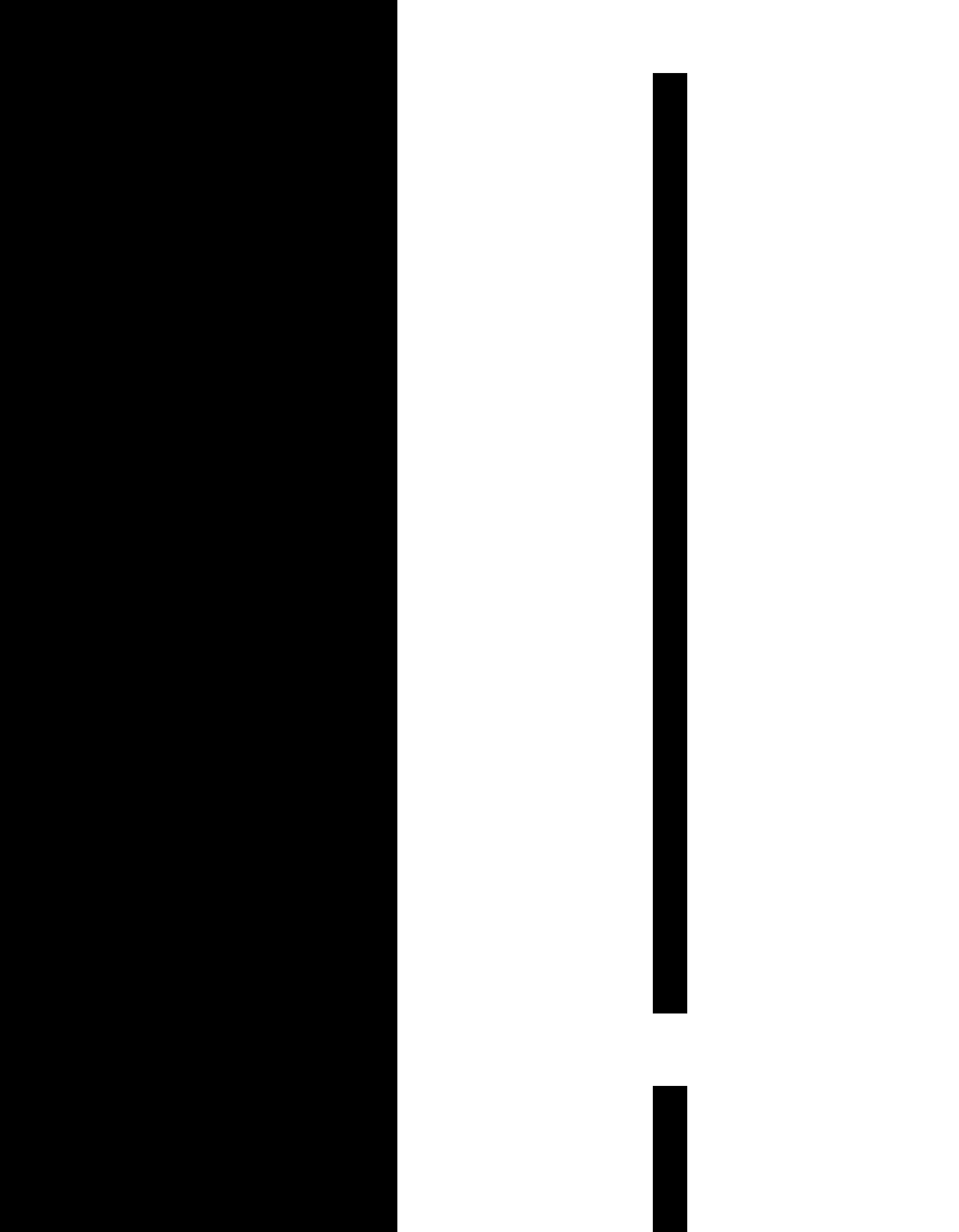


[energia]

anno 13 numero **24** / 4.18

asimmetrie

rivista semestrale dell'Istituto
Nazionale di Fisica Nucleare



asimmetrie

Cari lettori di Asimmetrie,

Viviamo consumando energia. I paesi ricchi in enormi quantità *pro capite*, quelli meno ricchi in maniera più modesta, ma alla fine avendo più abitanti forse ne consumeranno di più. È importante capire il senso sia astratto che pratico di questa quantità, in fondo un po' misteriosa. Magari potrebbe servire a fare scelte informate nella nostra vita quotidiana, che aiuteranno a ridurre alcuni effetti pericolosi per il futuro del nostro pianeta. E poi in quanti modi si misura: joule, wattora, calorie e persino elettronvolt!

Per rendere meglio l'idea, ecco un conticino interessante per chi prende spesso l'aereo (come me, sigh!): il trasporto aereo brucia kerosene e con 10.000 aerei e 1.200.000 passeggeri sempre in volo ogni giorno alla fine dell'anno consuma il doppio dell'energia degli Stati Uniti. Non male!

Questo è un numero di Asimmetrie in bilico tra la definizione scientifica dell'energia, le tecnologie per generare quella che utilizziamo e uno sguardo sul futuro. Non è facile mettere insieme il ripudio del moto perpetuo, l'energia del vuoto, il tentativo di copiare le stelle per produrre la nostra dose di energia quotidiana e i problemi indotti dall'uso delle fonti non rinnovabili. D'altra parte sul problema dell'energia c'è un filo rosso che porta direttamente dalla ricerca di base alle applicazioni industriali passando per l'innovazione, spesso rivoluzionaria. Il neutrino fu postulato proprio per salvare il principio di conservazione dell'energia in un momento di profondi dubbi, le ricerche di Fermi sulla radioattività tramite l'irraggiamento con neutroni portarono rapidamente allo sfruttamento dell'energia nucleare, la comprensione dei meccanismi di funzionamento dei semiconduttori allo sviluppo dei pannelli solari e, sebbene sognata e lontana nel tempo, lo studio del funzionamento delle stelle porterà all'utilizzo dell'energia prodotta dalla fusione nucleare.

Buona lettura.

Fernando Ferroni
presidente Infn



asimmetrie

Rivista dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Semestrale, anno 13,
numero 24, aprile 2018

direttore responsabile

Fernando Ferroni, *presidente Infn*

direttore comitato scientifico

Egidio Longo

comitato scientifico

Vincenzo Barone
Massimo Pietroni
Giorgio Riccobene
Barbara Sciascia

caporedattore

Catia Peduto

redazione

Francesca Mazzotta
Francesca Cuicchio
(infografiche)

hanno collaborato

Gianluca Alimonti, Pasquale Blasi,
Eleonora Cossi, Paolo Gambino,
Marco Ripani, Mirko Pojer, Ezio
Previtali, David Riondino, Francesco
Scerbo, Raffaella Schneider,
Francesca Scianitti, Alfredo Urbano

contatti redazione

Infn Ufficio Comunicazione
piazza dei Caprettari 70
I-00186 Roma
T +39 06 6868162
F +39 06 68307944
comunicazione@presid.infn.it
www.infn.it

impaginazione

Tipolitografia Quatrini

stampa

Tipolitografia Quatrini

su carta di pura cellulosa
ecologica ECF
Fedrigoni Symbol™ Tatami
250 - 135 g/m2

Registrazione del Tribunale di Roma
numero 435/2005 del 8 novembre 2005.
Rivista pubblicata da Infn.

Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte della
rivista può essere riprodotta, rielaborata o
diffusa senza autorizzazione scritta dell'Infn,
proprietario della pubblicazione.

Finita di stampare nel mese di aprile 2018.
Tiratura 20.000 copie.

come abbonarsi

L'abbonamento è gratuito.

Per abbonarsi compilare l'apposito
form sul sito www.asimmetrie.it

In caso di problemi contattare
la redazione all'indirizzo
comunicazione@presid.infn.it

sito internet

**Asimmetrie 24 e tutti i numeri
precedenti della rivista sono
disponibili anche online su
www.asimmetrie.it**

e-magazine

**Asimmetrie è anche disponibile
in versione digitale, ricca di ulteriori
contenuti multimediali, come app
di iOS e Android sull'Apple Store
e nel Google Play Store.**

crediti iconografici

Foto copertina © Istockphoto.com (Johnnorth)
// foto p. 4 © Istockphoto.com (PPAMPicture);
figg. a, b pp. 5,6 © Asimmetrie-Infn; foto c p.
7 © Istockphoto.com (Yangphoto); fig. d p.
8 © Asimmetrie-Infn // fig. a p. 9 © Norman
Rockwell. Popular Science, Oct. 1920; figg.
b, 1 pp. 10,11 © Asimmetrie-Infn; foto c p.
12 © Bryn Mawr College Library // figg. a,
b, c pp. 13, 14, 15 © Asimmetrie-Infn //
foto a p. 16 © VF Hess Society, Echophysics,
Schloss Pöllau/Austria; foto b © Chandra
X-ray Observatory; figg. c, 1 pp. 18, 19 ©
Asimmetrie-Infn // foto a p. 20 © NASA,
ESA, M. Robberto (Space Telescope Science
Institute/ESA) and the Hubble Space
Telescope Orion Treasury Project Team; fig. b
p. 21 © Hirano et al. 2015, Monthly Notices
of the Royal Astronomical Society, 448, 568 /
Asimmetrie-Infn; fig. c p. 22 © Asimmetrie-Infn;
foto d p. 23 © NASA/Chris Gunn // foto a p.
24 © NASA/SDO (AIA); figg. b,c pp. 25, 26
© Asimmetrie-Infn; foto p. 27 © 2018, ITER
Organization // foto a p. 28 © Istockphoto.
com (Tsvibrav); foto b p. 29 © Istockphoto.
com (Landbysea); figg. c, d, e, f pp. 30, 31 ©
Asimmetrie-Infn // foto a p. 32 © CERN; fig. b
p. 33 © Asimmetrie-Infn; foto c p. 34 © Z22/
Wikimedia // foto a p. 35 © CERN; fig. b p. 36
© Asimmetrie-Infn (da un'idea di Enzo Iarocci);
foto c p. 37 © SabaPaul Frame // foto 1 p.
38 © Amaldi Archive, Dipartimento di Fisica,
Università 'La Sapienza,' Rome, courtesy AIP
Emilio Segrè Visual Archives; foto a p. 39 ©
Argonne National Laboratory, courtesy AIP
Emilio Segrè Visual Archives // foto a p. 42
© CNAO-INFN; foto b p. 43 © INFN // foto b p.
45 © Michael_Schwab // foto p. 46 © Museo
dei bambini_Genova // foto p. 47 © LNF-
Federici/Asimmetrie-Infn // fig. p. 48 © CERN.

Ci scusiamo se, per cause del tutto
indipendenti dalla nostra volontà, avessimo
omesso o citato erroneamente alcune fonti.

L'energia è tutto

di Paolo Gambino

4

Un bilancio sempre in pari

di Vincenzo Barone

9

La ricchezza del niente

di Alfredo Urbano

13

Una pioggia energetica

di Pasquale Blasi

16

Luce dal buio

di Raffaella Schneider

20

Il Sole in Terra

di Marco Ripani

24

Il motore del pianeta

di Gianluca Alimonti

28

Salto a velocità luce

di Mirko Pojer

32

La febbre dell'energia

di Ezio Previtali

35

[as] radici

Il mio ricordo della "pila".

di Laura Fermi

38

[as] con altri occhi

Discorso all'Accademia della Fisica.

di David Riondino

40

[as] riflessi

Energia per curare.

di Eleonora Cossi

42

[as] traiettorie

Il suono dei dati.

di Francesca Mazzotta

44

[as] spazi

Universo, tempo zero.

di Francesca Scianitti

46

[as] selfie

Incontri ravvicinati.

di Francesco Scerbo

47

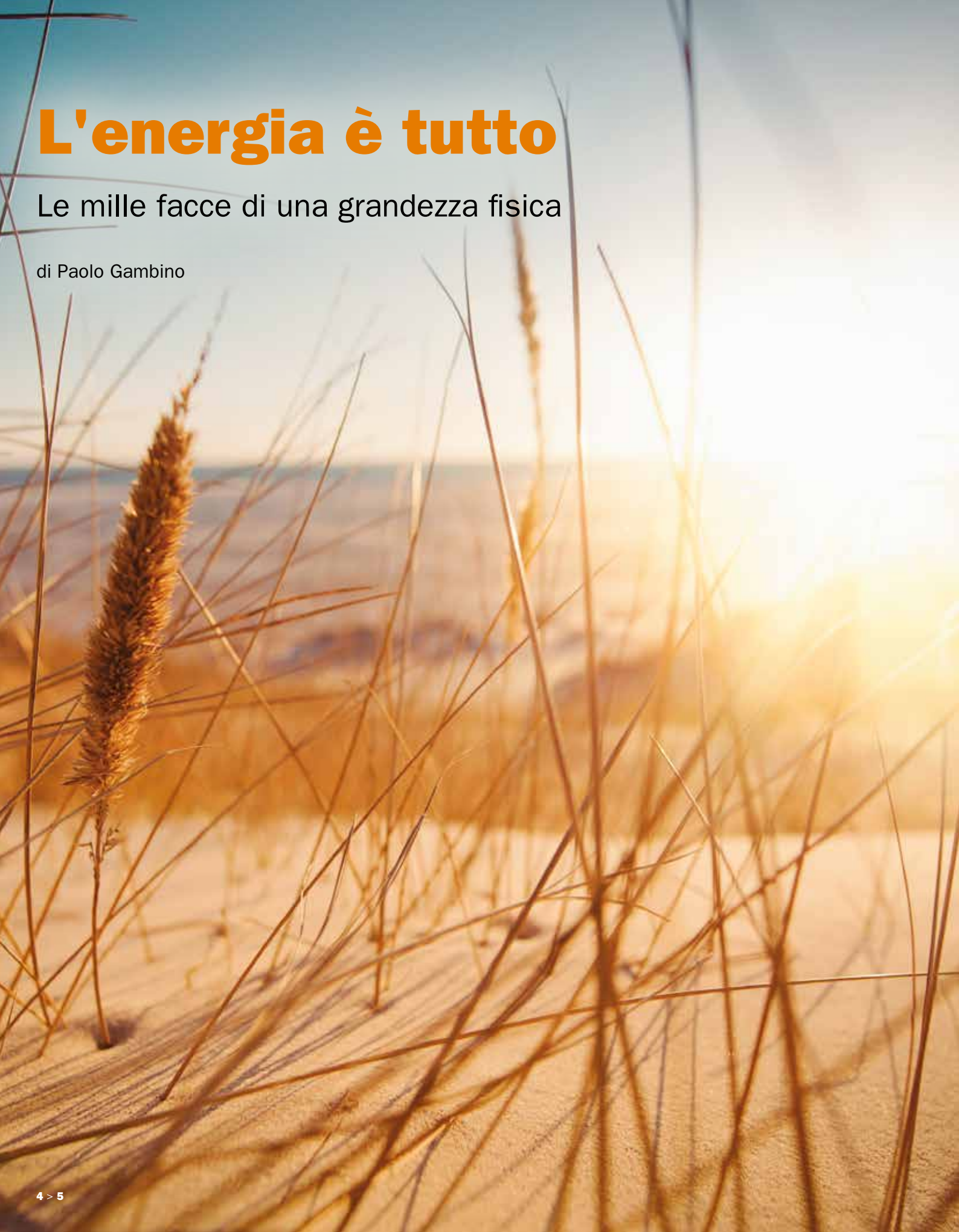
[as] illuminazioni

Oltre le metafore:

una lezione sul bosone di Higgs.

di Barbara Sciascia

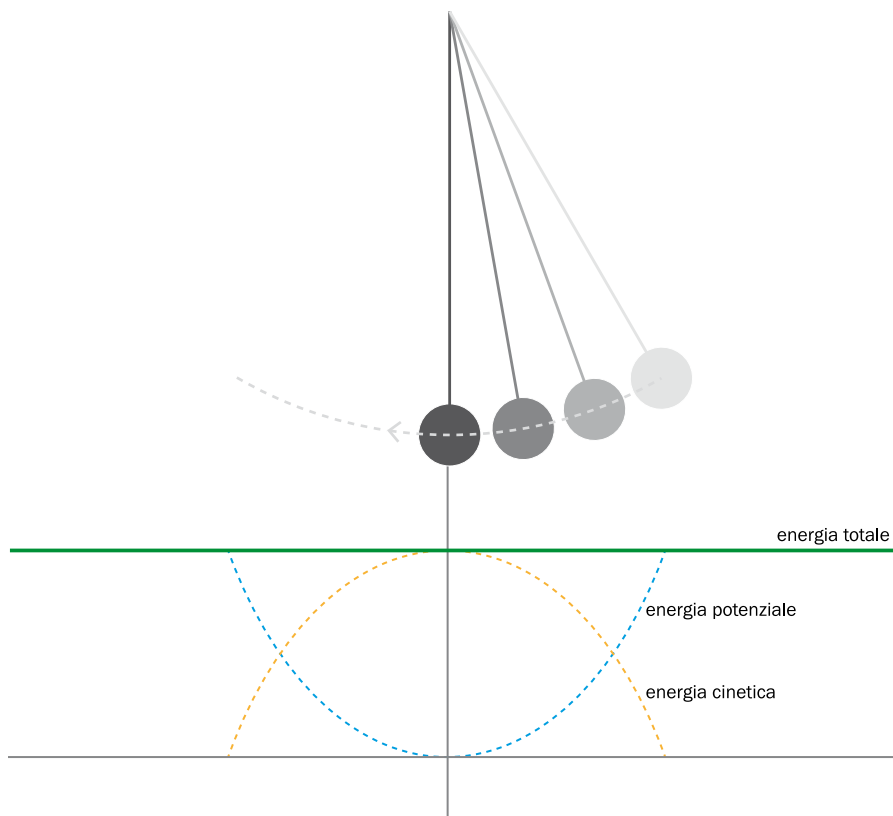
48



L'energia è tutto

Le mille facce di una grandezza fisica

di Paolo Gambino



a.
L'energia totale di un pendolo in oscillazione (assumendo nulle le forze di attrito) è costante (linea verde). Questa è la somma tra l'energia cinetica (linea tratteggiata gialla) e l'energia potenziale (linea tratteggiata blu), che invece variano a seconda della posizione del pendolo.

L'esplosione cosmica all'inizio del tempo ha avuto origine da un grumo di energia. L'incessante e rocambolesca trasformazione di questa energia primordiale, il suo continuo disperdersi e riaggregarsi costituiscono a tutti gli effetti la storia dell'universo. In principio era quindi l'energia, e l'energia è luce ed è massa, è movimento ed è calore, è elettricità ed è vita. I fisici definiscono l'energia come capacità di compiere "lavoro meccanico" (ad esempio l'energia contenuta nella benzina alimenta un'automobile), ma l'energia è molto di più, e non tutta l'energia può essere completamente convertita in lavoro meccanico. Un pallido riflesso dell'energia primordiale muove pure le nostre vite, illumina e riscalda le nostre notti, alimenta l'economia del pianeta e con essa le speranze di miliardi d'individui. Da sempre, la riflessione sulla realtà fisica è stata accompagnata, e spesso direttamente motivata, dal desiderio di dare risposte a problemi pratici, di fornire cioè tecnologie in grado di aiutare l'umanità a soddisfare i propri bisogni. Oggi, gran parte di questi bisogni (calore, trasporto, luce, ecc.) sono soddisfatti attraverso lo sfruttamento di combustibili fossili (petrolio, carbone, gas naturale). Si tratta di risorse finite, destinate prima o poi a esaurirsi, il cui impiego massiccio ha causato un rapido aumento dell'anidride carbonica atmosferica che sta alterando l'equilibrio dell'ecosistema terrestre. Le prime avvisaglie di drammatici cambiamenti climatici sono ormai evidenti e gli sviluppi futuri potrebbero essere ben peggiori: la transizione verso fonti energetiche sostenibili è quindi diventata una questione urgente. Questa transizione è già iniziata a livello planetario, ed è molto probabile che le sorti del riscaldamento globale dipendano dalla velocità con cui si compirà. Che cosa è dunque l'energia? Abbiamo detto della sua natura mutevole e multiforme: nella storia della fisica, forme di energia differenti sono state successivamente individuate e gradualmente inglobate in un processo unificante, culminato nella formulazione di un principio universale di conservazione

secondo cui "la somma di tutte le forme di energia di un sistema isolato è costante nel tempo". Il primo passo nella comprensione dell'energia è stato l'affermarsi nel XVIII secolo del "teorema dell'energia cinetica" o "delle forze vive", che stabilisce proprio l'equivalenza tra energia cinetica, cioè energia posseduta da un corpo in virtù del suo moto, e lavoro meccanico, dato dal prodotto di forza per spostamento. La forza che accelera un razzo, ad esempio, compie un lavoro pari all'energia cinetica acquisita dal razzo. Si consideri ora un pendolo (vd. fig. a): durante le oscillazioni la sua velocità (e quindi la sua energia cinetica) diminuisce quando esso sale verso l'alto e cresce quando esso scende. È quindi naturale legare l'altezza raggiunta dal pendolo a un nuovo tipo di energia, l'"energia potenziale", che rappresenta la capacità di un sistema di immagazzinare energia attraverso l'interazione con qualcosa, in questo caso il campo gravitazionale. L'energia cinetica del pendolo si trasforma gradualmente in energia potenziale e viceversa, ma la loro somma rimane sempre costante. In effetti, avrebbe poco senso parlare di energia se questa non fosse conservata. A seconda del tipo di sistema distingueremo tra energia potenziale "gravitazionale", come nel caso del pendolo, energia potenziale "elastica", come nel caso di una molla, ecc. Un pendolo lasciato a sé stesso, però, prima o poi si ferma: la sua energia viene lentamente dissipata attraverso l'attrito con l'aria e al perno. Dove finisce? Si trasforma in calore, e contribuisce all'"energia interna", l'energia posseduta dai componenti microscopici del pendolo e dell'aria che lo circonda, il cui moto disordinato è legato alla temperatura del sistema. La branca della fisica che studia la relazione tra calore, energia e lavoro è la "termodinamica". Il suo primo principio riafferma la conservazione dell'energia totale, mentre il secondo principio sancisce l'impossibilità di trasformare tutto il calore assorbito da un sistema in energia meccanica.

La termodinamica si sviluppa durante la rivoluzione industriale e le sue leggi spiegano il comportamento delle macchine termiche, che venivano messe a punto proprio in quegli anni. In particolare, una macchina termica, scambiando calore con una sorgente calda e una fredda a temperature assolute T_1 e T_2 , non può mai trasformare in energia meccanica più di una frazione $1 - T_2/T_1$ del calore assorbito (teorema di Carnot).

Questa frazione è l'“efficienza”, il rapporto cioè tra energia utile ed energia assorbita. I motori a combustione interna delle nostre automobili, che consumano benzina o gasolio per produrre l'energia meccanica necessaria al loro movimento, hanno un'efficienza del 25-30%: il 70-75% dell'energia viene quindi disperso nell'ambiente come calore. Qualsiasi trasformazione energetica a livello macroscopico è caratterizzata da un'efficienza minore di 1 e da una dispersione di calore nell'ambiente (vd. fig. b).

Naturalmente abbiamo anche l'energia potenziale elettrica e magnetica: le onde elettromagnetiche trasferiscono proprio questo tipo di energia, che noi percepiamo come luce, calore o radiazione a seconda della loro lunghezza d'onda. Tutti i corpi emettono onde elettromagnetiche in misura proporzionale alla quarta potenza della loro temperatura: la maggior parte del consumo metabolico del nostro corpo, circa 100 watt (un watt, l'unità di misura della “potenza”, è pari a un joule per secondo), viene emesso come radiazione infrarossa.

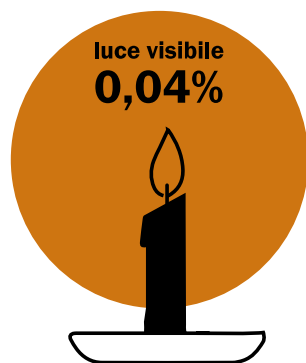
Con l'avvento della relatività,

intervengono alcune novità dirompenti. La principale è che la massa stessa è una forma di energia (la famosa equivalenza einsteiniana tra massa ed energia), come dimostrano i decadimenti dei nuclei radioattivi e delle particelle elementari o l'annichilazione tra materia e antimateria. Su questo fenomeno è basata la Pet (la tomografia a emissione di positroni, una tecnica diagnostica molto usata in medicina, soprattutto per la localizzazione e il monitoraggio di tumori, vd. in Asimmetrie n. 7 p. 38, ndr): nell'annichilazione tra un elettrone e un positrone (l'antiparticella dell'elettrone) a riposo, l'energia della loro massa si trasforma completamente nell'energia elettromagnetica dei due fotoni prodotti (due raggi γ). L'energia di massa è immensa: un solo grammo di materia contiene più energia di quella rilasciata dalla bomba atomica di Hiroshima. Nei reattori nucleari si cattura una piccola parte dell'energia di massa per produrre energia elettrica. L'equivalenza massa-energia vale anche nel senso opposto. Negli acceleratori di particelle parte dell'energia delle particelle che collidono si tramuta nell'energia di massa di nuove particelle, che poi rapidamente decadono. La recente scoperta del bosone di Higgs in Lhc è proprio stata resa possibile dalla grande energia dei protoni che vi vengono fatti collidere. E poiché ogni particella è anche un'onda (ce lo insegna la meccanica quantistica), la cui lunghezza d'onda decresce al crescere dell'energia, particelle di alta energia sondano la struttura della materia a distanze piccolissime, come microscopi superpotenti.

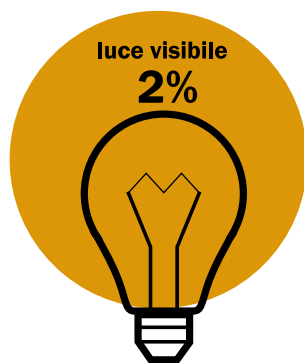
Nonostante le innumerevoli conferme sperimentali della sua conservazione, l'energia rimane un concetto sfuggente - come disse Feynman: “Ad oggi, non sappiamo davvero che cosa sia” - la cui essenza è da cercare a livello formale. La conservazione dell'energia (vd. p. 9, ndr) è il riflesso dell'immutabilità delle leggi fondamentali della natura, e quindi dell'intellegibilità del mondo, quella misteriosissima proprietà che ci permette di trovare ordine nel caos dell'universo. E parlando di misteri, non possiamo non ricordare che a livello cosmologico il bilancio energetico non sembra funzionare: per spiegare le osservazioni sperimentali, in particolare l'accelerazione dell'espansione dell'universo, è stata perciò ipotizzata l'esistenza di un'energia del vuoto (vd. p. 13, ndr), detta “energia oscura”, che rappresenta uno dei problemi più affascinanti della fisica attuale.

b.

In figura è mostrata l'efficienza di emissione di alcune sorgenti luminose. Nel caso di una lampadina, l'energia utile è quella emessa sotto forma di luce visibile, che è solo una frazione dell'energia impiegata, perché la restante parte viene dissipata in calore o radiazione non visibile. L'illuminazione a Led (*light emitting diode*) è un tipico esempio di tecnologia che migliorando l'efficienza riduce i consumi di energia: a Torino, ad esempio, la parziale conversione a Led dell'illuminazione pubblica ha ridotto i relativi consumi elettrici del 33% (25 milioni di kWh/anno equivalenti a 4 milioni di euro/anno).



