1}{2} m u^2, \quad (31)$$

in accordo con il limite classico. Possiamo quindi porre

$$G(u) = \gamma(u) - 1. \quad (32)$$

Notiamo inoltre che, applicando l'eq. (28) a una coppia di particelle, si ottiene

$$\mathbf{u}_1 \gamma(u_1) + \mathbf{u}_2 \gamma(u_2) = 2\mathbf{V} \gamma(u') \gamma(V). \quad (33)$$

Otteniamo così la relazione seguente:

$$\mathbf{u}_1 \gamma(u_1) + \mathbf{u}_2 \gamma(u_2) = \mathbf{w}_1 \gamma(w_1) + \mathbf{w}_2 \gamma(w_2), \quad (34)$$

che può essere interpretata come la legge di conservazione della quantità di moto. Otteniamo così l'espressione relativistica della quantità di moto derivata nella Sezione 3.

## 5. Equivalenza massa-energia

Consideriamo adesso un urto totalmente inelastico in una coppia di particelle. Nel sistema di riferimento  $K'$  in cui  $\mathbf{P}^{\text{tot}} = 0$ , l'energia cinetica totale prima della collisione è data da

$$T'_{\text{in}} = 2m (\gamma(u') - 1). \quad (35)$$

Per semplicità, supponiamo che le velocità  $\mathbf{u}_{1,2}$  delle particelle siano parallele all'asse  $y$ . L'energia cinetica totale dopo l'urto si annulla, ma l'energia della particella risultante è aumentata di  $T'_{\text{in}}$ . Per la conservazione della quantità di moto la particella risultante è in quiete nel sistema  $K'$  ed è animata della velocità  $V$  parallela all'asse  $x$  nel sistema  $K$ . Denotiamo con  $M$  la sua massa. Nel sistema  $K$  la quantità di moto totale prima dell'urto è data da

$$\mathbf{P} = m (\mathbf{u}_1 \gamma(u_1) + \mathbf{u}_2 \gamma(u_2)) = 2m \mathbf{V} \gamma(u') \gamma(V), \quad (36)$$

<sup>2</sup>L'equazione (30) implica la conservazione di  $\sum (\gamma(u) + \text{const.})$ . Il valore della costante è scelto in modo che l'espressione si annulli per  $u \rightarrow 0$ .

mentre dopo l'urto vale

$$\mathbf{P} = M \mathbf{V} \gamma(V). \quad (37)$$

Otteniamo così

$$M = 2m \gamma(u') = 2m + T'_{\text{in}}. \quad (38)$$

Quindi, quando due particelle subiscono un urto completamente inelastico e formano una nuova particella, la massa della particella risultante è più grande della somma delle masse delle particelle che subiscono l'urto di una quantità esattamente uguale, nelle nostre unità, all'energia cinetica trasformata dall'urto in altre forme d'energia. È quindi possibile introdurre una scelta naturale per l'energia a riposo  $E_0$  di una particella, ponendola uguale (nelle nostre unità) alla sua massa, anche perché "dalla natura del concetto [che] è determinato solo a meno di una costante additiva, si può stipulare che  $E_0$  debba annullarsi insieme con  $m$ " [5, p. 229]. Possiamo quindi porre  $E_0 = m$  e identificare  $m \gamma(u)$  con l'energia totale di una particella, associando la variazione  $\Delta E$  dell'energia dall'energia cinetica ad un'altra forma con una variazione  $\Delta m = \Delta E$  della massa della particella. Nel caso più generale in cui le due particelle non si fondono, ma restano animate da velocità  $w'$  di ugual modulo dopo l'urto, si potrà esprimere la conservazione dell'energia mediante la

$$2m \gamma(u') = 2\bar{m} \gamma(w'), \quad (39)$$

dove  $\bar{m}$  è la massa di ciascuna particella dopo l'urto. Lo stesso vale nel sistema  $K$ , se teniamo conto della relazione

$$\gamma(u) = \gamma(u') \gamma(V), \quad (40)$$

che vale dato che tanto  $\mathbf{u}_1$  che  $\mathbf{u}_2$  sono paralleli all'asse  $y$ .

È quindi facile verificare che l'energia  $E$  e la quantità di moto  $\mathbf{P}$  di una particella di massa  $m$  soddisfano la relazione

$$E^2 - P^2 = m^2, \quad (41)$$

dove il secondo membro è relativisticamente invariante. Questa relazione vale anche nel limite di una particella di massa nulla, in cui assume la



forma

$$E = |\mathbf{P}|. \quad (42)$$

Come corollario, la massa non è additiva: la massa di un sistema di particelle dipende dal suo contenuto totale di energia nel sistema di riferimento in cui la sua quantità di moto si annulla. Quindi, quando delle onde luminose (di massa nulla) con quantità di moto opposte vengono emesse da una particella in quiete, la massa della particella cambia (come discusso nel lavoro di Einstein del 1905 [4]). Dato che il secondo membro dell'eq. (41) è invariante, può essere usato come punto di partenza per mostrare che l'energia  $E$  e la quantità di moto  $\mathbf{P}$  si combinano a formare un quadrivettore relativistico, una proprietà che può generalizzarsi ai sistemi di particelle.

