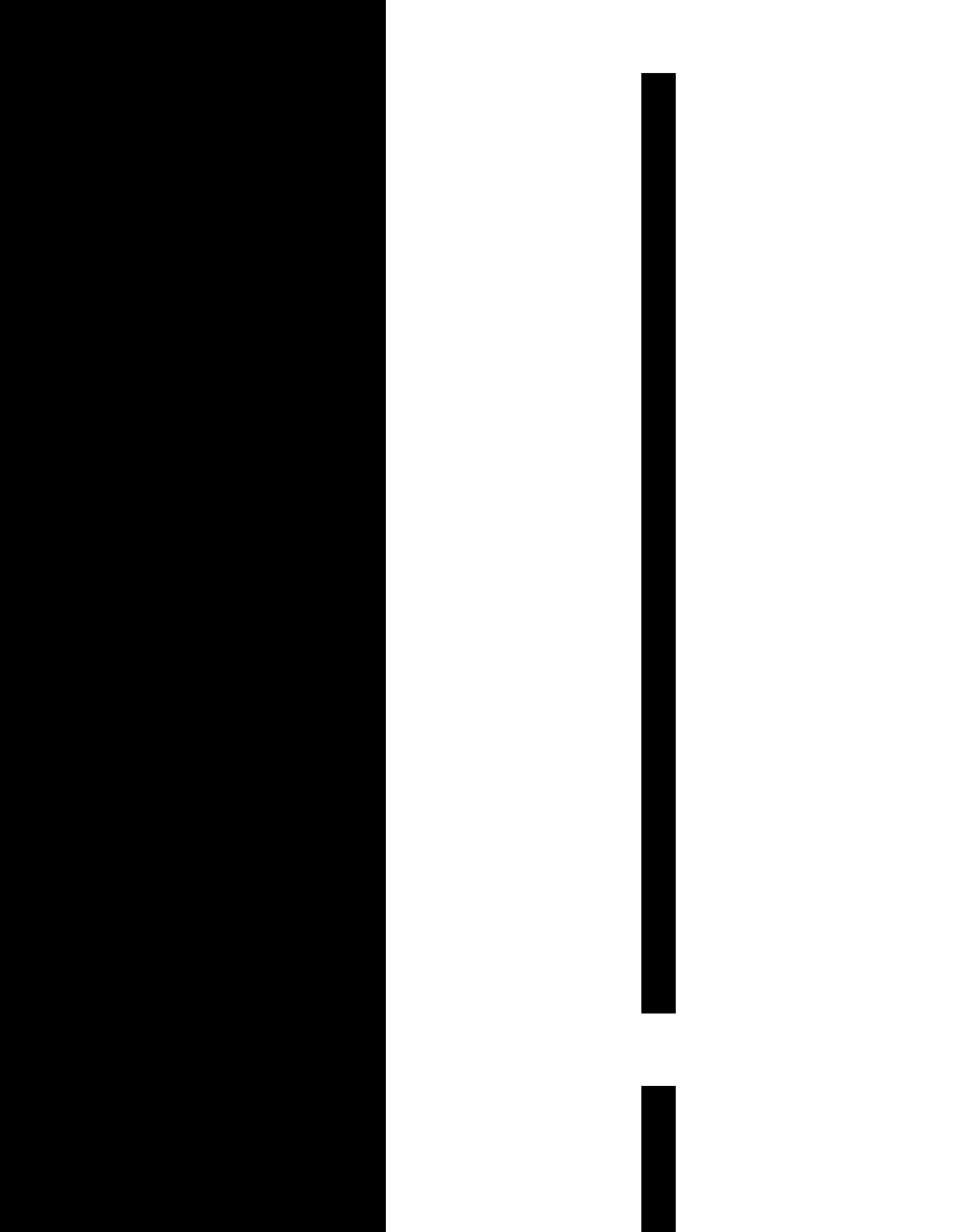


[materia]

anno 19 numero **36** / 04.24

asimmetrie

rivista semestrale dell'Istituto
Nazionale di Fisica Nucleare



asimmetrie

Care lettrici e cari lettori,

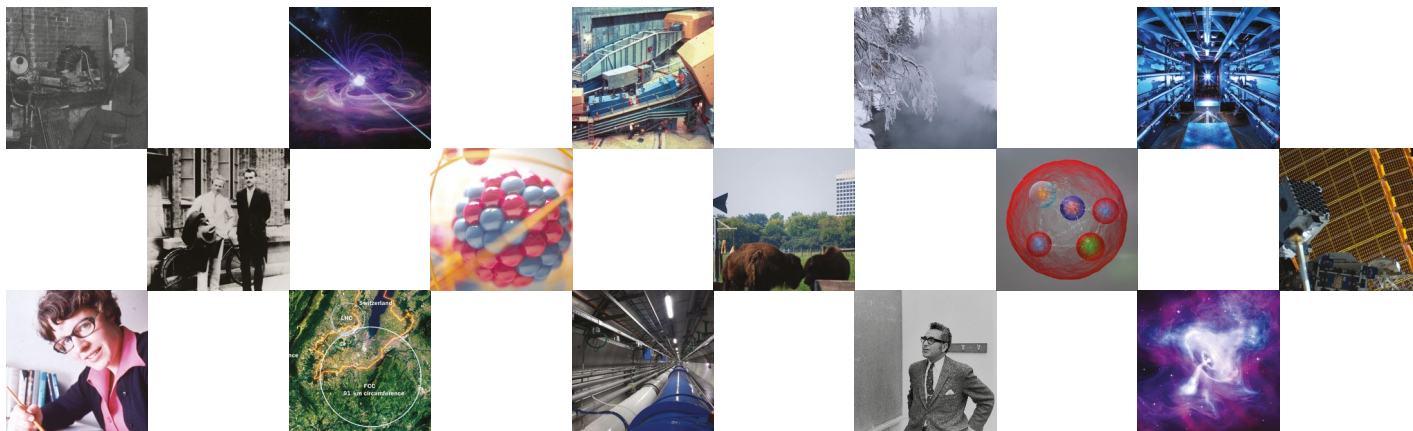
Cos'è la materia? Di cosa sono fatti gli oggetti che ci circondano? Esistono dei componenti fondamentali? Quanti sono? Già cinque secoli prima di Cristo, Democrito aveva ipotizzato che la materia fosse composta da unità non ulteriormente divisibili, gli atomi. Questa idea ha attraversato i secoli e ha avuto un ruolo importante nello sviluppo della scienza moderna: l'atomo di Democrito è cambiato, si è scoperto prima visibile e poi divisibile, formato da elettroni e da un nucleo a sua volta composto da nucleoni, protoni e neutroni, questi pure formati da particelle più elementari, i quark. Nel tempo nuove particelle elementari hanno sostituito le precedenti, ma il concetto di costituente fondamentale è rimasto. Oggi il modello standard delle interazioni fondamentali descrive la materia come formata da una manciata di particelle elementari, tutte osservate. Bastano quattro particelle (e le corrispondenti antiparticelle) a formare tutta la materia ordinaria dell'universo: i leptoni, elettrone e neutrino elettronico, e i quark up e down (costituenti dei nucleoni). Questa prima generazione di particelle si replica due volte, per motivi ancora misteriosi, con altre particelle, simili ma più pesanti, che non si trovano nella materia ordinaria (con una possibile eccezione che troverete discussa in questo numero, l'ipotesi di Bodmer e Witten), ma sono state prodotte con

gli acceleratori.

Questi grandi microscopi, gli acceleratori di particelle, sono strumenti unici per investigare la natura della materia e comprendere se abbiamo veramente individuato i suoi componenti fondamentali oppure se, guardandole più da vicino (ovvero, con energie più alte), vedremo strutture ancora più piccole. Ci permettono inoltre di studiare degli stati esotici della materia non altrimenti accessibili: ad esempio particelle formate da quattro o cinque quark (nei normali nucleoni ce ne sono tre) o il plasma di quark liberi e gluoni (i mediatori delle interazioni forti), che ha rappresentato la materia nei primissimi istanti dell'universo. Proprio l'universo ci dice che dobbiamo continuare a investigare la materia: attraverso le osservazioni astrofisiche e cosmologiche, ci mostra, ad esempio, che quella che conosciamo è solo il 5% della materia dell'universo, con una grande frazione di materia oscura non descritta dal modello standard, ancora tutta da scoprire.

Buona lettura.

Antonio Zoccoli
presidente INFN



asimmetrie

Rivista dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

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

Semestrale, anno 19, numero 36, aprile 2024

direttore editoriale

Antonio Zoccoli, *presidente Infn*

direttore responsabile

Catia Peduto

direttore comitato scientifico

Nicolao Fornengo

comitato scientifico

Daniele Del Re
Viviana Favone
Giuliana Galati
Sandra Leone
Alessandro Papa

redazione

Catia Peduto

hanno collaborato

Wanda Alberico, Stefano Atzeni, Ignazio Bombaci, Matteo Cirillo, Marina Cobal, Cecilia Collà Ruvolo, Alessandro Drago, Anna Greco, Adele La Rana, Francesca Mazzotta, Alessandro Nagar, Marco Pappagallo, Massimo Pietroni, Simone Stracka, Giulia Zanderighi

contatti redazione

INFN Ufficio Comunicazione
Piazza dei Caprettari 70
I-00186 Roma
T +39 06 6868162
comunicazione@presid.infn.it
www.infn.it

impaginazione

Hylab

stampa

Tipografare srl



su carta certificata FSC
carta interno:
R4 Next Bulky da 130 gr/m²
carta copertina:
garda matt art da 250 gr/m²

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 ottobre 2023. Tiratura 18.000 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 36 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 © Natalia Blauth/Unsplash // foto p. 4 © Dian/Adobe Stock // foto a p. 5 © Cavendish Laboratory, University of Cambridge; foto b p. 6 © McGill University, Rutherford Museum, courtesy of AIP Emilio Segrè Visual Archives; foto c p. 7 © AIP Emilio Segrè Visual Archives; foto d p. 8 © S. Orlando-INAF // foto a p. 9 © Ktsdesign/Science Photo Library / Getty Images; fig. f p. 10 © Hylab/ Asimmetrie-INFN // fig. a p. 11 © Hylab/ Asimmetrie-INFN // foto a p. 12 © CERN; foto b p. 13 © SLAC; foto c p. 14 © Mike Kappel; fig. d p. 15 © CERN // foto a p. 16 © AIP Emilio Segrè Visual Archives, Physics Today Collection; fig. b p. 17 © Hylab/ Asimmetrie-INFN; fig. c p. 18 © CERN // foto a p. 19 © keithlevit/123RTF; fig. b p. 20 © Hylab/ Asimmetrie-INFN; foto c p. 21 © AIP Emilio Segrè Visual Archives, Physics Today Collection // foto a p. 22 © Robin Scagell, Astronomical Society of the Pacific, courtesy AIP Emilio Segrè Visual Archives, Physics Today Collection; foto b p. 23 © NASA; fig. c p. 24 © Hylab/ Asimmetrie-INFN; foto d p. 25 © NASA // foto a p. 26 © Damien Jemison-LLNL; fig. 1 p. 28 © Hylab/ Asimmetrie-INFN // foto a p. 29 © Cavendish Laboratory, University of Cambridge; foto b p. 30 © CERN; foto c p. 31 © Jaspal Singh // foto a p. 32 © Photograph by Mark Godfrey, courtesy of AIP Emilio Segrè Visual Archives, Gift of Vera Rubin; foto b p. 33 © DESY / Heiner Müller-Elsner; foto c p. 34 © the Franklin Institute, courtesy AIP Emilio Segrè Visual Archives, Physics Today Collection // foto a p. 35 © Archivio Amaldi, Dipartimento di Fisica, Università la Sapienza, Roma; foto b p. 36 © Argonne National Laboratory, courtesy AIP Emilio Segrè Visual Archives, Fermi Film Collection // foto a p. 38 © University of Illinois; foto b p. 39 © AIP Emilio Segrè Visual Archives, Physics Today Collection // foto b p. 41 © Thomas Jefferson National Accelerator Facility // foto a, b pp. 42-43 © INFN // foto a p. 4 © Michele Purin; foto b p. 45 © Matteo De Stefano // foto a p. 45 © die formgeber/shutterstock //fig. p. 48 © A. Nagar/ Asimmetrie-INFN.

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

as

36 / 04.24 [materia]

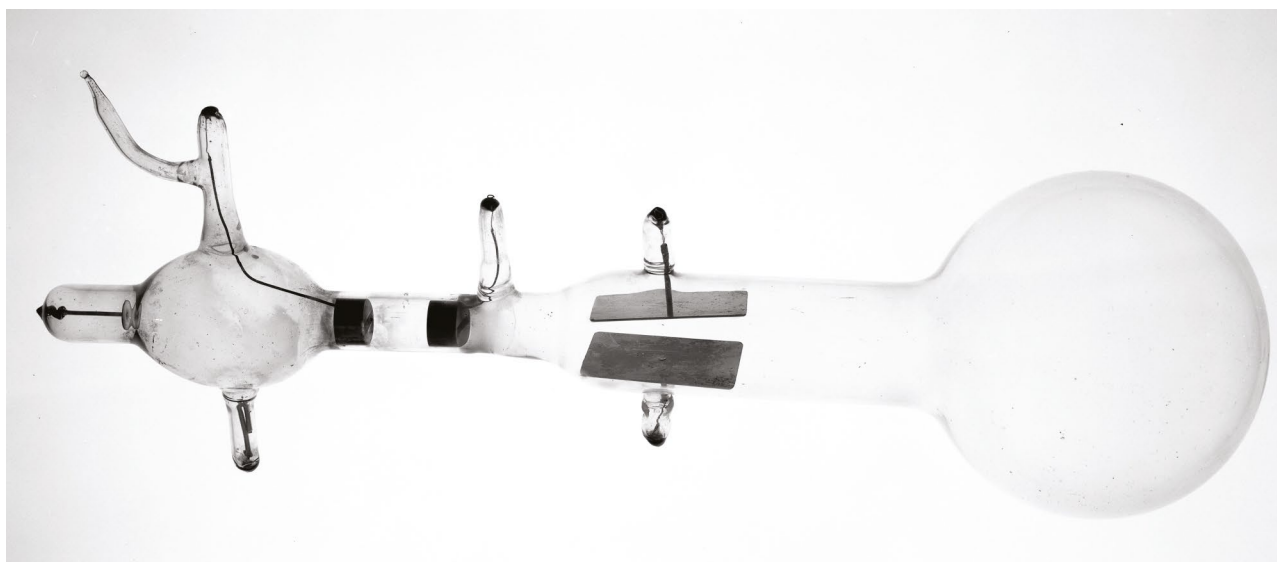
Per fare l'albero... di Wanda Alberico	4	[as] radici Dividere l'indivisibile di Adele La Rana	35
Elementari, Watson! di Giulia Zanderighi	9	[as] intersezioni Superfluidi di Matteo Cirillo	38
[as] Lo scambio di Daniele Del Re	11	[as] visioni Un tipo strano di Giuliana Galati	40
Scontri creativi di Marina Cobal	12	[as] traiettorie Più donne nella fisica di Francesca Mazzotta	42
More quarks for Muster Mark! di Marco Pappagallo	16	[as] spazi Quanto di Cecilia Collà Ruvolo	44
Sic transit materia mundi di Alessandro Drago	19	[as] illuminazioni Solido o liquido? di Anna Greco	46
Stelle di neutroni di Ignazio Bombaci	22	[as] lampi	47
Le stelle in una stanza di Stefano Atzeni	26	[as] segni	48
Uguali e contrari di Simone Stracka	29		
AAA materia cercasi di Massimo Pietroni	32		

Per fare l'albero...

Breve storia della materia

di Wanda Alberico





La parola “materia” è un termine del vocabolario comune, apparentemente intuitivo, ma in realtà ha molti significati a seconda del contesto. Di solito con “materia” si intende materiale inorganico, inerte: rocce, terra, liquidi, gas. L’etimologia della parola si richiama al latino *materia*, da *mater* ovvero “madre”, ma anche dal legno, quale materiale primigenio.

Qui vogliamo ripercorrere il cammino della scienza, per arrivare alla nostra attuale comprensione della materia, dall’infinitamente piccolo alle straordinarie dimensioni dell’universo intero.

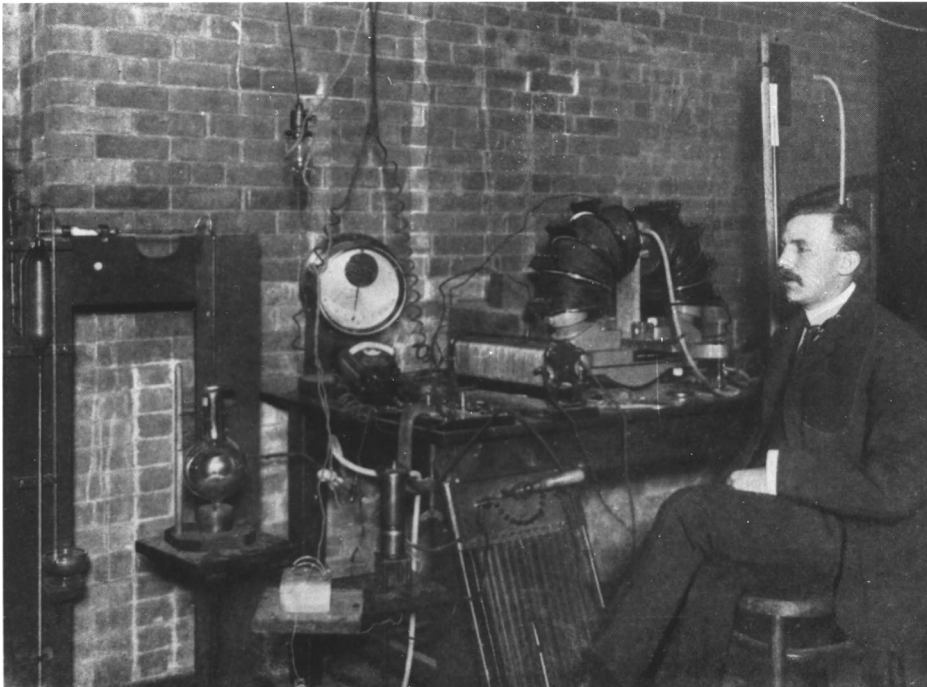
Oggi, ovviamente, le spiegazioni degli antichi riguardo al concetto di materia non ci soddisfano più. I quattro elementi del filosofo greco Aristotele (terra, acqua, aria, fuoco) ci fanno sorridere, sebbene geniali per l’epoca. Tuttavia, già nel V secolo a.C. Democrito di Abdera suggerì che tutta la materia fosse composta da “atomi” (entità indivisibili, come dice il nome). Si trattava di una speculazione filosofica, ma ancora oggi possiamo dire che la materia è fatta di atomi, sia pure molto diversi da quelli di Democrito e, soprattutto, divisibili...

La teoria atomistica, successivamente apprezzata da Epicuro e riportata nel *De Rerum Natura* di Lucrezio (vd. p. 47, ndr), poté giungere fino a Isaac Newton, che descrive gli atomi come costituenti di tutti i corpi e interagenti tra loro, producendo diverse reazioni chimiche. Newton fu anche fautore della teoria corpuscolare

della luce, poi avversata dalla teoria ondulatoria finché, agli inizi del ‘900, le due “nature” vennero riconciliate dalla meccanica quantistica.

La teoria atomistica riceve il suo riconoscimento scientifico dalla chimica del ‘700 e soprattutto dell’800. John Dalton redige una tavola dei pesi atomici, confermata da William Prout, che li identifica come multipli del peso atomico dell’idrogeno. Nel 1870 vede la luce il sistema periodico degli elementi di Mendeleev (vd. p. 10 in *Asimmetrie* n. 26, ndr), che rafforza la teoria atomica, soprattutto dopo aver dimostrato il suo potere predittivo sull’esistenza di elementi chimici ancora sconosciuti. Siamo dunque al capolinea della descrizione atomica della materia? Nemmeno per sogno: 26 anni dopo Joseph John Thomson scopre che l’atomo è divisibile, eccome! In particolare, che al suo interno ci sono gli elettroni, particelle subatomiche con carica elettrica negativa e massa piccolissima (meno dello 0,06% della massa atomica). L’elettrone viene subito ritenuto un costituente elementare (cioè non ulteriormente divisibile) della materia. La scoperta di Thomson chiudeva un ventennio di studi iniziati da William Crookes, che aveva effettuato esperimenti su quelli che vennero chiamati “raggi catodici” e solo in seguito identificati come fasci di elettroni. L’atomo dunque è divisibile e al suo interno sono presenti cariche negative

a.
Tubo per raggi catodici, ideato da Joseph Thomson presso il Laboratorio Cavendish all’Università di Cambridge.



b.
Ernest Rutherford
davanti alle
apparecchiature del
suo laboratorio presso
la Victoria University di
Manchester.

(gli elettroni) e positive (i protoni) che ne garantiscono la neutralità elettrica. Grazie agli esperimenti di Hans Wilhelm Geiger ed Ernest Marsden, effettuati sotto la direzione di Ernest Rutherford tra il 1908 e il 1913, la carica positiva fu localizzata in una regione centrale, di raggio 100.000 volte più piccolo del raggio dell'atomo stesso: il nucleo atomico. Successivamente si comprese che il nucleo è composto da due tipi di particelle, i protoni con carica elettrica positiva e massa pari all'atomo di idrogeno ionizzato (ossia privo del suo unico elettrone) e i neutroni elettricamente neutri e con massa leggermente superiore a quella del protone.