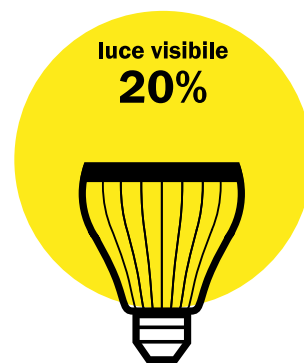
candela



lampada a incandescenza



lampada a fluorescenza



lampada a Led



c.
I pannelli fotovoltaici trasformano la radiazione solare in energia elettrica. La tecnologia dominante è basata sull'uso del silicio, materiale molto abbondante in natura, e ha un'efficienza modesta, tra il 15 e il 22%. Il suo costo è crollato negli ultimi 10 anni. La ricerca di alternative ancora più economiche ed efficienti è attivissima.

Ogni secondo, la Terra riceve dal Sole ben $1,7 \cdot 10^{17}$ joule di energia, da cui derivano quasi tutte le forme di energia che conosciamo, sia rinnovabili (solare, eolica, idrica) sia fossili (carbone, petrolio e gas naturale non sono altro che energia solare fossile). Solo le correnti di marea e il calore geotermico hanno origine diversa. Un m^2 di territorio italiano, per esempio, riceve in media 170 watt di radiazione solare: tutta l'energia (finale) consumata nel nostro paese in un anno è pari all'energia solare che raggiunge un quadrato di soli 30 km di lato nello stesso periodo. Si tratta quindi di una risorsa abundantissima e apparentemente a portata di mano, e lo stesso si può dire del vento, almeno nelle zone più ventose. Il problema è trasformare questi flussi naturali di energia nelle forme di energia di cui abbiamo bisogno (elettrica, termica, ecc.) per poterla utilizzare quando necessario. Le principali limitazioni sono legate all'efficienza del processo di trasformazione, alle fluttuazioni (giornaliere, stagionali e aleatorie) di questi flussi e al costo dei relativi impianti. Un comune pannello fotovoltaico al silicio, ad esempio, trasforma l'energia solare in energia elettrica con un'efficienza di circa il 15-17% (i migliori modelli in commercio raggiungono il 22%) e quindi solo una frazione ridotta della radiazione solare può essere trasformata in energia elettrica. Nuove tecnologie potrebbero aumentare l'efficienza, ma esistono limiti fisici invalicabili (il 29% circa per le celle al silicio a giunzione singola). Possiamo invece scaldare l'acqua con il Sole in maniera assai più efficiente: un collettore solare ha un'efficienza che dipende dalla differenza tra la temperatura dell'acqua e quella dell'ambiente, ed è tipicamente del 50-60% per temperature dell'acqua attorno ai 60°C. Naturalmente, il valore che attribuiamo all'efficienza dipende dal costo: la buona notizia è che il prezzo del fotovoltaico tradizionale è sceso drammaticamente negli ultimi anni, al punto che i moduli non sono più la voce principale di costo nella costruzione di un piccolo impianto. E anche il prezzo dell'energia eolica è sceso,

seppur più lentamente. Il risultato, a livello mondiale, è un boom di queste due fonti rinnovabili, che in molte zone non necessitano più di incentivazione e sono spesso ormai competitive con le fonti energetiche fossili. A fine 2016 risultavano installati circa 300 GW di fotovoltaico e 500 GW di eolico in tutto il mondo. La transizione energetica interessa ormai davvero tutto il globo e procede a grande velocità: l'Agenzia Internazionale dell'Energia (Iea) stima che nel 2016 il 24% dell'energia elettrica mondiale sia stata prodotta da fonti rinnovabili, una quota destinata a superare il 30% entro il 2021. In Italia siamo ormai stabilmente attorno al 33%, il doppio rispetto al 2008.

Queste fonti tuttavia non sono programmabili, e la loro aleatorietà e stagionalità rappresentano un serio problema per le future reti elettriche, solo parzialmente mitigato dal potenziale di fonti rinnovabili programmabili come le biomasse. L'accumulo di energia (di breve o lunga durata, termico, meccanico o chimico) è quindi al centro della ricerca attuale, ma anche la rete elettrica e il modo in cui usiamo l'energia sono destinati a cambiare in profondità, spostando parte dei consumi nei periodi di massima disponibilità di energia rinnovabile.

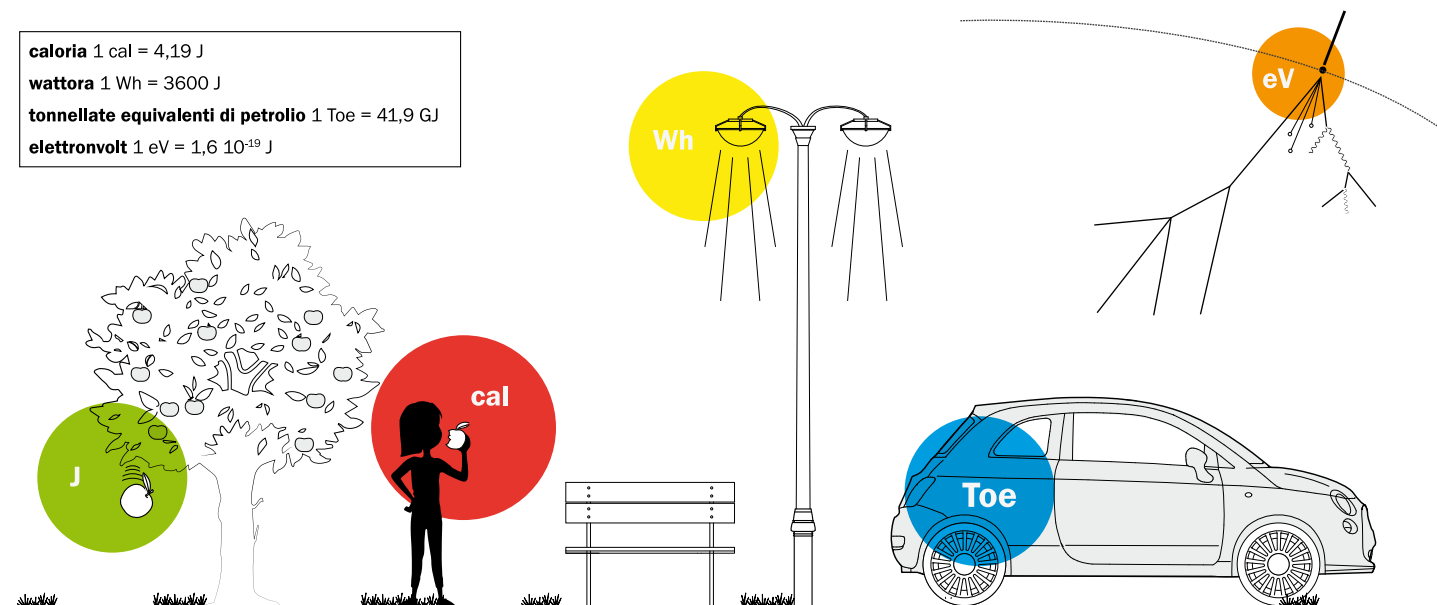
Parallelamente, il miglioramento dell'efficienza energetica ha grandi potenzialità. Si pensi ai consumi termici che in Italia rappresentano il 45% del totale: il miglioramento dell'isolamento termico degli edifici e l'estensione del teleriscaldamento possono concorrere a una loro forte riduzione. Il settore dei trasporti, che assorbe globalmente quasi un terzo dell'energia, è prevalentemente basato su motori diesel e a benzina, che come abbiamo visto sono poco efficienti. Un motore elettrico ha invece un rendimento prossimo al 90% e permette anche il recupero dell'energia in frenata. La diffusione delle auto elettriche e in generale l'elettrificazione dei trasporti sono quindi componenti essenziali di ogni scenario energetico futuro basato sulle fonti rinnovabili. La tecnologia è ormai matura e si stima che entro il 2030 ci saranno nel mondo 150 milioni di auto elettriche circolanti.

caloria 1 cal = 4,19 J

wattora 1 Wh = 3600 J

tonnellate equivalenti di petrolio 1 Toe = 41,9 GJ

elettronvolt 1 eV = $1,6 \cdot 10^{-19}$ J



Il miglioramento dell'efficienza energetica è quindi complementare all'impiego delle fonti rinnovabili in una strategia di riduzione delle emissioni e richiede un investimento il cui tempo di ritorno è spesso breve. Poiché il risparmio che ne deriva è molto competitivo rispetto alla costruzione di nuove centrali elettriche, assistiamo a livello globale a una forte espansione di questi investimenti (200 miliardi di euro nel solo 2015).

Oggi ogni italiano consuma in media circa 80 kWh al giorno di energia primaria, ovvero assorbe mediamente 3,3 kW. Servono per scaldarci, a casa e in ufficio (oltre il 20% del totale), per spostarci, mangiare, lavorare e divertirci e per produrre oggetti di consumo, dalle automobili ai cellulari. Percorrere un chilometro con un'auto a benzina o gasolio, p. es., richiede quasi un kWh di energia primaria, 5-10 volte più dell'energia elettrica assorbita da un'auto elettrica. Un aereo di linea Torino-Roma consuma circa 50.000 kWh e attorno a 200 kWh per passeggero. Viaggiare in treno, anche ad alta velocità, è almeno dieci volte meglio! Oltre al miglioramento dell'efficienza e all'eliminazione degli sprechi ci sono poi moltissime possibilità per risparmiare energia che però implicano dei cambiamenti nel nostro stile di vita (p. es. usare la bicicletta invece dell'auto).

Purtroppo il ritmo della transizione energetica è ancora insufficiente per incidere sui cambiamenti climatici in atto, e per ridurre le emissioni di CO₂ in misura tale da contenere l'aumento medio di temperatura entro i 2°C. La domanda globale di energia, trainata dall'aumento della popolazione mondiale, continua infatti a crescere (vd. p. 28, ndr). Solo nei paesi avanzati si osserva un lieve ma costante calo dai primi anni 2000, dovuto in parte al miglioramento dell'efficienza. Se nell'immediato futuro la priorità dovrebbe essere di ridurre le emissioni e i consumi, aumentando la quota di rinnovabili, nel medio-lungo termine potrebbe giocare un ruolo importante lo sviluppo di nuove tecnologie rinnovabili e nucleari, tra cui la fusione (vd p. 24, ndr) e la fissione intrinsecamente sicura. In definitiva, per quanto la transizione energetica sia già cominciata, non sappiamo ancora esattamente dove ci porterà, anche se avrà certamente un impatto notevole sulla società e sull'economia. In effetti, sarebbe sbagliato considerare il problema energetico soltanto come un problema tecnologico: è anche, e forse soprattutto, un problema politico-culturale. Senza una capillare educazione all'uso responsabile dell'energia e senza una riscoperta del valore della sobrietà, le migliori tecnologie, probabilmente, non basteranno.

d.

Nel Sistema Internazionale l'unità di misura dell'energia è il joule (J), ma a seconda dei contesti si usano spesso unità pratiche diverse: per misurare la quantità di calore si usa la caloria (cal, pari a 4,19 J), i consumi di energia elettrica si esprimono in wattora (Wh, pari a 3600 J), mentre per esprimere l'energia prodotta dai combustibili fossili si usa la tonnellata di petrolio equivalente (Toe, posta convenzionalmente uguale a 10 Gcal = 41,9 GJ); infine, l'energia delle particelle elementari si esprime in elettronvolt (eV, pari a $1,6 \cdot 10^{-19}$ J). Così l'energia potenziale di una mela di 100 g appesa a un metro di altezza (energia che si ritrova sotto forma di energia cinetica nel momento in cui la mela, cadendo, tocca il suolo) è di circa 1 J; la stessa mela, consumata come alimento, fornisce un contenuto energetico nutrizionale di circa 50 kcal = 209 kJ; un lampione da 1000 W consuma in un'ora 1000 Wh, pari a 3600 kJ; un pieno di 60 litri di benzina corrisponde a circa 0,05 Toe, pari a 2 GJ; i raggi cosmici più energetici che sono stati osservati hanno energie maggiori di 10^{20} eV (10 milioni di volte l'energia dei protoni in Lhc), che corrispondono ad appena qualche decina di joule.

Biografia

Paolo Gambino è professore di fisica teorica all'Università di Torino. Si occupa principalmente di fisica delle particelle elementari (e in particolare del loro "flavour") ed è referente del gruppo Energia di UniToGo, il nuovo hub per la sostenibilità ambientale dell'Università di Torino.

Un bilancio sempre in pari

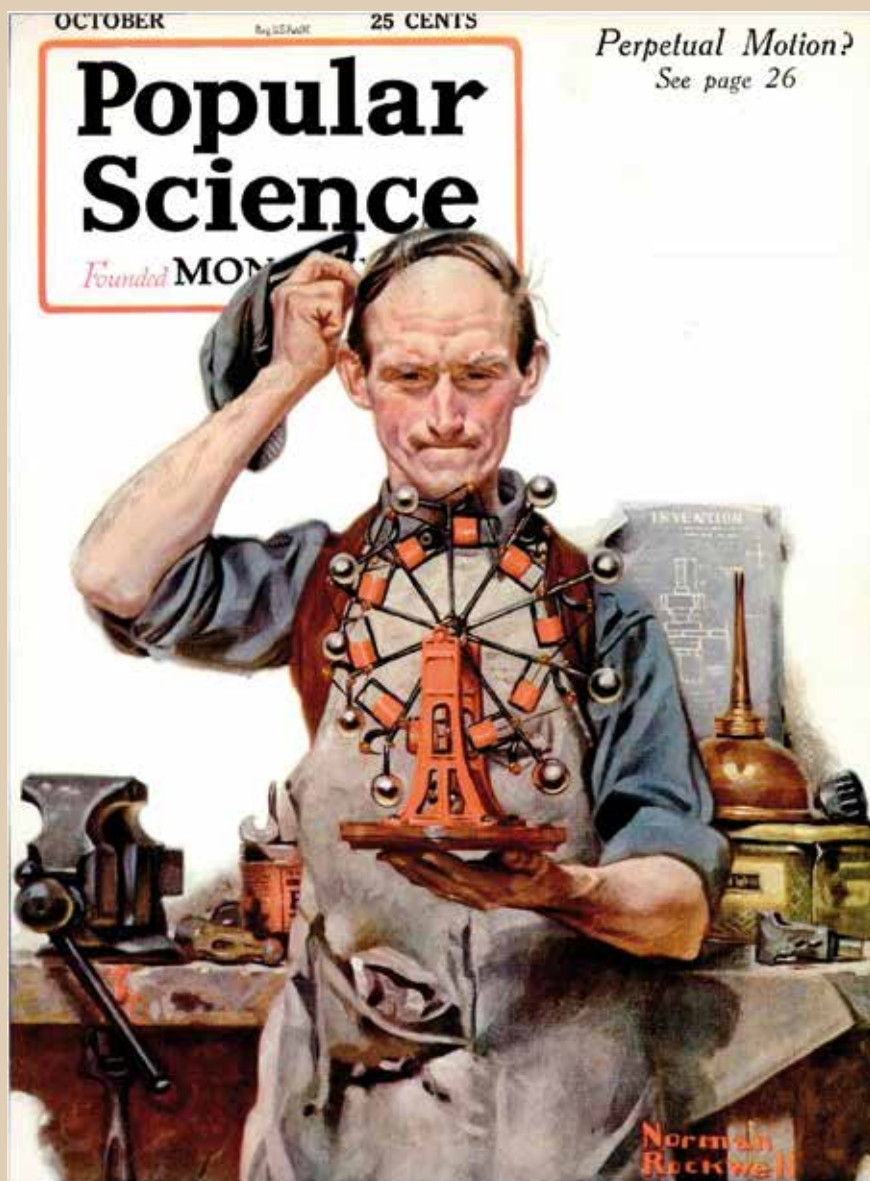
La legge di conservazione dell'energia

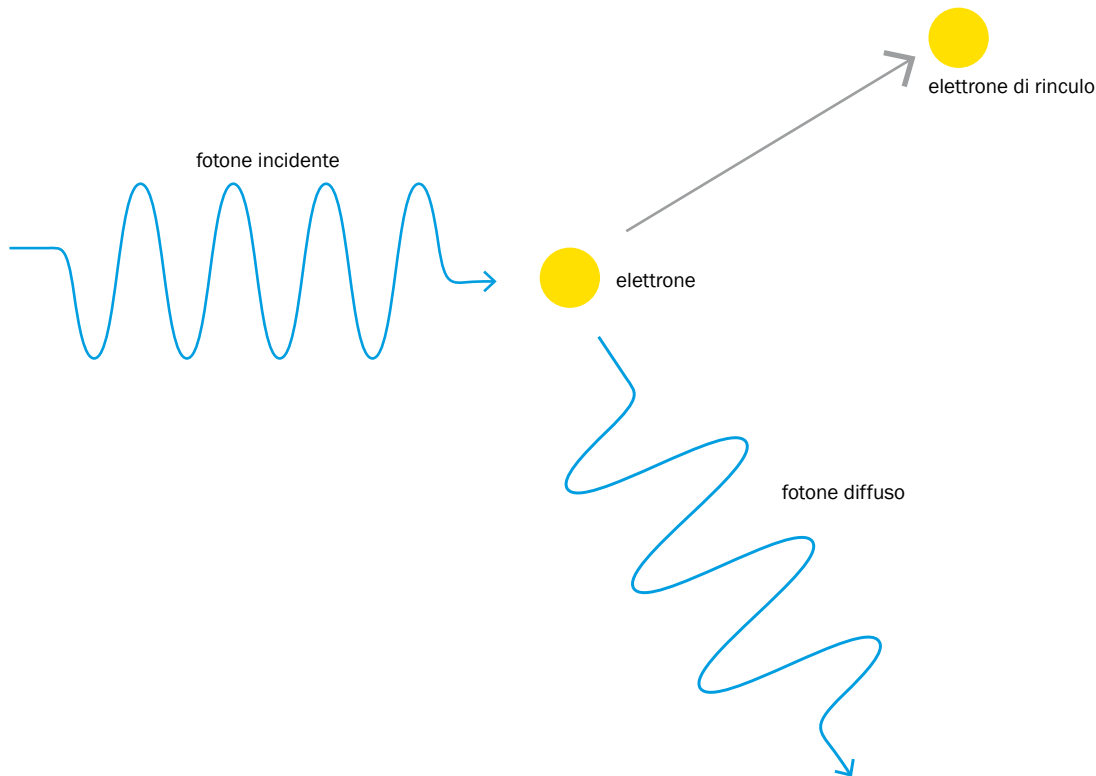
di Vincenzo Barone

Per secoli gli uomini hanno inseguito il sogno di realizzare il *perpetuum mobile*, una macchina in grado di produrre più di ciò che viene consumato - di creare energia dal nulla, diremmo oggi. Ancora nel 1911 l'Ufficio Brevetti americano si trovò costretto a emanare una circolare in cui, dopo aver ribadito l'impossibilità del moto perpetuo, stabiliva molto pragmaticamente che le domande di brevetto sarebbero state prese in esame solo previa presentazione di un prototipo funzionante.

Il motivo per cui il moto perpetuo è un'illusione è che esiste una legge fondamentale della natura - la legge di conservazione dell'energia - che lo vieta. Questa legge, centrale nella moderna visione fisica del mondo, fu acquisita, assieme al concetto stesso di energia, abbastanza tardi, solo verso la metà dell'800. Fu allora che, grazie ai lavori di alcuni fisici e fisiologi (in particolare Robert Mayer e Hermann von Helmholtz), si scoprì che, dato un sistema isolato, è possibile attribuire a esso una grandezza fisica - l'energia - che rimane costante nel tempo. La caratteristica peculiare di tale grandezza è che si presenta in varie forme, apparentemente diverse tra loro; ma se le aggiungiamo tutte, senza dimenticarne nessuna, la somma si conserva, cioè mantiene lo stesso valore istante per istante. La prima forma di energia identificata, da Huygens e Leibniz, fu l'energia cinetica, cioè l'energia legata al movimento dei corpi. L'altra importante forma di energia è l'energia potenziale, l'energia dovuta alle interazioni (i pianeti possiedono un'energia potenziale gravitazionale; gli elettroni in un atomo possiedono un'energia potenziale elettrostatica, ecc.). Con la relatività abbiamo

a.
L'ossessione del *perpetuum mobile* ha attraversato i secoli. La macchina per il moto perpetuo proposta attorno al 1230 dal francese Villard de Honnecourt non era molto diversa da quella raffigurata da Norman Rockwell su questa copertina di "Popular Science" del 1920.





b.
La diffusione Compton è dovuta agli urti elastici tra fotoni ed elettroni liberi. Per la conservazione dell'energia, i fotoni diffusi hanno una lunghezza d'onda maggiore di quella dei fotoni incidenti.

imparato che anche la massa è energia, e va conteggiata nelle reazioni nucleari e subnucleari, nelle quali può convertirsi in altre forme di energia o essere generata a partire da altre forme di energia. Nell'annichilazione di un elettrone e di un positrone, per esempio, tutta l'energia di massa delle due particelle si trasforma in energia cinetica dei fotoni prodotti. Infine, quando si ha a che fare con sistemi macroscopici, l'energia può essere scambiata anche sotto forma di calore. Il primo principio della termodinamica, in effetti, è nient'altro che la legge di conservazione dell'energia, che tiene conto degli scambi di calore, dell'energia interna di un sistema e del lavoro compiuto da o su di esso.

La meccanica quantistica ha introdotto un importante elemento di novità nel discorso sull'energia. Il principio di indeterminazione di Heisenberg stabilisce infatti che se si osserva un sistema per un intervallo di tempo limitato, la sua energia può essere misurata solo con un'incertezza inversamente proporzionale al tempo di osservazione. Dunque, se il sistema è instabile e vive solo per poco, la sua energia è necessariamente indeterminata. Ciò apre una serie di interessanti possibilità. Si può dimostrare che in virtù della legge di conservazione dell'energia un elettrone isolato non può emettere un fotone reale; ma, proprio a causa del principio di indeterminazione energia-tempo, l'elettrone può emettere un fotone "virtuale", cioè un fotone che acquista massa e vive per un tempo limitato, venendo poi assorbito da un altro elettrone. È così che due elettroni interagiscono

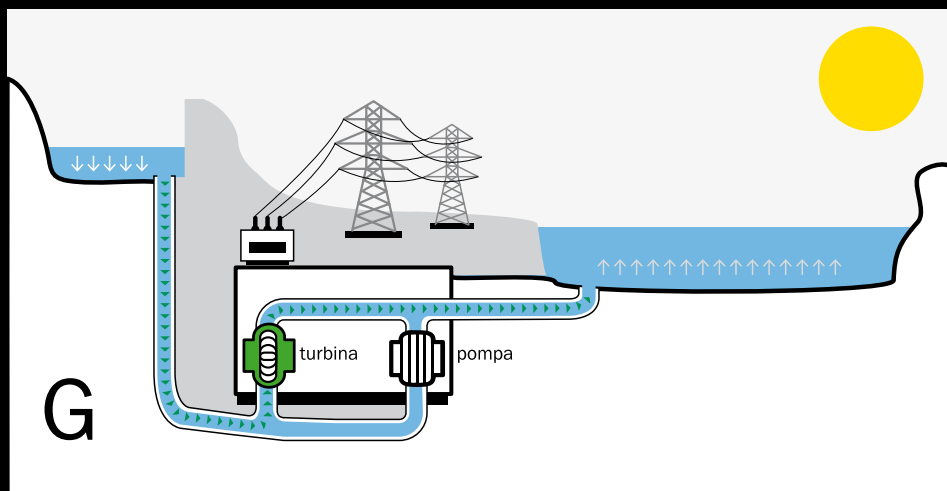
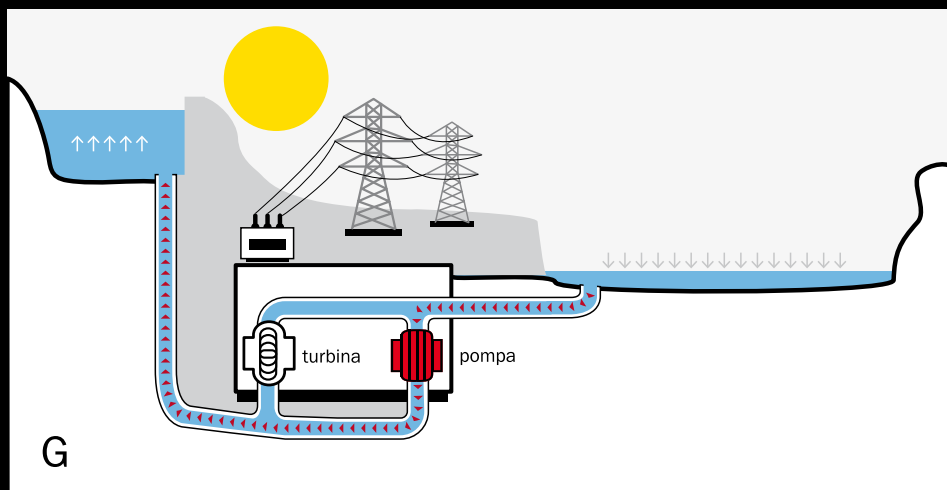
elettromagneticamente. Va detto che se si guarda alle particelle realmente osservate (gli elettroni) la legge di conservazione dell'energia è perfettamente rispettata, perché l'energia totale dei due elettroni prima dell'interazione è uguale alla loro energia totale dopo l'interazione.

Il primo esempio storico di applicazione della legge di conservazione dell'energia a un processo elementare risale al 1923, quando il fisico statunitense Arthur Compton scoprì che, irradiando un bersaglio di grafite con raggi X, la radiazione diffusa aveva una lunghezza d'onda maggiore di quella della radiazione incidente, secondo una semplice legge matematica. Compton ipotizzò che l'effetto fosse dovuto, a livello microscopico, agli urti elastici tra i fotoni dei raggi X e gli elettroni del materiale irradiato, e fu in grado, applicando le leggi di conservazione dell'energia e della quantità di moto, di spiegare la variazione della lunghezza d'onda osservata. Negli anni successivi, tuttavia, non mancò chi suggerì che la legge di conservazione dell'energia potesse non valere a livello nucleare e subnucleare. Attorno al 1930 i fisici erano alle prese con un problema legato al decadimento beta dei nuclei, il processo in cui un nucleo di una certa specie si trasforma in un altro nucleo emettendo un elettrone. Gli elettroni emessi hanno una distribuzione continua di energia, il che è incompatibile con la legge di conservazione dell'energia, se si suppone che nel decadimento venga emesso solo un elettrone. Niels Bohr propose allora che la legge di conservazione dell'energia fosse violata a livello di

Energia e tempo

1.

Se la costante di gravità G aumentasse nel corso della giornata, potremmo creare energia pompando in alto dell'acqua la mattina e facendola ricadere in basso la sera.