È interessante sottolineare che l'approccio considerato può essere applicato solo se lo spazio ha più di una dimensione. Ci si può domandare se sia possibile percorrere un ragionamento analogo in uno spazio unidimensionale. Un attimo di riflessione mostra però che le funzioni  $F(u)$  e  $G(u)$  non possono essere completamente determinate dalle leggi di conservazione se lo spazio è unidimensionale. In questo caso, in effetti, urti elastici fra particelle, visti nel sistema di riferimento del centro di massa, producono semplicemente il cambio di segno delle velocità delle particelle incidenti. Di conseguenza, non è possibile ottenere una relazione che identifichi  $F(u)$ . Se si considerano urti anelastici, si ottiene una relazione fra  $F(u)$  e  $G(u)$ , ma comunque non si ottiene una espressione ben definita di queste funzioni.

Occorre sottolineare che questo approccio non si basa sulle equazioni di Maxwell (conservandone solo la costanza della velocità della luce), né fa uso di altri concetti meccanici, in particolare del concetto di forza, che è difficile da giustificare in relatività ristretta. Esattamente per questa ragione, Einstein critica l'uso del concetto di forza nella derivazione delle espressioni relativistiche dell'energia e della quantità di moto, contenuta nel libro di G. D. Birkhoff e R. E. Langer, *Relativity and Modern Physics* [14], come espresso dai paragrafi finali del suo lavoro del 1935 [5]:

“Così, nel libro appena menzionato, viene fatto un uso essenziale del concetto di forza, che non ha un significato

così diretto nella teoria della relatività come quello che ha in meccanica classica. Questo è dovuto al fatto che, in quest'ultima, bisogna considerare la forza come una funzione data delle coordinate di tutte le particelle, il che è evidentemente impossibile in teoria della relatività. Perciò ho evitato di introdurre il concetto di forza.

Inoltre, ho fatto attenzione ad evitare qualunque ipotesi relativa alle leggi di trasformazione dell'energia e della quantità di moto rispetto a una trasformazione di Lorentz.”



- [1] A. Einstein: *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, *Annalen der Physik*, 17 (1905) 891.
- [2] H. Bondi: *Relativity and Common Sense*, Dover, New York (1980).
- [3] F. Rohrlich: *An elementary derivation of  $E = mc^2$* , *Am. J. Phys.*, 58 (1990) 348.
- [4] A. Einstein: *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?*, *Annalen der Physik*, 18 (1905) 639.
- [5] A. Einstein: *Elementary derivation of the equivalence between mass and energy*, *Bull. Am. Math. Soc.*, 41 (1935) 223.
- [6] G. N. Lewis, R. C. Tolman: *The principle of relativity and non-Newtonian mechanics*, *Phil. Mag.*, 6 (1909) 510.
- [7] P. S. Epstein, *Über relativistische Statik*, *Annalen der Physik* 36 779-795 (1911).
- [8] C. G. Adler: *Does mass really depend on velocity, dad?*, *Am. J. Phys.*, 55 (1987) 739.
- [9] L. B. Okun: *The concept of mass*, *Physics Today*, 42 (1989) 31. : *The mass versus relativistic and rest masses*, *Am. J. Phys.*, 77 (2009) 430.
- [10] R. F. Feynman, R. Leighton, M. Sands: *The Feynman Lectures on Physics*, Addison-Wesley, Boston (1964, 1966).
- [11] F. Flores: *Einstein's 1935 derivation of  $E = mc^2$* , *Stud. Hist. Philos. Mod. Phys.*, 29 (1998) 223.
- [12] M. Friedman: *Foundations of Spacetime Theories*, Princeton University Press, Princeton (1983).
- [13] A. Einstein: lettera a Lincoln Barnett, 19 giugno 1948, citata in [9, p. 32].
- [14] G. D. Birkhoff, R. E. Langer: *Relativity and Modern Physics*, Harvard University Press, Cambridge (MA) (1923).

**Luca Peliti:** è stato Professore Ordinario di Meccanica Statistica presso l'Università "Federico II" di Napoli. Si è occupato di meccanica statistica, applicata in particolare a sistemi di interesse biologico, e dell'approccio statistico alla teoria dell'evoluzione. È autore, in particolare, di *Appunti di Meccanica Statistica* (Bollati Boringhieri, 2003) e di *Stochastic Thermodynamics: An Introduction*, in collaborazione con Simone Pigolotti, Princeton University Press (2021). Al momento è vice direttore del Santa Marinella Research Institute.



Numero XXI Anno 2023

Viaggio nella Scienza

# Ithaca

---

Sfide, parte B

---