Nell'atomo quindi abbiamo un nucleo centrale, in cui risiede la quasi totalità della massa atomica, e un certo numero di elettroni, pari al numero atomico dell'elemento (ovvero il numero di protoni nel nucleo). Gli atomi e le molecole della materia ordinaria sono composti da questi tre costituenti: protoni, neutroni ed elettroni.

Grande soddisfazione per i risultati raggiunti, ma il cammino della ricerca non si ferma qui (ancora oggi potremmo dire che non si ferma mai). Vengono proposti

vari modelli dell'atomo, sembra prevalere il modello planetario di Bohr-Rutherford, ma troppe discrepanze con le misure sperimentali inducono i fisici a scavare ancora nei segreti della Natura. Val la pena di ricordare qui (vd. anche p. 12, ndr) che per esplorare il mondo subatomico i ricercatori dovettero inventare nuovi strumenti, tipicamente ispirati a quello usato da Rutherford per scoprire il nucleo atomico: gli acceleratori di particelle elettricamente cariche (per esempio elettroni e protoni), accelerate e guidate da campi elettrici e magnetici e quindi inviate sul bersaglio che si vuole studiare. L'analisi di quanto è successo nell'urto ci permette di scoprire la struttura del bersaglio nonché la natura di nuove particelle prodotte. Questa tecnica geniale ha richiesto enormi progressi di tecnologia e materiali, ma ancora oggi è alla base dei grandi esperimenti come quelli del CERN di Ginevra.

Tra gli anni '20 e '30 del '900 si affaccia al panorama del mondo subatomico la meccanica quantistica, una vera rivoluzione di pensiero, un terremoto per le certezze concettuali della meccanica classica. Fin dal 1900, con Max Planck, vengono proposti i quanti di luce, prima solo

nello scambio di energia con la materia, poi, con il lavoro di Albert Einstein sull'effetto fotoelettrico, come vere e proprie particelle: nasce la "dualità onda-corpuscolo", oggi più nota come dualità onda-particella (la luce è pur sempre un'onda elettromagnetica), che verrà presto estesa anche alle particelle note, come gli elettroni.

Le leggi della fisica diventano sempre meno intuitive: il principio di indeterminazione di Heisenberg, il principio di esclusione di Pauli, la relatività ristretta e successivamente la relatività generale ci offrono descrizioni della materia a volte difficili anche solo da immaginare, ma piene del fascino dell'ignoto di un territorio tutto da esplorare, pieno di sorprese e di novità.

Abbiamo da tempo abbandonato l'idea che gli atomi siano indivisibili, ora sappiamo che anche protoni e neutroni sono oggetti composti da tre quark, considerati i costituenti elementari degli "adroni" (cioè quelle particelle, come ad esempio il protone e il neutrone, che interagiscono con la forza forte), ipotesi che ha permesso di inglobare in un unico schema le numerose particelle via via prodotte e identificate in laboratorio. Inoltre, si sono identificati i cosiddetti "messaggeri" delle interazioni che intervengono tra le particelle. Il modello standard (vd. p. 9, ndr) ci offre un panorama di ben 17 costituenti elementari, ivi incluso l'ultimo arrivato, il bosone di Higgs, lungamente cercato dai ricercatori.

Non solo, ma grazie all'ipotesi di Paul Dirac (vd. p. 29, ndr), siamo stati capaci di identificare e produrre particelle di antimateria. Se un elettrone incontra la sua antiparticella (il positrone), si annichilano in un fiotto di energia elettromagnetica, la più elegante dimostrazione dell'equivalenza massa-energia concepita da Einstein. Viceversa, dall'energia primordiale del Big Bang, sono state create miliardi e miliardi di coppie particella-antiparticella: ma allora perché il mondo che conosciamo sembra contenere solo materia? Un'ipotesi interessante è la cosiddetta asimmetria materia/antimateria con una prevalenza della prima, ancorché in percentuale minuscola, ma sufficiente a spiegare un universo che contiene solo materia.

Altrettanto degne di nota sono particelle instabili, che non entrano nella composizione della materia ordinaria ma sono prodotte negli acceleratori o dalle interazioni dei raggi cosmici; una delle prime a essere state individuate nel 1947 è la particella lambda (Λ), il cui insolito comportamento le valse l'appellativo di particella "strana", perché mostrava di avere una vita media più lunga di quel che si pensasse. Questa sua proprietà fu denominata "stranezza" (*strangeness*, in inglese) e portò successivamente all'ipotesi dell'esistenza di un nuovo quark, il quark strange. Altri stati esotici della materia o del suo stato primordiale (un plasma caldissimo di quark e gluoni) sono sotto indagine, in attesa di conferme (vd. pp. 16 e 19, ndr).

Fin qui si è focalizzata l'attenzione sul mondo dell'infinitamente piccolo, ma come gli antichi astronomi è doveroso chiederci di cosa siano composte le grandi strutture che vediamo nel cielo, talvolta utilizzando potenti telescopi, talvolta utilizzando sonde specializzate, inviate anche a grandi distanze dalla Terra. Anche in questo caso la ricerca ci ha fornito molte informazioni sulla materia che compone le grandi strutture dell'universo (stelle, galassie, ammassi di galassie).

Pur dal nostro limitato osservatorio, analizzando gli spettri di radiazione luminosa emessi da stelle lontane si è potuto risalire



C.
Paul Dirac e Werner
Heisenberg a Chicago
nel 1929.



alla loro composizione e capire che la materia da cui sono composte non è dissimile da quella che ci è nota sulla Terra, anche se vi sono casi particolari come le stelle di neutroni, prodotte dal collasso gravitazionale di stelle massicce, con densità enormi per la nostra immaginazione (vd. p. 22, ndr).

Protoni e neutroni sono altresì responsabili dell'energia prodotta nelle stelle, grazie al processo di fusione nucleare (vd. p. 26, ndr): un processo complesso in cui intervengono sia la forza forte (nucleare) sia quella debole, che permette di formare nuclei di deuterio (p-n) e dare inizio a una catena di reazioni il cui bilancio finale consiste nel fondere protoni e neutroni in un nucleo di elio-4 con emissione di energia sotto forma di fotoni e neutrini.

La relatività generale di Einstein ha rivoluzionato il concetto di gravità, introducendo uno spaziotempo curvo, la cui curvatura è indotta dalla massa e dall'energia. Le equazioni della relatività generale ci hanno permesso di elaborare teorie cosmologiche sull'origine ed evoluzione dell'universo, come la teoria del Big Bang, con le sue implicazioni sull'espansione dell'universo e sulla formazione della materia a partire dai suoi costituenti elementari. Le condizioni della materia nelle prime frazioni di secondo dopo il Big Bang pongono difficili quesiti alla teoria che cerca di descrivere un plasma di quark e gluoni non ancora confinati in un adrone, un magma caldissimo da cui sono emerse le particelle che conosciamo oggi.

Le ricerche sulla cosmologia sono un capitolo aperto, ricco di ipotesi affascinanti, come quella riguardante l'esistenza della materia oscura (e dell'energia oscura) (vd. p. 32, ndr).

Come Galileo Galilei attendiamo conferme puntando i nostri occhi verso il cielo.

d.
Una pulsar (una stella di neutroni magnetizzata in rapida rotazione), scoperta al centro del residuo della supernova SN1987A.

Biografia

Wanda Maria Alberico è stata professoressa ordinaria di fisica teorica presso l'Università di Torino, in quiescenza dal novembre 2020. Socio corrispondente dell'Accademia delle Scienze di Torino. Si è occupata di fisica nucleare e fisica del plasma di quark e gluoni.

10.23801/asimmetrie.2024.36.1

Elementari, Watson!

I mattoni fondamentali della natura

di Giulia Zanderighi

Il modello standard è la teoria che attualmente descrive con notevole successo le interazioni tra particelle elementari. Rappresenta un esempio straordinario della capacità umana di comprendere e prevedere le interazioni fondamentali tra i costituenti elementari della materia. L'elenco impressionante di particelle, predette dal modello standard e successivamente scoperte, include il quark charm, i neutrini tau, i bosoni vettori pesanti (W e Z), il quark top e, ultimo ma non meno importante, il bosone di Higgs.

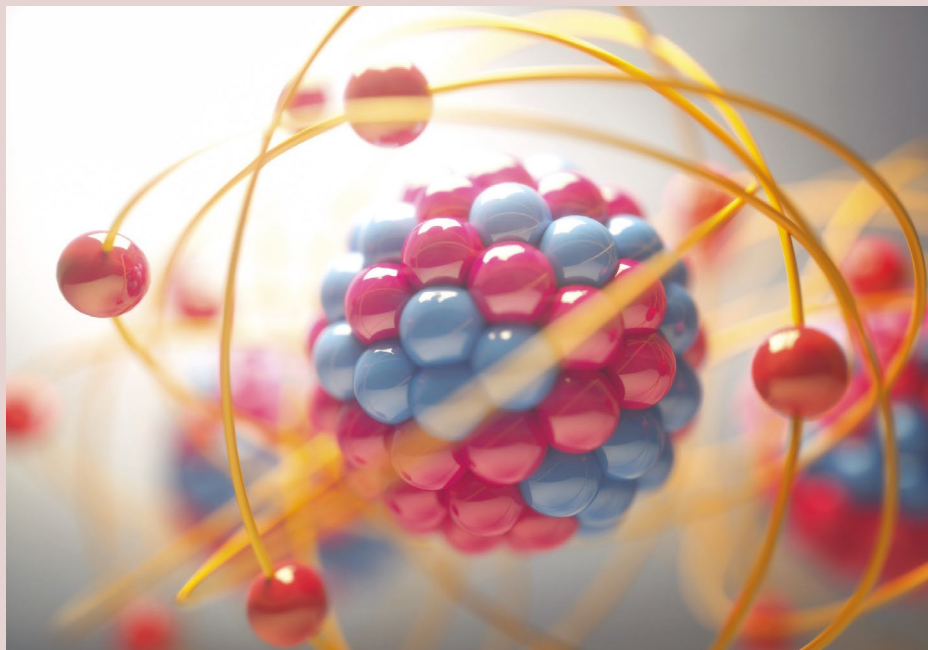
Nel modello standard (vd. fig. b), le particelle elementari costituenti la materia sono i cosiddetti "fermioni", organizzati in tre "generazioni" (o "famiglie") di quark e leptoni. I "bosoni" invece sono particelle che trasmettono le forze fondamentali: i fotoni trasmettono l'interazione elettromagnetica, i bosoni pesanti (W e Z) le interazioni deboli e i gluoni le interazioni forti. Infine, il bosone di Higgs, giocando un ruolo cruciale nella generazione della massa di tutte le particelle, trasmette un'interazione a breve raggio, chiamata "interazione di Yukawa", diversa dalle altre, in quanto dipende dalla massa delle particelle con cui interagisce.

Protoni e neutroni, costituenti i nuclei atomici, contengono due quark up, di carica elettrica $2/3$, e un quark down, di carica

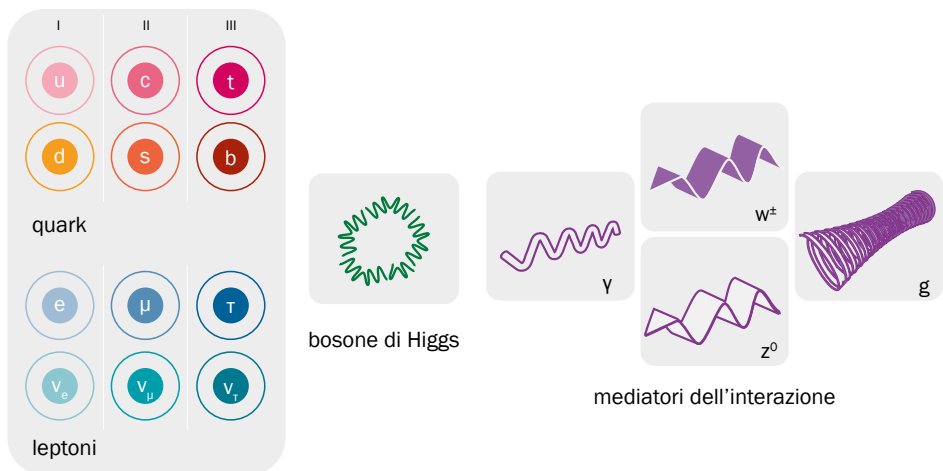
$-1/3$, nel caso del protone, o due quark down e un quark up, nel caso del neutrone. Protoni e neutroni sono detti "barioni", particelle composte da tre quark. In generale, i quark non possono essere osservati "liberi", ma si trovano sempre confinati in "mesoni" (composti da un quark e un antiquark) o, appunto, barioni. Questa proprietà dei quark, nota come "confinamento", è legata alle caratteristiche intrinseche delle interazioni forti a basse energie (vd. p. 19, ndr).

Per la vita quotidiana e la maggior parte dei fenomeni nell'universo, la seconda e terza generazione di quark e leptoni non sono necessarie (essi sono instabili e decadono rapidamente in fermioni della prima generazione), e non comprendiamo il motivo della presenza di tre generazioni nel modello standard anziché quattro o cinque. Tuttavia, almeno tre generazioni sono cruciali per permettere la violazione della simmetria congiunta di carica e di parità (simmetria CP) (vd. p. 33 in *Asimmetrie* n. 16, ndr), confermata con alta precisione da vari esperimenti.

Per i teorici che cercano una teoria più fondamentale del modello standard, quest'ultimo presenta un alto numero di parametri liberi. Nel dettaglio, per descrivere tutte le particelle e le loro interazioni sono necessari 19 parametri: nove



a.
Illustrazione artistica di un atomo.



b. Nel modello standard le particelle che costituiscono la materia sono i fermioni, che si dividono in due categorie: i leptoni e i quark. Entrambi, quark e leptoni, appaiono in tre generazioni (o famiglie): la prima è costituita da fermioni leggeri (elettrone e neutrino elettronico ν_e per i leptoni, e up u e down d per i quark). Le altre due famiglie sono copie più pesanti della prima: il quark charm c e lo strange s e il muone μ e il neutrino muonico ν_μ compongono la seconda generazione e il quark top t e il bottom (o beauty) b e il tau τ e il neutrino tauonico ν_τ la terza. Infine, il modello standard prevede il bosone di Higgs e i mediatori delle interazioni, ovvero il fotone γ dell'interazione elettromagnetica, i bosoni W^\pm e Z^0 dell'interazione debole e i gluoni g dell'interazione forte.

rappresentano le masse dei quark e dei leptoni carichi (nel modello standard, i neutrini sono considerati privi di massa, anche se oggi sappiamo che posseggono una massa molto piccola, il che richiederebbe di aggiungere ulteriori parametri al modello), tre descrivono i decadimenti dei quark di seconda o terza generazione nei quark della generazione più leggera, uno quantifica la violazione di CP nelle interazioni deboli, due descrivono il bosone di Higgs e il suo potenziale, tre indicano la “forza” delle tre interazioni fondamentali, e infine uno parametrizza la violazione di CP nelle interazioni forti. Per quanto ne sappiamo, quest’ultimo è compatibile con zero, anche se attualmente non ne comprendiamo il motivo.

Dal modello standard seguono regole precise, alle quali le particelle devono obbedire. Richard Feynman ha rappresentato queste regole in termini di diagrammi (i cosiddetti “diagrammi di Feynman”, vd. anche p. 11, ndr), che illustrano in modo intuitivo quali interazioni elementari sono permesse. A questi diagrammi corrispondono espressioni matematiche che ci consentono di calcolare con grande precisione come le particelle interagiscono, quali particelle possono essere prodotte e con quale probabilità.

Un esempio di successo del modello standard è il momento magnetico anomalo dell’elettrone, misurato con un’accuratezza di una parte su un miliardo, in accordo con le previsioni teoriche. Il laboratorio che testa in modo più sistematico il modello standard è attualmente il Large Hadron Collider (LHC) al CERN. Qui, protoni e antiprotoni vengono accelerati alle energie più elevate mai raggiunte in un laboratorio, permettendo la produzione e lo studio accurato di particelle pesanti come

il bosone di Higgs. Nonostante il numero elevato di misure effettuate, il modello standard si è dimostrato in grado di descrivere tutti i processi osservati a LHC, ad altri collisori e in altri esperimenti senza che siano state osservate deviazioni dalle sue previsioni.

Tuttavia, rimangono numerose domande senza risposta, sia dal punto di vista teorico che sperimentale. Non comprendiamo il motivo delle tre generazioni nel modello standard e le masse delle particelle rimangono parametri da determinare sperimentalmente. Anche se i neutrini nel modello standard sono privi di massa, sappiamo che non è così, ma l’origine della loro massa è ancora ignota. La massa del bosone di Higgs presenta un altro mistero: i calcoli diretti mostrano che la sua massa è molto sensibile alla presenza di scale di energia più alte associabili alla possibile presenza di nuova fisica, mentre invece la sua massa osservata è molto più bassa di queste scale, quindi ci deve essere un motivo per cui questo accade. La presenza di materia oscura (vd. p. 32, ndr), costituita da particelle non presenti nel modello standard, rappresenta uno dei grandi enigmi sperimentali e non è spiegabile con il solo contenuto di materia del modello standard. Inoltre, il modello standard non può spiegare la predominanza che osserviamo della materia sulla sua controparte, l’antimateria (vd. p. 29, ndr). In conclusione, con il modello standard, nonostante il suo successo, il nostro universo è ancora pieno di misteri, e molte domande fondamentali rimangono senza risposta. La ricerca continua nel tentativo di trovare una teoria più fondamentale e di ottenere una comprensione più profonda della struttura dell’universo.

Biografia

Giulia Zanderighi è stata professoressa di fisica presso l’Università di Oxford e ha coperto una posizione di *staff* al CERN di Ginevra. Dal 2019 ha assunto l’incarico di direttrice presso l’Istituto Max Planck per la Fisica di Monaco e dal 2021 è professoressa ordinaria all’Università Tecnica di Monaco. Il suo lavoro si concentra sulla fenomenologia delle interazioni elementari.

[as]

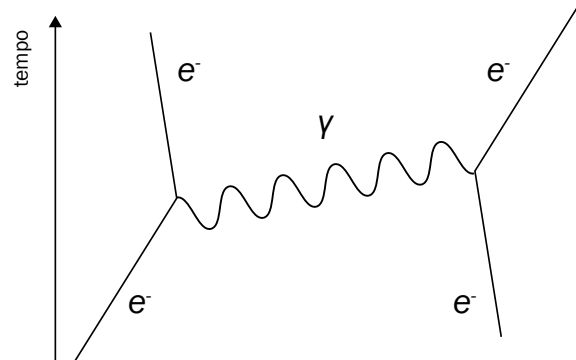
Lo scambio

Nel modello standard l'interazione tra le particelle avviene attraverso i cosiddetti "mediatori", che sono particelle elementari che hanno il compito di portare l'interazione. Solo le particelle che hanno le caratteristiche giuste possono essere collegate tra di loro: il fotone media tra particelle che hanno carica elettrica diversa da zero, mentre il gluone (mediatore dell'interazione forte) lo fa con le particelle dotate di un altro tipo di carica, chiamato "colore" (posseduto solo dai quark e dai gluoni stessi), e i bosoni W e Z lo fanno nell'ambito dell'interazione debole.

Il ruolo del mediatore può essere meglio compreso usando il seguente esempio: immaginiamo di avere due pattinatori. Sono lontani fra loro e l'unico modo che hanno per comunicare e per interagire è quello di scambiarsi un oggetto, ad esempio una scatola (vd. fig. a). Quando uno dei due pattinatori lancia o riceve la scatola, cambia il proprio stato di moto, cioè la sua quantità di moto. Più la scatola viene lanciata energicamente e maggiore sarà l'intensità di questo cambiamento. Questo esempio meccanico macroscopico prevede solo la repulsione, viceversa le particelle hanno interazioni più varie. Due elettroni, per esempio, interagiscono in questa maniera. Si scambiano un fotone e ciò comporta un cambiamento delle loro quantità di moto. Questo meccanismo può essere visualizzato in modo efficace con i diagrammi di Feynman. Le particelle sono indicate da linee, che rappresentano le quantità di moto, e l'interazione elettromagnetica viene vista come l'emissione di un fotone in un punto e il successivo assorbimento dello stesso in un altro punto. Come conseguenza di questa emissione/assorbimento le due particelle cambiano il loro stato di moto, che corrisponde al cambio di pendenza della linea che descrive la particella stessa. Questa rappresentazione dei diagrammi di Feynman nello spazio-tempo in realtà non è corretta: essi sono usati per rappresentare regole di calcolo complicate, che coinvolgono sia la quantità di moto che l'energia, ma è utile per capire il ruolo del mediatore.

Nei diagrammi ciascun vertice viene pesato con un coefficiente detto "costante di accoppiamento". Questi coefficienti sono caratteristici del tipo di interazione e regolano la probabilità che due particelle possano interagire. Più l'interazione è probabile, più grande è la costante di accoppiamento associata ad essa. Le interazioni che hanno costanti di accoppiamento grandi determinano fenomeni molto frequenti, mentre costanti piccole sono caratteristiche di fenomeni rari. Tra questi ultimi possiamo menzionare il caso delle interazioni deboli, in cui i mediatori sono costituiti dai bosoni W e Z e descrivono, per esempio, una parte dei processi di decadimento nucleare chiamati "decadimenti beta con emissione di elettroni e neutrini".