Per capire in che modo la legge di conservazione dell'energia è legata all'uniformità del tempo, cioè alla simmetria delle leggi fisiche rispetto alle traslazioni temporali, si può ricorrere a un semplice esperimento ideale (suggerito dal fisico statunitense Leon Lederman). Una delle tecniche usate per immagazzinare l'energia elettrica prodotta da una centrale è l'accumulazione per pompaggio. Il principio è semplice: quando l'elettricità è abbondante, se ne utilizza il sovrappiù per pompare l'acqua di un bacino a valle verso un serbatoio a monte; quando invece scarseggia, si usa il dislivello dell'acqua per azionare una turbina e produrre così l'energia elettrica necessaria. Questo meccanismo è basato sulla legge di conservazione dell'energia. L'energia elettrica impiegata per pompare in alto l'acqua si trasforma in energia potenziale dell'acqua contenuta nel serbatoio in quota. Quando, successivamente, l'acqua precipita, la sua energia potenziale si trasforma in energia cinetica che mette in movimento la turbina (trascureremo per semplicità tutte le complicazioni del processo). Supponiamo che per qualche misterioso motivo la costante di gravità G di Newton sia soggetta a variazioni diurne: per esempio, che aumenti nel corso della giornata. Se le cose stessero così, potremmo

realizzare una macchina a moto perpetuo (cioè una macchina che produce più energia di quella che consuma) spostando per esempio una massa d'acqua da un serbatoio a terra a un serbatoio in alto e facendola poi ricadere. Il lavoro necessario a pompare l'acqua verso l'alto è uguale all'energia potenziale gravitazionale dell'acqua ed è proporzionale a G ; anche l'energia cinetica dell'acqua che ricade in basso (e che può essere utilizzata per azionare una turbina) è proporzionale a G . Dunque, se pompassimo l'acqua, quando G è piccola, consumeremmo una quantità di energia inferiore alla quantità di energia che produrremmo facendo precipitare l'acqua, quando G è grande. Il bilancio di energia sarebbe in attivo: avremmo realizzato il moto perpetuo. Nella realtà, le leggi della fisica non cambiano (fortunatamente) nel corso della giornata, e una macchina che crei energia dal nulla è irrealizzabile. Aggiungiamo che, in concreto, non è neanche possibile recuperare tutta l'energia potenziale accumulata con il pompaggio idrico, perché una parte di essa inevitabilmente si dissipa, convertendosi in energia termica (gli impianti di pompaggio hanno un'efficienza dell'ordine dell'80%, il che significa che un quinto dell'energia viene dissipata).

singoli eventi di decadimento e mantenesse solo una validità statistica (come media su un gran numero di eventi). Si sbagliava. La soluzione corretta del problema fu trovata da Pauli, il quale suggerì che nel decadimento beta, assieme all'elettrone, fosse emessa un'altra particella, neutra e poco interagente, e perciò non osservata: il "neutrino" (nome coniato da Fermi nel 1931). Si trattò, nelle parole dello stesso Pauli, di un "rimedio disperato per salvare la legge di conservazione dell'energia". La legge, in effetti, era salva: poiché in un decadimento beta sono prodotte due particelle, l'elettrone e il neutrino, l'energia può distribuirsi tra esse in modo arbitrario, e gli elettroni hanno quindi uno spettro continuo, come osservato sperimentalmente.

Nella fisica delle particelle la legge di conservazione dell'energia rappresenta oggi uno strumento di uso comune: è incorporata nei programmi di analisi dei dati e interviene sempre nell'interpretazione dei risultati sperimentali. La massa del bosone di Higgs, per esempio, è stata determinata sulla base del fatto che, in virtù della legge di conservazione dell'energia, essa deve essere uguale alla somma delle energie delle particelle in cui l'Higgs decade (quelle effettivamente osservate dai rivelatori di Lhc).

La legge di conservazione dell'energia ha attraversato indenne tutte le rivoluzioni fisiche del Novecento, rivelandosi valida in qualunque contesto, classico, relativistico e quantistico. Perché è così universale? La risposta sta in un famoso teorema enunciato dalla matematica tedesca Emmy Noether esattamente un secolo fa, nel 1918. Questo teorema stabilisce che la legge di conservazione dell'energia è una conseguenza diretta di una proprietà fondamentale del tempo: la sua uniformità. L'energia si conserva perché ogni istante di tempo è uguale a un altro e le leggi fisiche sono invarianti rispetto alle traslazioni temporali - cioè sono le stesse ieri, oggi e domani (nessun esperimento, in altri termini, dà esiti diversi a seconda dell'ora in cui viene compiuto). È proprio questo che rende speciale la legge di conservazione dell'energia: la sua validità è legata alla costanza nel tempo delle leggi di natura, senza la quale la possibilità

stessa di una descrizione fisica del mondo verrebbe messa a repentaglio. Ma, in ultima analisi, la legge di conservazione dell'energia - come tutte le leggi della fisica - è un fatto sperimentale, ed è consolante constatare che finora non è mai stata trovata alcuna evidenza di una sua violazione.



c.
La tedesca Emmy Noether (1882-1935) è stata una delle più grandi matematiche di tutti i tempi. Insegnò a Gottinga e, dopo il trasferimento negli Stati Uniti, al Bryn Mawr College in Pennsylvania.

Biografia

Vincenzo Barone insegna meccanica quantistica all'Università del Piemonte Orientale ed è associato alla sezione Infn di Torino. Si occupa di teoria delle interazioni forti. Il suo più recente libro divulgativo è *L'infinita curiosità. Breve viaggio nella fisica contemporanea* (con P. Bianucci, Edizioni Dedalo, 2017).

La ricchezza del niente

L'energia del vuoto quantistico

di Alfredo Urbano

A prima vista, il vuoto e l'energia sono due concetti completamente estranei l'uno dall'altro, ma i principi della relatività speciale e della meccanica quantistica ci portano a conclusioni ben diverse.

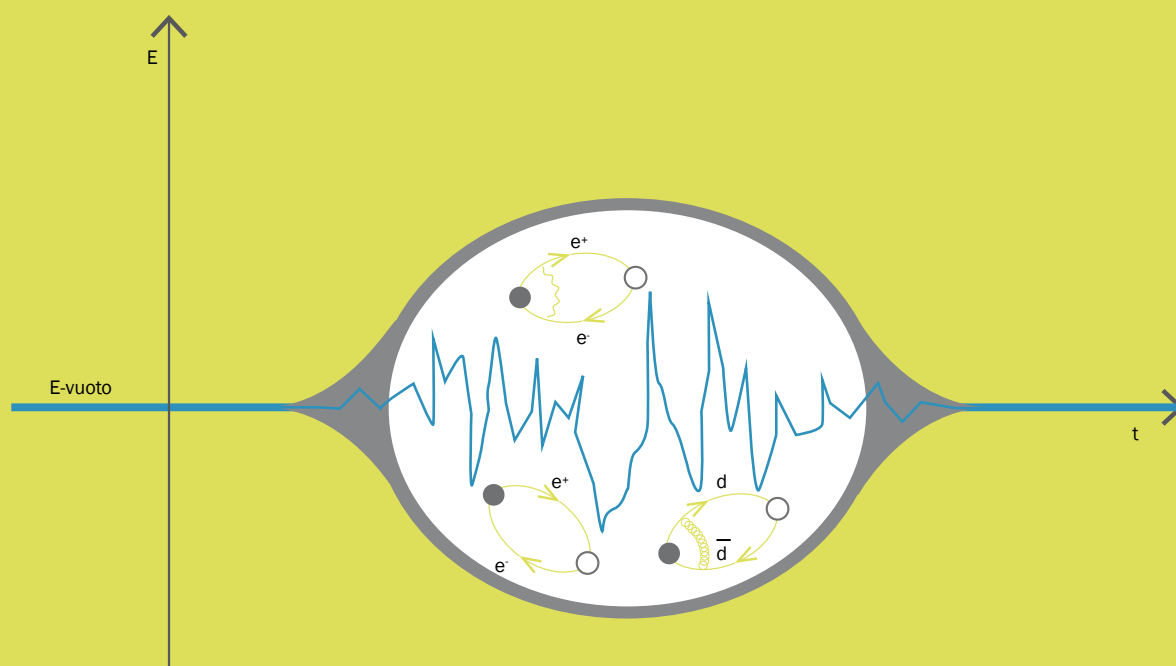
Una definizione intuitiva di vuoto potrebbe essere quella dell'assenza di materia in un determinato volume di spazio. Già nell'ambito della fisica classica tale definizione si rivela non del tutto adeguata. I lavori di Einstein sulla relatività hanno mostrato come materia ed energia siano intrinsecamente legate tra loro. È chiaro quindi come una più corretta caratterizzazione del vuoto debba necessariamente tenere conto di questa dicotomia. Nella fisica classica il vuoto è identificabile non solo con la totale assenza di materia, ma anche - e necessariamente - con l'assenza di energia, come ad esempio quella associata a un campo elettromagnetico.

Equivalentemente, lo stato di vuoto può essere definito come lo stato a energia totale nulla di un sistema.

Nella teoria quantistica dei campi la situazione è radicalmente diversa. Il principio di indeterminazione di Heisenberg - il quale vieta la possibilità di poter determinare simultaneamente posizione e quantità di moto di una particella così come energia e tempo di vita di uno stato energetico - impedisce che una misura dell'energia dello stato di vuoto possa dare esattamente valore nullo.

A causa del principio di indeterminazione il numero di particelle contenute nello stato di vuoto non può essere nullo come nell'analogo esempio classico, ma è costretto a subire fluttuazioni casuali. Il vuoto quantistico deve quindi essere immaginato come uno stato dinamico, ricco di tutte le particelle - dette "virtuali" - che vengono prodotte a causa di

a.
Il vuoto quantistico è uno stato dinamico, in cui avvengono continuamente processi di creazione e annichilazione di particelle. Di conseguenza, l'energia del vuoto non è una quantità costante, come in fisica classica, ma subisce piccolissime fluttuazioni.

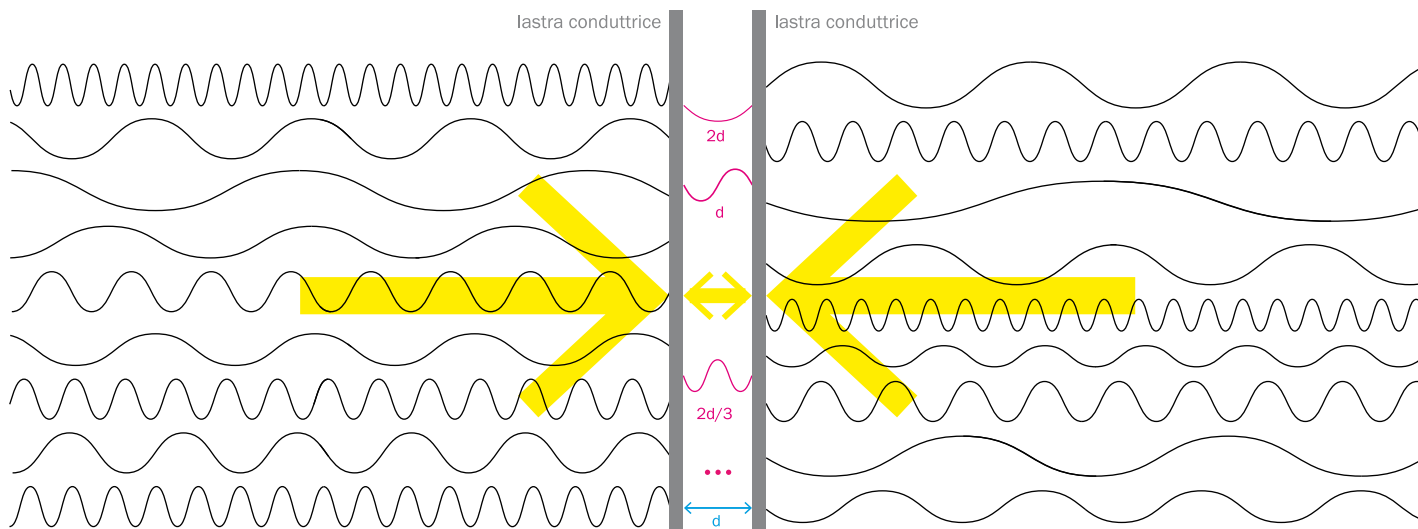


ineliminabili fluttuazioni quantistiche.

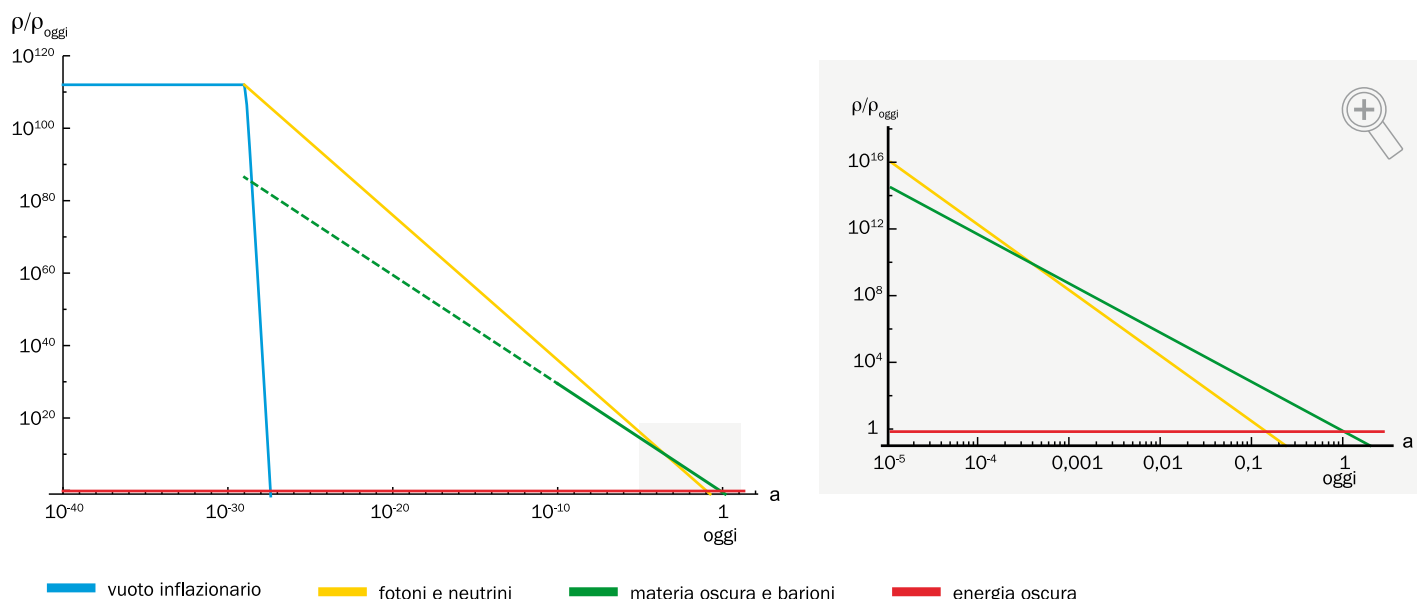
Questa definizione di vuoto quantistico, seppur apparentemente frutto di pure speculazioni teoriche, trova una straordinaria verifica sperimentale nella misura del cosiddetto “effetto Casimir”, teorizzato dal fisico olandese Hendrik Casimir, ovvero la forza attrattiva che si esercita fra due lastre conduttrici poste a piccola distanza l’una dall’altra. Se supponiamo di avere due lastre metalliche parallele poste nel vuoto alla distanza di alcuni nanometri, secondo la teoria elettromagnetica classica non dovrebbe essere misurata alcuna forza tra le due lastre, data l’assenza di qualunque tipo di campo elettromagnetico. Secondo la teoria quantistica, al contrario, tra le due lastre si esercita una forza dovuta alla presenza di fotoni virtuali, cioè le particelle quantistiche fondamentali costituenti il campo elettromagnetico nel suo stato di vuoto. Il principio che genera l’effetto Casimir è il seguente: poiché la distanza tra le lastre limita le possibili lunghezze d’onda dei fotoni virtuali - nello specifico dev’essere un sottomultiplo intero della distanza tra le lastre - ci sono meno particelle virtuali nello spazio tra le lastre rispetto a quante occupino lo spazio esterno. Ciò significa che la densità di energia tra le lastre è inferiore alla densità di energia dello spazio circostante, e questo genera una pressione negativa. L’effetto Casimir è stato osservato per la prima volta nel 1997 nei laboratori americani di Los Alamos e presso l’Università

di Riverside in California e successivamente nel 2002 presso l’Università di Padova.

Su un altro fronte, la scoperta del bosone di Higgs e il conseguente completamento del modello standard hanno messo in luce che il vuoto previsto da questa teoria potrebbe presentare delle caratteristiche molto particolari. Il vuoto del modello standard, infatti, è identificabile con lo stato di minima energia del potenziale di Higgs, in cui viene realizzata la rottura spontanea della simmetria elettrodebole. Questo tipo di vuoto, però, a quanto sembra, non è unico. Le sempre più precise misure della massa del bosone di Higgs e della massa del quark top sembrano indicare che il minimo del potenziale di Higgs in cui si realizza la rottura della simmetria elettrodebole sia solo un minimo locale (in gergo, un “falso vuoto”) e che esista un secondo minimo, più profondo, in cui il vuoto elettrodebole potrebbe decadere. Ciò renderebbe il vuoto del modello standard, lo stato in cui si trova attualmente tutto l’universo, intrinsecamente instabile, e un tale decadimento, qualora dovesse accadere, comporterebbe delle conseguenze catastrofiche. È stato però calcolato che la vita media del vuoto del modello standard, qualora instabile, sia di gran lunga superiore al tempo trascorso tra il Big Bang (o meglio, la fine dell’inflazione, vd. più avanti e fig. c) e oggi. A tale situazione viene dato il nome di “metastabilità del vuoto elettrodebole” (vd. in Asimmetrie n. 14 p. 24, ndr).



b.
Illustrazione schematica dell’effetto Casimir. Nella regione compresa tra due lastre conduttrici, le lunghezze d’onda ammesse per i fotoni virtuali devono essere un sottomultiplo intero della distanza d tra le lastre. Nelle regioni esterne tutte le lunghezze d’onda sono possibili, e quindi la maggior “densità” di fotoni virtuali crea una pressione che tende a far avvicinare le lastre.



La metastabilità del modello standard è a tutt'oggi oggetto di una intensa ricerca che coinvolge sia la fisica sperimentale che quella teorica. In particolare, la possibilità che sia un falso vuoto dipende in modo cruciale dal valore della massa del quark top. L'incertezza sperimentale con la quale quest'ultima è misurata preclude per ora la possibilità di giungere a una conclusione certa, ed è anzi ancora possibile - sebbene poco probabile - che il vuoto del modello standard sia assolutamente stabile.

Dato che il vuoto permea tutto lo spazio, e a esso, come abbiamo visto, è associata dell'energia, è naturale chiedersi quali siano invece le conseguenze di questa sull'evoluzione dell'universo. Come predetto dalla relatività generale, la presenza di energia del vuoto - o, equivalentemente, di una costante cosmologica - ha come conseguenza il fatto che l'espansione dell'universo acceleri nel tempo anziché decelerare (vd. in *Asimmetrie* n. 18 p. 30, ndr.). L'energia del

vuoto pertanto ricopre un ruolo di primaria importanza anche nella cosmologia moderna. La teoria dell'inflazione (vd. in *Asimmetrie* n. 15 p. 37 e in *Asimmetrie* n. 20 p. 21, ndr) postula che l'universo primordiale abbia attraversato una fase di espansione estremamente rapida. Questo permette di risolvere alcuni problemi concettuali come la sua straordinaria omogeneità su distanze così grandi che nemmeno i raggi di luce avrebbero potuto coprire nel tempo a disposizione dopo il Big Bang.

Ma l'importanza dell'energia del vuoto non è solo limitata all'universo primordiale. Numerosissime osservazioni mostrano infatti che l'universo si trova nuovamente in una fase di espansione accelerata. Il bilancio energetico dell'universo attuale è dominato (oltre il 68%) da una forma di energia del vuoto, detta "energia oscura", che è responsabile di questa accelerazione. L'esatta natura dell'energia oscura è tuttora oggetto di ricerca e può essere considerata come uno dei misteri più grandi della fisica teorica moderna.

c. Evoluzione delle varie componenti di energia dell'universo in funzione della sua espansione, misurata in termini del "fattore di scala" a , che corrisponde al rapporto tra la distanza tra due punti generici dell'universo a una certa epoca e la loro distanza odierna. Quindi, $a = 1$ corrisponde all'epoca attuale e $a < 1$ a un'epoca precedente all'attuale. La densità di energia di ogni componente è divisa per il valore odierno della densità totale di energia. L'energia del vuoto si comporta come una costante e, secondo la cosmologia odierna, ha svolto un ruolo determinante in due fasi della storia dell'universo: durante l'*inflazione* (per $a < 10^{-26}$), e anche oggi ($a < 1$), in cui domina l'energia oscura. Dopo l'inflazione l'universo entra in una fase dominata dalla radiazione (ossia fotoni e neutrini) (fino ad $a \sim 10^{-4}$) e successivamente dalla materia (oscura e barionica, fino ad $a \sim 0,3$). In entrambe queste epoche, l'energia diminuisce con l'espansione, in modo proporzionale rispettivamente a $1/a^4$ e $1/a^3$.

Biografia

Alfredo Urbano è un ricercatore Infn. Ha conseguito il dottorato di ricerca in fisica presso l'Università del Salento. Come ricercatore post-doc ha lavorato presso la Scuola Normale Superiore di Parigi, la Sissa di Trieste e il Cern di Ginevra. Si occupa di fisica oltre il modello standard, con particolare attenzione agli aspetti cosmologici e astroparticellari.

DOI: 10.23801/asimmetrie.2018.24.3

Una pioggia energetica

L'origine dei raggi cosmici

di Pasquale Blasi

In una sera d'estate, lontano dalle luci della città, il cielo stellato ci dà una sensazione di tranquillità che sembra contrastare con l'ansia che di solito ci è trasmessa dal buio della notte. Si tratta però di una tranquillità ingannevole: in uno storico volo in pallone nell'estate del 1911, Victor Hess svelò che la Terra è continuamente bombardata da una pioggia di particelle di alta energia di natura non solo extraterrestre ma, come fu chiaro molto tempo dopo, originate in eventi violenti nella via Lattea. Queste particelle, ora note come raggi cosmici,

hanno un ampio spettro di energie e si muovono a velocità prossime a quella della luce. Oggi sappiamo che si tratta principalmente di protoni (nuclei di atomi di idrogeno) e nuclei di elio, prodotti in gigantesche esplosioni, che forniscono le enormi energie necessarie per produrli. Ciascun raggio cosmico che colpisce la Terra porta con sé un'energia che è da milioni a centinaia di miliardi di miliardi di volte quella dei fotoni del nostro Sole, che hanno energia media di qualche eV (vd. p. 24, ndr). Dove sono prodotti questi raggi cosmici e in che

modo? Ci possono aiutare a sondare i limiti della fisica che conosciamo?

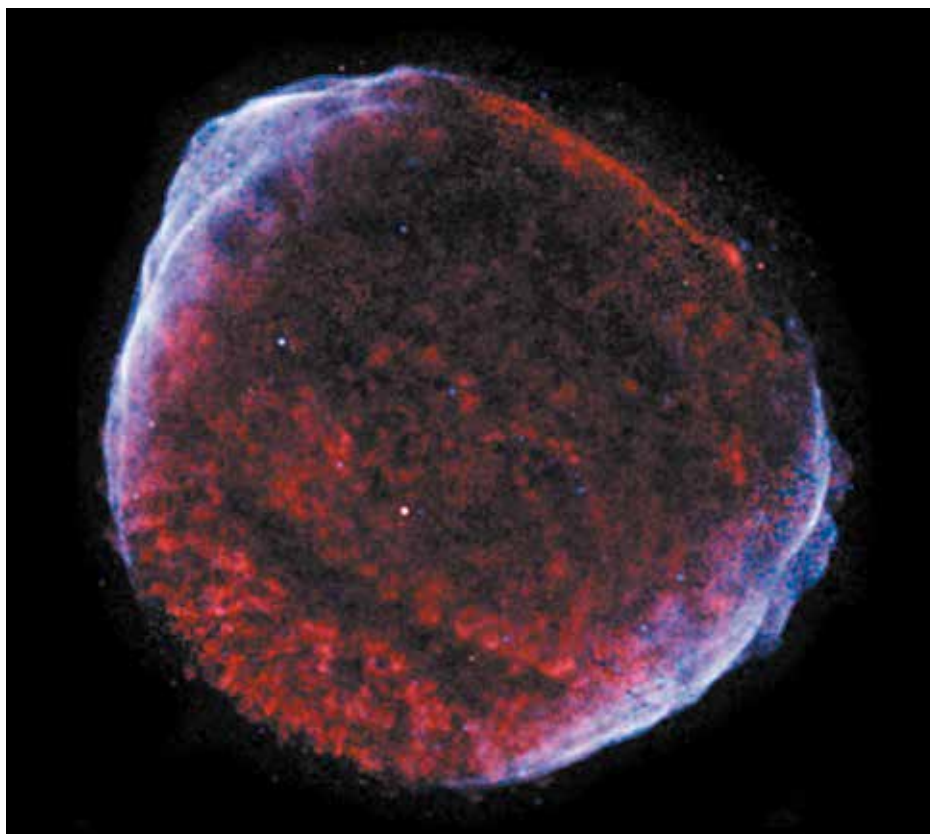
Qui sulla Terra abbiamo imparato che possiamo accelerare particelle con carica elettrica, come elettroni e protoni, facendole passare attraverso campi elettrici. In un acceleratore di particelle come Lhc, un campo magnetico forza le particelle a percorrere delle traiettorie approssimativamente circolari in un enorme anello così che lo stesso campo elettrico venga attraversato molte volte e l'energia delle particelle continui ad aumentare. Man mano che l'energia aumenta diventa più difficile curvare le traiettorie, e quindi l'energia massima che le particelle possono acquisire nell'acceleratore è determinata dalla dimensione dell'acceleratore. L'energia massima raggiunta in Lhc (di circa 10^4 GeV) è un decimilionesimo dell'energia più alta misurata nei raggi cosmici (circa 10^{11} GeV). Come fa la Natura a ottenere un effetto di gran lunga maggiore senza usare le gigantesche macchine che noi abbiamo costruito sulla Terra?

Ben lungi dalla tranquillità del nostro cielo stellato, gran parte dei raggi cosmici sono accelerati in eventi catastrofici, noti come "supernovae", che segnano la fase finale della vita di una stella.

Queste esplosioni liberano in un tempo brevissimo mille volte più energia di quanta il Sole ne avrà prodotta nella sua intera esistenza di 10 miliardi di anni.



a.
Victor Hess mentre si prepara a effettuare uno dei voli in pallone che portarono alla scoperta dell'origine cosmica della radiazione ionizzante (circa 1911).



b.
Immagine del resto di supernova SN 1006 acquisita con il satellite Chandra. Il colore rosso indica le emissioni X prodotte da gas ad altissima temperatura (milioni di gradi) e i colori blu e viola indicano la presenza di raggi X prodotti dall'accelerazione di elettroni. SN1006 è un candidato anche per l'accelerazione di protoni e nuclei.