[Daniele del Re]



a.
Diagramma di Feynman di un'interazione elettromagnetica tra due elettroni e confronto qualitativo del ruolo del mediatore della forza (fotone, indicato con γ) con il caso di una scatola scambiata tra due pattinatori.

Scontri creativi

Produzione di particelle negli acceleratori

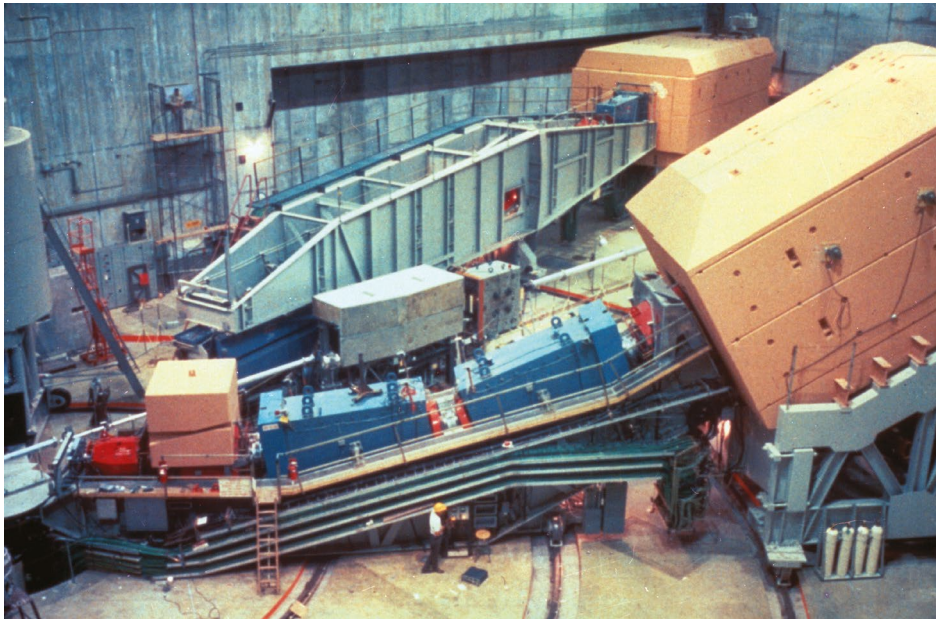
di Marina Cobal

La materia visibile che compone il nostro universo può essere costruita a partire da poche particelle elementari incluse nel modello standard, la più completa teoria che abbiamo sviluppato per descrivere il mondo subatomico. I “mattoni fondamentali” della materia sono dodici (con le corrispondenti dodici antiparticelle che formano l’antimateria), e compaiono in sei diversi tipi di quark (sapori, o *flavour* in inglese) e di leptoni, ordinati in tre doppietti (o generazioni). I doppietti leptonici contengono un leptone carico e il corrispondente

neutrino, mentre i doppietti di quark contengono due diversi quark. Quark e leptoni sono fermioni, cioè particelle con *spin* (il momento angolare intrinseco delle particelle) pari a $\frac{1}{2}$, e – a eccezione dei neutrini – hanno tutti carica elettrica, unitaria per i leptoni e frazionaria per i quark. I primi fermioni sono stati scoperti e studiati utilizzando sorgenti radioattive e raggi cosmici, fino a che si è capito che la strada più efficiente, controllabile e riproducibile, era quella di creare queste particelle in laboratorio con gli acceleratori di particelle.



a.
Il tunnel di LHC, al CERN di Ginevra, dove è stata confermata la validità del modello standard grazie alla scoperta del bosone di Higgs.



b.
Lo spettrometro utilizzato allo SLAC per l'esperimento di *scattering* che ha osservato nel 1968 la prima evidenza dei quark.

Gli acceleratori sono macchine in grado di fornire un'alta energia cinetica a particelle cariche utilizzando cavità a radiofrequenza. Queste particelle vengono poi fatte collidere con altre particelle (anche esse accelerate oppure appartenenti a un bersaglio fisso). Secondo la ben nota formula di Einstein $E = mc^2$, massa ed energia sono equivalenti, e quindi l'energia cinetica delle particelle può essere trasformata in nuove particelle massive. Più grande è l'energia cinetica delle particelle che collidono, maggiore potrà essere la massa di queste particelle prodotte. Gli acceleratori hanno permesso dapprima di produrre in laboratorio particelle "leggere" come i muoni (leptoni simili agli elettroni ma un po' più pesanti, appartenenti alla seconda generazione) e i pioni (adroni, cioè oggetti non elementari), che prima si potevano rivelare solo come prodotti delle interazioni dei raggi cosmici con l'atmosfera.

La costruzione di macchine acceleratrici di energia sempre più alta ha permesso poi il fiorire degli studi delle proprietà di particelle come protoni, neutroni, elettroni, neutrini, e le loro antiparticelle, fino a mettere in evidenza altre entità più nascoste: i quark, ipotizzati nel 1964 (inizialmente in numero di tre) come parte di uno schema di classificazione dei numerosi adroni scoperti in quegli

anni. Nel 1968, esperimenti di *scattering* anelastico profondo elettrone-protone presso lo Stanford Linear Accelerator Center (SLAC), in California, mostrarono che il protone era effettivamente composto da oggetti puntiformi, molto più piccoli, che sarebbero stati identificati in seguito come i quark up e down (il doppietto che costituisce la prima generazione dei quark). L'esistenza del quark strange fu validata indirettamente sempre dagli esperimenti di *scattering* allo SLAC: non solo era una componente necessaria del modello iniziale a tre quark, ma forniva anche una spiegazione per i cosiddetti "kaoni", adroni osservati in passato nei raggi cosmici.

Nel 1970, per spiegare il motivo per cui i decadimenti di adroni con trasformazione di un quark strange in un quark down non venivano osservati sperimentalmente, venne introdotto nel modello standard un quarto quark, il charm. Quattro anni dopo, mesoni formati da quark e antiquark charm furono scoperti quasi simultaneamente da due gruppi di ricerca - uno allo SLAC, e uno al Brookhaven National Laboratory, nello Stato di New York: queste particelle divennero note con il nome di J/ψ e convinsero definitivamente la comunità scientifica della validità del modello a quark. Nel 1973 il numero dei quark ipotizzati arrivò a sei, per spiegare



c.

Il laboratorio Fermilab che ospitava l'acceleratore Tevatron, dove nel 1995 è stato osservato il quark top e nel 1997 è stato rivelato il neutrino tau.

l'osservazione sperimentale della violazione della simmetria CP (la simmetria quasi esatta delle leggi di natura sotto l'effetto dello scambio simultaneo di particelle con le corrispondenti antiparticelle e dell'inversione delle coordinate spaziali). Nel 1977, un esperimento condotto al Fermilab, nei pressi di Chicago, fornì la prima prova dell'esistenza del quark bottom (chiamato anche quark beauty), attraverso la scoperta della particella che fu chiamata Upsilon (Υ), composta da un quark e un antiquark bottom, di peso pari a circa 10 volte la massa del protone.

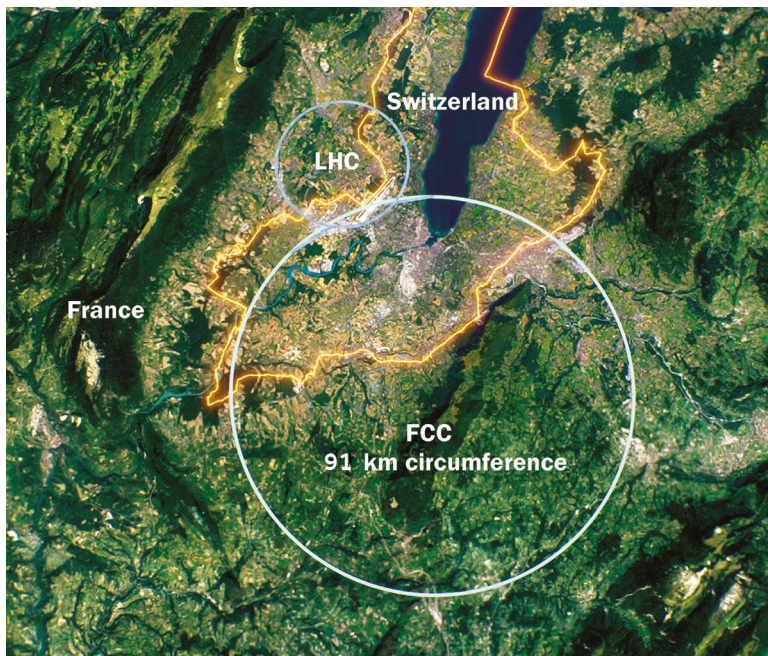
Come per tutti gli altri quark precedentemente osservati, anche il quark bottom avrebbe dovuto avere un partner della stessa generazione per completare il suo doppietto: il top. Fino al 1994 tuttavia non si riuscì a dimostrarne l'esistenza. Oggi sappiamo che l'ultimo quark ha una massa molto più grande di tutti gli altri quark e di quanto ci si attendeva all'inizio: circa 175 GeV, quasi come un atomo di oro. Solo l'acceleratore Tevatron del Fermilab fu in grado di fornire l'energia sufficiente per creare coppie top-antiquark top e rendere possibile la scoperta, che fu annunciata nel 1995, dalle collaborazioni CDF e DO. Da notare che il top si distingue da tutti gli altri quark: avendo un tempo di

decadimento molto piccolo, non riesce a formare adroni, ma si trasforma immediatamente in altre particelle.

Gli acceleratori hanno grandemente contribuito anche al settore leptonic del modello standard, con la scoperta del leptone tau e del suo partner, il neutrino tau. Il tau è una particella di materia appartenente alla terza generazione, che decade rapidamente in particelle stabili e fu scoperta in esperimenti condotti tra il 1974 e il 1977 allo SLAC.

La rivelazione del neutrino tau è invece avvenuta utilizzando l'acceleratore Tevatron del Fermilab: nel 1997 un intenso fascio di neutrini, che ci si aspettava contenesse neutrini tau, ha attraversato l'esperimento DONUT, dove circa un neutrino tau su un milione ha interagito con un nucleo di ferro e ha prodotto un leptone tau. I fisici hanno impiegato circa tre anni per identificare le tracce che rivelavano un leptone tau e il suo decadimento, la chiave per svelare l'esistenza del neutrino tau, e nel 2001 è stata così annunciata la scoperta dell'ultimo dei sei leptoni.

Tutti questi successi hanno permesso di completare e consolidare il settore di materia del modello standard. Tuttavia oggi sembra necessario ipotizzare l'esistenza di una "fisica oltre il modello standard". Uno dei motivi è il fatto che la materia



d.
Vista dall'alto dell'area intorno a Ginevra dove dovrebbe sorgere il tunnel di circonferenza pari a circa 91 km di FCC, a confronto con i 27 km del tunnel di LHC.

composta dalle particelle del modello standard sembra spiegare solo una piccola percentuale (circa il 5%) di ciò che compone il nostro universo. Questo è motivo di sconcerto e di eccitazione nella comunità scientifica che ha ipotizzato e sta cercando la cosiddetta “materia oscura”, una ipotetica componente di materia che, diversamente dalla materia conosciuta, non emetterebbe radiazione elettromagnetica e sarebbe attualmente rilevabile solo in modo indiretto attraverso i suoi effetti gravitazionali (vd. p. 32, ndr). Una opportunità di indagine alternativa e complementare alla ricerca della materia oscura già presente in natura è quella di produrla negli acceleratori. Il Large Hadron Collider (LHC) del CERN di Ginevra, con i suoi 27 km di circonferenza, è attualmente l'acceleratore più grande al mondo e fornisce una energia disponibile per le reazioni di circa 14 TeV. Si sta adesso lavorando al progetto High-Luminosity LHC (HL-LHC), previsto entrare in funzione nel 2029, che intende accrescere il potenziale di scoperta di LHC attraverso test di precisione del modello standard, incrementando la quantità di dati raccolti di oltre

un fattore dieci. Tuttavia, l'HL-LHC non fornirà una energia disponibile superiore a quella di LHC, per creare particelle ancora più pesanti di quelle sinora identificate. Quale sarà allora il passo successivo? Al momento c'è convergenza a livello europeo su un progetto molto ambizioso, il Future Circular Collider (FCC): un nuovo acceleratore circolare di circa 91 km di circonferenza nel quale potrebbero essere ospitati, in tempi successivi, un collisore elettrone-positrone (FCC-ee) e un collisore protone-protone (FCC-hh) a un'energia nel centro di massa di circa 100 TeV. Il FCC-hh sarà il più potente acceleratore di particelle mai costruito al mondo e aprirà una nuova finestra sulla possibile fisica oltre il modello standard permettendo eventualmente di produrre, se esistono, nuove e più pesanti particelle (fino a masse di decine di TeV) e magari di contribuire a svelare il segreto della natura della materia oscura. Il complesso di acceleratori previsto da FCC fornirà al CERN e all'Europa gli acceleratori più avanzati nel campo della fisica delle particelle e assicurerà un futuro di avanguardia nel mondo in questo settore per almeno 60-70 anni dopo LHC.

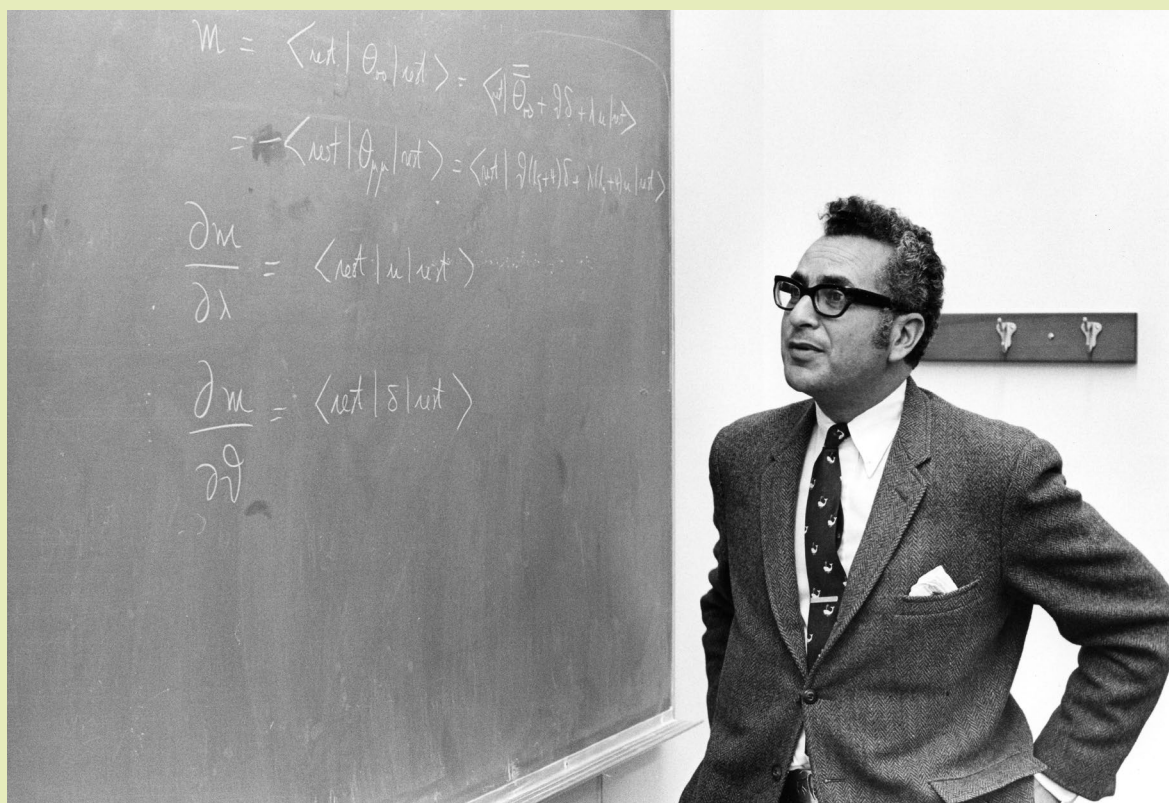
Biografia

Marina Cobal è professoressa all'Università di Udine, si occupa di fisica agli acceleratori e ha lavorato agli esperimenti CDF (Tevatron, USA) e ATLAS (LHC, Svizzera). Al CERN ha ricoperto incarichi di responsabilità internazionale ed è ora parte dello *steering group* per la realizzazione del futuro collisore FCC. A Udine ha fondato e dirige la SIER (Scuola di Introduzione alle Energie Rinnovabili).

More quarks for Muster Mark!

Breve viaggio nella materia esotica

di Marco Pappagallo

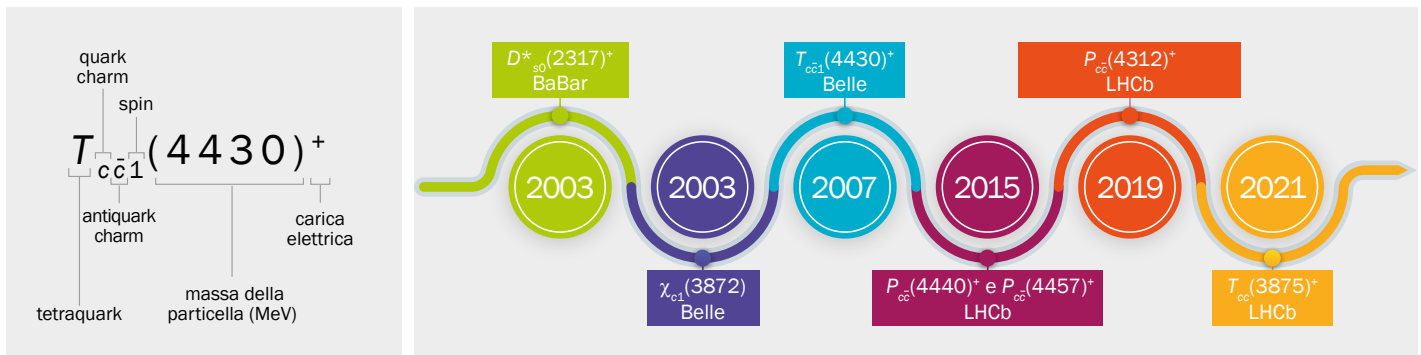


a.
Murray Gell-Mann ha vinto il premio Nobel per la fisica nel 1969 per gli studi sulle particelle elementari, in particolare sulla teoria dei quark

Nel modello standard delle particelle elementari (vd. p. 9, ndr), le particelle che possono interagire tramite l'interazione forte sono gli adroni, suddivisi in mesoni e barioni, a seconda che siano costituiti da una coppia quark-antiquark o da tre quark rispettivamente. Ma possono esistere stati con più quark?

L'ipotesi fu presa subito in considerazione, già da Murray Gell-Mann e George Zweig nel 1964, autori del modello a quark, che ipotizzarono l'esistenza di

stati come per esempio il "tetraquark" (due quark e due antiquark) o il "pentaquark" (quattro quark e un antiquark). La definizione di mesoni e barioni può quindi essere generalizzata: i mesoni sono stati aventi lo stesso numero di quark e antiquark, mentre i barioni stati in cui la differenza tra il numero di quark e antiquark è un multiplo di tre. Per decenni i fisici hanno invano cercato adroni fuori dalle "solite" configurazioni, a tal punto che la loro esistenza era



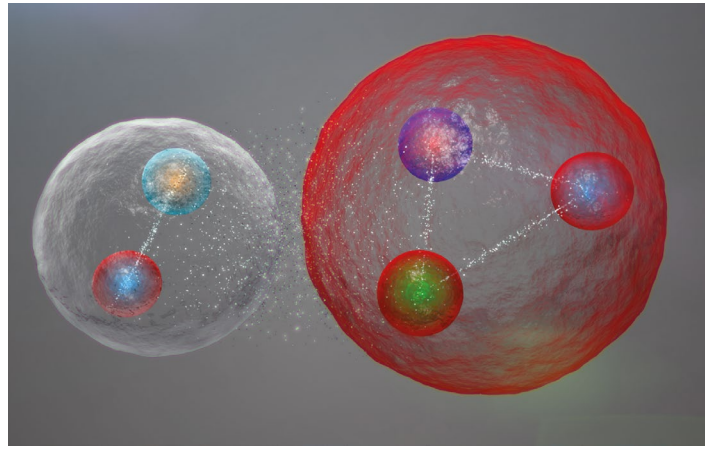
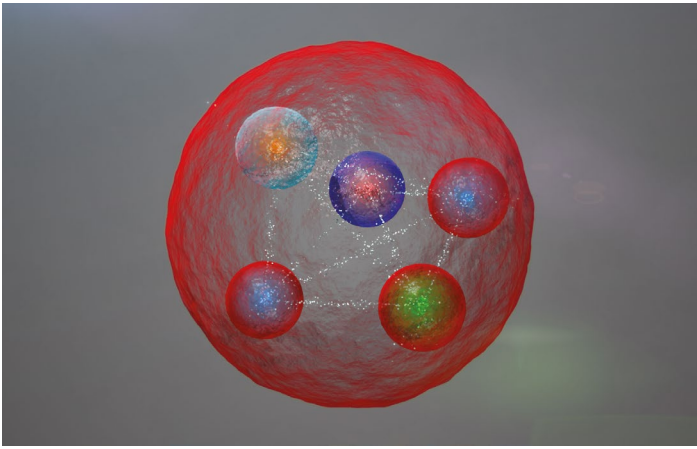
b.

A sinistra: il nome assegnato agli adroni esotici rispecchia le loro caratteristiche fondamentali. Consideriamo ad esempio l'adrone $T_{cc1}^-(4430)^+$: la "T" sta a indicare che si tratta di un tetraquark (per i pentaquark si usa la P), la "c" indica la presenza di un quark charm (\bar{c} per gli antiquark) e 1 è lo spin. Il numero tra parentesi indica la massa della particella in unità di megaelettronvolt (MeV). Infine, il segno "+" indica una carica elettrica positiva (come quella del protone). A destra, l'anno e l'esperimento in cui sono stati scoperti alcuni adroni esotici.

stata messa in discussione. Questo è il motivo per cui oggi ci si riferisce a questi stati come adroni "esotici", in contrapposizione agli adroni "convenzionali", osservati fino a quel momento. Nel 2003 l'inaspettata scoperta di due nuovi adroni ha riaperto il dibattito nella comunità scientifica: si tratta dei mesoni $D_{s0}^*(2317)^+$ (per una spiegazione della lettura dei nomi vd. fig. b) e $X(3872)$. L'uso del simbolo "X" per quest'ultimo mesone ha un'origine storica, in quanto riflette le caratteristiche inaspettate che questo adrone ha presentato sin dalla sua scoperta, rendendo misteriosa la sua natura. A seguito della misura di alcune sue proprietà, questo mesone è stato rinominato $\chi_{c1}(3872)$. Ma perché tanto clamore per questi adroni? Per capirlo facciamo un passo indietro: la maggior parte degli adroni sono instabili e decadono dando origine ad altri adroni. Siccome l'interazione forte conserva il sapore dei quark, lo studio dei prodotti del decadimento permette di comprendere quali quark sono contenuti nella particella che decade. Il decadimento del mesone $\chi_{c1}(3872)$ rivelava la presenza di un quark charm e un antiquark charm al suo interno. L'ipotesi più semplice era che fosse un mesone convenzionale. Tuttavia, la sua massa e il suo tempo di vita non erano compatibili con la possibilità di identificarlo con nessun mesone predetto dai modelli teorici. L'osservazione successiva di altri mesoni con caratteristiche simili faceva così ipotizzare che i modelli non fossero abbastanza accurati oppure che ci si trovava di fronte a una nuova famiglia di mesoni composti da quattro quark: i tetraquark! A complicare lo scenario vi è la possibilità che gli adroni siano in realtà una combinazione quantistica di diverse configurazioni di quark

e che quindi manifestino proprietà esotiche o convenzionali a seconda del processo studiato. Non è quindi sorprendente che dopo due decenni dalla scoperta del mesone $\chi_{c1}(3872)$ non si sia ancora giunti a un consenso unanime sulla sua natura. E questo non è l'unico mesone a rimanere misterioso: ci sono risultati sperimentali che suggeriscono che persino il protone possa non essere un barione puramente a tre quark e abbia un contributo di pentaquark.

Il suggello all'esistenza di adroni esotici è arrivato grazie alla scoperta di particelle che non possono essere spiegate in uno scenario convenzionale: fra le tante ricordiamo i tetraquark $T_{cc1}^-(4430)^+$, altrimenti noto come $Z_c^-(4430)^+$, e $T_{cc}^-(3875)^+$ e il pentaquark $P_{cc}^-(4312)^+$. Per esempio, dal decadimento del mesone $T_{cc}^-(3875)^+$ si deduce la presenza al suo interno di due quark charm. La definizione di mesone impone quindi che ci sia un uguale numero di antiquark (cioè due), portando il numero totale di quark costituenti a quattro. L'osservazione dei primi adroni esotici è stata accompagnata dal tentativo di comprendere come i quark fossero legati al loro interno. La comprensione dei meccanismi di legame permette di estendere la nostra conoscenza della cromodinamica quantistica, la teoria fisica che descrive l'interazione forte. Sono stati proposti diversi modelli per gli adroni esotici, probabilmente i più popolari sono l'adrone "molecolare" e l'adrone "compatto". Nel "modello molecolare", l'adrone è uno stato debolmente legato tra due mesoni convenzionali per i tetraquark, e un mesone e un barione per i pentaquark, tenuti insieme dall'interazione forte residua, un meccanismo del tutto analogo a



c.

A sinistra, rappresentazione artistica di un pentaquark secondo il modello compatto, che prevede che il pentaquark sia uno stato composto da cinque quark saldamente legati fra di loro. A destra è rappresentato un pentaquark secondo il modello molecolare, per il quale il pentaquark è uno stato formato da un mesone (formato da un quark e un antiquark) e un barione (formato da tre quark) debolmente legati.

quello che lega i protoni e neutroni all'interno dei nuclei atomici. Il "deuterone" è un esempio di molecola adronica composta da un protone e un neutrone. Caratteristica peculiare di questi sistemi è che la loro massa è leggermente inferiore alla somma delle masse degli adroni costituenti. Tale caratteristica è propria di vari adroni, come $\chi_{c1}(3872)$, $D_{s0}^*(2317)^+$, $P_{cc}^-(4312)^+$, $T_{cc}^+(3875)^+$, ma non è una caratteristica universale di tutti gli adroni esotici osservati. Uno scenario alternativo è proposto dal "modello compatto", che assume che i quattro (o cinque) quark costituenti siano saldamente legati fra di loro e confinati in spazio ridotto, in contrasto alle molecole adroniche che hanno una dimensione più estesa. Un'altra differenza fra i due modelli è che il modello compatto prevede uno spettro di adroni esotici molto più popolato rispetto al modello molecolare. Infatti, in quest'ultimo non tutte le combinazioni di adroni convenzionali possono dare origine a una molecola. Ad esempio, due adroni, entrambi con carica positiva, non potrebbero legarsi a formare una molecola in quanto la forza repulsiva coulombiana prevarrebbe sulla interazione forte e ne impedirebbe il legame. I quark potrebbero non essere gli unici mattoni fondamentali nella formazione degli adroni. Infatti la cromodinamica quantistica prevede che un gluone possa legarsi a una coppia

quark-antiquark o a tre quark per formare rispettivamente mesoni e barioni "ibridi". I gluoni possono anche legarsi fra di loro a formare stati, chiamati "glueball", che non hanno quark. L'identificazione di questi stati è difficile, in quanto la maggior parte di essi presentano caratteristiche simili a quelle degli adroni convenzionali. Pertanto alcuni di loro potrebbero essere già stati scoperti, ma classificati erroneamente come adroni convenzionali.

La ricerca di nuovi stati esotici e lo studio delle loro proprietà proseguiranno negli anni futuri per verificare se gli adroni esotici possano essere classificati in multipletti di sapore, analogamente agli adroni convenzionali. Inoltre, la conferma dell'esistenza di adroni ibridi potrebbe arrivare attraverso la scoperta di mesoni ibridi caratterizzati da combinazioni di numeri quantici non permessi per i mesoni convenzionali formati da una coppia quark-antiquark. Sebbene l'esistenza di adroni esotici sia stata accertata, siamo ancora lontani da comprendere a pieno come i quark interagiscono all'interno degli adroni. Pertanto la caccia a nuove particelle, come *glueball*, hexaquark, ecc., riserverà ancora inaspettate e affascinanti scoperte!

Biografia

Marco Pappagallo è professore associato presso il Dipartimento Interateneo di Fisica dell'Università di Bari. Lavora nell'ambito della spettroscopia adronica alla ricerca di nuovi stati convenzionali ed esotici. Ha partecipato all'esperimento BaBar al laboratorio SLAC (USA) ed è attualmente membro della collaborazione LHCb al CERN, di cui è stato *deputy physics coordinator* dal 2020 al 2022.

Sic transit materia mundi

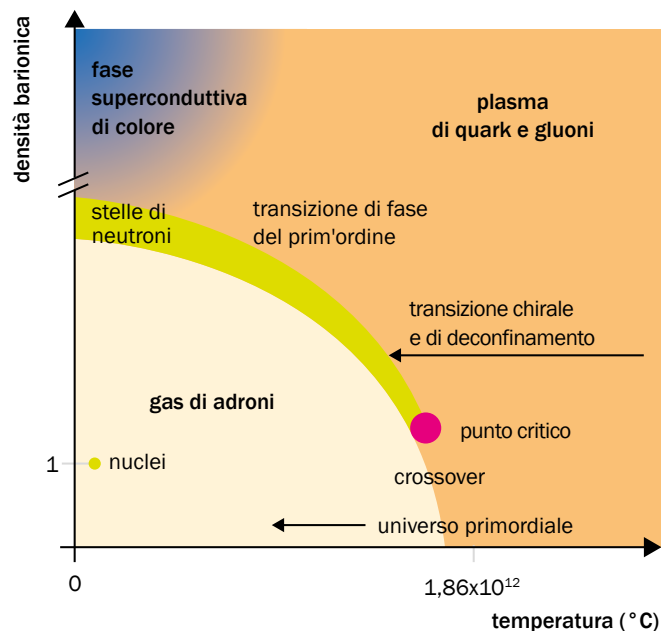
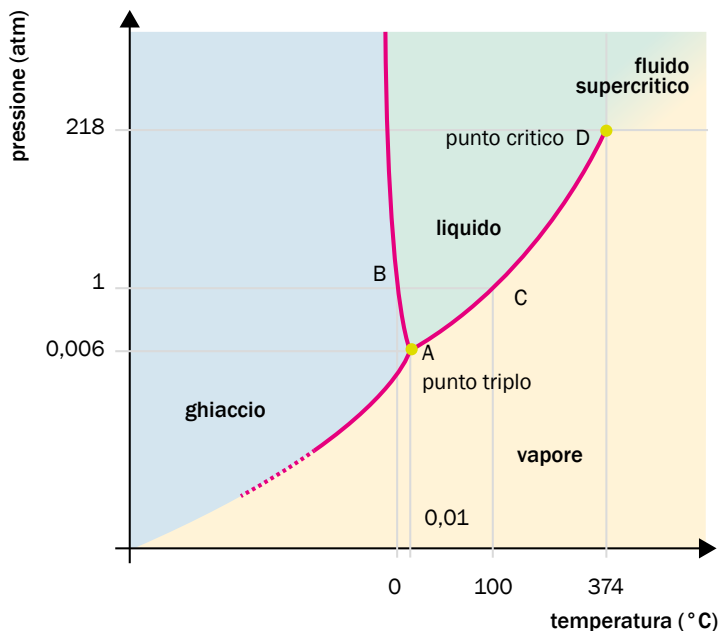
Le fasi della materia adronica

di Alessandro Drago



Conosciamo fin dall'antichità il comportamento dell'acqua al variare della temperatura: sappiamo che, se siamo al livello del mare (ovvero alla pressione atmosferica di riferimento), l'acqua è solida sotto 0 gradi Celsius, è un vapore al di sopra dei 100 gradi (la temperatura di ebollizione) e un liquido alle temperature intermedie. Abbiamo anche imparato che la temperatura di ebollizione diminuisce al diminuire della pressione: in cima a una montagna l'acqua bolle a meno di 100

gradi! Sappiamo anche che la transizione fra liquido e vapore alla pressione atmosferica avviene in modo discontinuo: quando riscaldiamo l'acqua nella pentola, la temperatura resta fissata a 100 gradi finché tutta l'acqua non è evaporata. Il calore che stiamo fornendo viene usato per dissociare le molecole d'acqua e non per innalzare la temperatura del liquido. Questa energia, necessaria per trasformare l'acqua liquida in vapore, si chiama "calore latente" e la sua esistenza caratterizza quelle che si



b.

A sinistra, diagramma di fase dell'acqua nel piano temperatura (in gradi Celsius) e pressione (in atmosfere). Alla pressione di una atmosfera, l'acqua è nella sua forma liquida fra 0 gradi (punto B) e 100 gradi (punto C). Alla temperatura di 374 gradi e alla pressione di 218 atmosfere (punto critico D) la transizione fra liquido e vapore avviene in modo continuo, senza calore latente. Nel punto A le tre fasi (solido, liquido e vapore) co-esistono. Le linee rosse denotano le transizioni di fase del prim'ordine. A destra, diagramma di fase della materia fortemente interagente (materia adronica) nel piano temperatura (in gradi Celsius) e densità barionica (in unità della densità nucleare, pari a circa $2,7 \times 10^{14}$ g/cm³).

chiamano “transizioni di fase del primo ordine”.

In fig. 1 è mostrato un esempio schematico di diagramma di fase dell'acqua. Il diagramma mostra per quali valori di temperatura e di pressione esiste una delle tre fasi. È indicato un punto critico (il punto D, vd. fig. b a sinistra): a temperature superiori a circa 374 gradi non c'è più una transizione del primo ordine fra la fase liquida e la fase gassosa, ma le due fasi si trasformano in modo continuo, senza calore latente.

Il diagramma di fase racchiude molte informazioni cruciali riguardo al comportamento di una sostanza in funzione di due variabili termodinamiche, ad esempio temperatura e pressione. La scelta di questa coppia di variabili termodinamiche non è univoca: si sarebbero potute scegliere al loro posto, ad esempio, la densità e la temperatura. La struttura del diagramma di fase dell'acqua discende dal tipo di interazione fra le molecole. Nel caso dall'acqua la forza che si esercita fra le varie molecole è ben descritta dall'interazione di Van der Waals, a sua volta interpretabile in termini di interazioni elettromagnetiche fra atomi e quindi fra elettroni. Essa è attrattiva a distanze dell'ordine di mezzo nanometro (un miliardesimo di metro) e diventa fortemente repulsiva a distanze inferiori.

In tempi recenti si è studiato il comportamento di un tipo di materia molto più estremo: la materia nucleare, ovvero quella che costituisce i nuclei atomici. Se nel caso dell'acqua le distanze coinvolte sono dell'ordine del nanometro, nel caso della materia nucleare sono dell'ordine del femtometro, un milione di volte più piccole. E se le temperature rilevanti nel caso dell'acqua sono dell'ordine delle centinaia di gradi, nel caso della materia nucleare sono un miliardo di volte più grandi.

Come sappiamo, i nuclei atomici sono composti da neutroni e protoni, ma questi, a loro volta, sono costituiti da quark che interagiscono scambiandosi gluoni, in modo simile a come gli elettroni di una molecola interagiscono scambiandosi fotoni. Possiamo immaginare i neutroni e i protoni (e più in generale tutti i barioni) come delle piccole sacche all'interno di ciascuna delle quali ci sono tre quark. Una delle domande che la fisica si è posta negli ultimi decenni riguarda la possibilità di formare uno stato della materia in cui i quark, invece che essere racchiusi nelle sacche a formare i barioni, si possono muovere liberamente in uno spazio molto più grande. Questo processo viene chiamato “deconfinamento”.

Si può allora tracciare un diagramma di fase per il comportamento della materia nucleare (vd. fig. b a destra). Esso mostra il comportamento della materia nucleare in funzione della temperatura e della densità. La regione di basse densità e temperature è costituita dalla materia ordinaria, cioè da quark che sono raggruppati a tre a tre a formare barioni, oppure in coppie quark-antiquark a formare mesoni. È il tipo di materia che conosciamo da sempre, costituita da barioni con masse grandi, che costituiscono oltre il 99,9 % della massa della materia ordinaria. Queste grandi masse sono legate a un meccanismo in cui una simmetria, detta “chirale”, è rotta. Se invece quella simmetria è preservata (come capita alle alte temperature), le masse dei quark sono circa cento volte più piccole di quelle dei neutroni e protoni (a basse temperature). La regione di alte temperature e bassissime densità è ben studiata: tanto i calcoli teorici, quanto gli esperimenti di collisioni di nuclei ad altissime energie indicano che non c'è una vera transizione di fase fra la

regione popolata da barioni e mesoni e quella in cui i quark deconfinati convivono con i gluoni. Si tratta di una transizione graduale detta “crossover”, analoga a quella che si ha alle altissime temperature nel caso dell’acqua.

Questa transizione è avvenuta una volta nell’universo primordiale, quando aveva l’età di circa 10 microsecondi ed è passato dalla fase di plasma di quark e gluoni a quella di adroni. Molti ritengono però che al crescere della densità si raggiunga un punto critico, oltre il quale la transizione diventa del primo ordine. Al momento non ci sono però dati sperimentali che lo confermino. Da notare che alle alte temperature non solo i quark sono deconfinati, ma la simmetria chirale non è più rotta e quindi le masse dei quark sono molto più piccole. La ricerca riguardo al processo di adronizzazione è ancora in pieno sviluppo: ad esempio, recentemente è stato mostrato che, se la frazione di elettroni, muoni e tauoni, all’epoca dell’adronizzazione nell’universo primordiale, fosse più grande di quanto finora ipotizzato, la densità dei quark crescerebbe anch’essa e potrebbe essere più grande di quella critica, ottenendo quindi una transizione del primo ordine.

La regione di altissime densità e temperature non troppo elevate è stata molto studiata teoricamente e si pensa che quella materia sia in uno stato “superconduttore”, ovvero che i quark deconfinati formino delle coppie correlate, come succede nel caso degli elettroni nei materiali detti, appunto, “superconduttori”. Questa materia ha una bassissima viscosità e può essere anche molto legata. È importante notare che questo stato della materia non sarebbe costituito solo da quark up e down (quelli presenti nei neutroni e protoni), ma anche da quark strange. Questi ultimi sono presenti, ad esempio, negli “iperoni” (simili per certi versi a neutroni e protoni, ma con appunto almeno un quark strange). Alle altissime densità, i quark up, down e strange sarebbero quindi deconfinati e formerebbero delle coppie correlate. In particolare, è possibile che questo stato della materia sia realizzato almeno al centro delle stelle di neutroni, dove vengono raggiunte le più alte densità nell’universo (vd. p. 22, ndr).

Per chiudere, vale la pena menzionare una possibilità teorica suggerita oltre quaranta anni fa da Arnold R. Bodmer ed Edward Witten: che lo stato fondamentale della materia, quello più legato, sia proprio costituito da una miscela di quark up, down e strange. Il motivo per cui la materia ordinaria, costituita da neutroni e protoni, non decadrebbe in quello stato ancora più legato è che i quark strange possono essere prodotti solo tramite le interazioni deboli, che, alle normali densità dei nuclei atomici, richiederebbero tempi lunghissimi per generare un numero sufficientemente grande di quark strange. Le implicazioni dell’ipotesi di Bodmer e Witten sono innumerevoli: dall’esistenza di stelle fatte integralmente di quark deconfinati alla possibilità che la materia oscura sia costituita, appunto, da grumi di quark up, down e strange. La validazione o la negazione di questa ipotesi richiede ancora molto lavoro, e passa anche attraverso lo studio dei processi di adronizzazione che avvengono dopo la formazione del plasma di quark e gluoni negli esperimenti come ALICE al CERN, in cui l’INFN gioca un ruolo cruciale.



c. Edward Witten negli anni in cui propose l’ipotesi che la materia oscura sia costituita da agglomerati macroscopici di quark up, down e strange. Witten è uno dei massimi fisici teorici viventi, ha ricevuto molti premi non solo per la fisica ma anche per la matematica, fra cui una medaglia Fields, l’equivalente per la matematica del premio Nobel.

Biografia

Alessandro Drago è professore ordinario di fisica teorica presso l’Università di Ferrara. È stato il coordinatore nazionale della iniziativa specifica dell’INFN che si occupa di stelle di neutroni e della materia che le costituisce. Negli ultimi dieci anni ha studiato in molti articoli varie implicazioni dell’ipotesi di Bodmer-Witten e la possibile co-esistenza di stelle di neutroni e di stelle fatte integralmente da quark deconfinati.

Stelle di neutroni

Laboratori cosmici per la materia estrema

di Ignazio Bombaci



a.
Jocelyn Bell scoprì le pulsar nel 1967, quando era studentessa di dottorato in astronomia.

Le stelle di neutroni sono gli oggetti macroscopici più densi dell'universo. Esse rappresentano il limite estremo oltre il quale la forza di gravità prende il sopravvento sulle altre forze della natura e conduce alla formazione di un buco nero. In una stella di neutroni, una massa pari a circa 1,5 volte la massa del Sole è compressa dalla gravità entro una sfera dal raggio di 10 km circa. La densità media di queste stelle è pertanto di circa 700 milioni di tonnellate al centimetro cubo (ovvero 7×10^{14} g/cm³). Neanche al centro dei nuclei atomici pesanti, caratterizzati da una densità pari a $2,7 \times 10^{14}$ g/cm³ (che indicheremo con ρ_0), si ha un valore così grande.

L'esistenza di un nuovo tipo di stelle formate da "neutroni estremamente impacchettati" fu formulata 90 anni fa, cioè nel 1934, dagli astrofisici Walter Baade e Fritz Zwicky, i quali ipotizzarono anche che le stelle di neutroni fossero generate nei processi di esplosione di supernovae (un termine da loro stessi coniato nel medesimo articolo del 1934). Il neutrone era stato

scoperto da James Chadwick appena due anni prima e nel 1932 Werner Heisenberg, Dmitri Iwanenko ed Ettore Majorana avevano indipendentemente proposto che il nucleo dell'atomo fosse composto da protoni e neutroni, ipotizzando anche l'esistenza di una nuova forza (la forza forte), che li tenesse legati.

La scoperta delle stelle di neutroni si può associare a quella, nel novembre del 1967 da parte di Jocelyn Bell, delle pulsar, che furono prontamente interpretate da Franco Pacini e Thomas Gold come stelle di neutroni rapidamente rotanti, dotate di un intenso campo magnetico.