La maggior parte di questa energia è trasportata da neutrini - aventi energie di qualche decina di milioni di eV - ma un centesimo circa viene trasformata in energia cinetica del gas espulso nell'esplosione. Questo gas si muove a circa 10.000 km al secondo attraverso il mezzo interstellare, circa mille volte più veloce del suono in quel mezzo, creando così un'onda d'urto che si espande e trascina tutto quel che incontra sul suo cammino. Possono passare migliaia di anni prima che l'inerzia del materiale accumulato dall'onda d'urto fermi l'espansione, lasciando nel cielo quelli che chiamiamo "resti di supernova", dei grandi anelli di gas che tipicamente emettono onde radio a celebrare la morte di una stella un tempo brillante. Le onde d'urto generate in un'esplosione di supernova sono siti dove i raggi cosmici possono essere accelerati grazie a un meccanismo noto, un po' impropriamente, come "accelerazione di Fermi", in onore del fisico italiano che fu il primo a descrivere un meccanismo di accelerazione statistico (vd. approfondimento a p. 19). Il campo elettrico necessario per

dare energia alle particelle è, nel caso di un'onda d'urto, dovuto a una conseguenza della relatività di Einstein: se un osservatore misura un campo magnetico, un altro osservatore in moto rispetto al primo misura anche un campo elettrico. La differenza di velocità fra il gas sui due lati dell'onda d'urto fa sì che vi sia un campo elettrico a cui le particelle elettricamente cariche reagiscono se attraversano la superficie dell'onda. L'aumento dell'energia in tale attraversamento è però piuttosto piccolo, e perché l'energia aumenti in modo considerevole è necessario che vi siano molti attraversamenti. Questo può avvenire grazie al fatto che i raggi cosmici si muovono in modo diffusivo (moto browniano) nel campo magnetico, così che rimangono attorno all'onda d'urto per tempi più lunghi. Così come per Lhc, l'energia massima raggiungibile è (almeno in parte) determinata dalla dimensione finita dell'onda d'urto. Si pensa che questo meccanismo possa spiegare la gran parte dei raggi cosmici osservati a terra, e parziale conferma di questo ci viene dalla rivelazione della radiazione gamma prodotta dagli "acceleratori cosmici" (cioè le sorgenti

astrofisiche che accelerano i raggi cosmici). Le interazioni di raggi cosmici con il gas interstellare danno infatti luogo alla generazione di pioni neutri e carichi, che decadendo producono radiazione gamma e neutrini. Per avere la certezza che le supernovae siano in grado di accelerare fino alle energie osservate nei raggi cosmici dovremo forse aspettare i nuovi dati del prossimo telescopio gamma, Cta (Cherenkov Telescope Array), che è ora in fase di costruzione e, in futuro, dei telescopi per neutrini Icecube e Km3net (vd. in Asimmetrie n. 15 p. 15, ndr).

Il viaggio dei raggi cosmici dalle loro sorgenti sino a noi è anch'esso un moto diffusivo attraverso i campi magnetici galattici e intergalattici. Le misure più recenti realizzate con Ams-02 sulla stazione spaziale internazionale orbitante ci hanno fornito informazioni preziose su questo viaggio. Durante questo viaggio i raggi cosmici subiscono diverse reazioni nucleari che portano alla produzione di nuclei secondari - come il boro - e di radiazione gamma e di antimateria, osservate dagli esperimenti Pamela e Ams-02 (vd. in Asimmetrie n. 18 p. 26, ndr.). La misura dell'eccesso di positroni conferma la presenza di sorgenti aggiuntive di antimateria: le pulsar, stelle di neutroni rapidamente rotanti capaci di produrre copiosamente positroni, potrebbero essere ottimi candidati. La comunità sta anche studiando possibili anomalie sul flusso di antiprotoni che potrebbero risultare cruciali per il futuro della fisica dei raggi cosmici.

I raggi cosmici osservati a terra raggiungono energie circa 100 miliardi di volte più alte della massa a riposo di un protone (che è pari a 1 GeV), un'energia inimmaginabile da produrre

in un laboratorio terrestre. E in realtà non è facile capire come la natura stessa riesca a compiere questo prodigio. Il flusso di queste particelle che raggiunge la Terra è bassissimo, meno di una particella al km² al secolo, ed è per questo che la loro rivelazione richiede esperimenti di dimensioni gigantesche, come il telescopio Auger, che copre una superficie di circa 3000 km² nella Pampa argentina. Persino l'intera nostra Galassia è troppo piccola per confinare magneticamente particelle di tale energia: le loro sorgenti vanno perciò cercate al di fuori del nostro quartiere cosmico.

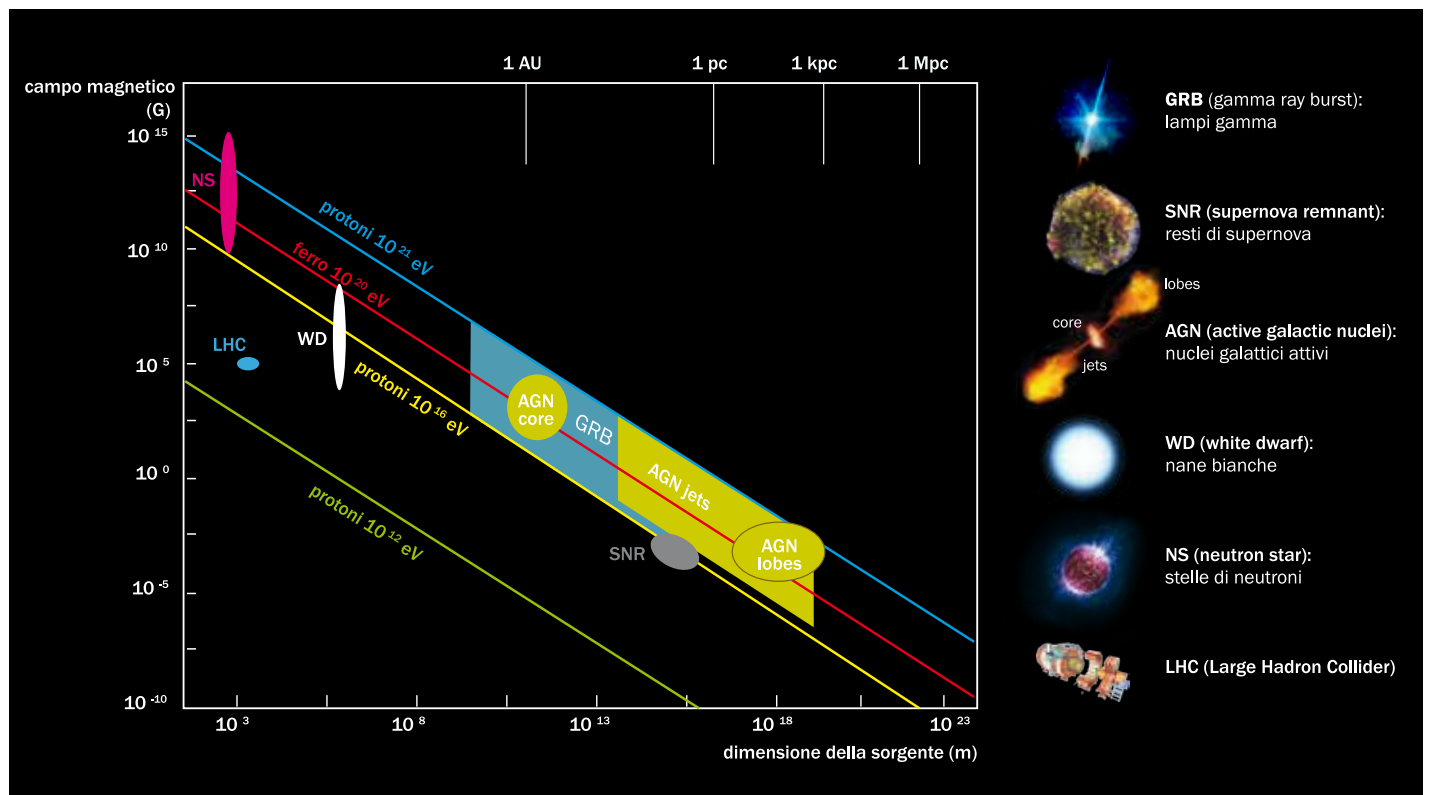
A energie superiori a circa 10²⁰ eV, i raggi cosmici perdono gran parte della loro energia interagendo con la radiazione cosmica di fondo, residuo del Big Bang. Quest'ultimo processo - noto come effetto "gzk" dalle iniziali dei fisici Greisen, Zatsepin e Kuz'min che lo descrissero per primi - riduce drasticamente la probabilità che i raggi cosmici di energia estrema raggiungano la Terra da distanze superiori a circa 10 milioni di anni luce, il che si riflette in una drastica riduzione del loro flusso.

Un utile strumento per valutare quali siano

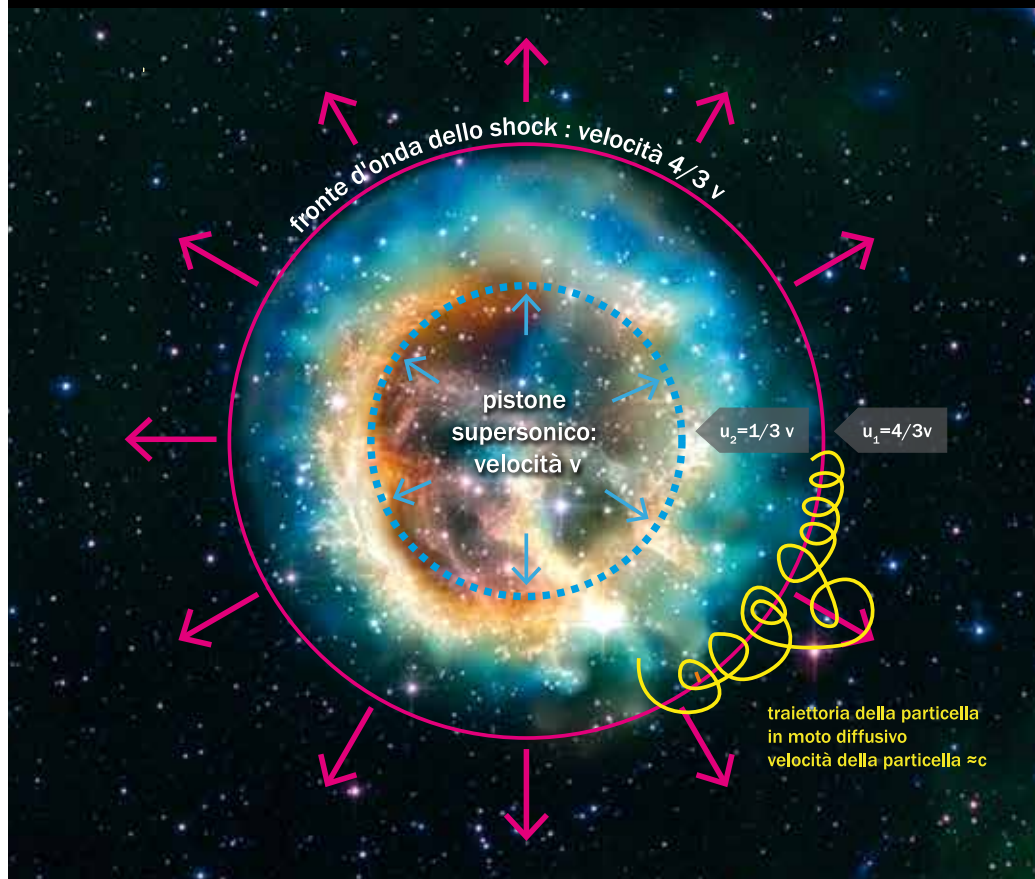
le possibili sorgenti dei raggi cosmici di energia estrema è il cosiddetto diagramma di Hillas (vd. fig. c). Come per gli acceleratori di particelle di costruzione umana, anche per gli acceleratori cosmici l'energia massima che le particelle possono raggiungere è funzione della dimensione della sorgente e del suo campo magnetico. Per accelerare le particelle di altissima energia osservate a terra, occorre cercare sorgenti molto estese o con campi magnetici relativamente alti. Fra gli indiziati ci sono le galassie attive, che ospitano buchi neri di massa miliardi di volte quella del nostro Sole, i lampi gamma e giovanissime stelle di neutroni rapidamente ruotanti. I dettagli dei meccanismi di accelerazione sino alle estreme energie osservate sono tutt'altro che chiari. La natura extra-galattica dei raggi cosmici di altissima energia è stata recentemente confermata dalla misura dell'anisotropia delle direzioni di arrivo di queste particelle, simile a un dipolo, effettuata dall'osservatorio Pierre Auger. Tali misure hanno anche rivelato che alle energie più alte i raggi cosmici sembrano essere composti principalmente da nuclei pesanti e non da idrogeno, un risultato un po' inatteso che la comunità sta ancora studiando.

c.

Il diagramma di Hillas permette di identificare, con buona approssimazione, le classi di sorgenti candidate per la produzione di raggi cosmici di alta energia, secondo una relazione che lega il campo magnetico, espresso in Gauss, e le dimensioni della sorgente, in metri, all'energia massima raggiungibile dai raggi cosmici prodotti in quell'ambiente astrofisico. Le rette in figura delimitano i semipiani alla destra dei quali l'accelerazione di particelle di una data energia è possibile; sono inoltre indicate le sorgenti che hanno le caratteristiche fisiche per accelerare tali particelle. In ascissa sono anche riportate le unità di misura delle distanze comunemente usate in astrofisica: 1AU (unità astronomica), corrispondente alla distanza Terra-Sole pari a circa $1,5 \times 10^{11}$ m; 1 pc (parsec) corrispondente a circa $3,1 \times 10^{16}$ m (cioè 3,26 anni luce) e i suoi multipli, il kiloparsec (10³ pc) e il megaparsec (10⁶ pc). Per confronto sono inseriti i parametri di Lhc, che accelera particelle fino a energie di circa 10 TeV.



L'accelerazione di Fermi



1.

L'esplosione di una supernova genera un'onda d'urto nel gas interstellare. La massa espulsa preme sul gas come un pistone supersonico che si muove a velocità v , molto minore della velocità della luce c , ma maggiore della velocità del suono nel mezzo. Seduti sul fronte dell'onda d'urto, che si propaga con velocità $4/3 v$, il mezzo interstellare ci viene incontro a velocità u_1 e rallenta a velocità u_2 dopo aver attraversato il fronte. Il moto diffusivo delle particelle all'interno del gas, dovuto alla presenza di campi magnetici, consente di attraversare il fronte d'onda diverse volte prima che le particelle siano trasportate via. Ad ogni attraversamento la particella guadagna un'energia proporzionale alla sua energia iniziale moltiplicata per $4/3 v/c$. Poiché le velocità u_1 e u_2 sono tutte molto minori della velocità della luce c , il guadagno energetico è molto piccolo e sono necessari moltissimi attraversamenti prima che la particella acquisti le enormi energie rivelate a terra.

I meccanismi di accelerazione astrofisici permettono la conversione dell'energia cinetica di una massa macroscopica - ad esempio un plasma formato da protoni ed elettroni - nell'energia di poche particelle presenti all'interno dello stesso plasma che però non rimangono in equilibrio termico con esso. Il cosiddetto "meccanismo di Fermi" rappresenta il caso meglio studiato. Esso ha luogo quando un plasma è investito da un'onda d'urto, come quelle prodotte dalle esplosioni di supernova. Se fossimo seduti sul fronte dell'onda d'urto, vedremmo il mezzo interstellare - tipicamente formato da atomi di idrogeno - arrivarci incontro a velocità $u_1 = 4/3 v$, dove v è la velocità della massa espulsa, che agisce come un "pistone supersonico", e allontanarsi dal lato opposto, con velocità $u_2 = 1/3 v$, rallentato e riscaldato. Parte dell'energia cinetica del gas investito dall'onda d'urto viene infatti trasformata in energia termica. Alcune delle particelle cariche che attraversano il fronte dell'onda d'urto riescono, nel loro moto diffusivo, a tornare dall'altro lato.

Nel passaggio tra le due regioni le particelle guadagnano energia, accelerate dal campo elettrico prodotto (come predetto dalla relatività) dai campi magnetici presenti nei plasmi sui due lati del fronte d'onda. Se l'onda d'urto si muove con velocità molto minore di quella della luce, il guadagno di energia è piccolo e richiede molti passaggi delle particelle attraverso il fronte d'onda affinché si raggiungano le alte energie osservate nei raggi cosmici.

L'energia conferita alle particelle accelerate viene sottratta al moto ordinato del gas che attraversa l'onda, un po' come accade per il riscaldamento. Si è compreso di recente che il moto delle particelle accelerate attorno alla superficie dell'onda d'urto provoca esso stesso delle perturbazioni del campo magnetico capaci di intrappolare i raggi cosmici nell'acceleratore e rendere l'accelerazione più efficace. Il fenomeno di accelerazione è intrinsecamente non-lineare, nel senso che i raggi cosmici modificano l'ambiente in cui vengono accelerati.

Biografia

Pasquale Blasi è professore presso il Gran Sasso Science Institute, centro di studi avanzati de L'Aquila. Membro del Comitato Editoriale della rivista *Astroparticle Physics*, membro della commissione C4 della International Union for Pure and Applied Physics (Iupap). Ha fatto ricerca presso l'Università di Chicago e presso il Fermilab. Dal 2001 al 2017 è stato ricercatore dell'Inaf - Osservatorio Astrofisico di Arcetri. Nel 2003 gli è stato conferito il premio Shakti P. Duggal per il suo lavoro sull'origine dei raggi cosmici.

Luce dal buio

La nascita delle prime stelle

di Raffaella Schneider

Nei primi 200 milioni di anni di evoluzione cosmica, stelle e galassie non esistevano. L'unica sorgente di energia era la radiazione di fondo cosmico, il calore residuo del Big Bang, che all'epoca aveva una temperatura media di circa 85 Kelvin, corrispondenti a -188 gradi Celsius. L'universo era quindi freddo, buio e relativamente noioso. Niente a che vedere con le immagini alle quali i moderni telescopi ci hanno abituati. Oggi vediamo stelle, pianeti, le suggestive regioni di formazione stellare nella nostra galassia e migliaia di galassie esterne alla nostra caratterizzate da una grande varietà di forme e colori.

È stata proprio la comparsa delle prime stelle a segnare una transizione fondamentale nella storia dell'universo. Le prime stelle attivano al loro interno la fusione termonucleare, per la prima volta dopo il Big Bang. L'energia liberata dalla loro superficie ed emessa sotto forma di radiazione elettromagnetica illumina le regioni circostanti, riscaldando e ionizzando il gas. L'effetto di questa radiazione sugli atomi di idrogeno, che rappresentano il 75% della massa di gas nell'universo, potrebbe avere causato la leggera distorsione della radiazione di fondo cosmico recentemente misurata dall'esperimento Edges. Se confermata, questa sarebbe la prima prova osservativa, anche se indiretta, dell'esistenza delle prime stelle, datandola a 180 milioni di anni dopo il Big Bang. Attraverso i venti stellari e le esplosioni di supernova le prime stelle liberano nel gas circostante anche i prodotti della fusione termonucleare avvenuta al loro interno. L'universo inizia così ad arricchirsi degli elementi fondamentali per la vita, carbonio, ossigeno, azoto, fino ad arrivare a elementi più pesanti come il ferro. L'insieme di questi processi avvia



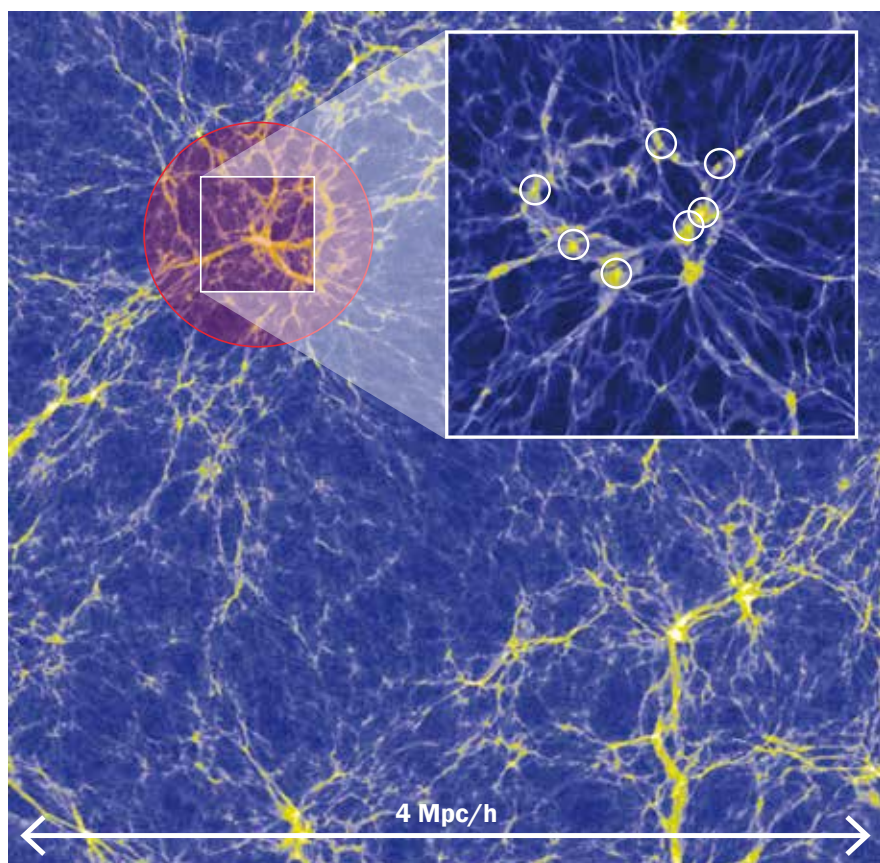
l'evoluzione delle strutture cosmiche, trasformando l'universo dallo stato di relativa semplicità che precede la formazione delle prime stelle allo stato di grande complessità che oggi osserviamo intorno a noi. L'impatto delle stelle sull'evoluzione delle galassie dipende fortemente dalle loro proprietà fisiche e in particolare dalla loro "metallicità" e dalla loro "funzione di massa iniziale". La metallicità di una stella è una grandezza che si indica con la lettera Z e che misura la concentrazione di elementi

a.
La nebulosa di Orione è la regione di formazione stellare più vicina a noi (si trova a circa 1500 anni luce) e per questo motivo una delle più studiate. Nell'immagine del telescopio spaziale Hubble (in realtà una composizione di 520 immagini diverse che coprono una regione simile alla dimensione apparente della luna piena) si osservano più di 3000 stelle con masse ed età diverse.

chimici più pesanti dell'idrogeno e dell'elio presenti nel gas dal quale la stella si è formata. Gli astrofisici chiamano impropriamente "metalli" tutti gli elementi più pesanti dell'elio, anche se sulla tavola periodica i metalli sono una classe di elementi chimici ben definita, che comprende l'argento, l'alluminio, il ferro, ecc. La metallicità del Sole Z_{sun} è pari a 0,0142, ovvero circa l'1,4% della massa del Sole (che si indica con M_{sun}). La restante parte del gas del Sole è composta per circa il 72% d'idrogeno e per circa il 27% di elio. La massa di una stella che si formi dal gas primordiale, arricchito solo degli elementi chimici leggeri prodotti nel Big Bang, sarà composta per circa il 75% da idrogeno, per circa il 25% da elio e, trascurando una concentrazione molto piccola di deuterio e di litio, si può dire che abbia metallicità zero (ovvero $Z = 0$). La funzione di massa iniziale delle stelle descrive invece la probabilità che si formino stelle di una certa massa. Secondo le attuali conoscenze, solo il 10-15% delle stelle ha una massa maggiore di una massa solare ($1 M_{\text{sun}}$), e questa frazione diventa minore del 3-5% per masse maggiori di $10 M_{\text{sun}}$: la stragrande maggioranza delle stelle, quindi, ha una massa leggermente più piccola o confrontabile con quella del Sole! Cosa si può dire sulla funzione di massa iniziale delle stelle primordiali? Non avendo mai osservato una stella primordiale possiamo basarci solo sui risultati di modelli teorici che, partendo dalle condizioni fisiche che pensiamo caratterizzassero le prime regioni di formazione stellare, provano a predire le masse delle stelle risultanti. Questi

modelli suggeriscono che la stragrande maggioranza delle prime stelle dovesse avere una massa da qualche decina a qualche centinaia di volte maggiore della massa del Sole. Molto più grande di quella della maggioranza delle stelle che oggi osserviamo intorno a noi.

Per rimanere in equilibrio, stelle di masse così grandi hanno nuclei molto caldi e le reazioni termonucleari che avvengono al loro interno sono molto efficienti. Per questo motivo, nel giro di pochi milioni di anni, si esaurisce il combustibile nucleare e le stelle terminano la propria vita esplodendo come supernovae o collassando e trasformandosi in un buco nero. La prima reazione termonucleare che si attiva nel nucleo delle stelle primordiali è quella che trasforma l'idrogeno in elio attraverso la cosiddetta "catena protone-protone" (o "catena pp", vd. fig. c a p. 22) mediante la quale quattro nuclei d'idrogeno (quattro protoni) sono trasformati in un nucleo di elio composto di due protoni e due neutroni. La trasformazione di un protone in un neutrone prende il nome di "decadimento β^+ " ed è una reazione molto inefficiente, perché mediata dalle interazioni deboli (vd. p. 24, ndr). Nelle stelle come il Sole, la catena pp si attiva quando la temperatura nel nucleo raggiunge 4-5 milioni di gradi e la combustione dell'idrogeno in elio nel nucleo della stella richiede circa 10 miliardi di anni. Questo intervallo temporale è quello che determina la durata della vita della stella, perché le fasi evolutive successive avvengono molto più rapidamente. Nelle stelle di massa maggiore, che raggiungono temperature nucleari di almeno 15 milioni di gradi, se sono presenti anche



b.
Simulazione al computer di regioni di formazione stellare primordiale. La figura mostra come la materia si distribuisca lungo una rete di filamenti. I filamenti di colore più chiaro sono quelli nei quali il gas riesce a raffreddarsi e a raggiungere le densità necessarie a formare le prime stelle. La figura più piccola è un ingrandimento della regione circolare colorata. La simulazione mostra che le prime stelle si formano all'interno di regioni d'intersezione di filamenti diversi (cerchiate in bianco). A causa dell'assenza di metalli e polveri, il raffreddamento del gas primordiale è poco efficiente e le masse delle prime stelle sono molto maggiori delle masse delle stelle che si formano oggi nella nostra galassia e hanno masse di decine o centinaia di masse solari.

piccole concentrazioni di carbonio e ossigeno, la trasformazione dei quattro nuclei di idrogeno in un nucleo di elio avviene attraverso la mediazione del carbonio mediante il “ciclo del carbonio-azoto-ossigeno” (vd. in Asimmetrie n. 9 p. 12, ndr).

Il tempo di vita di una stella di $10 M_{\text{sun}}$ è di circa 30 milioni di anni. Una stella primordiale di $100 M_{\text{sun}}$ raggiunge temperature centrali di 100 milioni di gradi ma, essendo del tutto priva di carbonio, la combustione dell'idrogeno in elio si attiva solo attraverso la catena pp. A causa delle elevate temperature, la combustione avviene però anche in modi non convenzionali. Infatti, si può innescare contemporaneamente la combustione dell'elio, che porta alla produzione di carbonio, che rende possibile l'attivazione del ciclo del carbonio-azoto-ossigeno: in appena un milione di anni la stella completa la combustione nucleare dell'idrogeno in elio.

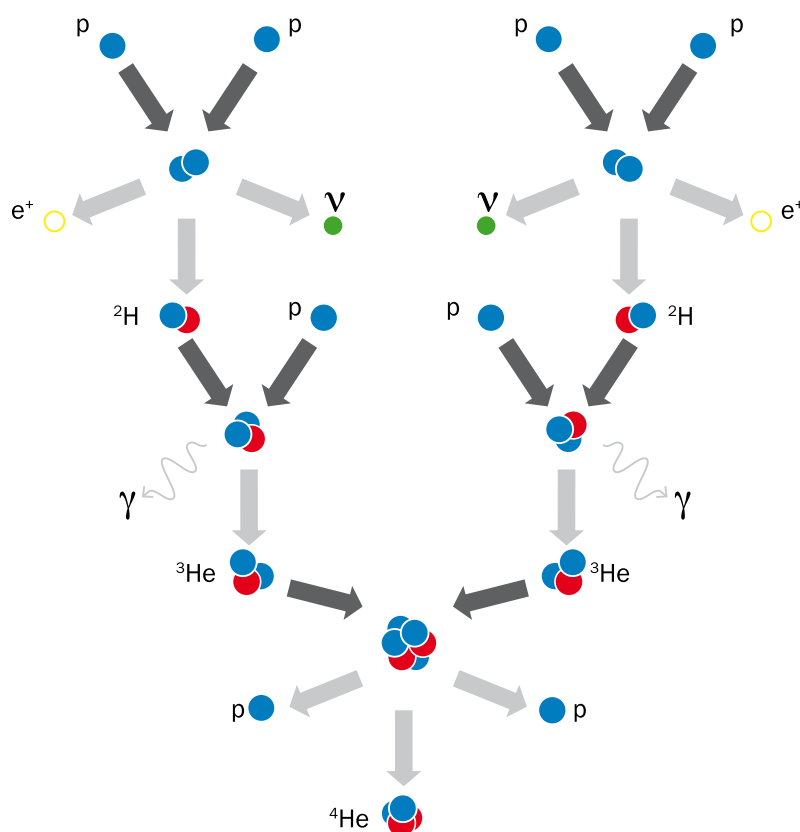
La rapida successione di eventi che accompagna la fase di combustione

dell'elio in carbonio e le fasi di combustione più avanzate dipendono dalla massa della stella. Se le stelle hanno una massa tra 10 e $40 M_{\text{sun}}$ e tra 140 e $260 M_{\text{sun}}$, nelle fasi avanzate di combustione si incontra un'instabilità che sottrae energia alla stella, portandola prima a collassare e poi ad esplodere. Per stelle di massa compresa tra 40 e 120 masse solari l'onda d'urto associata al collasso è troppo debole per indurre un'esplosione di supernova e l'intera stella collassa a buco nero. Per stelle di massa maggiore di $260 M_{\text{sun}}$, durante il collasso le temperature all'interno del nucleo diventano così elevate da indurre la foto-disintegrazione dei nuclei. L'energia della stella viene così dispersa e il collasso non può essere arrestato, portando alla formazione di un buco nero con una massa confrontabile a quella originaria della stella.

Che esplodano come supernovae o che collassino a buco nero, le prime stelle hanno un ruolo importantissimo nella catena di eventi che porterà alla

formazione di galassie, stelle e sistemi planetari. Saremo mai in grado di osservarle? L'epoca remota in cui si formano e la breve durata della loro vita rendono molto difficile la loro osservazione diretta, anche con il James Webb Space Telescope (Jwst), il telescopio spaziale che verrà messo in orbita nel 2019. È probabile, però, che il telescopio Jwst sarà in grado di osservare le rare ma potenti esplosioni di supernovae con masse tra 140 e $260 M_{\text{sun}}$. Infine, le prime stelle che terminano la loro vita in modo meno appariscente e collassano formando un buco nero potrebbero rappresentare i piccoli semi da cui si formano i buchi neri supermassicci che sappiamo esistere nei nuclei di quasi tutte le galassie, compresa la Via Lattea.

Buchi neri con masse fino a 10 miliardi di volte la massa del Sole sono stati osservati anche nei nuclei delle galassie antiche, quando l'universo aveva meno di 1 miliardo di anni e comprenderne il meccanismo di formazione rappresenta una delle grandi frontiere dell'astrofisica.



c.
La “catena protone-protone”, il primo ciclo di combustione che si sviluppa in una stella, è ancora il processo dominante nella combustione del Sole: nell'interazione tra due protoni con sufficiente energia cinetica, uno di essi può trasformarsi per interazione debole in un neutrone, un positrone e un neutrino, permettendo la formazione di uno stato legato p-n, ossia un nucleo di deuterio (^2H). Il deuterio può successivamente assorbire un altro protone, trasformandosi nel nucleo di elio-3 (^3He) con emissione di un fotone. Due nuclei di elio-3 possono ora fondersi in un nucleo di elio-4 (^4He), liberando due protoni. L'energia cinetica di tutti gli oggetti prodotti è maggiore di quella dei sei protoni di partenza: la catena produce complessivamente oltre 26 MeV di energia cinetica, che contribuiscono all'energia termica della stella.



La speranza è di riuscire a osservare questi buchi neri quando si “attivano”, ovvero quando aumentano la loro massa accrescendo la materia che gli orbita vicina che, scaldata, emette radiazione. Alcuni di questi buchi neri potrebbero trovarsi in sistemi binari e, alla loro coalescenza, emettere segnali gravitazionali del tutto simili a quelli recentemente scoperti, ma a frequenze molto più basse, che non potrebbero

essere rivelati dagli strumenti Ligo/Virgo (vd. in *Asimmetrie* n. 21 p. 10, ndr) a causa dell'interferenza dovuta a tante fonti di rumore presenti sulla Terra. Per la loro misura dovremmo attendere il 2034, quando inizierà la missione Lisa, la prima antenna gravitazionale nello spazio. Ci avviciniamo sempre di più a comprendere come l'universo sia passato dal buio alla luce e il futuro di questa ricerca è luminoso.

d.
Lo specchio del James Webb Space Telescope (Jwst) a Goddard durante la sua costruzione nel Johnson Space Center.

Biografia

Raffaella Schneider è professore presso il Dipartimento di Fisica della Sapienza Università di Roma. Autrice di più di 100 pubblicazioni scientifiche, si occupa della formazione ed evoluzione di stelle, buchi neri e galassie nell'universo primordiale. Nel 2012 ha vinto uno Starting Grant dello European Research Council per il progetto “FIRST: the first stars and galaxies”. Svolge una intensa attività divulgativa rivolta alle scuole, ai bambini e al grande pubblico.

Link sul web

<http://www.eso.org/public/outreach/>
<http://www.esa.int/Education>
<http://www.oa-roma.inaf.it/FIRST/>

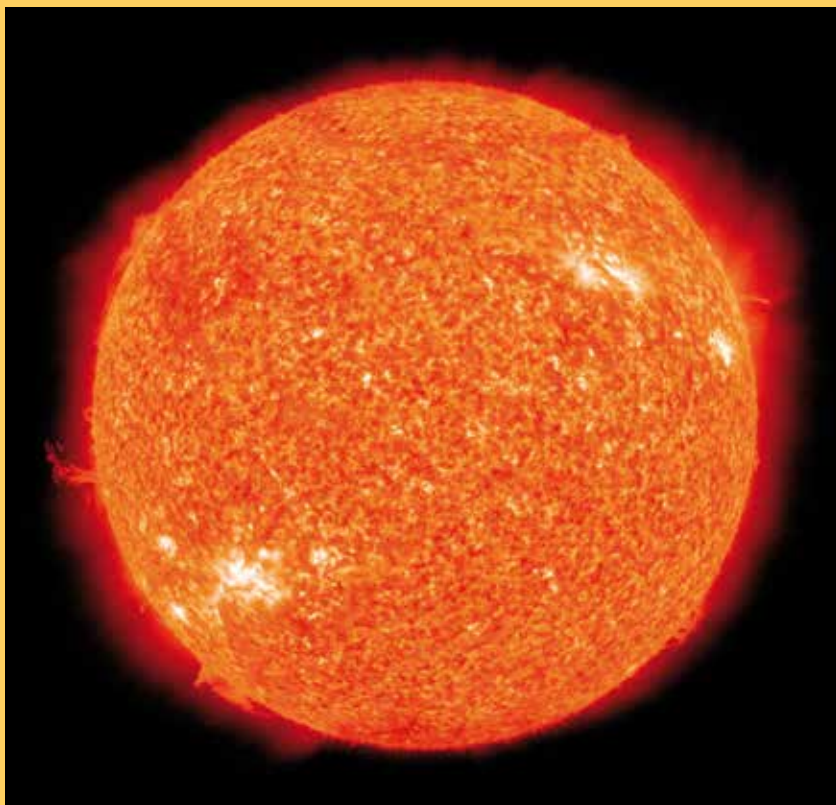
DOI: 10.23801/asimmetrie.2018.24.5

Il Sole in Terra

Le prospettive della fusione nucleare controllata

di Marco Ripani

a.
Il Sole ripreso in falsi colori dal Solar Dynamics Observatory della Nasa nella banda dell'ultravioletto. Il Sole rimane "acceso" grazie alla fusione nucleare.



Solitamente non poniamo grande attenzione alle condizioni che rendono possibile la vita sul nostro pianeta. Una di queste è la disponibilità di energia. Ciò che rende possibile gustare della buona frutta o stendersi piacevolmente su una spiaggia, è l'energia che il Sole irradia continuamente nello spazio e che viene captata dalla Terra.

La fonte di energia che tiene il Sole "acceso" e che ci inonda di calore ha origine nella "fusione di nuclei leggeri". Alla base di questo processo nucleare vi è la formazione di un "plasma" a partire da atomi di idrogeno (formati da un nucleo composto da una sola particella, il protone, e da un "guscio" composto da un elettrone). In un gas di idrogeno riscaldato a temperature di 10-20.000 gradi, gli atomi si muovono velocemente e si scontrano tra loro violentemente, tanto che gli elettroni vengono strappati via e quindi si hanno protoni ed elettroni liberi.

Quindi basta prendere un po' di idrogeno gassoso, costruire una specie di forno per scaldarlo a quelle temperature, e si può accendere un Sole in laboratorio? No, non basta.

Nel nostro plasma i protoni si scontrano continuamente, ma essendo dotati di carica elettrica positiva, non possono avvicinarsi così tanto da fondersi. Se però aumentiamo la temperatura a una decina di milioni di gradi, ecco che due protoni che si scontrano, nonostante la forza elettrica che li respinge, possono avvicinarsi così tanto da sentire la forza nucleare forte, che tiene insieme protoni e neutroni nei nuclei. Questo però non è ancora sufficiente e soprattutto in questo avvicinamento non si produce energia, perché non esiste uno stato legato stabile formato solo da due protoni (^2He , un nucleo di elio senza neutroni). Ma ogni tanto entra in gioco un altro elemento, la forza nucleare debole, che nel breve tempo in cui i due protoni sono così vicini, trasforma uno dei due protoni in un neutrone, con l'emissione contemporanea di un positrone e di un neutrino. Ecco che allora protone e neutrone possono stare insieme e formare un nuovo nucleo, il nucleo di deuterio. Inoltre, poiché la massa totale di deuterio, positrone e neutrino è inferiore alla massa dei due protoni, secondo la famosa equivalenza di Einstein una parte di massa

si è trasformata in energia. Questo è il processo primario che avviene nel Sole (vd. in Asimmetrie

n. 9 p. 12, ndr), ma in modo estremamente lento, proprio perché necessita della forza debole, caratterizzata da bassa probabilità di interazione e quindi tempi di azione lunghi. Ma allora se volessimo riprodurre la fusione in laboratorio, che combustibile potremmo usare? Fortunatamente, abbiamo disponibili anche gli isotopi dell'idrogeno: il deuterio, presente in natura, e il trizio, "fratelli" chimicamente uguali (anche loro con un solo elettrone atomico) ma i cui nuclei sono composti da un protone e un neutrone nel caso del deuterio e da un protone e due neutroni nel caso del trizio. A temperature sufficientemente alte, anche deuterio e trizio possono fondere, dando origine a un nucleo di elio (due protoni e due neutroni) con emissione di un neutrone libero e un notevole rilascio di energia (vd. fig. b).

Inoltre, questo avviene anche con tempi enormemente più brevi della fusione protone-protone, il che rende la reazione abbastanza frequente da pensare di utilizzarla in un impianto vero e proprio per la produzione di energia.

Le reazioni di fusione, inoltre, producono una quantità minima di "scorie" nucleari, che

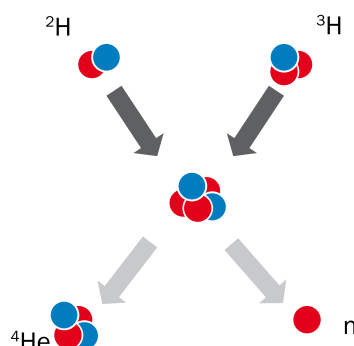
invece vengono prodotte in modo significativo nei processi di fissione dei nuclei pesanti come l'uranio o il plutonio.

Ci sono però tre problemi per realizzare una piccola copia del Sole sulla Terra. Il primo è che il plasma dev'essere sufficientemente denso per avere un numero utile di reazioni. Il secondo è che il plasma va mantenuto caldissimo (a decine o centinaia di milioni di gradi) e lontano dalle pareti del suo contenitore. Se esso venisse a contatto con i materiali delle pareti, li danneggerebbe, venendo pure inquinato da atomi estranei strappati ai materiali o venendo assorbito dalle pareti, privando così l'impianto di combustibile, e inoltre si raffredderebbe. Il terzo è che il plasma dev'essere intrappolato per un tempo sufficientemente lungo a produrre la fusione e raccoglierne l'energia prodotta. Perciò, dovremo adottare qualche trucco tecnologico per intrappolare il plasma e tenerlo lontano dalle pareti del forno, come per esempio mettere il tutto dentro un magnete, che costringe le particelle cariche del plasma a girare attorno alle linee di campo magnetico senza andare troppo in giro. Inoltre, le pareti dell'impianto dovranno essere protette da appositi materiali, per esempio utilizzando piastrelle di tungsteno, in grado di reggere il calore

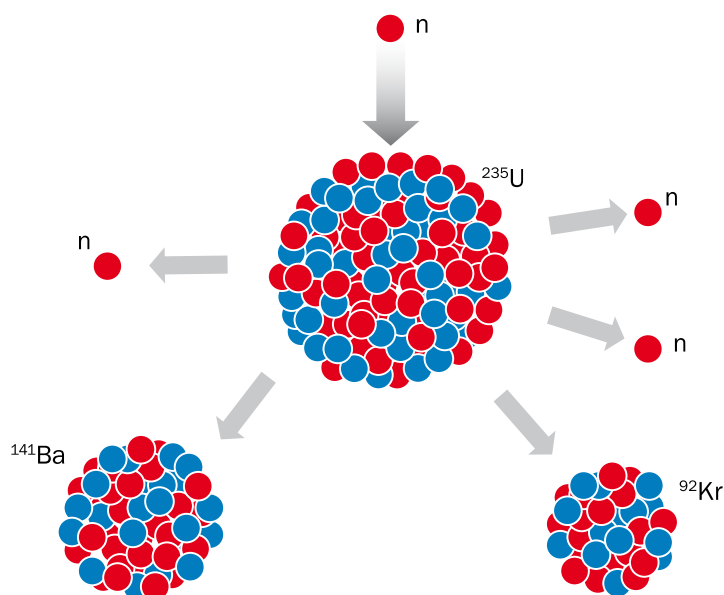
b.

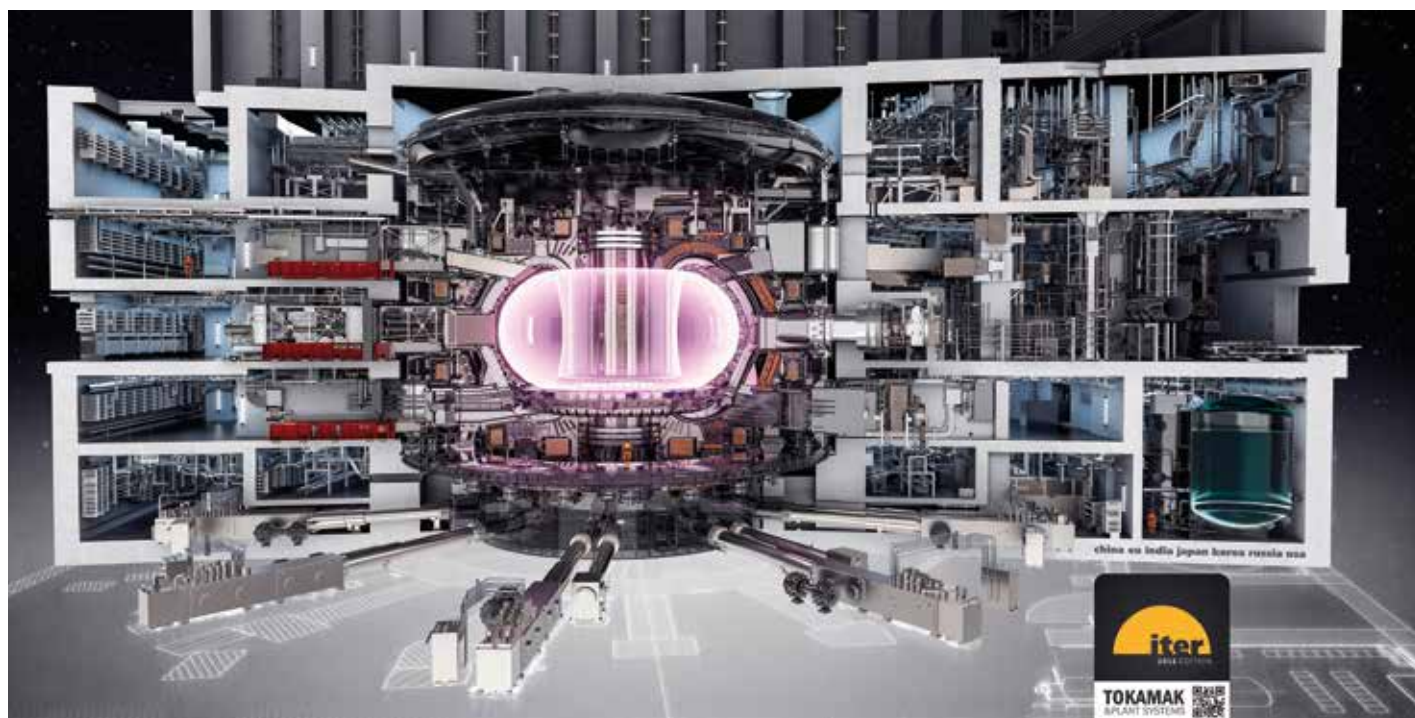
A sinistra il processo di fusione nucleare di un nucleo di deuterio (^2H) e uno di trizio (^3H). Nei reattori che attualmente producono energia nucleare avviene il processo "inverso", quello chiamato di "fissione nucleare" (a destra nella figura). Le reazioni di fissione utilizzano come combustibile elementi chimici molto pesanti, come l'uranio (U) o il plutonio (Pt), la cui massa atomica è superiore a 200. Questi nuclei, inizialmente bombardati con neutroni dall'esterno, si scindono (da cui il termine fissione) producendo elementi più leggeri, nel caso in figura il kripton (Kr) e il bario (Ba) e altri neutroni. I nuovi neutroni, a loro volta, danno origine ad altre fissioni del combustibile, permettendo alla reazione di "autosostenersi" e creare energia utilizzabile dall'uomo.

FUSIONE



FISSIONE





innanzitutto a essere un “amplificatore” di energia, cioè a produrre più energia di quella che viene utilizzata per riscaldare e mantenere la fusione nel plasma. Inoltre, mentre il deuterio è abbondantemente presente nell’acqua, il trizio non è disponibile in natura e quindi deve venire prodotto artificialmente. L’ipotesi è quella di usare una reazione nucleare in cui i neutroni energetici prodotti dalla fusione stessa interagirebbero con del litio (relativamente abbondante in natura e presente in molte delle batterie che utilizziamo per computer, tablet e cellulari), producendo elio e trizio. Iter punta quindi anche a dimostrare che utilizzando questa tecnica l’impianto è in grado di autoprodurre il trizio necessario al suo funzionamento. Il primo plasma è atteso nel 2025, mentre il raggiungimento di condizioni di fusione con miscela di deuterio-trizio è previsto nel 2035. Oltre alla dimostrazione della capacità di produrre energia da fusione in grandi quantità vi è la necessità di sviluppare materiali in grado di sostenere l’elevato flusso neutronico. Ciò richiede ulteriori prove sui materiali. Per questo è in corso di realizzazione Ifmif (International Fusion Material Irradiation Facility), un laboratorio dove si riproducono le condizioni gravose determinate dalla fusione. A tale progetto l’Infn dà un importante

contributo tecnico-scientifico con la realizzazione di una sorgente di neutroni molto intensa, basata su un potente acceleratore di nuclei di deuterio. Il passo successivo sarà la costruzione della prima centrale a fusione: Demo (Demonstrating fusion power reactor), in grado di produrre energia elettrica, prevista attorno alla metà di questo secolo. Si tratta certamente di una delle più grandi imprese dell’umanità, paragonabile per ambizione e complessità alla conquista dello spazio, con l’obiettivo di rendere disponibile una nuova fonte di energia pulita, sicura, praticamente inesauribile e libera da CO₂.

d.

In figura è mostrato uno schema del futuro reattore sperimentale a fusione Iter all’interno del suo edificio in cemento. Al centro si intravede la struttura toroidale della camera a vuoto in cui viene confinato il plasma (illustrato con un colore violetto). Intorno e al centro del Tokamak sono situate le bobine che producono i campi magnetici necessari al funzionamento della macchina. Tutto intorno sono illustrate le strutture che costituiscono l’impianto nel suo insieme (sistemi di raffreddamento, alimentazioni elettriche, controlli, ecc.).

Biografia

Marco Ripani è ricercatore presso la sezione Infn di Genova e lavora da circa 25 anni nel campo della fisica nucleare con sonde elettromagnetiche. Dal 2012 dirige il progetto strategico “Infn Energia”, finalizzato a sviluppare applicazioni di tecnologie nucleari per la gestione dei rifiuti nucleari, la sicurezza e i futuri reattori a fissione e fusione. È membro di comitati internazionali di esperti all’interno dell’organizzazione europea Euratom.

Link sul web

<https://www.iter.org>

<https://www.euro-fusion.org/>

<https://www.euro-fusion.org/wpcms/wp-content/uploads/2013/01/JG12.356-web.pdf>

DOI: 10.23801/asimmetrie.2018.24.6

Il motore del pianeta

Fonti e consumi di energia

di Gianluca Alimonti

a.
Le pale eoliche permettono di sfruttare una delle più diffuse sorgenti di energia primaria rinnovabile e illimitata.



Sin dai tempi di Prometeo il legame tra energia e sviluppo dell'umanità è stato molto stretto. Senza luce, gas o benzina la nostra vita, la stessa giornata, sarebbero inimmaginabili. Non solo non potremmo muoverci, lavorare o anche solo mangiare come siamo abituati a fare, ma il nostro pensiero e le nostre preoccupazioni sarebbero ben diverse, come lo sono in parti del mondo meno sviluppate delle nostre.

Per caratterizzare lo sviluppo di un paese non solo in termini di crescita economica, è stato definito lo Human Development Index (Hdi) che misura la qualità della vita dei singoli, attraverso la salute, l'aspettativa di vita, il livello di istruzione e di informazione. C'è una chiara relazione tra Hdi e la domanda primaria di energia procapite: tutti i Paesi appartenenti all'Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico (Ocse) manifestano sia un elevato Hdi che un elevato utilizzo di energia. Quando un paese in via di sviluppo raggiunge i livelli dei paesi Ocse, l'Hdi non cresce più in maniera significativa mentre bassi consumi energetici sono correlati a un basso Hdi. L'energia "primaria" è l'energia direttamente disponibile in natura. In natura ci sono fonti di energia "rinnovabile",

come l'energia idroelettrica, eolica, solare o la biomassa, che provengono tutte, direttamente o meno, dal Sole e sono considerate illimitate. Esistono anche fonti di energia primaria che non sono rinnovabili, come il petrolio, il carbone e il gas naturale. Sono dette energie "fossili" e anch'esse provengono dal Sole, ma essendo il tempo di generazione assai più lungo di quello di utilizzo non sono considerate illimitate.

L'energia nucleare, in particolar modo quella generata da reattori autofertilizzanti o, in futuro dalla fusione (vd. p. 24, ndr), è prevista durare assai più a lungo delle energie fossili, ma è comunque classificata tra le fossili. Analogamente l'energia geotermica, generata in parte dai decadimenti radioattivi all'interno del nostro pianeta e in parte dal calore fossile che residua dalla formazione della Terra, non dovrebbe far parte delle fonti di energia rinnovabile ma è comunque classificata tra queste.

L'energia primaria viene di solito trasformata in energia secondaria più adatta al trasporto e agli utilizzi finali. Un esempio tipico è l'energia elettrica: ha il grande vantaggio di essere facilmente trasportabile per lunghe distanze

fino all'utilizzatore finale che la può facilmente convertire con elevata efficienza in energia meccanica, calore, luce o altri usi. Purtroppo ha l'inconveniente che non può essere accumulata in grande quantità e per lungo tempo e deve quindi essere prodotta nello stesso tempo del suo utilizzo. Questo è il problema principale nell'aumentato uso di fonti energetiche rinnovabili non programmabili (Sole e vento) per cui si sta investendo nelle cosiddette *smart grid*, accumulatori e reti di distribuzione più adatti alla produzione non continua di energia. La domanda di energia primaria è più che raddoppiata negli ultimi anni (vd. fig. c a p. 30) e l'80% proviene tutt'ora da fonti fossili (vd. fig. d a p. 30). Anche se in diminuzione, il petrolio è ancora la più importante fonte di energia, mentre sono in crescita gas e carbone. La recente crisi economica ha causato una lieve flessione della domanda ma ora la crescita è tornata ai livelli pre-crisi. Un altro elemento importante è il significativo spostamento geografico dell'uso dell'energia dai Paesi Ocse verso l'Asia e la Cina, che riflette la crescita economica mondiale

degli ultimi anni (vd. fig. e a p. 31). Dal 1971 la domanda di energia primaria è raddoppiata mentre la generazione di elettricità è quasi quadruplicata. Circa due terzi della produzione globale proviene da combustibili fossili con in testa il carbone, che ha visto la propria quota aumentare nel periodo. La percentuale del gas naturale è quasi raddoppiata, mentre il petrolio è praticamente scomparso dalla produzione di energia elettrica, anche se, come ben noto, in tutto il mondo i trasporti dipendono per oltre il 90% dal petrolio.