Ad oggi sono state scoperte circa 3600 pulsar che emettono radiazione pulsata in varie bande dello spettro elettromagnetico (radio, X, γ). Si ritiene che nella nostra galassia ci siano circa un miliardo di stelle di neutroni.

Ma di che cosa sono fatte le stelle di neutroni? Oggi sappiamo che, a dispetto del loro nome, le stelle di neutroni non sono però costituite soltanto da neutroni, ma possiedono una



b. Una straordinaria immagine della celeberrima nebulosa del Granchio (*Crab nebula*), ottenuta combinando i dati osservativi raccolti a varie lunghezze d'onda dello spettro elettromagnetico dai seguenti telescopi spaziali della NASA: Chandra (raggi X), Hubble (visibile) e Spitzer (infrarosso). La nebulosa del Granchio è il residuo di una esplosione di supernova che è stata osservata, come una "stella ospite" nel cielo, dagli astronomi cinesi della dinastia Song nel 1054. Si trova a una distanza di circa 6500 anni luce dalla Terra nella direzione della costellazione del Toro. Al centro della nebulosa si trova l'altrettanto celebre pulsar del Granchio (*Crab pulsar*) che emette radiazione elettromagnetica pulsata con un periodo di 33 millesimi di secondo. La stella di neutroni associata alla pulsar del Granchio ruota quindi attorno al proprio asse con lo stesso periodo di 33 ms, cioè compie circa 1800 giri al minuto, come la centrifuga di una moderna lavatrice!

struttura interna a gusci assai complessa, e in parte non completamente compresa.

La regione più esterna della stella, la cosiddetta "crosta esterna", è formata da un reticolo cristallino di nuclei atomici (che partendo dal ferro diventano sempre più pesanti addentrando nella stella), immerso in un gas "degenere" (vd. p. 12 in *Asimmetrie* n.9, ndr) di elettroni in equilibrio (chiamato "β-equilibrio") con i nuclei del reticolo rispetto all'interazione debole (l'interazione responsabile del decadimento β dei nuclei atomici ipotizzata da Enrico Fermi nel 1933).

I nuclei presenti nella zona più profonda della crosta esterna sono nuclei "esotici", ovvero molto ricchi di neutroni rispetto ai nuclei pesanti stabili che conosciamo e che costituiscono la cosiddetta "valle di stabilità nucleare".

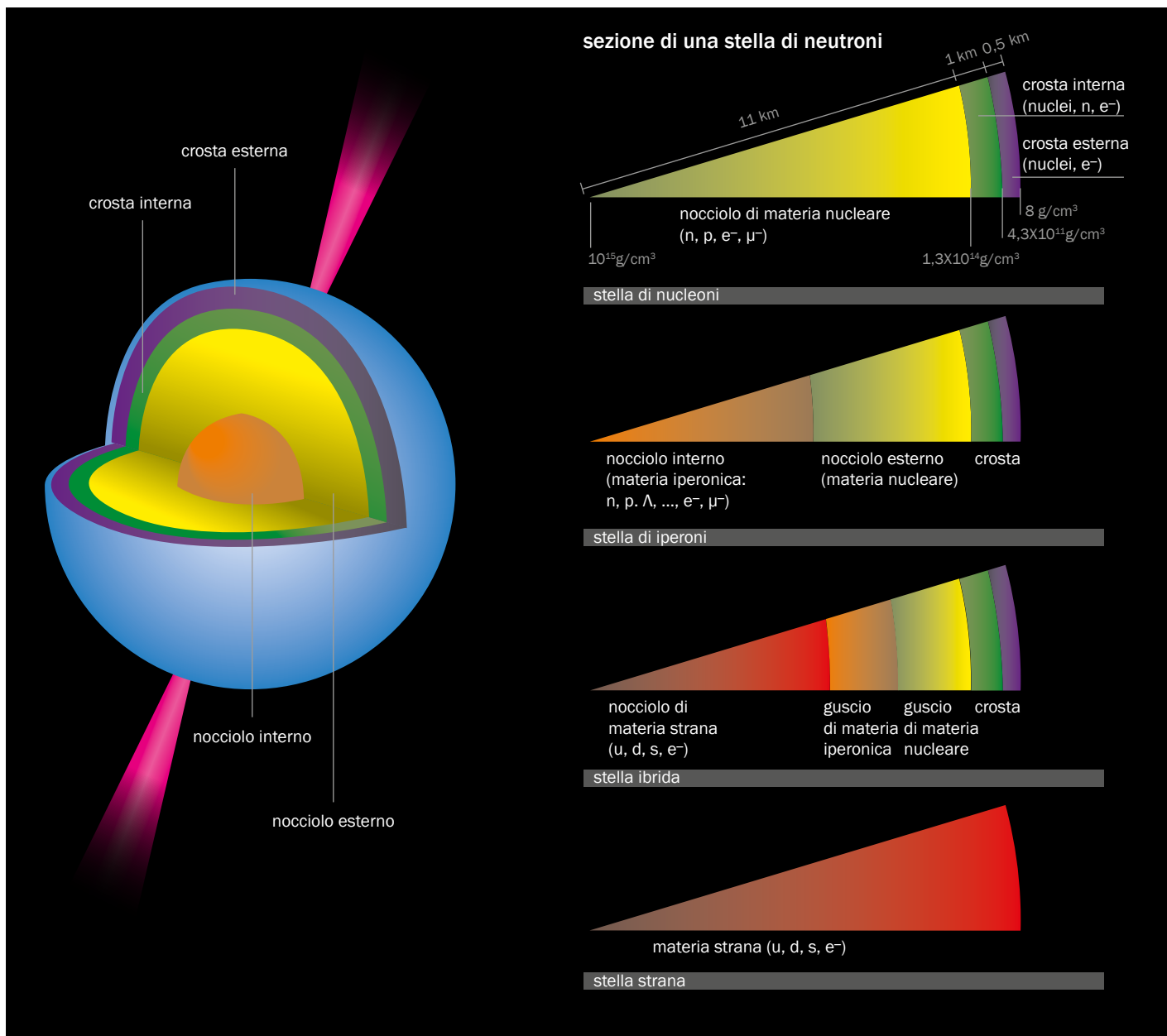
Andando più in profondità nella crosta, i nuclei del reticolo diventano così ricchi di neutroni che alcuni di essi non possono più rimanere legati ai nuclei e "sgocciolano" fuori. Da questo punto, il cosiddetto "*neutron drip point*" (che corrisponde a una densità di circa 400 mila tonnellate in un cm³), comincia la crosta interna della stella di neutroni, formata da un gas degenere di neutroni che assieme al gas di elettroni permea un reticolo di "nuclei" superpesanti ed estremamente ricchi di neutroni. Una cospicua parte dei neutroni liberi della crosta interna forma uno stato superfluido, la cui presenza gioca un ruolo centrale nei modelli delle "*glitches*", cioè il fenomeno di improvvisi salti del valore della frequenza di rotazione osservati in numerose pulsar.

Quando si raggiunge una densità di circa la metà di ρ_0 , i nuclei del reticolo si dissolvono in un fluido uniforme elettricamente neutro costituito principalmente da neutroni, e da protoni, elettroni e muoni in β-equilibrio. A questa profondità inizia il "nocciolo" (in inglese *core*) della stella di neutroni. Aumentando ulteriormente la densità e quindi andando verso la regione più profonda del nocciolo stellare (il cosiddetto *inner core*),

oltre ai costituenti appena citati, sono previste varie particelle subatomiche, quali gli iperoni e varie fasi della materia, come ad esempio una fase in cui i quark sono deconfinati (vd. p. 19, ndr). Le stelle di neutroni rappresentano quindi dei laboratori naturali senza eguali per investigare i costituenti della materia e le loro interazioni in condizioni fisiche così estreme da non poter essere realizzate in nessun laboratorio terrestre. Questi corpi celesti consentono anche di esplorare il diagramma di fase della cromodinamica quantistica (QCD), in una regione che è attualmente inaccessibile ai calcoli numerici di QCD su un reticolo spazio-temporale discreto (vd. p. 25 in *Asimmetrie* n. 11, ndr). Gli iperoni come i nucleoni (cioè, protoni e neutroni) sono barioni ma hanno una massa maggiore di quella dei nucleoni e inoltre possiedono un ulteriore numero quantico, chiamato "stranezza", che è zero per i nucleoni. La stranezza degli iperoni è dovuta alla loro struttura a quark.

Infatti, gli iperoni sono stati legati di tre quark che contengono almeno un quark strange (come ad esempio la particella lambda), mentre i nucleoni sono formati solo da quark up e down.

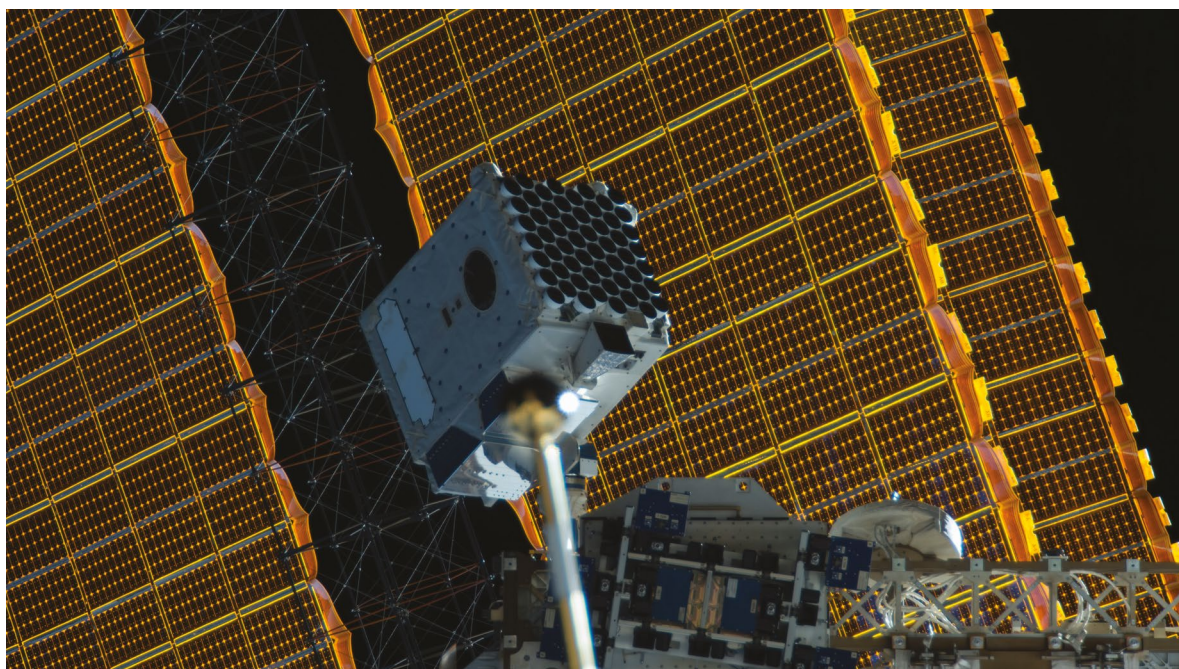
Gli iperoni possono essere creati negli acceleratori di particelle mediante collisioni tra nucleoni e mesoni o tra nucleoni. Essi sono però delle particelle effimere e decadono nuovamente in nucleoni e mesoni in un tempo di circa un decimo di miliardesimo di secondo. Gli iperoni possono legarsi a protoni e neutroni formando dei nuclei esotici instabili chiamati "ipernuclei" il cui studio dà preziose informazioni sulla forza che si ha tra iperoni e nucleoni. Dentro il nocciolo di una stella di neutroni, come conseguenza dell'enorme densità e della natura fermionica di neutroni e protoni (che obbediscono al principio di Pauli), gli iperoni possono essere formati spontaneamente e restare stabili sostituendosi, in parte, ai neutroni e ai protoni, generando quindi una nuova forma di materia chiamata "materia iperonica" e una variante di stelle di neutroni dette "stelle di iperoni".



c. A sinistra, rappresentazione in 3D di una stella di iperoni. A destra, struttura interna per i possibili tipi di stelle di neutroni descritti in questo articolo. I valori numerici riportati nella parte superiore della figura (stella di nucleoni) si riferiscono a una stella avente una massa di 1,5 volte la massa del Sole, usando nel calcolo della struttura stellare una moderna equazione di stato della materia nucleare.

La possibilità che la regione interna del nocciolo di una stella di neutroni potesse contenere una nuova forma di materia in cui i quark fossero deconfinati (cioè, non più rinchiusi nei rispettivi barioni e mesoni) fu proposta da vari fisici negli anni immediatamente successivi all'introduzione, nel 1964, del modello a quark degli adroni da parte di Gell-Mann e Zweig. Poiché la massa dei quark charm, bottom e top è molto maggiore di quella dei quark up, down e strange, si ha che, alle densità raggiungibili al centro di una stella di neutroni, solo questi ultimi tre sapori di quark leggeri possono essere presenti nel nocciolo stellare. Quindi la fase deconfinata della materia

adronica presente nel nocciolo di una stella di neutroni è una miscela di quark up, down e strange, con un appropriato numero di elettroni per garantire la neutralità di carica e il β -equilibrio. Questa forma di materia densa è chiamata "materia strana" (in inglese, *strange quark matter*) e le stelle di neutroni che possiedono un *inner core* di materia strana sono chiamate stelle di neutroni "ibride" o più brevemente "stelle ibride". Ancora più intrigante dell'esistenza di un *inner core* di materia strana in una stella di neutroni è la possibile esistenza di una nuova famiglia di stelle compatte chiamate "stelle strane", che sono interamente costituite da materia strana.



d.
Il Neutron Star Interior Composition Explorer (NICER) è un telescopio per raggi X della NASA che si trova a bordo della Stazione Spaziale Internazionale (ISS), progettato e dedicato allo studio delle stelle di neutroni. Lanciato il 3 giugno del 2017, NICER ha recentemente permesso di misurare il raggio di alcune stelle di neutroni con una accuratezza mai raggiunta finora.

La possibile esistenza delle stelle strane è una conseguenza dell'ipotesi di stabilità assoluta della materia strana formulata indipendentemente da Arnold Bodmer ed Edward Witten (vd. p. 19, ndr).

Le proprietà globali delle stelle di neutroni (massa, raggio, massa massima possibile, deformabilità mareale, ecc.) dipendono in modo cruciale dalla cosiddetta "equazione di stato", cioè dalla relazione termodinamica tra pressione, densità e temperatura della materia stellare. L'equazione di stato della materia in condizioni estreme di densità e temperatura è anche un ingrediente fondamentale nelle simulazioni numeriche di supernovae e di fusione di stelle di neutroni in sistemi binari. Negli ultimi decenni sono stati compiuti degli sforzi enormi per misurare diverse proprietà delle stelle di neutroni utilizzando i dati raccolti da varie generazioni di satelliti a raggi X e raggi γ e da radiotelescopi sulla Terra. Dati osservativi sempre più accurati pongono dei vincoli sempre più stringenti ai modelli dell'equazione di stato e quindi ci danno delle informazioni indirette sulle proprietà della materia estrema e su come potrebbe essere fatta una stella di neutroni. Ad esempio, la scoperta di alcune stelle di neutroni con massa di poco superiore alle due masse solari ha escluso tutti i modelli

dell'equazione di stato che non possono supportare stelle di massa così elevata. La missione NICER (Neutron Star Interior Cosmic Explorer) della NASA ha consentito di compiere misure accurate del raggio di alcune stelle di neutroni, ponendo ulteriori vincoli all'equazione di stato.

La scoperta rivoluzionaria del 17 agosto 2017 (da parte della collaborazione LIGO-Virgo) del primo segnale di onde gravitazionali (GW170817) generato dalla fusione di due stelle di neutroni ha permesso di testare in una maniera completamente nuova l'equazione di stato della materia in condizioni estreme. Nelle ultime fasi di spiraleggiamento delle due stelle il segnale gravitazionale contiene informazioni sull'effetto reciproco delle forze di marea tra le due stelle. Queste informazioni sono contenute nella cosiddetta "deformabilità mareale" (in inglese *tidal deformability*), che è fortemente correlata all'equazione di stato. Il segnale gravitazionale emesso nella fase successiva alla fusione (che potrebbe essere rilevato dagli osservatori di onde gravitazionali della terza generazione come l'Einstein Telescope) potrebbe invece dare delle risposte sulla formazione di materia strana oppure sull'esistenza delle stelle strane. L'astronomia delle onde gravitazionali ha quindi aperto una nuova finestra per esplorare la materia in condizioni fisiche estreme.

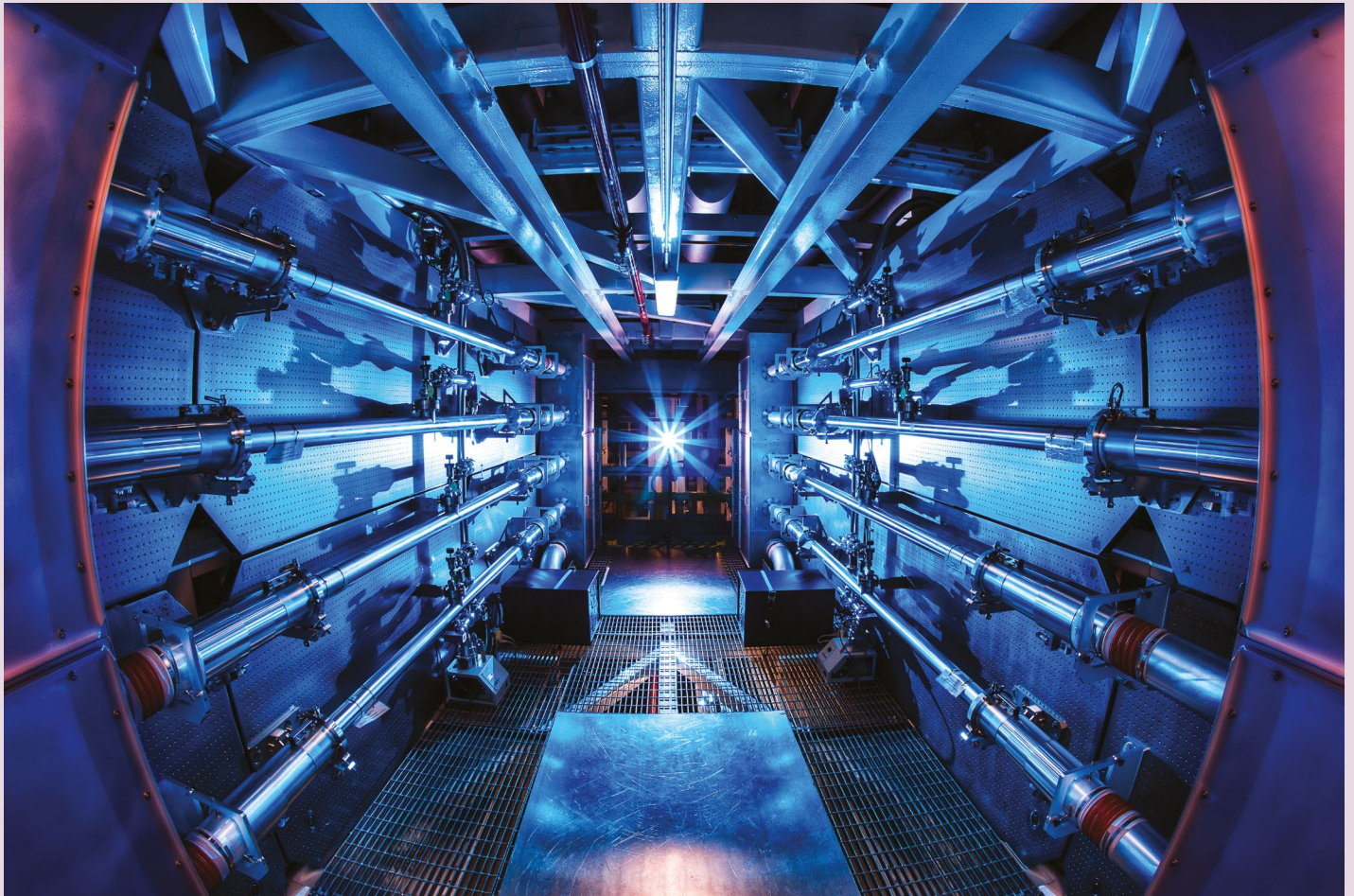
Biografia

Ignazio Bombaci è professore di fisica all'Università di Pisa e ricercatore associato all'INFN. La sua attività di ricerca riguarda lo studio della materia fortemente interagente in condizioni estreme di densità e temperatura, lo studio della struttura e dell'evoluzione delle stelle di neutroni e dei fenomeni astrofisici ad esse associati. Dal 2006 è membro dell'International Astronomical Union.

Le stelle in una stanza

Nuclei ed energia nucleare

di Stefano Atzeni



a.

Il laser della National Ignition Facility (NIF) del Lawrence Livermore National Laboratory, dove nel 2021 è stata realizzata per la prima volta l'ignizione termonucleare di un plasma di deuterio e trizio.

Si può creare energia dalla materia? La materia ha massa, e massa ed energia, due grandezze apparentemente diverse, sono equivalenti, come scoperto da Einstein nel 1905: la massa si può trasformare in energia e l'energia in massa. Per esempio, la trasformazione di una massa di un solo grammo libera la stessa energia della combustione di ben 2.200 tonnellate di petrolio, sufficienti per riscaldare per un anno 1.500 appartamenti di medie dimensioni in Italia.