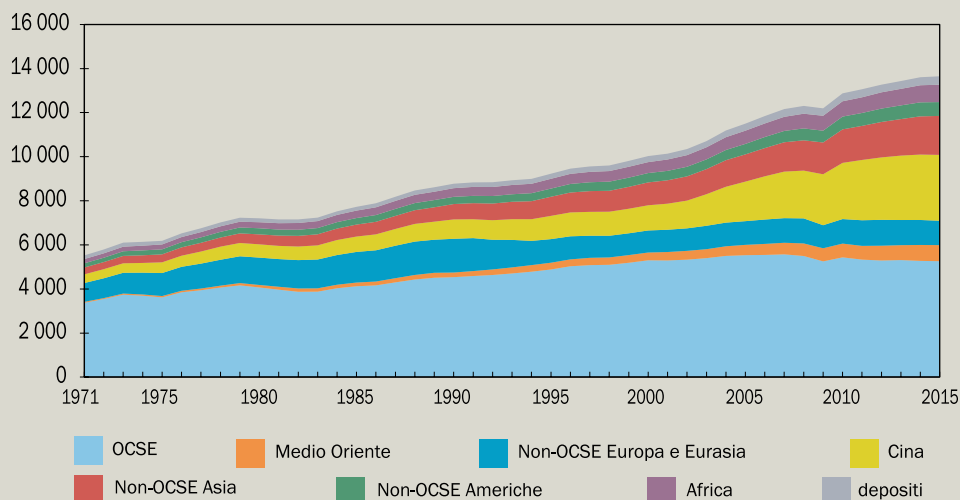
La produzione idroelettrica è quasi triplicata anche se la sua quota rispetto al totale è diminuita. Sino all'incidente di Fukushima le produzioni da nucleare e da idroelettrico erano circa equivalenti, spartendosi la parte di produzione non coperta dalle fonti fossili. Oggi la produzione nucleare è circa due terzi della produzione idroelettrica e le "nuove rinnovabili" (solare ed eolico) coprono la parte residua (vd. fig. f a p. 31). Inoltre i consumi di energia non sono omogeneamente distribuiti nel mondo: il consumo equivalente pro capite dei paesi più sviluppati è sino a 50 volte

superiore a quello dei paesi più poveri, dove il consumo è poco diverso da quello dell'uomo primitivo. L'Africa, con il 14% della popolazione globale, consuma solo il 3% dell'energia elettrica, ma al suo interno il Sud Africa consuma metà di questa energia pur ospitando solo il 5% della popolazione africana. In centro Africa la principale fonte energetica è il legno. L'Agenzia Internazionale dell'Energia (Iea) stima che circa 1,3 miliardi di persone vivano senza elettricità e che 2,7 miliardi vivano senza la possibilità di utilizzare combustibili, cucine e stufe che non inquinino l'aria nelle abitazioni. L'accesso all'elettricità e all'energia in generale è essenziale per lo sviluppo della società: la Iea stima che investimenti globali per 35 miliardi di dollari all'anno garantirebbero l'accesso all'energia in tutto il mondo. Per dare un termine di paragone, Germania e Italia assieme investono ogni anno una cifra superiore per incentivare la diffusione delle fonti di energia rinnovabile. Focalizzandoci un attimo sull'Italia, la domanda di energia primaria vale circa il 10% della domanda europea la quale a sua volta vale circa il 10% della

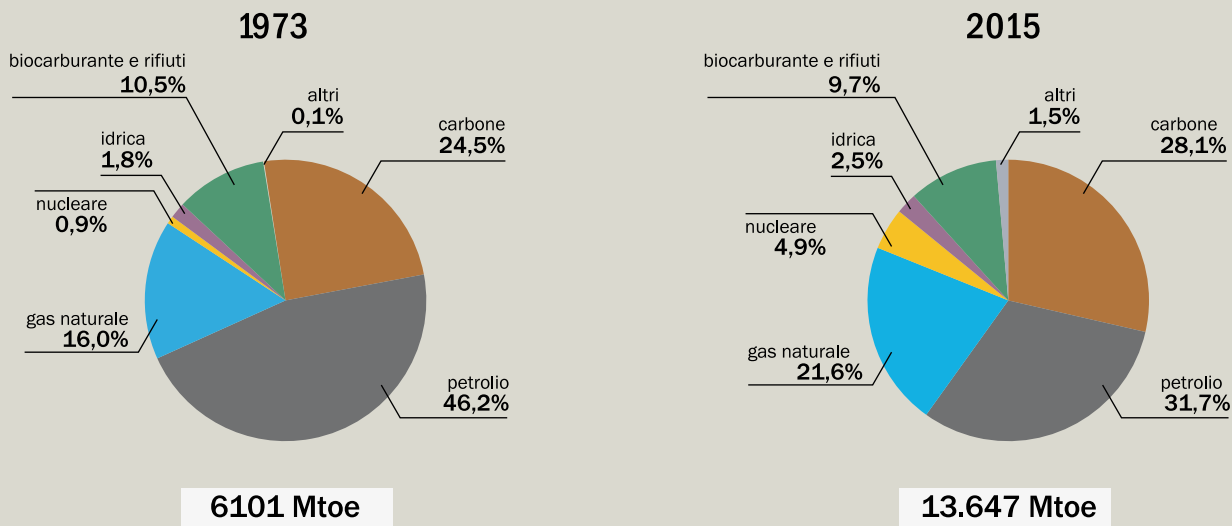


b.
Piattaforma petrolifera.
Le energie fossili, pur provenendo indirettamente dal Sole, non sono considerate illimitate dati i lunghi tempi di rigenerazione.

c. **approvvigionamento totale di energia primaria dal 1971 al 2015 per regioni (Mtoe)**



d. **distribuzione per fonti dell'approvvigionamento di energia primaria nel 1973 e 2015**



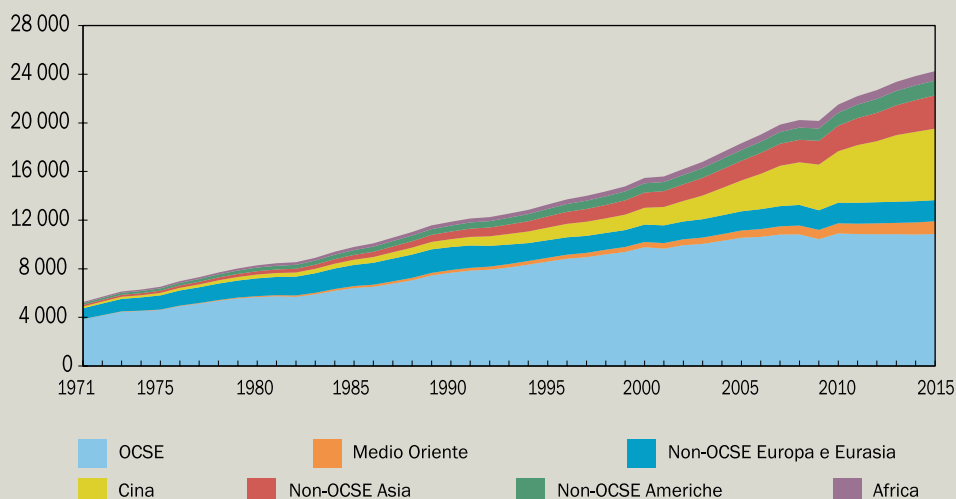
fonte Key world energy statistics, IEA

domanda globale. Il nostro Paese ha una tradizione storica nella produzione di energia idroelettrica che poco dopo la fine della seconda guerra mondiale arrivava a coprire quasi interamente la domanda nazionale di energia elettrica: in seguito la produzione ha continuato a crescere ma non è stato possibile star dietro all'impetuosa crescita della domanda e oggi la produzione idroelettrica copre circa il 15% della richiesta. Il nostro Paese vanta anche un primato nella produzione geotermoelettrica, avendone realizzato nel 1904 a Larderello il primo impianto al mondo. A queste fonti storiche di energia rinnovabile vanno oggi aggiunte la biomassa, con una importante produzione di calore soprattutto a uso civile e, più di recente, la produzione di elettricità da eolico e soprattutto da fotovoltaico che, anche se pagate a caro prezzo, pongono l'Italia tra i Paesi al mondo con la maggior produzione procapite da fonti di energia rinnovabile. Il nostro Paese è infatti tra quelli con la maggior percentuale della propria domanda elettrica prodotta da fotovoltaico e già da qualche

anno abbiamo raggiunto gli obiettivi europei previsti al 2020. Il dato che l'80% della domanda di energia primaria venga soddisfatta da fonti fossili ha un impatto sulla salute umana e sull'ambiente. Tale percentuale può essere mantenuta nel tempo? L'attuale produzione energetica ha tre limiti principali: le emissioni inquinanti (ossidi di zolfo e di azoto, monossido di carbonio, particolato...), che hanno un impatto sulla salute, la produzione di gas a effetto serra, che possono avere conseguenze sul clima del nostro pianeta, e infine una disponibilità limitata in futuro per cui sarà necessario trovare fonti alternative. Infatti come sosteneva Marion King Hubbert, geofisico americano noto per i suoi studi sulle riserve petrolifere, "l'energia è essenziale per tutte le attività organiche e inorganiche: la storia dell'evoluzione umana riflette la storia della capacità dell'umanità nel controllare e trasformare l'energia". L'uso del fuoco, che permise all'Uomo di convertire i legami chimici del legno in luce e calore, fu forse la prima e più

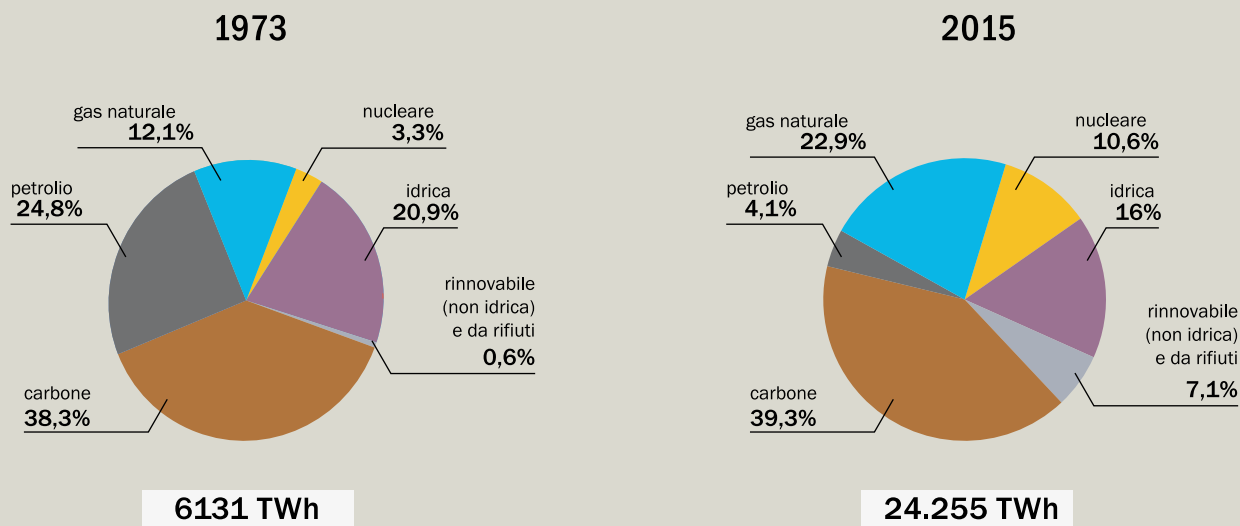
produzione di energia elettrica dal 1971 al 2015 per regioni (TWh)

e.



distribuzione per fonti della produzione di energia elettrica nel 1973 e 2015

f.



fonte Key world energy statistics, IEA

importante scoperta. Sino alla macchina a vapore, origine della rivoluzione industriale, l'umanità ha soddisfatto i propri bisogni energetici grazie all'agricoltura e allo sfruttamento di fonti rinnovabili. Dopo la rivoluzione industriale le fonti fossili hanno permeato il nostro sviluppo: la diffusione di energia economica ha sostituito il lavoro umano, e attività impossibili sino a quel momento sono diventate comuni. Durante l'impero romano uno schiavo assumendo 2000-2500 kilocalorie poteva produrre un lavoro di 3-400 wattora al giorno, equivalente a circa 100 grammi di petrolio: il consumo pro capite odierno in Europa pari a circa 10 kg di petrolio necessiterebbe del lavoro di 100-150 schiavi! La domanda di energia è cresciuta a livelli mai raggiunti in precedenza e ci troviamo oggi sul picco di utilizzo dei combustibili fossili: non è chiaro se siamo prima, dopo o esattamente sul picco, ma abbiamo visto che ci sono valide ragioni per cominciare a pensare seriamente a cosa verrà in seguito.

Biografia

Gianluca Alimonti è ricercatore presso la sezione Infm di Milano e attualmente collabora alla realizzazione del tracciatore a pixel di silicio di Atlas. Grazie all'esperienza maturata sui rivelatori al silicio, ha brevettato una cella fotovoltaica ad alta efficienza ed è ora titolare del corso di "Fondamenti di Energetica" per la laurea magistrale in Fisica presso l'Università degli Studi di Milano. Dal 2013 è membro dell'Energy Group della European Physical Society. Tra le pubblicazioni, il volume "Energia, sviluppo, ambiente", il cui scopo è di sviluppare nel lettore una propria capacità critica su questi temi.

Link sul web

<http://www.iea.org/>
<https://www.bp.com/>

DOI: 10.23801/asimmetrie.2018.24.7

Salto a velocità luce

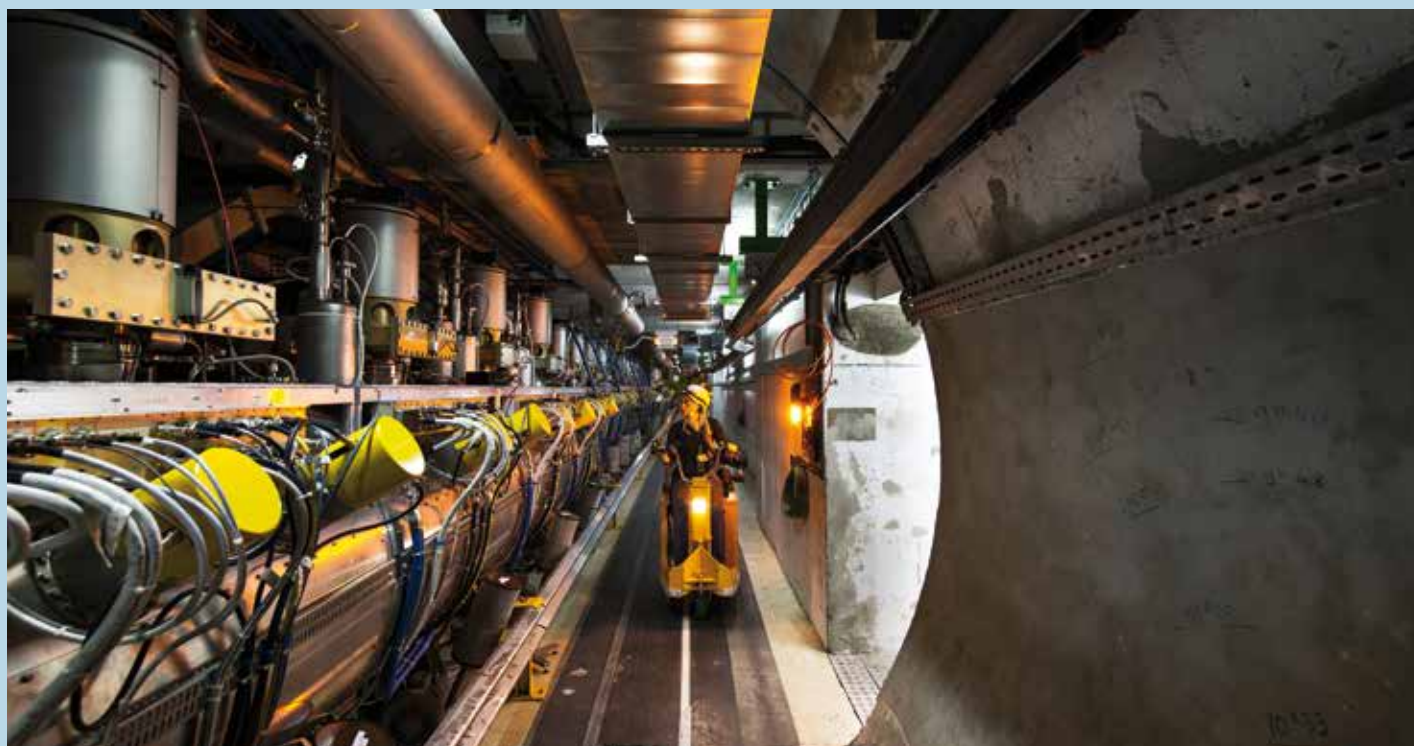
Macchine per accelerare

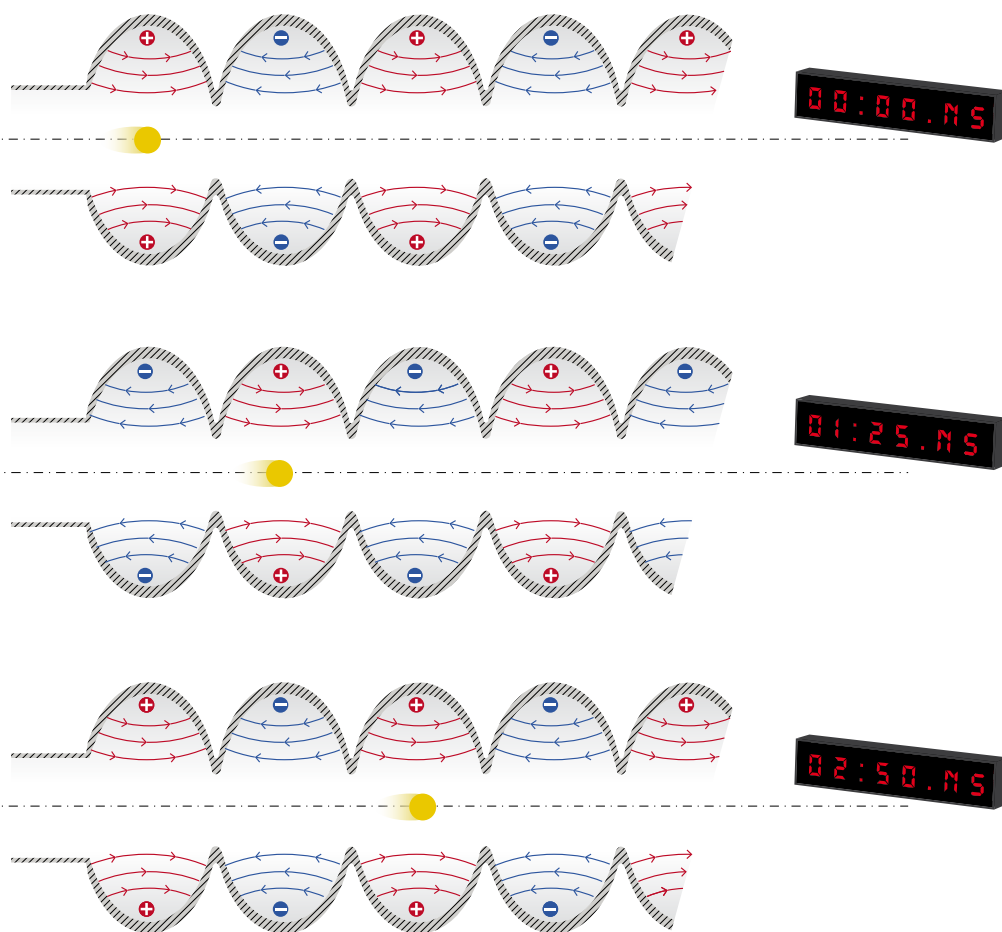
di Mirko Pojer

Non stiamo parlando di fantascienza, ma di acceleratori di particelle. Di macchine che sembrano uscite dalla fantasia degli sceneggiatori di “Guerre stellari”, ma che in realtà sono potenti strumenti scientifici creati per tornare indietro nel tempo, fino ai primi istanti dell’universo, quando tutta la materia era accumulata nello stesso punto con un’energia elevatissima. Benché oggi trovino applicazioni importanti negli ambiti più disparati (dalla medicina alla chimica, dalla biologia alla fisica dei materiali, dalla scienza della Terra fin forse, un giorno, alla generazione di energia), gli acceleratori di particelle sono nati come strumenti di ricerca nella fisica nucleare e delle alte energie. Facendo collidere particelle ad altissima energia, si riescono, infatti, a riprodurre le condizioni esistenti pochi istanti dopo il Big Bang, quando l’universo era appena nato. In quegli istanti, esistevano particelle che, grazie

agli acceleratori, possiamo oggi riprodurre nelle collisioni. Tali particelle decadono, cioè si trasformano, rapidamente in altre particelle più note che sono analizzate sotto la lente potente dei rivelatori degli esperimenti. Osservando le tracce e i decadimenti nei rivelatori, gli scienziati riescono a identificare le particelle primarie generate dalle collisioni. Seguendo il progresso tecnologico, l’energia di collisione negli acceleratori di particelle è costantemente aumentata negli anni, aumentandone il potenziale di scoperta, con la rivelazione di particelle sempre più massive, grazie all’equivalenza einsteiniana tra massa ed energia. È il caso del bosone di Higgs, identificato nel 2012 grazie a Lhc, l’acceleratore più potente mai costruito. Lungo 27 km e situato a circa 100 m di profondità a cavallo del confine franco-svizzero nella periferia di Ginevra, il Large Hadron Collider è in grado di produrre

a.
Cavità a radiofrequenza in Lhc.





b. Schema di funzionamento delle cavità risonanti a radiofrequenza a Lhc. I pacchetti che si muovono all'interno dell'acceleratore perdono energia, che viene restituita nel passaggio attraverso le cavità risonanti. In Lhc le cavità funzionano a 400 MHz, cioè in ogni cavità il campo elettrico si modifica in modo continuo tornando ad avere lo stesso valore ogni 2,5 ns (quindi dopo 1,25 ns avrà la polarità opposta a quella che aveva al tempo 0), in fase con il passaggio dei pacchetti in modo che questi sentano sempre un campo accelerante.

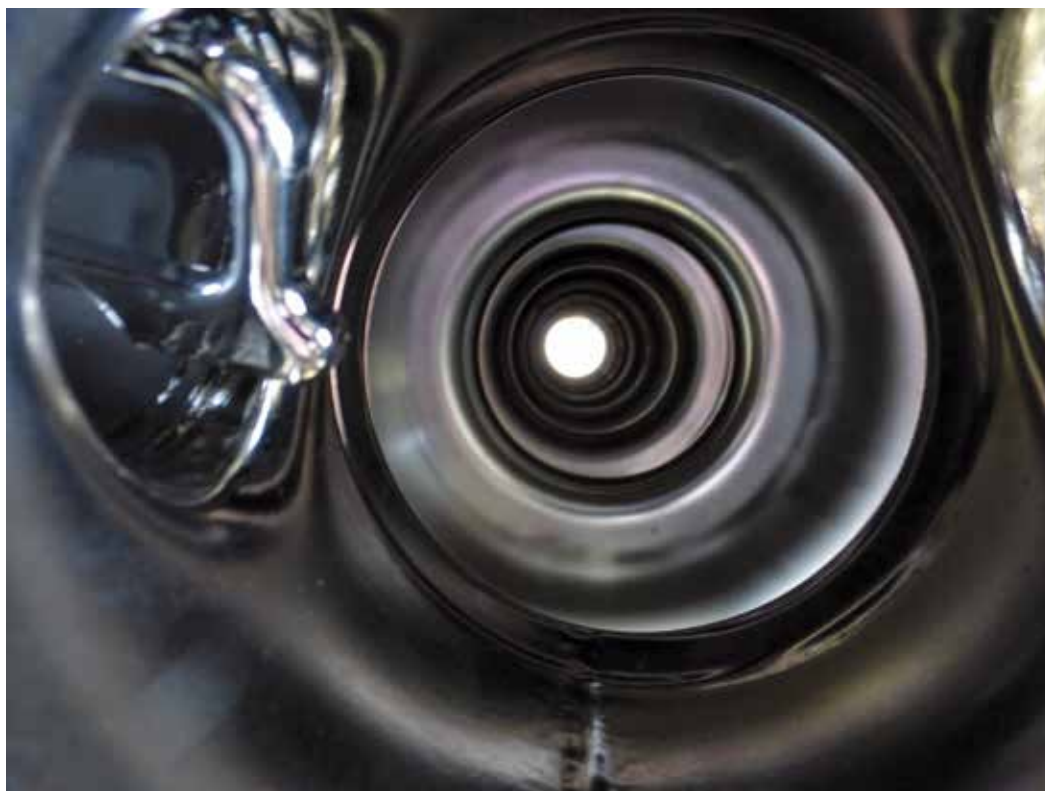
collisioni tra protoni che viaggiano a una velocità prossima a quella della luce con un'energia record di 6,5 TeV, ovvero 6500 miliardi di eV. Questa energia corrisponde a quella di un moscerino in volo: può sembrare poco, ma non se si pensa che è concentrata in una particella delle dimensioni di un milionesimo di milionesimo di millimetro. E in Lhc ci sono circa 2000 pacchetti di protoni, ognuno contenente 100 miliardi di particelle, la cui energia cumulata è comparabile a quella di una vettura utilitaria che viaggia a 3000 km all'ora! Il metodo più semplice per accelerare una particella carica è quello di immergerla in un campo elettrico, come può essere quello generato da due superfici cariche di segno opposto, posizionate l'una di fronte all'altra: la nostra particella (immaginiamo di carica positiva, come può essere un protone) sarà attratta dalla superficie carica negativamente e respinta da quella carica positivamente, subendo un effetto netto di accelerazione da una superficie verso l'altra. In questa accelerazione, la particella guadagnerà una quantità di energia proporzionale alla differenza di potenziale delle due superfici. Si parla in questo caso di acceleratori "elettrostatici", in cui il campo elettrico è mantenuto costante.

Nelle cavità a radiofrequenza (Rf), invece, un campo elettromagnetico è fatto risuonare per generare un'onda accelerante, che agisce sulle particelle come un'onda d'acqua su un surfista: solo le particelle che sono ben sincronizzate

con la cresta dell'onda saranno accelerate. Un particolare tipo di generatore, detto "klystron", alimenta il campo elettromagnetico all'interno delle cavità e queste trasferiscono alle particelle l'energia fornita loro dal klystron stesso.

Nel caso di un acceleratore circolare come Lhc, le particelle passano attraverso le cavità Rf a ogni giro e quindi la sincronizzazione tra particelle e onda accelerante è importante. Questo succede circa 11.000 volte al secondo per il grande collisore, e a ogni passaggio i protoni passano attraverso otto cavità alimentate da klystron di circa 2 MW di potenza che oscillano con una frequenza di 400 MHz.