Nel 1920, appena note le prime misure delle masse nucleari, l'astrofisico Arthur Eddington ipotizzò che la sorgente di energia

del Sole, che è costituito principalmente dagli elementi idrogeno ed elio, fosse dovuta a reazioni in cui, partendo da quattro nuclei di idrogeno, si arriva a formare un nucleo di elio, che ha una massa leggermente inferiore a quella dei quattro nuclei reagenti. Reazioni di fusione nucleare, in cui nuclei leggeri si combinano in uno più pesante, furono in effetti scoperte nei primi anni '30 dai ricercatori diretti da Lord Rutherford nel Cavendish Laboratory di Cambridge (vd. p. 4, ndr). Dalla fine dello stesso decennio è riconosciuto che la fonte dell'energia solare è proprio una sequenza di reazioni di fusione. Nello stesso

periodo furono scoperte anche le reazioni di fissione nucleare (vd. approfondimento a p. 28). Sia la fusione, sia la fissione di nuclei comportano un rilascio di energia, a parità di massa coinvolta, milioni di volte maggiore di quello delle ordinarie reazioni chimiche. Sorprendentemente però, proprio Rutherford, padre indiscusso della fisica nucleare, aveva affermato che “chiunque si aspetti una fonte di energia dalla trasformazione di questi atomi parla a vanvera”. Invece, soprattutto dopo le prime applicazioni militari e civili della fissione, molti scienziati, a partire dalla fine degli anni '40, si posero l'obiettivo di sfruttare reazioni di fusione per produrre energia in modo controllato sulla Terra, utilizzando materie prime ampiamente disponibili, praticamente inesauribili e con un impatto ambientale minimo. Ebbero allora inizio ricerche per “imbrigliare l'energia del Sole”, un'espressione, questa, che è persino riduttiva. Infatti, il Sole deve la sua immensa potenza alle sue enormi dimensioni e alla conseguente grande forza di gravità, che consentono di “bruciare” il poco reattivo idrogeno in una condizione di equilibrio che si mantiene da alcuni miliardi di anni. Sulla Terra si deve invece ricorrere a una miscela di isotopi pesanti dell'idrogeno, deuterio e trizio, che reagendo formano un nucleo di elio e rilasciano un neutrone: portare questa miscela a una temperatura di 50-100 milioni di gradi (ben più dei 15 milioni di gradi del centro del Sole) e “confinarla”, cioè mantenerla in condizioni di reagire, per un tempo sufficientemente lungo. Senza entrare in aspetti troppo tecnici, è necessario soddisfare la cosiddetta “condizione di Lawson”, che richiede che il prodotto fra la densità dei nuclei reagenti e il “tempo di confinamento” ecceda un certo valore minimo. Ovviamente, date le temperature in gioco, non è possibile utilizzare un ordinario recipiente. Gli scienziati hanno quindi concepito e sperimentato due principali schemi di confinamento, magnetico e inerziale, ciascuno con molte varianti. Nella fusione “a confinamento magnetico” si sfrutta la circostanza che alle temperature in questione la materia è allo stato di “plasma”, una miscela di nuclei atomici ed elettroni, che proprio per l'alta temperatura sono “strappati” dagli atomi. Essendo nuclei ed elettroni dotati di carica elettrica, è possibile limitarne il moto impiegando campi magnetici opportunamente configurati. Gli apparati sperimentali più diffusi e promettenti, detti “tokamak”, hanno forma di ciambella (propriamente, “toroidale”); attorno alla camera contenente il plasma sono avvolti potenti elettromagneti, che generano un campo circa 100.000 volte più intenso del campo magnetico terrestre. Inoltre, una potente scarica elettrica in un apposito circuito induce una corrente nel plasma, scaldandolo, e generando un ulteriore campo magnetico che si somma a quello generato dai magneti, dando luogo alle forze magnetiche che mantengono il plasma in equilibrio. Il plasma viene poi ulteriormente scaldato tramite l'iniezione di onde elettromagnetiche (microonde) e di fasci di particelle energetiche. In queste macchine la pressione del plasma, proporzionale al prodotto della densità delle particelle per la temperatura, è controbilanciata dalla pressione magnetica, e ciò in pratica pone un limite piuttosto basso alla densità di particelle, pari a circa un centomillesimo della densità di molecole dell'aria. Per soddisfare la condizione di Lawson è necessario che le inevitabili perdite di energia (per emissione di raggi X e per conduzione termica) avvengano su una scala

temporale dell'ordine di almeno un secondo.

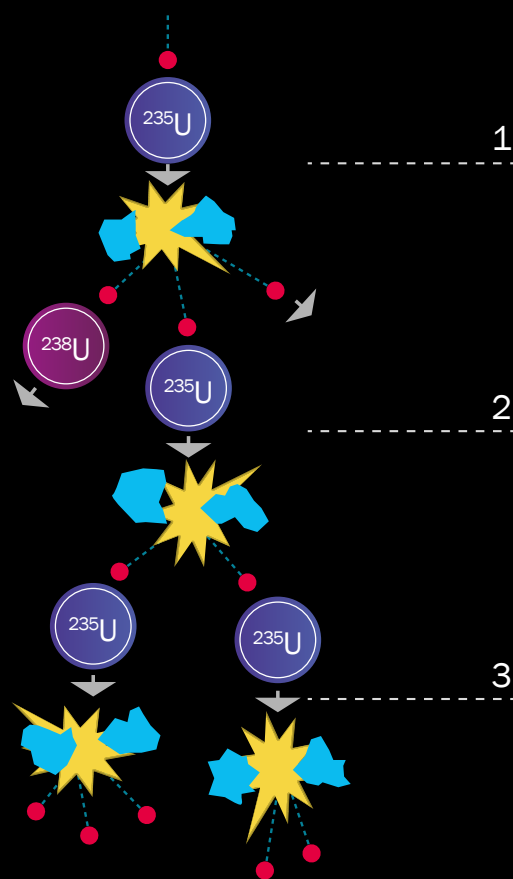
Il tokamak più avanzato in operazione, il JET, Joint European Torus, ha ottenuto prestazioni molto vicine alla condizione di Lawson, che potrà essere superata da macchine di maggiori dimensioni. Un consorzio, cui partecipano tutte le nazioni industriali avanzate e le potenze emergenti, ha quindi avviato nel 2007 la costruzione del reattore sperimentale ITER, a Cadarache (Francia), per dimostrare la fattibilità scientifica della fusione e per sperimentare molte delle tecnologie necessarie per un successivo reattore commerciale (per es. magneti superconduttori, circuiti di scambio termico, schermature, ecc.). Per la complessità e i costi della macchina sono previsti tempi lunghi: ITER entrerà in funzione tra alcuni anni, mentre gli esperimenti cruciali, con l'impiego del combustibile deuterio-trizio, sono programmati per il 2038. Sono comunque già in corso studi relativi a DEMO, il successivo prototipo di reattore commerciale.

Nella fusione “a confinamento inerziale” si segue un approccio complementare: si comprime il combustibile, portandolo a densità di centinaia di grammi per centimetro cubo e pressioni di centinaia di miliardi di atmosfere (superiori a densità e pressione al centro del Sole), sia pure per intervalli di tempo estremamente brevi, inferiori al miliardesimo di secondo (un nanosecondo). A tal fine, fasci laser impulsati, con una potenza di centinaia di migliaia di miliardi di watt e una durata di pochi nanosecondi, irradiano un “bersaglio” sferico, con un raggio dell'ordine del millimetro. Gli strati esterni del bersaglio assorbono la luce laser, evaporano, passano allo stato di plasma e si espandono rapidamente. Per reazione, il resto del bersaglio implode ad alta velocità, acquistando quindi energia cinetica. Al termine dell'implosione questa energia si converte in energia interna, il combustibile viene fortemente compresso e, in una piccola porzione centrale, riscaldato a temperature superiori ai 50 milioni di gradi. Si innescano così le reazioni di fusione. Parte dell'energia rilasciata, associata ai nuclei di elio prodotti dalla fusione, causa un ulteriore riscaldamento, dando luogo a un'onda di combustione che si propaga a tutto il combustibile. Dopo circa 50 anni di ricerche, questo processo di “ignizione” è stato realizzato (e la condizione di Lawson è stata superata) nel 2021 al laser NIF del Lawrence Livermore National Laboratory, in California (vd. fig. a). In successivi esperimenti, di cui anche la stampa non specialistica ha dato notizia con particolare enfasi, l'energia di fusione prodotta ha superato quella conferita al bersaglio dal laser. Si tratta di grandi successi scientifici. Ma per passare da questi alla realizzazione di un reattore si devono migliorare la resa energetica del bersaglio e l'efficienza del laser e, soprattutto si deve poter ripetere varie volte al secondo, quindi centinaia di migliaia di volte al giorno, il processo che per ora è stato realizzato solo una singola volta in un piccolo numero di esperimenti.

La strada verso la produzione praticamente illimitata e sostenibile di energia è quindi ancora lunga e irta di ostacoli. Tutti gli aspetti critici fisici e tecnologici vengono comunque attivamente studiati. È da notare, in conclusione, che i recenti progressi su entrambi gli schemi di confinamento hanno motivato la nascita di numerose *start-up* private che hanno raccolto complessivamente finanziamenti di alcuni miliardi di euro, con l'obiettivo di un percorso “accelerato” per la commercializzazione dell'energia da fusione.

Reazione a catena

La fissione nucleare è una reazione con rilascio di energia, che consiste nella scissione del nucleo di un atomo pesante in due nuclei più leggeri, cui si accompagnano rilascio di neutroni (mediamente fra due e tre per reazione) e di radiazione gamma e beta. Nella sua forma rilevante per le applicazioni, essa è indotta dall'assorbimento di un neutrone. Si può realizzare allora una reazione a catena che si autosostiene se almeno uno dei neutroni rilasciati dalla reazione induce a sua volta una successiva reazione, come nello schema in figura. Reazioni a catena controllate avvengono nel nocciolo (*core*) dei reattori nucleari a fissione, in cui l'energia rilasciata viene conferita a un fluido refrigerante, che aziona un gruppo turbina-alternatore, il quale a sua volta trasforma l'energia termica in energia elettrica. Esistono molti tipi di reattori, che differiscono, fra l'altro, per composizione e disposizione del combustibile, liquido refrigerante e "moderatore". Quest'ultimo è il mezzo impiegato per rallentare i neutroni "veloci" prodotti dalla fissione (con velocità dell'ordine di un decimo della velocità della luce), che possono indurre fissione solo con una bassa probabilità, mentre i neutroni "lenti" o "termici" sono molto più efficaci nell'indurre la fissione, soprattutto nell'isotopo ^{235}U dell'uranio. Peraltro, quest'ultimo costituisce solo lo 0,7% dell'uranio naturale; per incrementarne la reattività si "arricchisce" l'uranio naturale, cioè se ne aumenta – con procedimenti piuttosto complessi – la concentrazione di uranio-235. I modelli di reattore oggi più diffusi impiegano uranio arricchito e neutroni termici e sono moderati e raffreddati ad acqua. Esistono comunque, o sono allo studio, reattori a neutroni veloci, reattori a uranio naturale, reattori a torio e con moderatori diversi dall'acqua. Sono oggi in attività circa 440 grandi reattori a fissione, che producono circa il 10% dell'energia elettrica mondiale (20% in Europa e negli USA). Dopo uno sviluppo rapido negli anni '60 e '70 e una successiva stasi, è ora ripresa, soprattutto in Asia, la costruzione di reattori. In Europa l'energia nucleare è stata di recente introdotta nella "tassonomia delle fonti sostenibili". Senza entrare nei dettagli, possiamo dire che la fissione costituisce, al momento, l'unica fonte di energia non fossile e non intermittente, quindi idonea a coprire il cosiddetto "carico elettrico di base". L'accettazione sociale ne è invece ostacolata, soprattutto in alcuni paesi, dal percepito rischio di incidenti e dalla necessità di smaltire rifiuti radioattivi. L'economicità dell'energia prodotta, infine, dipende da un gran numero di variabili non solo tecniche, ma anche finanziarie e sociopolitiche.



1. Un esempio di reazione a catena: un primo nucleo, colpito da un neutrone, "fissiona" (cioè si spezza in altri nuclei più leggeri) rilasciando tre neutroni (1); uno di questi fuoriesce, un altro è catturato dall'uranio-238, il terzo induce un'altra fissione (2); in questo caso la reazione rilascia due neutroni, che inducono ciascuno un'ulteriore reazione (3); e così via.

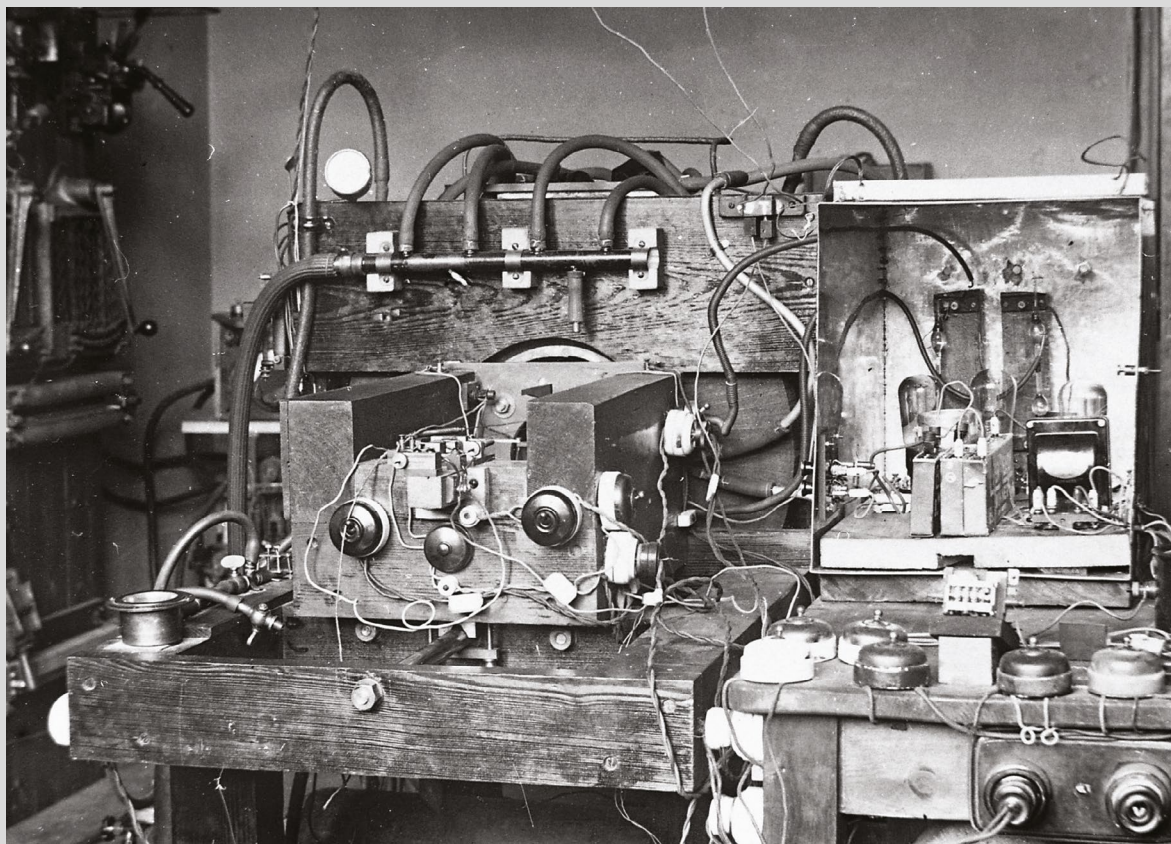
Biografia

Stefano Atzeni è stato professore ordinario di fisica sperimentale all'Università "La Sapienza" di Roma ed è attualmente consulente-senior *scientist* di Focused Energy GmbH. Ha dedicato la propria attività scientifica alla ricerca sulla fisica dei plasmi, la fusione a confinamento inerziale e la fisica computazionale. È co-autore, con J. Meyer-ter-Vehn, del libro "The Physics of Inertial Fusion" (Oxford, 2004).

Uguali e contrari

Antiparticelle e antimateria

di Simone Stracka

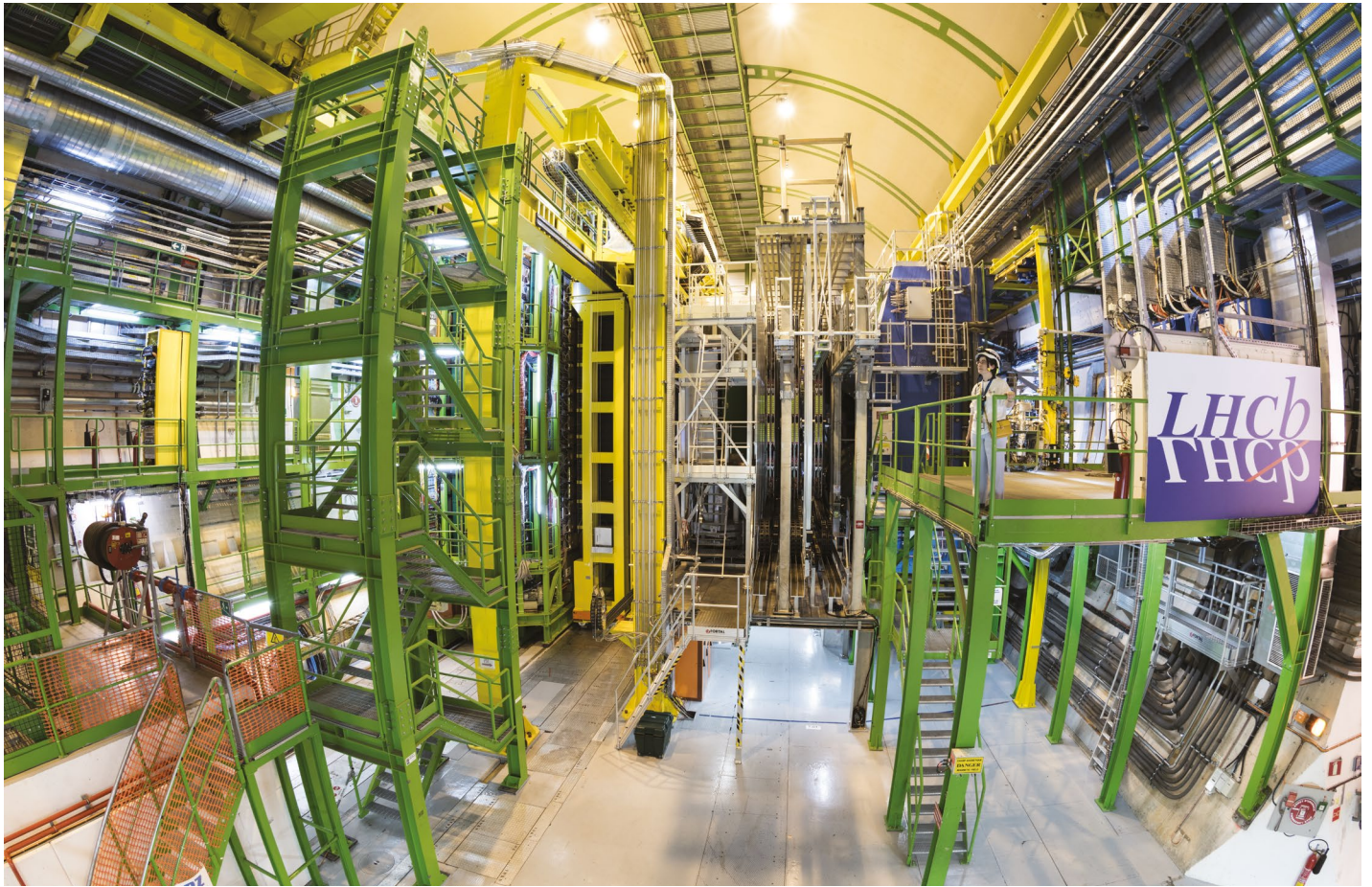


a.
La camera a nebbia usata da Blackett e Occhialini per studiare i raggi cosmici.

Quando studiamo la materia a volte ci imbattiamo in qualcosa che ne rappresenta l'antitesi: l'antimateria. La troviamo intorno a noi in piccole quantità, prodotta dai decadimenti radioattivi di elementi quali il potassio, presenti nei tessuti animali e vegetali o nelle rocce. La osserviamo nei fenomeni atmosferici e cosmici, come quelli in cui Patrick Blackett e Giuseppe Occhialini fotografarono, per la prima volta nel 1932, la creazione di coppie di particella e antiparticella a partire da radiazione elettromagnetica. Calcoli recenti hanno inoltre stimato che una frazione rilevante della massa del protone è dovuta proprio a particelle di antimateria, che come un mare che ribolle si creano e si distruggono incessantemente con i loro corrispettivi di materia, in un tempo così piccolo da rendere

impossibile rivelarle (e che per questo motivo sono dette "particelle virtuali").

L'antimateria era stata immaginata già sul finire dell'800, senza solide basi scientifiche. Queste furono poste nel 1928 dal fisico inglese Paul Dirac quando scrisse l'equazione che doveva rappresentare le particelle dotate di *spin* $1/2$, una quantità introdotta per spiegare alcune peculiarità dei livelli energetici occupati dagli elettroni negli atomi. Risolvendo questa equazione si ottenevano quattro soluzioni, invece delle due strettamente necessarie a spiegare le misure sperimentali esistenti. Nel 1932, accogliendo le osservazioni di Hermann Weyl e Robert Oppenheimer, Dirac affermò che le due soluzioni in più dovessero indicare l'esistenza di particelle di antimateria, aventi cariche opposte a



quelle di materia e con le altre caratteristiche, come la massa, identiche (questo è quello che intendiamo con “immagine allo specchio” della materia). Pochi mesi dopo Carl David Anderson scoprì il positrone (l’antielettrone), la prima di molte antiparticelle a essere osservata. A ogni particella di materia, infatti, corrisponde la propria antiparticella: all’elettrone il positrone, al protone l’antiprotone, al neutrone l’antineutrone, e così via (in alcuni casi, come per il fotone, particella e antiparticella coincidono). Nel nostro universo dominato dalla materia, però, un’antiparticella è destinata in breve tempo a incontrare la corrispondente particella con cui si annichila – un processo nel quale materia e antimateria, combinandosi, si trasformano in forme diverse di radiazione che dipendono dall’energia e dalla natura delle particelle coinvolte. Nel caso di elettroni e positroni a bassa energia è molto probabile che il risultato sia l’emissione di due raggi gamma, sfruttata in tecniche di diagnostica medica come la tomografia a emissione di positroni (PET). Quando ad annichilirsi sono particelle più pesanti e complesse, invece, ne possono risultare più spesso altri tipi di particelle. È quindi senz’altro una fortuna, e allo stesso tempo un mistero, che nella nostra

galassia l’antimateria sia presente solo in piccole quantità, altrimenti svaniremmo in men che non si dica in un lampo di fotoni e altre particelle. Pensiamo che agli albori della storia dell’universo non fosse però così, e che materia e antimateria fossero presenti in quantità simili. Queste si sarebbero annichilate dando origine al fondo di radiazione elettromagnetica che permea lo spazio. Solo meno di un miliardesimo delle particelle inizialmente presenti sarebbero sopravvissute fino ad oggi, e quasi tutte di materia, lasciando un cosmo apparentemente privo di regioni composte da antimateria. Con il tempo abbiamo caratterizzato a fondo le proprietà dell’antimateria. Un approccio molto fruttuoso è stato produrre con gli acceleratori particelle e antiparticelle in gran numero per confrontarle: lo studio dei cosiddetti mesoni K, B e D ci ha permesso di scoprire che materia e antimateria non sono immagini esattamente speculari, ma mostrano piccole differenze di comportamento nelle reazioni che coinvolgono le interazioni nucleari deboli (vd. p. 21 in Asimmetrie n. 7, ndr). Queste differenze sono tuttavia troppo piccole per conciliare l’asimmetria tra le quantità osservate di materia e antimateria con le attuali teorie sull’evoluzione

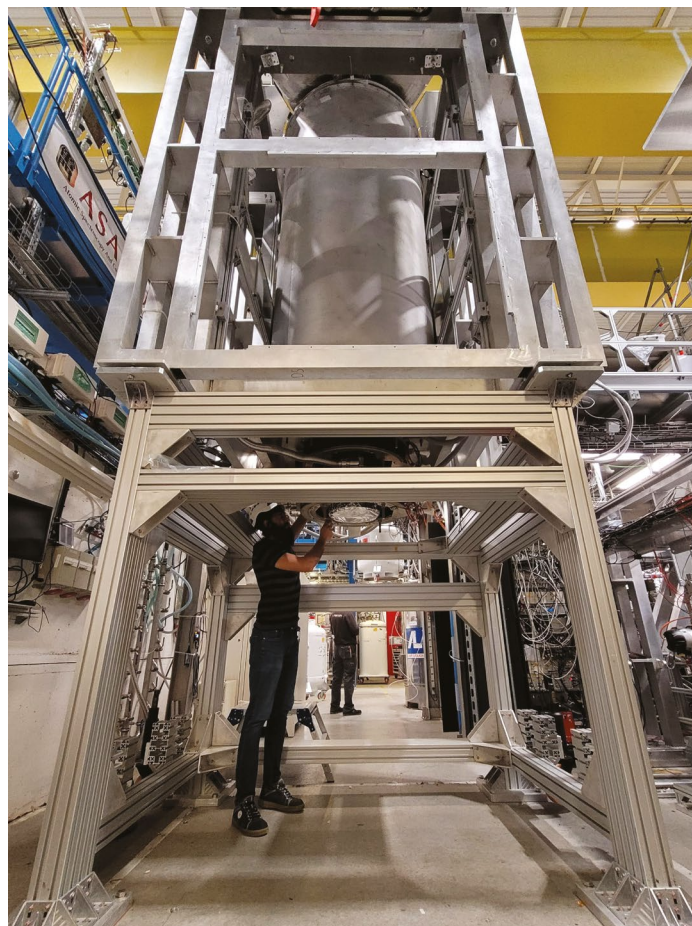
b.
L’esperimento LHCb al Large Hadron Collider studia le asimmetrie di comportamento tra materia e antimateria nei decadimenti dei mesoni B e D.

dell'universo (vd. p. 20 in *Asimmetrie* n. 11, ndr). Oggi quindi speriamo che uno studio sperimentale ancora più minuzioso di questo problema irrisolto possa portare alla scoperta di qualcosa che le teorie esistenti non prevedono.

I mesoni al centro di queste misure sono una sorta di ibrido, costituito da un quark (materia) e un antiquark (antimateria) tenuti insieme dalla forza nucleare forte. Non sono però questi gli unici sistemi composti da materia e antimateria che siamo in grado di produrre. Un caso particolarmente interessante è l'elio antiprotonico, formato mescolando elio gassoso o liquido con gli antiprotoni lenti forniti dall'Antiproton Decelerator (AD) del CERN. Di tanto in tanto uno dei due elettroni dell'elio viene sostituito da un antiprotone che inizia a orbitare intorno al suo nucleo al posto dell'elettrone, generando un atomo esotico che può sopravvivere diversi microsecondi prima di disintegrarsi.

Diversi esperimenti, tra cui ALPHA (Antihydrogen Laser Physics Apparatus), ASACUSA (Atomic Spectroscopy And Collisions Using Slow Antiprotons) e AEGIS (Antimatter Experiment: Gravity, Interferometry, Spectroscopy) all'AD, sono anche riusciti a sintetizzare atomi di antimateria. Com'è naturale si è scelto di replicare l'atomo più semplice, creando l'anti-idrogeno a partire da positroni e antiprotoni. Come per lo studio dei mesoni K, B e D, l'obiettivo è confrontare il comportamento di particelle e antiparticelle, ma questa volta in processi dominati da forze elettromagnetiche e dalla gravità. Finora non abbiamo osservato discrepanze, ma l'osservazione di una anche minima asimmetria avrebbe profonde conseguenze sulla nostra comprensione delle leggi che governano la natura. Per questo tipo di studi sono sufficienti poche manciate di antiatomi. D'altro canto in circa vent'anni abbiamo prodotto molto meno di un miliardesimo di grammo di anti-idrogeno, e ne siamo riusciti a conservare – al più per qualche ora – una quantità ancora più modesta (vd. anche p. 21 in *Asimmetrie* n. 26, ndr).

Poiché nel vuoto antiprotoni, positroni e anti-idrogeno sono stabili (proprio come i protoni, gli elettroni e l'idrogeno), il limite al loro immagazzinamento sta tutto nell'estrema difficoltà di tenerli separati dalla materia (vd. p. 28 in *Asimmetrie* n. 7, ndr). Servono una camera in cui realizzare un vuoto molto spinto, e campi elettromagnetici attentamente studiati per evitare che le antiparticelle urtino le pareti del contenitore. Esperimenti come BASE (The Baryon Antibaryon Symmetry Experiment) hanno perfezionato le tecniche di confinamento a tal punto da riuscire a confinare decine di antiprotoni per più di un anno. BASE e un altro esperimento all'AD, PUMA (antiProton Unstable Matter Annihilation), stanno ora sviluppando metodi per il trasporto di piccole quantità di antimateria su lunghe distanze fino a laboratori che non ne producono. Si tratta però di manipolazioni molto delicate: a renderle così impegnative è la stessa asimmetria materia-antimateria che garantisce la nostra esistenza.



c. La sezione verticale dell'esperimento ALPHA, che ha misurato l'accelerazione gravitazionale degli atomi di anti-idrogeno trovandola compatibile con quella dell'idrogeno.

Biografia

Simone Stracka è un ricercatore della sezione INFN di Pisa. Ha collaborato agli esperimenti sui mesoni con quark beauty BaBar e LHCb, allo SLAC e al CERN, e attualmente studia le proprietà dell'anti-idrogeno con ALPHA, all'Antiproton Decelerator.

AAA materia cercasi

Un mistero oscuro nell'universo

di Massimo Pietroni

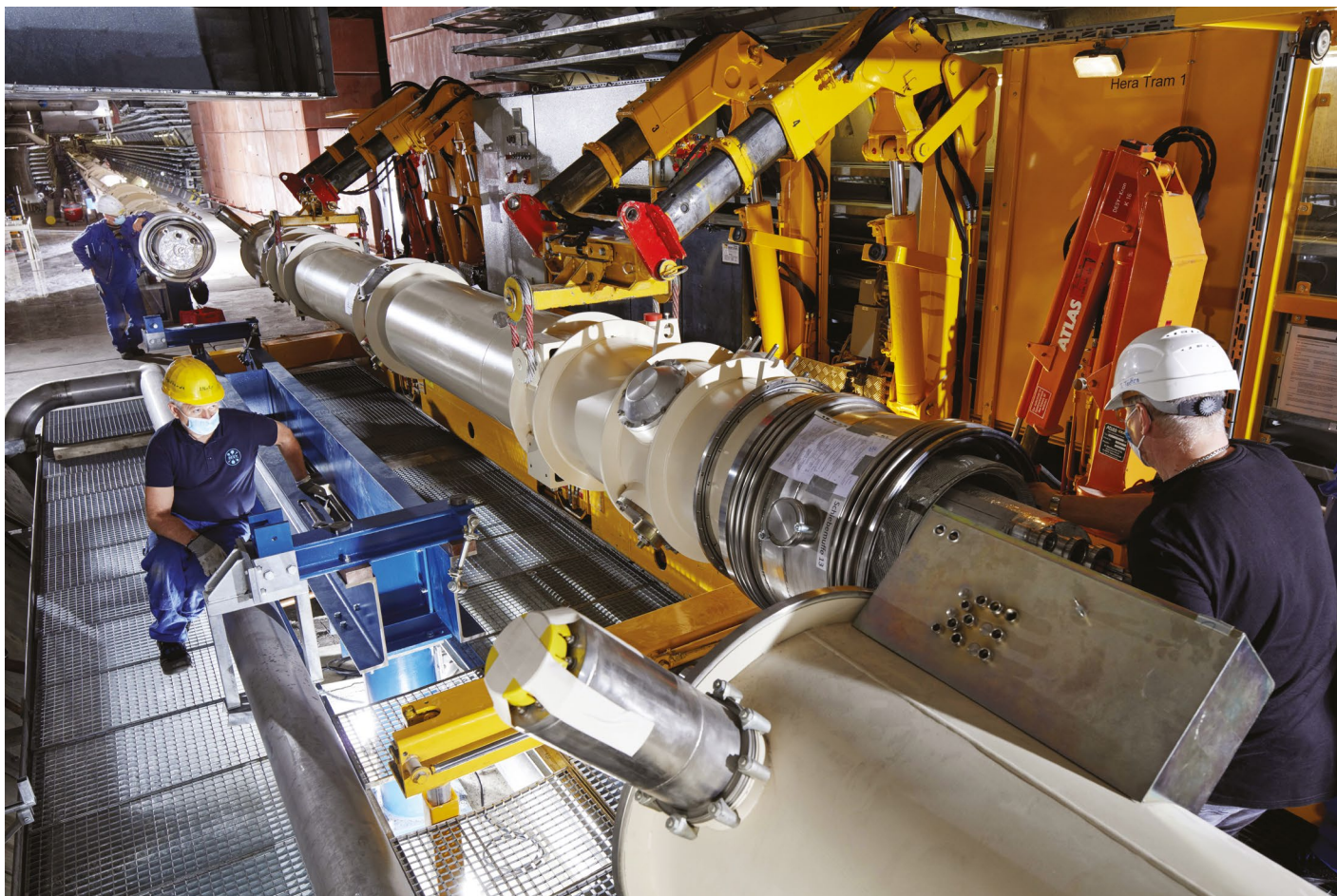


a.
Vera Rubin assieme a una parte della sua collezione di mappamondi antichi.

La convinzione che il nostro universo contenga materia in forme diverse da quelle che osserviamo qui sulla Terra prese forma poco alla volta, nell'arco di quasi un secolo. Esordì con le misure della velocità delle galassie dell'ammasso della Chioma effettuate da Fritz Zwicky negli anni '20 del secolo scorso e fu poi ravvivata negli anni '70, da Vera Rubin e dai suoi studi sulla rotazione delle galassie. Più recentemente, a queste si sono aggiunte altre misurazioni, sulla radiazione cosmica di fondo, sulla struttura dell'universo a grande scala e sulla deflessione dei raggi luminosi da ammassi di galassie per l'effetto di "lente gravitazionale". Pur riguardando scale di distanze ed epoche diversissime tra loro, tutte le osservazioni possono essere interpretate allo stesso modo: la forza di gravità è più intensa di quella che ci aspettiamo tenendo conto della quantità di massa osservabile. Ciò può essere spiegato in due modi: o la gravità su scale cosmologiche si comporta diversamente da come fa nel Sistema Solare, oppure esiste tanta materia in più che non vediamo, la "materia oscura". La prima possibilità, per quanto ancora aperta, non ha dato finora esiti soddisfacenti, dato che non esiste ancora una teoria consistente che modifichi la teoria della relatività generale di Einstein in modo da riprodurre le osservazioni cosmologiche.

Per capire cosa stiamo cercando, è importante chiarire cosa si intende per materia oscura. Per prima cosa, questa forma di materia deve esistere da almeno 13 miliardi di anni (l'età dell'universo), e quindi deve essere stabile almeno su queste scale dei tempi. Poi, deve essere praticamente "trasparente", ossia interagire pochissimo o per nulla con la luce (da cui il nome di "oscura") e anche con tutte le altre particelle che compongono la materia ordinaria. In particolare, deve essere neutra, perché altrimenti sarebbe soggetta alle interazioni elettromagnetiche e potrebbe emettere e assorbire luce. Infine, deve essere "non relativistica", cioè muoversi a velocità molto minori di quelle della luce, perché altrimenti l'universo oggi avrebbe una struttura ben diversa da quella osservata. L'insieme di queste richieste compone una formidabile *checklist* che, applicata alle particelle che conosciamo, ci porta a eliminarle tutte, una dopo l'altra. Quindi, qualunque cosa sia, la materia oscura è sicuramente qualcosa di mai osservato prima, e gli indizi sulla sua esistenza rappresentano l'evidenza più forte che esista nuova fisica al di là del modello standard.

Le idee su cosa possa essere la materia oscura non mancano, anzi, al contrario, di idee ce ne sono anche troppe. Il problema è piuttosto individuare quelle più soddisfacenti dal punto di vista



b.
L'esperimento ALPS ai laboratori DESY di Amburgo, che si propone di rivelare l'effetto "luce attraverso il muro": se alcuni fotoni del raggio laser si trasformano temporaneamente in assioni, possono attraversare un ostacolo e riconvertirsi poi in fotoni.

teorico e metterle alla prova negli esperimenti. Le candidate più studiate sono le particelle WIMP (*"weakly interacting massive particle"*) (particella massiva debolmente interagente). Sono particelle di massa elevata e con interazioni così deboli da non inficiarne l'attributo di "oscure", ma non così tanto da non poter essere rivelate in un esperimento di laboratorio. Inoltre, assumendo che questa interazione debole sia dello stesso tipo di quella che sentono per esempio i neutrini, si potrebbe realizzare il "miracolo" di produrre queste particelle, nell'universo primordiale, proprio nella quantità giusta richiesta dalle osservazioni, né troppo alta né troppo bassa. Per verificare il paradigma delle WIMP nel corso degli ultimi decenni si è sviluppata una campagna sperimentale formidabile, con la costruzione di vere e proprie "trappole acchiappa-WIMP" in laboratori sotterranei, come ad esempio ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'INFN. Un'altra possibilità è quella di osservare i fotoni, gli elettroni o altre particelle elementari prodotte nelle annichilazioni tra WIMP con strumenti posti a terra o nello spazio oppure sotto il mare o in Antartide. E infine, l'obiettivo più ambizioso è quello di produrre le WIMP in laboratorio, per

esempio a LHC al Cern, come risultato della collisione tra protoni. Purtroppo, questo enorme sforzo finora non ha prodotto segnali positivi, e la plausibilità delle WIMP si è notevolmente ridotta. Sebbene l'ipotesi non sia ancora del tutto tramontata, e magari la scoperta possa essere dietro l'angolo, forse dovremo a un certo punto accettare che il miracolo delle WIMP non sia mai avvenuto e per questo, da un po' di tempo, si è cominciato a cercare anche altrove.

Un candidato sempre più al centro dell'attenzione è l' "assione". L'idea alla base di questo scenario fu introdotta da Roberto Peccei e Helen Quinn nel 1977 con motivazioni teoriche del tutto indipendenti dalla materia oscura. Più che una particella, è utile pensare all'assione come un "campo", un po' come il campo elettromagnetico, seppur con caratteristiche molto diverse. Il valore del campo, anziché rimanere costante, varia rapidissimamente nel tempo e, così facendo, crea una distribuzione di energia che si comporta proprio come farebbe un insieme di particelle di materia oscura. La teoria di Peccei e Quinn e le sue modifiche successive prevedono anche interazioni tra gli assioni e la materia ordinaria e quindi, come per le WIMP,



c.
Un giovane Stephen Hawking ipotizzò già in un articolo del 1970 che i buchi neri primordiali potessero essere più abbondanti della materia ordinaria.

la possibilità di rivellarli in laboratorio. Nel caso degli assioni la fantasia dei fisici sperimentali si è veramente scatenata. Si cerca di convertire parzialmente il campo degli assioni in campo elettromagnetico, cioè in fotoni, facilmente rivelabili dagli strumenti. Con un intento simile si sono costruiti “haloscopi”, che sono grossi tubi contenenti un campo magnetico puntati verso il Sole, che dovrebbe essere una sorgente molto prolifica di assioni. O, ancora, si spara un raggio laser verso una parete per vedere se una parte dei fotoni del laser può attraversarla, grazie alla loro temporanea trasformazione in assioni (vd. fig. b). Altri esperimenti ancora cercano di rivelare l'interazione tra il campo degli assioni e lo *spin* degli elettroni. Si tratta, come si può capire da questi esempi, di un settore in piena espansione, in cui un problema di fisica fondamentale apparentemente disgiunto da ogni interesse pratico sta stimolando lo sviluppo di una serie di tecnologie, per esempio sui raggi laser e i campi magnetici, che avranno molto probabilmente ricadute in altri settori in apparenza molto lontani.

In questi ultimi anni poi, stimolata dalla scoperta delle onde gravitazionali da parte degli interferometri Ligo e Virgo, ha ripreso il centro della scena una vecchia ipotesi, avanzata inizialmente da Stephen Hawking negli anni '70, ossia che la materia oscura possa essere composta da buchi neri formatisi nei primi istanti di vita dell'universo.

Ora questa spiegazione sembra un po' ridimensionata, e sembra difficile che la materia oscura possa essere costituita al 100% da questi buchi neri “primordiali”.

In realtà, niente impone che la materia oscura sia composta da un solo tipo di oggetti, che siano particelle, campi o buchi neri. Infatti, se guardiamo alla materia ordinaria, che contribuisce solamente per il 5% al totale della materia del nostro universo, vediamo che essa è composta da sei tipi di quark e leptoni diversi, che a loro volta formano una moltitudine di particelle elementari, e più di cento elementi chimici differenti. Perché mai quindi la materia oscura, che è cinque volte più abbondante di quella ordinaria, dovrebbe essere interamente composta da un solo componente? Ha quindi senso, e l'idea è stata sviluppata moltissimo in questi ultimi anni, immaginare veri e propri “mondi oscuri”, composti da una varietà di specie differenti. La materia ordinaria potrebbe comunicare con questo mondo oscuro attraverso la forza di gravità e, eventualmente, poche altre interazioni deboli, che svolgerebbero il ruolo di “portali” tra i due mondi. La speranza, in questi scenari, è che un giorno, grazie a nuove intuizioni e a esperimenti sempre più raffinati, si possa attraversare uno di questi portali e riuscire a vedere se, dall'altra parte, nel mondo oscuro, ci sono i colori.

Biografia

Massimo Pietroni è professore di cosmologia e meccanica quantistica presso l'Università di Parma. Si occupa di cosmologia e fisica astroparticellare con particolare attenzione agli aspetti di ricerche che potrebbero rivelare nuova fisica oltre al modello standard.

[as] radici

Dividere l'indivisibile

di Adele La Rana

storica della fisica

“Spaccare l'atomo!": così annunciava la fascetta che avvolgeva il primo libro italiano dedicato a divulgare al grande pubblico la fisica nucleare. Correva l'anno 1936 e il volume s'intitolava “Alchimia del tempo nostro”. A realizzare l'opera erano state due giovanissime autrici, al loro debutto come scrittrici scientifiche: Ginestra Amaldi e Laura Fermi, mogli rispettivamente di Edoardo e di Enrico.