Una tecnologia complessa che necessita anche di magneti di ultima generazione per mantenere le particelle nella loro traiettoria circolare. Infatti, l'energia di un acceleratore circolare è proporzionale al raggio della macchina e al campo magnetico che guida le particelle nella loro traiettoria: più alta l'energia dei protoni nei fasci, maggiore dovrà essere il campo magnetico necessario a trattenerli lungo la traiettoria del collisore. Per le energie di Lhc, sono stati costruiti elettromagneti molto speciali che sono in grado di produrre campi magnetici elevatissimi (si tratta di campi 160.000 volte superiori al campo magnetico terrestre) senza dissipare energia. Ciò è possibile grazie all'utilizzo di superconduttori, materiali che, al di sotto di una certa temperatura detta "temperatura critica", perdono qualsiasi resistenza elettrica.



c.
Sezione trasversale di una delle nove celle a base di niobio della cavità a radiofrequenza operante a 1,3 GHz costruita per l'International Linear Collider che entrerà in funzione in Giappone nei prossimi anni.

Negli elettromagneti di Lhc circolano correnti elettriche di più di 10.000 A, ma, alla temperatura prossima allo zero assoluto in cui essi operano ciò avviene senza dissipazione. Un vantaggio enorme se comparato con i magneti tradizionali che non sono in grado di produrre campi magnetici elevati e che inoltre dissipano una notevole quantità di energia, riscaldandosi ad alte correnti sotto l'effetto della loro resistenza elettrica. L'inconveniente dei magneti superconduttivi è che devono essere raffreddati da decine di tonnellate di elio liquido mantenuto freddo con impianti che consumano circa 35-40 MW.

Le scoperte che i presenti acceleratori (Lhc in primis) forniranno in futuro, assieme all'avanzamento della tecnologia nei prossimi anni, definiranno la direzione che la fisica degli acceleratori prenderà nei prossimi decenni (questo è l'orizzonte temporale per la realizzazione di una nuova macchina acceleratrice). Se volessimo raggiungere valori di energia superiori a Lhc, dovrebbero essere costruiti nuovi e più potenti magneti oppure una macchina con una circonferenza ancora maggiore. Si studiano, già oggi, acceleratori ancora più potenti: da nuove macchine lineari per l'accelerazione di

elettroni (con gli studi sull'International Linear Collider e sul Cern Linear Collider, rispettivamente da 1 e 3 TeV su una lunghezza di circa 50 km), al potentissimo Fcc (Future Circular Collider), che dovrebbe avere una circonferenza di 100 km e un'energia dieci volte superiore a quella di Lhc, grazie a nuovi magneti in grado di produrre campi magnetici tre volte superiori a quelli di Lhc. Queste sono tecnologie all'avanguardia per ottenere energie di collisione mai raggiunte prima, per ricostruire il passato e permetterci di comprendere meglio l'universo in cui viviamo.

Biografia

Mirko Pojer ha studiato fisica all'Università degli Studi di Milano. Dopo un periodo all'Infn di Milano e un anno in Edison Termoelettrica a Torino, nel 2001 ha preso servizio al Cern di Ginevra, dove ha contribuito a test e sviluppo dei magneti di Lhc. Dal 2009 è uno dei responsabili delle operazioni di Lhc, nonché parte del gruppo di esperti che studiano l'*upgrade* della macchina nell'ambito del progetto High Luminosity Lhc.

DOI: 10.23801/asimmetrie.2018.24.8

La febbre dell'energia

Calorimetri e bolometri per rivelare particelle

di Ezio Previtali

a.
Otto "supermoduli" del calorimetro elettromagnetico dell'esperimento Cms, al Cern, durante l'installazione nell'apparato nel 2007.



Può sembrare difficile da comprendere, ma ogni secondo migliaia di particelle prodotte dalla radioattività o dai raggi cosmici interagiscono con il nostro corpo e in esso rilasciano tutta o parte della loro energia: ma noi non ce ne accorgiamo. Nessuno dei nostri sensi è in grado di rivelare la presenza di tali particelle e tanto meno di misurare quanta energia sia stata da esse rilasciata nel nostro organismo. Questo fatto si spiega facilmente, se si considera che sommando l'energia rilasciata da tutte quelle particelle in un secondo, si arriva a qualcosa dell'ordine di solo dieci milionesimi dell'energia consumata dal corpo umano nello stesso tempo: una potenza troppo piccola da poter essere da noi avvertita. Per individuare queste particelle e misurare l'energia da esse rilasciata nell'attraversamento di un mezzo facciamo uso di specifici strumenti: i "rivelatori di particelle". Questi strumenti

sono in grado di convertire l'energia rilasciata dalle particelle in un segnale elettrico proporzionale all'energia stessa. Di fatto, l'energia rilasciata nel mezzo attraversato viene convertita in energia di altre particelle, il cui numero ed energia sarà strettamente legato a quella della particella primaria. Dobbiamo a questo punto distinguere i possibili meccanismi di interazione con il mezzo attraversato sulla base dell'energia e del tipo di particella.

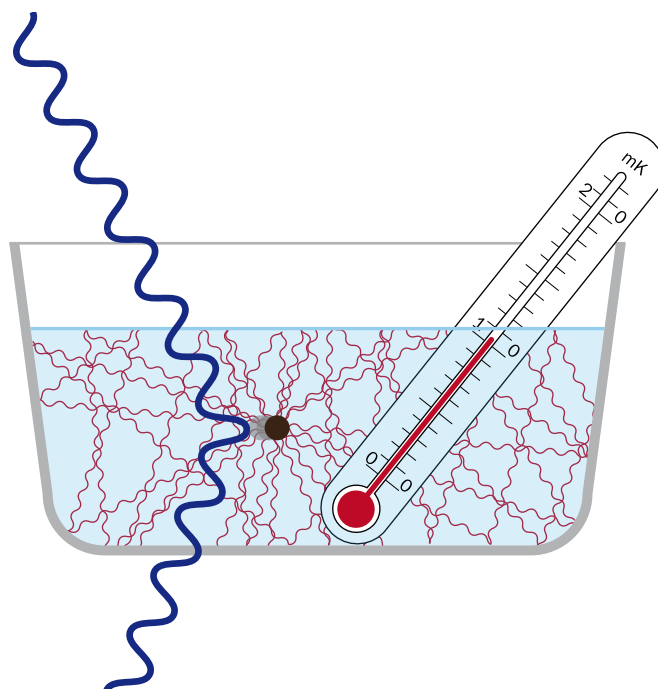
Gli elettroni di alta energia (> 10 MeV) interagiscono principalmente per *Bremsstrahlung* ("radiazione di frenamento") generando fotoni di alta energia, che a loro volta interagiscono producendo coppie elettrone/positrone, i quali a loro volta generano fotoni e così via: questo processo genera i cosiddetti sciami elettromagnetici. Mano a mano che le generazioni di particelle si susseguono, l'energia da esse posseduta sarà

sempre minore, fino ad arrivare a una soglia minima di energia sotto la quale questo processo di moltiplicazione non può più aver luogo. Anche le particelle adroniche, come i protoni, producono cascate di particelle: in questo caso l'interazione di un adrone con un nucleo produce adroni secondari che potranno ulteriormente interagire oppure decadere a seconda della loro vita media. All'interno degli sciami adronici si possono generare elettroni o fotoni che poi daranno vita a sciami elettromagnetici secondari. Volendo misurare l'energia dell'elettrone o dell'adrone che ha dato vita allo sciame, adronico o elettromagnetico che sia, dovremmo misurare le energie trasferite a tutte le particelle prodotte e sommarle tra di loro. Questo processo, per cui l'energia iniziale si può misurare degradandola in energie via via minori, ricorda il calorimetro della termologia, nel quale la misura della quantità di calore di un corpo si determina attraverso la quantità di ghiaccio che viene disciolta, disperdendo in tal modo il calore inizialmente posseduto dal corpo. Questo è il motivo per cui questi strumenti sono detti "calorimetri": un calorimetro è un rivelatore in cui una particella incidente deposita tutta la sua energia sotto forma di sciame di particelle, ognuna con energia inferiore

a quella primaria ma la cui somma è (nel caso ideale) uguale all'energia della particella iniziale. Normalmente solo una piccola frazione, costante, dell'energia depositata nel calorimetro viene trasformata in segnale. Per particelle che possiedono alta energia la bassissima efficienza con cui trasferiamo l'energia posseduta dalle particelle al segnale che possiamo rivelare non è così cruciale, in quanto il numero di particelle secondarie generate sarà così elevato da consentirci misure precise dell'energia. Ad esempio, gli sciami estesi che i raggi cosmici generano nell'atmosfera possono essere rivelati attraverso la "luce Cherenkov", che viene emessa solo dalle particelle che viaggiano con velocità maggiore di quella della luce nell'aria (vd. in Asimmetrie n. 15 p. 11, ndr). Quando vogliamo una misura molto precisa dell'energia iniziale, o quando questa energia è piccola, dell'ordine del MeV o meno, il segnale più accurato che possiamo rivelare è quello legato alla ionizzazione degli atomi che compongono la materia attraversata dalla particella incidente. In questo modo, dalla perdita di energia vengono liberati elettroni, i quali contribuiscono alla formazione di un segnale elettronico proporzionale all'energia iniziale. Ma anche in questo caso otteniamo comunque un'efficienza relativamente bassa: nella migliore delle

ipotesi il rapporto tra l'energia iniziale e quella effettivamente raccolta dal segnale risulta essere di un terzo.

Volendo misurare particelle con energie ancora più basse, sulla scala del keV, risulterà necessario migliorare ulteriormente il meccanismo di trasferimento di energia dalla particella al segnale rivelato. Ma dove finisce tutta l'energia che non viene trasferita agli elettroni ionizzati? Semplicemente va ad aumentare l'agitazione termica del materiale del rivelatore, aumentando, seppur impercettibilmente, la sua temperatura. Misurando quindi la variazione di temperatura del materiale prodotta dalla particella interagente, di fatto, misureremmo integralmente la sua energia. Esiste un rivelatore in grado di effettuare questa misura: il cosiddetto "bolometro". In esso si misura la variazione di temperatura indotta dall'interazione di una particella: tale variazione sarà proporzionale all'energia rilasciata rapportata alla capacità termica, che rappresenta l'inerzia termica dell'oggetto. Se la capacità termica è sufficientemente piccola anche l'energia rilasciata da una particella produce una variazione di temperatura apprezzabile. Per ottenere questo scopo i bolometri sono raffreddati a temperature molto basse, prossime allo zero assoluto (-273,14 gradi



b.
Rappresentazione artistica del funzionamento di un bolometro: il materiale di cui è costituito (solitamente una struttura cristallina) è rappresentato dal liquido contenuto in un recipiente. La linea ondulata rappresenta la particella che trasferisce in un urto parte della sua energia cinetica a un nucleo del materiale. La sua energia cinetica viene termalizzata attraverso vibrazioni trasmesse al resto del materiale, che viene complessivamente riscaldato. Questo riscaldamento viene misurato da un particolare termometro (rappresentato come un comune termometro a mercurio) in grado di apprezzare variazioni di temperatura dell'ordine del milionesimo di grado.



Celsius), e, sfruttando opportuni “termometri”, si apprezzano variazioni di temperatura dell’ordine del milionesimo di grado, ottenendo così strumenti particolarmente sensibili alla misura dell’energia delle particelle. In questo modo possiamo affermare che il bolometro risulta essere l’unico vero calorimetro, capace cioè di misurare integralmente l’energia della particella che con esso ha interagito. Un esperimento che utilizza dei bolometri per misurare l’energia delle particelle è Cuore (vd. in *Asimmetrie* n. 15 p. 27, ndr.), che recentemente ha iniziato a raccogliere dati ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso. In questo esperimento si devono misurare con

grande precisione le energie degli elettroni di un particolare decadimento del tellurio, che depositano complessivamente circa 2500 keV. Questa energia riscalda i cristalli di appena cento milionesimi di grado. L’esperimento è costituito da 988 cristalli di tellurio che devono essere raffreddati a circa 10 mK ed è dedicato alla ricerca del rarissimo fenomeno del doppio decadimento beta senza emissione di neutrini. Rivelare questo processo consentirebbe non solo di determinare la massa dei neutrini, ma anche di dimostrare la loro eventuale natura di particelle di Majorana, fornendo una possibile spiegazione della prevalenza della materia sull’antimateria nell’universo.

c.
Il Presidente della Repubblica Sergio Mattarella riceve in omaggio un cristallo dell’esperimento Cuore dal Presidente Infn Fernando Ferroni, durante la visita ai Laboratori del Gran Sasso (Lngs) del 15 gennaio scorso.

Biografia

Ezio Previtali è ricercatore dell’Infn presso l’Università degli Studi di Milano Bicocca. Ha partecipato allo sviluppo dei rivelatori bolometrici di particelle fin dagli albori ed è stato uno dei promotori dell’esperimento Cuore, il più grande rivelatore criogenico di particelle mai costruito. Partecipa attivamente agli esperimenti Cupid (di cui è responsabile nazionale) e Juno.

Link sul web

<http://people.na.infn.it/~barbarin/MaterialeDidattico/00+approfondimento%20corso%20rivelatori%20rilevatoriparticelle.pdf>

DOI: 10.23801/asimmetrie.2018.24.9

[as] radici

Il mio ricordo della “pila”.

di Laura Fermi

[as] approfondimento



1.
Da sinistra, Enrico, Laura
e il figlio Giulio Fermi.

Il 2 dicembre 1942 l'équipe di Enrico Fermi realizzò a Chicago una reazione a catena controllata, producendo energia dalla fissione dell'uranio. La “pila critica” CP-1, costruita in un campo da squash dell'Università, fu il primo reattore nucleare della storia. La “pila” era l'esito finale delle ricerche sulla radioattività indotta da neutroni compiute negli anni '30 dal gruppo di via Panispema, e rappresentò il punto di partenza

scientifico del cosiddetto “Progetto Manhattan”. La moglie di Fermi, Laura, emigrata negli Stati Uniti assieme al marito pochi anni prima a causa delle leggi razziali del governo fascista, rievoca l'episodio in queste pagine, tratte dall'articolo *Some personal reminiscences* comparso nel 1962 sullo “Iaea Bulletin” e ripubblicato nel volume *Enrico Fermi. Significato di una scoperta*, Ain - Enea, 2001 (traduzione di Bianca Franco).

Non sapevo nulla a quell'epoca del lavoro che si svolgeva presso il Laboratorio Metallurgico di Chicago durante la guerra. L'ultima notizia eccitante che mi fosse giunta, in materia scientifica, era stata quella concernente la fissione: erano gli inizi del 1939 e noi Fermi ci trovavamo solo da qualche settimana a New York, dove eravamo andati a stabilirci per sfuggire all'Italia fascista. [...]

Poco dopo aver appreso della fissione, seppi anche da Fermi che gli era accaduto di accertare che durante il processo di fissione poteva esservi emissione di neutroni, e che tale ipotesi, che era stata esaminata con Bohr durante un incontro teorico, aveva suscitato grande interesse. Poi si mise a spiegarmi il principio della reazione a catena. Ma ad un certo momento, durante le settimane seguenti, la famosa cappa della segretezza calò sull'attività atomica. Una segretezza che gli stessi fisici, incluso Fermi, rispettarono a malincuore, rinnegando le loro tradizioni, appena capirono quali implicazioni belliche potesse avere l'energia nucleare.

Io fui tagliata fuori da qualsiasi informazione riguardante il

lavoro di Fermi e, dunque, non potevo sapere che allo scopo di tentare di realizzare una reazione a catena, Fermi e Leo Szilard avevano concepito l'idea di costruire una “pila”. È vero che una volta, in mia presenza, qualcuno menzionò di aver visto una montagna di carbone nell'edificio di fisica, ma non diedi molta importanza alla cosa e Fermi mi disse di dimenticarmela. Null'altro trapelò dopo questo episodio. [...] Nella primavera del 1942 Fermi si trasferì a Chicago, dove tutto il lavoro concernente la reazione a catena si svolgeva sotto la direzione di Arthur Compton. [...]

A Chicago la segretezza era più organizzata, molto più tangibile che alla Columbia University. Vi erano guardie in tutti i Laboratori del Progetto Metallurgico, alcuni ricercatori erano forniti di guardie del corpo, alle mogli venivano fatte conferenze sui gravi pericoli dei discorsi sbadati, bisognava rispettare certe regole; un numero incredibilmente vasto di gente, trovandosi riunita per uno stesso scopo, accettò questa inevitabile segretezza. Fermi era abilissimo nel custodire segreti ed io non riuscii mai a cavar fuori dalla sua bocca qualcosa che riguardasse

il progetto, nemmeno il segreto meno importante, e cioè che al Laboratorio Metallurgico non c'erano metallurgisti. Con il tempo, quando ci fummo sistemati ed io incontrai più gente, fui io a riferirgli i pettegolezzi esterni: "Dicono che al Met Lab state lavorando ad una cura per il cancro", gli dissi un giorno e la sua unica risposta fu: "Ah sì, è questo che dicono?". E un'altra volta: "La gente che vive vicino ai West Stands dice che ogni tanto le loro case tremano e che ciò è dovuto ad una macchina costruita da voi fisici". "Davvero?", rispose Fermi. Non mi ricordo di aver provato irritazione a queste risposte evasive. Esse facevano parte di un gioco in cui io cercavo senza molta convinzione, di ottenere informazioni; invariabilmente finivo sconfitta. [...] Del giorno della prova finale, il 2 dicembre, ebbi varie descrizioni, dato che i testimoni non erano riluttanti a ricordarlo. Erano tutti d'accordo su un punto: Fermi era rimasto calmo mentre dirigeva l'esperimento, forse il più calmo fra tutti i presenti. A volte ho pensato che nei commenti dei suoi amici ci fosse una punta di critica per la sua imperturbabilità in

un tale momento, come se un po' di ansia fosse stata più appropriata della sua sicurezza. Da parte mia si trattava certo di ipersensibilità, ma non potei fare a meno di pensare ad un'osservazione espressami nell'autunno del 1942 da un fisico, che era per sua natura pessimista. Dopo avermi esortata a non preoccuparmi per il mio destino, mi disse: "Se Enrico salterà in aria, salterai anche tu". Questo mi portò ad affrontare con Fermi il problema del pericolo insito nell'esperimento della "pila", eseguito com'era nel cuore di una grande città. Si vede che mi aspettavo una risposta in chiaro oscuro, giacché quella che mi diede lui mi parve molto arzigogolata e poco esauriente. Quando era stata costruita la "pila", mi disse, egli ed il suo gruppo avevano preso attente misure per tutte le conseguenze possibili e si erano resi conto fino in fondo del comportamento della "pila" stessa. Non si aspettavano sorprese dalla "pila" ed erano certi che, una volta dato l'avvio alla criticità, essa si sarebbe comportata nel migliore dei modi. Purtroppo, avendo a che fare con una

cosa del tutto nuova, quale la liberazione di energia nucleare, non potevano scartare l'eventualità che un fenomeno imprevisto venisse a disturbare l'esperimento. Il rischio che correvano consisteva in questo elemento imponderabile. Allo scopo di ridurre al massimo tale rischio presero tutte le precauzioni possibili ed immaginabili. Grandi quantità di cadmio erano a portata di mano per spegnere la "pila", qualora fosse andata fuori controllo. Le barre di sicurezza automatiche però erano tarate per scattare ad un livello troppo basso di attività, come risultò evidente quando entrarono in funzione con uno scatto secco, che Fermi interpretò come il segnale di pausa "per andare a mangiare un boccone". L'esperimento fu condotto lentamente e con estrema cautela, passo passo, mentre Fermi controllava ripetutamente se la "pila" si comportasse secondo i calcoli. Fu così che la semplice operazione di rimuovere tutti i controlli e dare l'avvio alla "pila" durò per tutta la mattinata, e parte del pomeriggio della storica giornata del 2 dicembre 1942.



a.
Laura Fermi (a sinistra), mentre taglia la torta a forma di "pila" preparata all'Argonne National Laboratory per le celebrazioni del 35° anniversario della prima reazione a catena raccontata in questo articolo. È una delle ultime foto esistenti di Laura Fermi, deceduta il 26 dicembre 1977.

[as] con altri occhi

Discorso all'Accademia della Fisica.

di David Riondino

artista

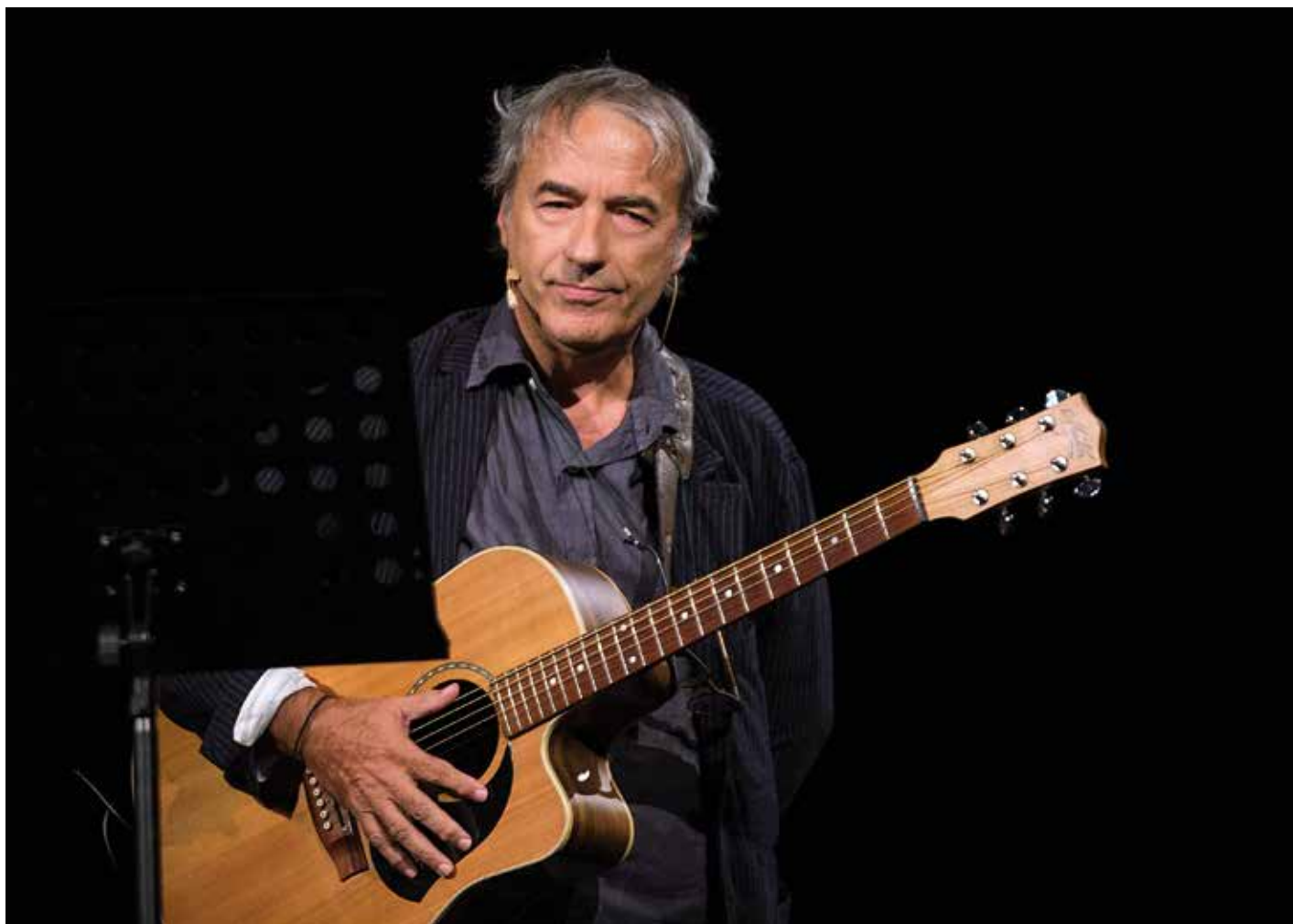
Ho sempre manifestato un profondo e disinteressato interesse per i misteri della fisica. Nei miei primi ricordi - ho al massimo dieci anni - sono al mare e medito sulla spiaggia. Rifletto sull'uso della ciambella, che sostiene a galla, ragionevolmente infilata sotto le braccia. Pensai: "Se io mi metto in piedi, con i piedi intrecciati alla ciambella, probabilmente vedrei il mare da un'altra prospettiva, ed eviterei di bagnarmi". Scesi in acqua, e avviticchiai i piedi alla ciambella immaginando che mi elevasse come un santino. La ciambella risali, mettendomi però a testa sotto. Mio fratello mi salvò dall'annegamento. Ricordo ancora lo stupore, quello strano stupore che accompagna ogni esperimento fallito. Non contento, qualche anno dopo ripresi la ricerca. Frequentavo un oratorio salesiano: c'era nel piazzale un'altalena, e intuì che sarebbe stato possibile, spostando il baricentro, mantenere un punto di equilibrio anche senza tenersi alle due catene. Tesi verso l'esterno il sedile, mi appoggiai e partii, mantenendo il baricentro in relazione con l'oscillazione. Caddi all'indietro picchiando la testa sul cemento, e fui circondato da preti che mi salvarono. Era un secondo fallimento, ma la mia vocazione astrofisica era ormai indiscutibile: vidi le stelle. Abbandonai la ricerca mentre si profilava una nuova verità in grado di dar risposta alle più urgenti domande di un adolescente: la telepatia, il teletrasporto, vedere le ragazze nude sotto il vestito. Il cinema e la letteratura illustrata avevano la risposta che cercavo: i Marziani. Contestualmente, l'approccio romantico e decadente al quale mi consegnava la metà del

Novecento aggiunse una coloritura psico-sentimentale e la sensibilizzazione politica introdusse la meditazione sul rapporto tra fisica e balistica, tra potere e scienza. Emergevano da vecchi giornali le foto di Fermi, Von Braun, Oppenheimer, funghi atomici, scienziati nazisti in America. E finalmente, gli uomini camminarono sulla Luna di Astolfo.

Il mondo dei calcoli e quello della fantasia, in quelle immagini lunari, si sovrapponevano. Si poteva pensare che la scienza sostenesse il sogno, e che il sogno arrivasse prima della scienza. E quindi che si trattasse di dare un linguaggio scientifico ai sogni, per realizzarli. Sotto sotto, sembrava suggerire la spedizione, noi già sappiamo come vanno le cose, noi già siamo sulla Luna: c'è una parte di noi che già conosce tutto, altrimenti non potremmo concepirlo. Si tratta solo di esprimere in formule questa visione. Novelli alchimisti e negromanti, gli scienziati traducevano in numero la comprovata certezza di poter volare, di essere ovunque e sempre.

Il problema è complesso e tragico: per indagare certe leggi, c'è bisogno di una qualità di calcolo che va oltre le normali possibilità di un abitante del pianeta. L'inadeguatezza è evidente. Ma è altresì chiarissimo che nessuno rinuncia a darsi una spiegazione del suo essere al mondo e che questa spiegazione non può esser quella di essere al mondo per non capire nulla. Ed ecco quindi il fiorire della letteratura popolare sui misteri nascosti, che si rivela interessantissima per i miti che propone, non ultimo quello dell'efficacia della divulgazione scientifica. E va

indagato e apprezzato tutto questo confuso lavoro che cerca di farci sentire al centro di qualcosa, di illuminarci usando i pochi e imprecisi materiali che conosciamo: e quindi di salire la muraglia della conoscenza saltando, per l'appunto, di palo in frasca. Una riflessione sulla divulgazione scientifica porta lontano, diventa un'indagine sui miti che scongiurano l'ansia di sapersi al mondo senza motivo: nella sua mancanza di agonismo, nel suo essere inesorabilmente fuori gara, diventa una dilettevole passeggiata parascientifica. A proposito di passeggiate, mi è capitato spesso di fare lunghe camminate in luoghi ameni e di meditare sulla psicofisica della camminatura: e ho notato che già camminare è un fatto molto complesso, dato che una massa in equilibrio mette un supporto snodato davanti a un altro con ritmo, istintivamente misurando distanze, ostacoli e altro. Operazioni complicatissime che, modestamente, faccio con gran disinvoltura. Se poi vado ad analizzare la meccanica del mio movimento, non ho il linguaggio adatto, né le conoscenze adeguate per decifrarla. Ne deduco che in me c'è qualcuno che conosce benissimo il funzionamento complesso della camminata, e qualcun altro che cerca di elaborare un linguaggio all'altezza di quel che già sa. Di fatto, noi studiamo quel che già in qualche modo sappiamo, altrimenti non potremmo riconoscerlo, dice il filosofo: possiamo conoscere solo quello che sta nei nostri limiti. Perdonerete la digressione ellittica, poco lineare: ma va anche tenuto in considerazione che chi vi sta parlando è un La Bemolle. Mi è stato da poco



regalato un corso di "cronomusicoterapia applicata", e da una scelta di colori si è arrivati all'identificazione della mia nota base. Dopodiché, sdraiato su un lettuccio, sono stato punteggiato di cristalli, e mentre stringevo in mano un sasso di zolfo, passavano su di me, che ascoltavo varie digressioni in La Bemolle, diversi colori. Il bello è che la cosa mi ha fatto bene: mi è passato il mal di testa e ho conosciuto una signora che dice di poter arrivare a centocinquant'anni. Con la quale riflettevo (senza malizia) che il magnetismo, la forza gravitazionale, l'idea stessa di attrazione e di forza sono termini relativi alla sfera semantica dell'astrofisica come a quella dell'eros. Le persone ci si presentano e ci girano intorno con dinamiche simili a quelle delle orbite di stelle e pianeti. E per giunta, a secondo della velocità delle loro rivoluzioni, si presentano più o meno luminose. In qualche modo, anche noi siamo corpi celesti.

Mi permetto di concludere citando Lucrezio, e il suo inno a Venere. Che non finisce di stupire, permettendo a esseri ignorantissimi di copulare sotto i ponti o in grandi alberghi per produrre in pochi minuti di oscuro delirio una macchina così sofisticata in grado di camminare, cantare, dipingere e fare calcoli astrofisici, immaginando e realizzando Macchine del Tempo.

P.S. Immaginando che questa Macchina del Tempo siamo nient'altro che noi bipedi, mi percorre la schiena un brivido. E mi dirigo al mare, con la mia ciambella sottobraccio, pronto a ripetere l'esperimento. Sono sicuro di riuscirci.

[as] riflessi

Energia per curare.

di Eleonora Cossi



La precisione è la parola chiave per parlare di un'applicazione nata dalla fisica delle particelle e oggi impiegata in tutto il mondo per trattare i tumori localizzati non operabili o pediatrici. Si tratta dell' "adroterapia", una terapia in cui si usano particelle di alta energia prodotte con acceleratori di particelle dedicati in parte o totalmente al trattamento dei pazienti oncologici. Accade nel centro Catana, che ha trattato circa 500 pazienti dal 2002 utilizzando il ciclotrone dei Laboratori Nazionali del Sud (Lns) dell'Infn di Catania, nel Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica (Cnao) di Pavia, il cui sincrotrone è stato realizzato dall'Infn sulla scia del progetto pionieristico promosso dalla Fondazione Tera (circa 1500 pazienti trattati dal 2011), e nel centro di protonterapia di

Trento, di cui l'Infn è partner attraverso il Trento Institute for Fundamental Physics and Applications (Tifpa), dove sono stati trattati oltre 400 pazienti da ottobre 2014.

Gli adroni (dal greco *hadros*, forte) sono particelle formate da quark, che quindi subiscono la forza nucleare forte. Nelle attuali terapie si usano due tipi di adroni: i protoni e gli ioni carbonio. Diversamente dagli elettroni e dai fotoni, impiegati nella radioterapia, l'utilizzo degli adroni ha il vantaggio di poter rilasciare l'energia delle particelle in modo molto più preciso. La precisione è dovuta al fatto che gli ioni leggeri e i protoni possono penetrare attraverso i tessuti fino alla profondità desiderata, definita in base al loro numero atomico, massa ed energia iniziale, rilasciando poca energia

a.

Il sincrotrone del Cnao, a Pavia.

durante il tragitto e concentrandone il rilascio a fine percorso, in una piccola regione - dell'ordine del mm - chiamata dai fisici "picco di Bragg" (vd. in *Asimmetrie* n. 9 p. 32, ndr). Queste particelle possono così colpire quasi solo le cellule malate, minimizzando i danni nel tessuto sano. L'azione delle particelle sulle cellule tumorali provoca la rottura della doppia elica nella struttura del Dna e porta alla morte delle cellule cancerose.

Proprio come negli acceleratori costruiti per gli esperimenti di fisica fondamentale, il processo di accelerazione inizia all'interno di speciali camere, chiamate "sorgenti", in cui si generano plasmi di elettroni e ioni. Gli ioni sono pre-accelerati, estratti e iniettati nelle macchine acceleratrici. Qui, grazie a campi elettrici e magnetici controllati da radiofrequenze, gli ioni vengono accelerati ad alte energie e raggruppati in pacchetti composti ognuno da miliardi di particelle.

Nel sincrotrone del Cnao, ad esempio, in partenza i pacchetti viaggiano a poche migliaia di km al secondo, ma nella fase di massima energia - 250 MeV per i protoni e 400 MeV per nucleone per gli ioni carbonio - raggiungono velocità di circa 100.000 km al secondo. I fasci accelerati vengono poi inviati nelle sale di trattamento. Nel centro di Pavia ce ne sono tre, dove un magnete curva il fascio dirigendolo sul bersaglio, le cellule tumorali del paziente, con una precisione di 200 micron (due decimi di millimetro). Questa precisione è garantita da un monitoraggio continuo, a tre dimensioni, del paziente, per seguire i movimenti del corpo che possono alterare la posizione del tumore (come ad esempio il respiro).

Il centro di Trento ospita un ciclotrone commerciale capace di produrre fasci di protoni con energie da 70 a 228 MeV, utilizzati per la cura di vari tipi di tumori. Durante il trattamento, il paziente è posizionato su un lettino all'interno di una "gantry", una camera che permette di indirizzare le radiazioni ruotando a 360° attorno al paziente. Nella gantry è possibile evitare accuratamente gli organi a rischio, e per questo motivo il centro di Trento tratta molti pazienti pediatrici (circa il 30% del totale), per i quali gli effetti collaterali a lungo termine sono ovviamente una grande preoccupazione. "Il Tifpa si occupa della ricerca presso il centro di protonterapia, utilizzando una sala dedicata con due linee fisse, che si aggiunge alle due sale di trattamento con i gantry", commenta Marco Durante, direttore del Tifpa. "La sala sperimentale è una *user-facility* e nel 2017 ha ospitato ben 20 esperimenti diversi: dalla fisica medica, alla radiobiologia, ai test di materiali di schermatura e della microelettronica nello spazio", conclude Durante. Catania, invece, è specializzato nella cura dei tumori dell'occhio utilizzando fasci di protoni accelerati a 62 MeV dal ciclotrone superconduttore dei Lns. In questa linea le particelle vengono trasportate in aria attraverso un sistema passivo e vengono impiegate precise e avanzate tecniche dosimetriche per la calibrazione di fasci in termini di dose assoluta. "Catania ha rappresentato la prima esperienza clinica di protonterapia in Italia dimostrando la capacità di aggregare competenze interdisciplinari nel campo della medicina, fisica e biologia, mettendo l'energia dei nuclei a disposizione per la salute umana", commenta Giacomo Cuttone, direttore dei Lns.



b.
La sala di trattamento di Catania, nei Laboratori del Sud dell'Infn a Catania.

[as] traiettorie

Il suono dei dati.

di Francesca Mazzotta

“Mi muovo all’interfaccia tra arte e scienza”, descrive così il suo lavoro David Pirrò, *sound artist*, ricercatore e musicista a Graz (Austria), che prima di dedicarsi alla musica ha studiato fisica teorica all’Università di Trieste.

[as]: Cosa ti ha spinto a passare dalla fisica alla musica elettronica?

[David]: Ho cominciato a suonare il pianoforte molto prima di interessarmi di fisica e ho sempre continuato a fare musica, anche durante gli studi in fisica teorica all’università di Trieste. Quando alla fine dell’università avrei avuto la possibilità di andare in America per un dottorato, ho capito che non ero disposto a trascurare la mia passione per la musica. Ho quindi cercato qualcosa che unisse un interesse scientifico per le cose a un interesse artistico per la musica e il suono. Cercando e ricercando mi sono imbattuto nella musica elettronica, una disciplina artistica storicamente molto connessa alla matematica e alla computazione. Ho quindi conseguito un master in musica elettronica al conservatorio di Trieste e ho studiato per un anno al centro di sonologia computazionale di Padova, per poi fare un dottorato in *computer music* all’Istituto di Musica Elettronica e Acustica dell’Università di Musica e Performing Arts di Graz, dove lavoro tuttora.

[as]: Su cosa lavori al momento?

[D]: Sto facendo musica elettronica con dei colleghi. Insegno inoltre ingegneria del suono e analisi del segnale a musicisti. E faccio ricerca in due grossi ambiti: *sonification*, ovvero far percepire informazioni attraverso il suono, e *artistic research*, una disciplina che ambisce a fare ricerca, nel senso di generare conoscenza, non basandosi



esclusivamente su metodi di ricerca scientifici ma anche estetici. Nell’*artistic research*, i processi sono guidati da un’esperienza artistica, tuttavia hanno anche un obiettivo, un’ambizione. Non sono solo opere d’arte, sono poste in un contesto di ricerca, di domande, e generano interconnessioni tra cose diverse.

[as]: Potresti fare un esempio?

[D]: *Transpositions* è un progetto di ricerca artistica di esplorazione dei dati, a cui sto lavorando con due colleghi, Gerhard Eckel e Michael Schwab. In questo progetto i dati sono il punto di partenza per realizzare artefatti artistici e si indaga la possibilità di generare

nuove forme uditive e visive partendo dall’analisi e dalla trasformazione matematica di dati scientifici. È quindi un progetto che si posiziona all’incrocio tra arte e scienza e cerca di trovare un punto di incontro tra le due discipline. In uno dei casi di studio di *Transpositions* abbiamo utilizzato i dati di un progetto di ricerca del Cern, Compass (Common Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy), che studia la struttura interna dei protoni, bombardandoli con muoni.

[as]: Sei più un ricercatore o un artista?

[D]: È difficile rispondere a questa domanda. Potrei dire che sono un po’

tutte e due le cose. La mia pratica artistica influenza la mia pratica di ricerca. Perché sono due cose così vicine, difficili da separare. Tuttavia la pratica di *artistic research* è diversa dalla pratica esclusivamente artistica.

[as]: La tua formazione in fisica teorica è stata utile nel tuo percorso professionale e artistico?

[D]: Sì, quello che ho appreso durante i miei studi in fisica non mi ha mai lasciato, mi è sempre stato utilissimo. Sicuramente per il modo di pensare che la fisica teorica insegna, sempre molto presente e importante nei miei lavori. Ma anche per le forti basi in computazione. Tuttora utilizzo metodi matematici per generare o per creare composizioni, opere e pezzi, che sono quasi interamente basati su sistemi dinamici che simulano in tempo reale e che generano il suono.

[as]: Come e quanto differiscono ricerca scientifica e ricerca artistica secondo te?

[D]: L'oggetto su cui arte e scienza si

focalizzano è sempre lo stesso, è sempre dettato dalla voglia di conoscere. Ritengo differiscano principalmente per i metodi che utilizzano. La ricerca scientifica pone l'oggetto di cui si occupa all'esterno dell'osservatore. La ricerca artistica, invece, ritiene che la percezione dell'osservatore sia fondamentale.

[as]: Secondo te quanto comunicano oggi arte e scienza? E cosa si può fare per incoraggiare questo dialogo?

[D]: Ci sono sempre più iniziative o discorsi che cercano di portare in contatto le due cose. C'è però un pericolo: non capirsi. Spesso gli scienziati concepiscono la ricerca artistica come uno strumento per rappresentare risultati scientifici. Ma questa è solo una minuscola parte di quello che potrebbe essere il dialogo tra arte e scienza. Credo che la pratica artistica e la filosofia possano ampliare i metodi con cui la ricerca scientifica si rapporta con il proprio oggetto. Ad esempio, potrebbero dare la possibilità agli scienziati di uscire dalla loro specializzazione per un attimo, per poi rientrarci arricchiti.



a.
Un'installazione di *Transpositions*, il progetto di ricerca artistica a cui David lavora con Gerhard Eckel e Michael Schwab.

[as] spazi

Universo, tempo zero.

di Francesca Scianitti

Dall'estate 2017 la Città dei Bambini e dei Ragazzi di Genova ospita con successo un'installazione permanente ideata e realizzata dall'Infn per il pubblico dei più piccoli e dedicata alla storia dell'universo, la sua evoluzione e le fasi di formazione delle sue strutture. Una storia che ha inizio con il Big Bang e che scorre lungo i quasi 14 miliardi di anni di vita dell'universo, toccando alcuni dei misteri più affascinanti cui la fisica di oggi sta cercando di dare risposta. La fisica, le scienze naturali, la chimica, l'ambiente, la comunicazione sono solo alcuni dei temi trattati negli oltre 2000 metri quadrati e 50 exhibit multimediali e interattivi della Città dei Bambini e dei Ragazzi di Genova (www.cittadeibambini.net), all'interno del Modulo 1 del Porto Antico di Genova, in cui i giovani visitatori - dai 2 ai 13 anni - toccano, osservano e sperimentano argomenti diversi, mettendosi alla prova per condividere un'esperienza didattica in famiglia. In questo contesto, "Universo tempo zero" arricchisce l'offerta dedicata ai più grandi, dalla scuola primaria all'ultimo anno della scuola media inferiore.

L'installazione si compone di elementi grafici e testuali, a parete e a terra, che descrivono la successione delle fasi evolutive del cosmo: dal brodo primordiale ai primi nuclei e atomi, fino alla formazione di stelle, galassie e sistemi planetari. Inoltre, il percorso è accompagnato da testi di approfondimento inseriti in elementi fisici che pendono dall'alto: è questa la voce dei temi di ricerca più attuali sulla natura dell'universo, dai raggi cosmici alle onde gravitazionali, fino alla massa delle particelle, dalla scomparsa dell'antimateria al mistero irrisolto sulla natura della materia oscura.

Seguendo la linea temporale dell'evoluzione cosmica, gli elementi di approfondimento appaiono in corrispondenza della fase evolutiva cui sono maggiormente legati. Tra questi: il momento in cui materia e antimateria, originate dal Big Bang in uguale quantità hanno iniziato ad annullarsi vicendevolmente con esito che - per motivi ancora inspiegati - è stato favorevole alla materia; vi è poi la fase fondamentale in cui nell'universo ha fatto la sua comparsa il campo di Higgs che, fornendo massa alle particelle, ha consentito loro di rallentare e di dare successivamente origine alle strutture

più complesse, dai nuclei agli atomi, dalle stelle ai pianeti, fino a noi stessi. Punto di arrivo del percorso di "Universo, tempo zero" è la Terra. E da qui, grazie a un'installazione interattiva *touch screen*, i giovani visitatori possono interrogarsi sulla struttura di ciò che fin dall'antichità osserviamo e interpretiamo, gli oggetti visibili come stelle, pianeti e galassie, "giocando" con i modelli planetari copernicano e tolemaico e osservando i moti dei pianeti da diversi punti di vista: dalla Terra, dal Sole e da ogni altro pianeta del Sistema Solare. Per scoprire che non è poi così strano che la Terra non sia al centro dell'universo.



Incontri ravvicinati.

di Francesco Scerbo

insegnante del Liceo Scientifico "Luigi Siciliani" di Catanzaro

Il mio primo "incontro" con gli Incontri di Fisica risale al 2006. Nel giugno di quell'anno tra le numerose circolari in sala docenti notai una comunicazione inviata dal Ministero relativa a un corso di aggiornamento organizzato dai Laboratori Nazionali di Frascati dell'Infn (Lnf). Spinto dalla curiosità cercai il programma sul sito dei Lnf: di fronte all'occasione unica di poter seguire le relazioni di due "mostri sacri" quali Nicola Cabibbo e Luca Cavalli Sforza, decisi di iscrivermi. Quell'ottobre partecipai alla mia prima edizione degli Incontri di Fisica, con grande soddisfazione perché, oltre ai due interventi citati, le tre giornate di attività presso l'aula Touschek si rivelarono dense di presentazioni dedicate alle attività di ricerca dei Laboratori e alla fisica, alla tecnologia, alle problematiche ambientali, all'analisi degli aspetti sociali e culturali della scienza. La presentazione delle attività Lnf e la visita ai Laboratori, incluso l'acceleratore Dafne, furono una sorta di anticipazione dei successivi sviluppi delle mie attività presso e con i Lnf.

Da quell'anno la mia partecipazione agli Incontri è diventata un *must* e il viaggio annuale a Frascati un appuntamento fisso. In queste 12 edizioni ho avuto modo non solo di ampliare e approfondire le mie conoscenze in diversi settori della fisica di base e applicata, della tecnologia, delle scienze in generale, e acquisire nuove competenze in campo laboratoriale, ma ho anche potuto osservare l'evoluzione che le stesse attività degli Incontri hanno subito nel tempo. Infatti, già dal 2007, gli Incontri si sono arricchiti, durante la loro seconda giornata, dell'introduzione dei "gruppi di lavoro", dedicati ad attività sperimentali



da svolgere nei diversi laboratori sotto la guida dei ricercatori e tecnici Infn. Sarebbe troppo lungo fare un elenco delle relazioni che ho apprezzato e degli esperimenti che ho svolto in questi anni, ci sono stati però relatori e attività che hanno lasciato un segno particolare: dalla coinvolgente relazione in cui John Ellis ha scomodato Gauguin per illustrare i progressi di Lhc, alla appassionata e lucida ricostruzione che Miriam Mafai ha tracciato della vicenda scientifica, umana e politica di Pontecorvo, alla lezione sulla fisica delle particelle elementari (con tanto di formalismo matriciale) del prof. Guido Altarelli, fino alle esperienze

sugli "atomi esotici", le risonanze nel laboratorio Nautilus, la rivelazione dei muoni con gli scintillatori, gli esperimenti didattici di fisica quantistica, le nanotecnologie del laboratorio Next, la misura della vita media del mesone D con i dati di Lhcb. Insomma da quel lontano 4 ottobre del 2006, ogni anno ho vissuto tre giornate di interessante formazione scientifica con un occhio sempre attento agli aspetti didattici, accompagnato da ricercatori e tecnici capaci di coniugare preparazione e serietà nel lavoro a una dose di disponibilità, umanità e cordialità di rapporti personali difficilmente riscontrabile altrove.

a.
Vari momenti degli "Incontri di Fisica" del 2017.

Oltre le metafore: una lezione sul bosone di Higgs.

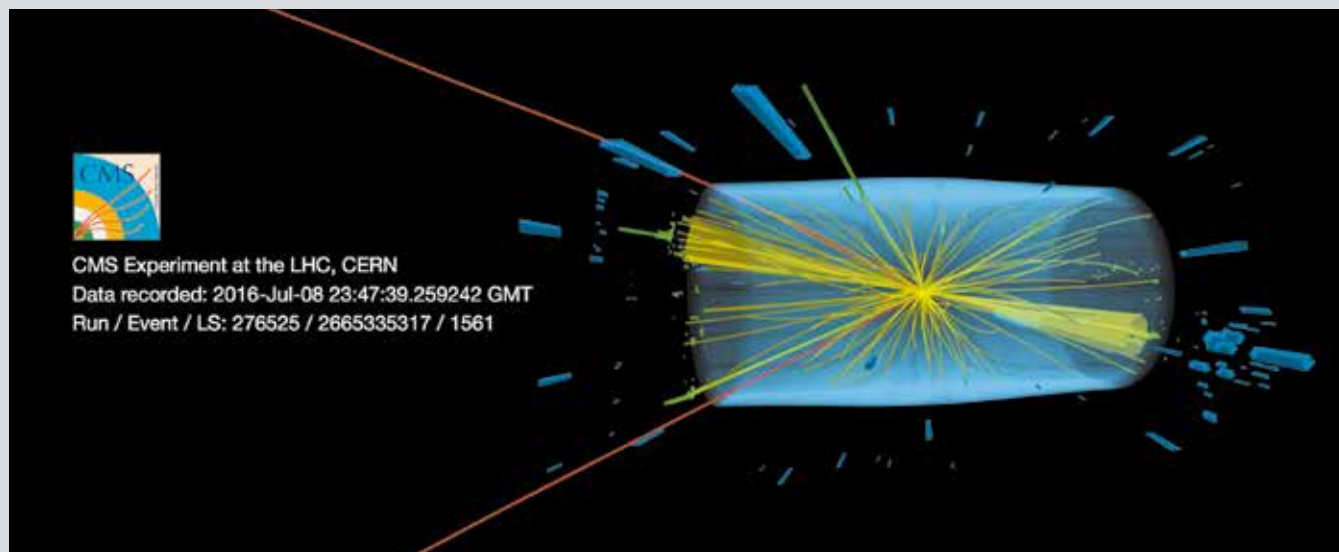
Di solito il meccanismo della rottura spontanea della simmetria che porta al bosone di Higgs si studia verso la fine del corso di teoria quantistica dei campi al termine del corso di laurea in fisica. La divulgazione è invece costretta a fermarsi alle metafore (vd. in *Asimmetrie* n. 8, p. 8), utili nella comprensione di concetti spesso ardui per gli stessi esperti ma che ad alcuni - come gli insegnanti di fisica o forse i loro studenti più appassionati - lasciano un senso di insoddisfazione, come se qualcosa in più si sarebbe potuto fare. Giovanni Organtini, professore associato di fisica sperimentale all'Università di Roma "Sapienza", ha preparato una lezione (scaricabile su www.asimmetrie.it/ oltre-le-metafore e tratta dal suo libro di fisica sperimentale, scaricabile da <http://www.roma1.infn.it/people/organtini/publications/fisicaSperimentale-light.pdf>) alla portata di studenti e insegnanti, che permette di capire come una particella acquisti massa attraverso l'interazione con un campo, il cosiddetto meccanismo di Higgs, andando oltre le metafore. Un po' come quando si studia il primo principio della termodinamica su un manuale di fisica al posto di considerare la materia come un insieme di palline tenute insieme da molle.

Come si è detto, la spiegazione del meccanismo di Higgs richiederebbe la conoscenza della teoria quantistica dei campi, mentre la trattazione ideata da Giovanni Organtini riesce a farlo in modo diretto, usando solo la matematica che a scuola serve già egregiamente per studiare altri rami nobili della fisica, dalle leggi di Newton all'elettromagnetismo. L'idea

di partenza è osservare che l'introduzione del meccanismo di Higgs rende evidente l'alto grado di uniformità delle leggi della natura, in particolare nel calcolo dell'energia di una particella, anche là dove a priori non lo sembrava.

Entrando un po' in dettaglio, dall'esistenza del campo di Higgs Giovanni Organtini trae lo spunto per assumere che l'energia contenuta in una regione di spazio dipenda solo dall'interazione di qualcosa con qualcos'altro e per scrivere poi l'espressione dell'energia di una particella in un volume, considerando tutti i termini dovuti alle interazioni note.

Quando si aggiunge l'energia a riposo dovuta alla relatività, il famoso mc^2 , si ha un termine che dipende solo dal tipo di particella considerata e che ha una forma matematica diversa da quella di tutti gli altri termini. Come spesso capita in fisica, anche in questa trattazione la ricerca dell'eleganza matematica indica una possibile soluzione. Assumendo che esista un nuovo campo di forza e riscrivendo l'energia di una particella che interagisce con questo campo in modo simile agli altri termini noti, compare sia un termine costante, che dipende solo dal tipo di particella (interpretabile come l'energia a riposo della particella stessa) sia l'indicazione che il campo di Higgs sia massivo. Insomma, senza ricorrere a materie e tecniche di calcolo che oggi scoraggerebbero anche gli studenti migliori, Giovanni Organtini introduce tutti i termini necessari alla comprensione del meccanismo di Higgs, suggerendo che potrebbe non essere lontano il tempo in cui questo sarà abbastanza facile da essere insegnato a scuola. [Barbara Sciascia]





Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

**I laboratori dell'Istituto Nazionale
di Fisica Nucleare sono aperti alle visite.**

I laboratori organizzano, su richiesta
e previo appuntamento, visite gratuite
per scuole e vasto pubblico.

La visita, della durata di tre ore circa,
prevede un seminario introduttivo
sulle attività dell'Infn e del laboratorio
e una visita alle attività sperimentali.

Per contattare
i laboratori dell'Infn:

Laboratori Nazionali di Frascati (Lnf)

T + 39 06 94032423
/ 2552 / 2643 / 2942
sislnf@lnf.infn.it
www.lnf.infn.it

Laboratori Nazionali del Gran Sasso (Lngs)

T + 39 0862 4371
(chiedere dell'ufficio prenotazione visite)
visits@lngs.infn.it
www.lngs.infn.it

Laboratori Nazionali di Legnaro (Lnl)

T + 39 049 8068342 356
direttore_infn@lnl.infn.it
www.lnl.infn.it

Laboratori Nazionali del Sud (Lns)

T + 39 095 542296
sislns@lns.infn.it
www.lns.infn.it

www.infn.it



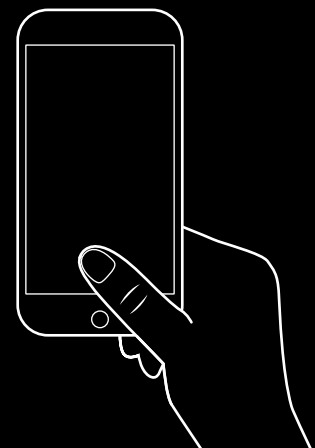
Sul sito **www.asimmetrie.it**
vengono pubblicate periodicamente
notizie di attualità scientifica.

Per **abbonarti gratuitamente** ad Asimmetrie
o per **modificare** il tuo abbonamento vai su:
<http://www.asimmetrie.it/index.php/abbonamento>

Si prega di tenere sempre aggiornato il proprio
indirizzo mail per ricevere le nostre comunicazioni.

Leggi anche le nostre **faq** su:
<http://www.asimmetrie.it/index.php/faq>

Asimmetrie è anche una app,
ricca di contenuti multimediali.





www.infn.it

rivista online
www.asimmetrie.it