Testimoni attive delle ricerche dei ragazzi di via Panisperna, Laura e Ginestra descrivevano l'avventuroso percorso che dalla scoperta della radioattività naturale, alla fine dell'800, aveva condotto nel giro di una quindicina d'anni all'identificazione della struttura dell'atomo e poi all'esplorazione della materia a scale ancora più piccole, fino a svelare, nel corso di altre due decadi, la composizione del nucleo atomico e a produrre la radioattività artificiale. Con sapiente semplicità, le due autrici introducevano il lettore alla frontiera delle ricerche sulla materia e alla nascita, nei primi anni '30, della fisica nucleare. L'atomo, quel frammento ritenuto per molti secoli unità fondamentale, immutabile e indivisibile della materia, era divenuto, nel corso di soli 40 anni, un oggetto composito e trasmutabile.

L'idea di frantumare l'atomo era entrata nell'immaginario scientifico diverso tempo prima. Già agli inizi del '900, Thomson – scopritore dell'elettrone nel 1897 – sfidava i suoi collaboratori a spaccare (“smash up”) gli atomi con i raggi X. In generale, tra i fisici e i radiochimici d'inizio secolo aleggiava l'ambizione di varcare la soglia atomica.

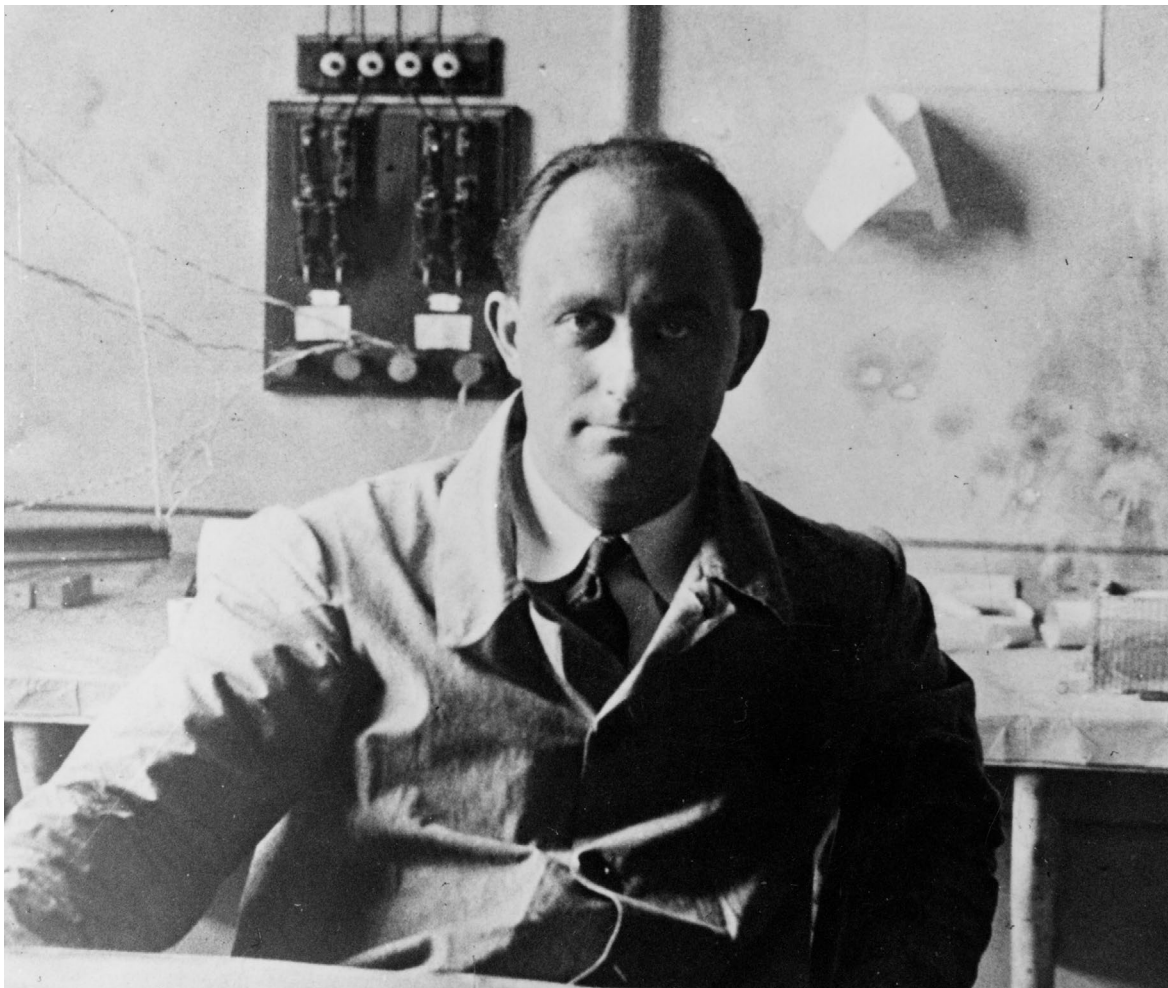
Al tempo, la chiave di accesso al mondo subatomico appariva essere la radioattività. Poco dopo aver scoperto con suo marito Pierre l'elemento radio (1898), la stessa Marie Curie aveva suggerito che la radioattività potesse originarsi nell'atomo, invece che scaturire da una reazione chimica o da un'interazione con l'ambiente.

La natura della radioattività e l'origine dell'energia emessa furono oggetto di accanite indagini negli anni successivi. Nel 1902 Rutherford, insieme al collega radiochimico Frederick Soddy, corroborò con numerosi risultati sperimentali l'idea che un elemento radioattivo subisse un processo di trasformazione a livello atomico, perdendo la propria integrità originaria (“disintegrandosi”) e trasmutando in un altro elemento. Intorno al 1903 cominciò a diffondersi l'espressione “disintegrazione dell'atomo” per descrivere il processo alla base della radioattività.

In una serie di esperimenti svolti tra il 1915 e il 1919, Rutherford riuscì finalmente nell'impresa di frammentare



a. Partendo dall'alto a sinistra e procedendo in senso orario: Ginestra Amaldi, Laura Fermi, Edoardo Amaldi e il figlio Ugo, Enrico Fermi e il figlio Giulio (Pera di Fassa, 1954).



b.
 Enrico Fermi a via Panisperna, nei primi anni '30. La sua teoria del decadimento β apriva la strada alla teoria dell'interazione debole. Con intuito formidabile ("CIF" come scherzava lui stesso, acronimo che compare abbastanza spesso nei suoi scritti, un residuo di goliardia giovanile), Fermi ipotizzò che l'elettrone non preesiste nel nucleo, ma si forma al momento del decadimento, tramite una trasformazione del neutrone in un protone, con la conseguente emissione di un elettrone. Nel contempo, viene emesso anche un neutrino, secondo l'ipotesi di Pauli.

l'atomo, anzi, il denso nucleo positivo al suo interno – scoperto dallo stesso Rutherford qualche anno prima. Le particelle α emesse da una sorgente radioattiva venivano usate come proiettili per colpire nuclei di azoto. Rutherford mostrò che ne scaturivano particelle di carica positiva e massa unitarie: di fatto, nuclei di idrogeno. Aveva estratto, per la prima volta, un costituente fondamentale della materia nucleare, il protone! Rutherford suggerì che particelle α più energetiche avrebbero potuto disintegrare altri elementi, superando la forza elettrica repulsiva esercitata dal nucleo. Di qui la necessità di accelerare i proiettili subatomici. Nel 1932 John Cockcroft ed Ernest Walton misero in funzione l'acceleratore elettrostatico da loro ideato e realizzarono per la prima volta una disintegrazione nucleare indotta da particelle accelerate (protoni). Riuscirono a spaccare in due metà un nucleo leggero, producendo due nuclei di elio. L'espressione "*the atom split*" campeggiò sulle pagine di molti giornali.

La scoperta più rilevante del 1932 fu, però, l'identificazione da parte di Chadwick del secondo ingrediente del nucleo, il neutrone, che segnò l'effettivo inizio della fisica nucleare. Con l'emergere del modello di Heisenberg e Majorana – che descriveva il nucleo come costituito di protoni e neutroni – e i

primi tentativi di descrivere le forze nucleari, capaci di vincere la repulsione coulombiana tra protoni, si varcava una nuova frontiera delle indagini sulla materia.

È a questo punto della storia narrata da Laura e Ginestra, nella seconda parte del libro, che fanno la loro comparsa i giovani ricercatori di via Panisperna, Franco Rasetti, Emilio Segrè, Edoardo Amaldi, Bruno Pontecorvo e Oscar D'Agostino.

Fermi è menzionato per la prima volta quando, alla fine del 1933, formula la teoria del decadimento β . Assumendo per il nucleo la struttura a protoni e neutroni, e mettendo a frutto l'ipotesi del "neutrino di Pauli" (oggi identificato con il neutrino elettronico), gettava finalmente luce sul tipo più misterioso di radioattività: l'improvvisa emissione, da parte di un nucleo, di un elettrone e la trasmutazione in un elemento di numero atomico superiore. Nella teoria di Fermi l'elettrone non preesisteva nel nucleo, come si ipotizzava al tempo, ma veniva creato nel processo di "trasformazione" di un neutrone in protone (con associata emissione di un'elusiva nuova particella, il neutrino). Nel gennaio del 1934 Irène Curie e suo marito Frédéric Joliot produssero per la prima volta la radioattività artificiale, bombardando con particelle α un sottile strato di alluminio e osservandone l'attivazione. Subito dopo, Fermi intuì che i

neutroni sarebbero stati proiettili ben più efficaci a indurre reazioni nucleari, non risentendo delle forze coulombiane. Allesti un apposito esperimento, utilizzando come sorgente una miscela di radon e berillio: le particelle α emesse dal radon colpivano il berillio, producendovi l'espulsione di neutroni. Fermi mise alla prova la sua recentissima teoria del decadimento β , esponendo ai neutroni prima il platino, poi l'alluminio e il fluoro, elementi ricchi in neutroni e quindi, secondo i suoi calcoli, più "instabili" e più favorevoli a produrre radioattività β . Con l'alluminio e il fluoro osservò quanto cercava: i neutroni inducevano nel bersaglio, prima inerte, la formazione di nuclei radioattivi!

Nei mesi successivi del 1934 i ragazzi di via Panisperna bombardarono sistematicamente gli elementi della tavola periodica, producendo una quarantina di nuovi nuclidi radioattivi e affermandosi a livello internazionale tra i pionieri della fisica nucleare. La loro scoperta più importante - l'efficacia dei neutroni lenti a innescare la radioattività - sarebbe arrivata in ottobre, ma intanto credettero di averne fatta una particolarmente rilevante a maggio.

Giunsero infatti a irraggiare l'ultimo e più pesante elemento allora conosciuto della tavola periodica, l'uranio (numero atomico pari a 92). Ottennero un nuclide radioattivo avente un'emivita di tredici minuti, risultato che Fermi interpretò, con una certa cautela, come la possibile produzione del primo elemento "transuranico". Seguendo il ragionamento usato per gli altri casi, infatti, Fermi ipotizzò che l'uranio catturasse il neutrone-proiettile e poi decadesse β , trasformandosi nell'elemento di numero atomico immediatamente successivo nella tavola periodica.

Critiche a questa ipotesi giunsero presto dalla chimica tedesca Ida Noddack, nota per aver scoperto con il marito Walter l'elemento renio. In un articolo sul presunto "elemento 93", sottolineò la mancanza di rigore da parte di Fermi nell'interpretazione dei risultati e suggerì l'idea che, tra le varie possibilità da vagliare, c'era quella che l'uranio si fosse spezzato in nuclei più piccoli. Intanto, però, a Berlino Otto Hahn e Lise Meitner confermarono con diversi articoli i risultati di Fermi. Finalmente, nel dicembre 1938, Hahn e Fritz Strassmann, coadiuvati da Meitner, scoprirono che l'uranio, colpito da un neutrone, si disintegrava in due nuclei di massa confrontabile. Non si trattava quindi di separazione di frammenti piccoli e periferici di materia nucleare, come ipotizzato fino ad allora: era una vera e propria spaccatura di un nucleo pesante. Un fenomeno del tutto nuovo, per il quale fu coniato un nome inedito, mutuato dalla biologia cellulare: "fissione" (vd. p. 26, ndr). La fissione dell'uranio colse tutti di sorpresa, perché implicava "effetti nucleari collettivi". Il proiettile causa una vibrazione e deformazione dell'intero nucleo: come fosse un corpo elastico, questo si allunga e strozza nel mezzo, fino a spezzarsi in due. Un comportamento del genere necessitava di una descrizione d'insieme, che integrasse il modello nucleare "a goccia di liquido" di George Gamow con il nucleo composto di Niels Bohr, una teoria che muoveva i primi passi proprio mentre "Alchimia del tempo nostro" veniva pubblicato. Fermi e gli altri non avevano alcun sospetto di avere davvero realizzato quanto la pubblicità annunciava sulla copertina.



c.

Laura Fermi aveva frequentato tre anni del corso di laurea in scienze naturali, interrompendo gli studi dopo il matrimonio, ma subito dopo aiutando il marito nella stesura di un volume di fisica per le scuole superiori. Ginestra Amaldi si era laureata in fisica e aveva collaborato negli anni successivi al calcolo di funzioni d'onda elettroniche con il metodo Thomas-Fermi, entrando poi nella redazione della rivista del CNR "La Ricerca Scientifica", dove ebbe un ruolo fondamentale nella pubblicazione e rapida diffusione dei lavori del gruppo di via Panisperna. Il libro di Laura e Ginestra ebbe una buona diffusione, come testimonia il fatto che una seconda edizione ampliata fu pubblicata nel 1943, in pieno periodo di guerra.

[as] intersezioni

Superfluidi

di Matteo Cirillo

fisico delle basse temperature

Lavorando presso l'Università di Leida (dove fu professore dal 1882 al 1923), Heike Kamerlingh Onnes fu il primo a capire come ottenere la liquefazione dell'elio e a osservare il fenomeno della superconduttività in materiali raffreddati proprio con l'elio liquido. Negli anni '30 del secolo scorso furono poi gli studi di Pyotr Kapitza a evidenziare alcune sorprendenti proprietà di un isotopo dell'elio (l'elio-4), tutte riscontrate successivamente anche per un altro isotopo, l'elio-3. Queste proprietà costituiscono l'evidenza fenomenologica della "superfluidità". Nella fisica della materia condensata uno stato è definito "superfluido" se è caratterizzato dall'assenza di processi dissipativi quando parametri quali temperatura, campi magnetici applicati e pressione assumono valori specifici. I

due isotopi dell'elio, l'elio-4 e l'elio-3, diventano "superfluidi" nella fase liquida e per temperature inferiori rispettivamente a 2,17 K e 2,49 mK, nel senso che la loro viscosità diminuisce drasticamente (di 11 ordini di grandezza) rispetto a quella che hanno nello stato normale: in tal modo acquisiscono la capacità di scorrere anche in capillari micrometrici. Successivamente, all'inizio degli anni '40, Lev Landau ipotizzò che la superfluidità dell'elio-4 fosse dovuta al fatto che sotto una certa "velocità critica" non potessero essere generate perdite di energia per interazioni tra le particelle del liquido o per urti di esse contro le pareti del "tubo" ove il liquido stesso fluisce. Ad uno stato superfluido ci si riferisce spesso anche quando si parla di elementi e loro composti o leghe nello stato



a.
Schrieffer, Bardeen e Cooper (da sinistra a destra) che svilupparono la teoria BCS, per la quale ricevettero il premio Nobel per la fisica nel 1972.

“superconduttore” (assenza di resistenza elettrica). In questo caso la rivoluzionaria teoria sviluppata da John Bardeen, Leon Cooper e Robert Schrieffer, nota come BCS (dalle iniziali del loro cognome), individuò nell’esistenza di un intervallo specifico di energia (il cosiddetto *energy gap*) la spiegazione per l’assenza di processi dissipativi e quindi di resistenza elettrica. Di solito, in metalli “tradizionali”, quest’ultima è dovuta alle interazioni degli elettroni con la struttura reticolare. Nel caso di un superconduttore, invece, all’interno di questo *gap* di energia gli elettroni interagiscono con le eccitazioni reticolari (i cosiddetti “fononi”), ma in modo che il risultato sia quello di generare coppie di elettroni che poi generano correnti di trasporto non dissipative (cosiddette “supercorrenti”).

La teoria BCS presenta tuttavia dei limiti. Ad esempio, nei nuovi materiali superconduttori “ad alta temperatura di transizione”, investigati a partire dai risultati di Georg Bednorz e Alex Mueller del 1986, si osservano temperature di transizione alte, fino a 180 K. Per questi materiali, data l’elevata energia dei fononi, non è semplice pensare a una spiegazione di tipo BCS in assenza di pressione sul solido, poiché la teoria BCS in questi casi richiede che la temperatura non sia superiore a circa 40 K per avere una fase superconduttiva. Ma è un dato di fatto che anche per questi materiali, come per tutti i superconduttori finora noti, le cariche che generano le correnti superconduttrici sono pari a due volte la carica dell’elettrone e quindi sono riconducibili alla formazione di coppie di elettroni. Nonostante i suoi limiti, la teoria BCS resta un grandissimo successo ed è stata d’ispirazione in diversi campi della fisica. Antony Leggett la prese come modello per spiegare la superfluidità dell’elio-3, scoperta sperimentalmente da David Lee, Douglass Osheroff e Robert Richardson nel 1971.

Una cosa interessante è che, nella fase superfluida, sia l’elio-3 e l’elio-4 che i superconduttori hanno proprietà analoghe a quelle dei cosiddetti “condensati di Bose-Einstein”, come è risultato per esempio dagli esperimenti sui condensati “atomici” costituiti da vapori di atomi alcalini, scoperti a metà degli anni ‘90 da

Eric Cornell, Wolfgang Ketterle e Carl Wieman (vd. p. 36 in *Asimmetrie* n. 20, ndr).

A parte queste analogie però non è semplice, in generale, stabilire legami tra la teoria della superfluidità e quella dei condensati di Bose-Einstein, nonostante questo sia stato il primo approccio teorico di un pioniere della ricerca sui superfluidi, Wolfgang Fritz London. Anche se gli atomi di elio-4 sono bosoni e anche le coppie di elettroni nei superconduttori e le coppie di atomi di elio-3 possono essere considerati in opportune condizioni come dei bosoni, osservazioni sperimentali e argomenti teorici indicano che le proprietà osservate nei superfluidi possono mostrare dei comportamenti contrari a quelli previsti per i condensati di Bose-Einstein. Non è possibile, per esempio, conciliare le proprietà di un condensato di Bose-Einstein con il concetto di velocità critica di Landau. Il problema della relazione esistente tra le teorie “microscopiche” sui superfluidi e gli esperimenti e modelli teorici basati sui condensati di Bose-Einstein è origine di una vasta e interessante letteratura scientifica.

Le “famiglie” di nuovi materiali superconduttori ad alta temperatura di transizione, di cui si è parlato sopra, sono state – e sono – oggetto di grande interesse da parte delle comunità di fisica fondamentale e applicata. Anche se non esistono ancora modelli teorici “microscopici” completi per queste nuove famiglie a pressione atmosferica (tranne che per il diboruro di magnesio, un superconduttore BCS), nella comprensione dei loro comportamenti può venire in aiuto la “teoria di Landau e Ginzburg”. Quest’ultima, in realtà, è stata sviluppata per le transizioni di fase del secondo ordine (e quindi non specificamente per transizioni di condensati di Bose-Einstein), ma fornisce informazioni e “linee-guida” per la caratterizzazione dei nuovi composti superconduttori ad alta temperatura di transizione. Generalmente le previsioni fondamentali di questa teoria permettono di caratterizzare abbastanza bene i nuovi materiali, specie per le prospettive applicative.



b.
Wolfgang Fritz London,
fisico teorico, Medaglia
Lorentz nel 1953, il
pioniere della ricerca sui
superfluidi.

[as] visioni

Un tipo strano

di Giuliana Galati



a.

Disegno di Giacomo Bodrato ed Elia Amirante della 2° elementare del 2009 della Scuola Internazionale Europea "Altiero Spinelli" di Torino. Il disegno raffigurante un quark strange è frutto del progetto "Semplicemente ... Complesso", nato dal desiderio di far lavorare i bambini sul tema del "vedere l'invisibile", per scoprire con loro che, scendendo di scala fino all'infinitamente piccolo, la molteplicità e la complessità che ci circonda è riconducibile a un numero finito di elementi. Dopo aver ricevuto nel 2009 dalla Regione Piemonte un contributo iniziale nell'ambito del piano strategico di ampliamento della offerta formativa, la scuola, in collaborazione con il Dipartimento di Fisica dell'Università di Torino, ha continuato a sostenere il progetto inserendolo annualmente nel suo programma di attività curricolari.

Il modello standard delle particelle è, per i fisici, un po' come la tavola periodica per i chimici, però con meno caselle. A volte spieghiamo anche ai bambini più piccoli quali sono i suoi protagonisti: quark, leptoni, bosoni. E magari chiediamo loro di immaginare e disegnare una versione fantastica di uno di loro.

[quark strange]: Io odio questo gioco.

[as] Perché?

[qs]: Perché i quark charm e beauty vengono disegnati sempre come affascinanti, col ciuffo brillantinato o i capelli vaporosi e un bel vestito. A me, invece, mi immaginano sempre come un mostro con tre o più occhi storti, quattro ciuffi in testa che neanche a carnevale e un vestito da burino.

[as]: Beh, in effetti anche io ti avrei immaginato un po' così...

[qs]: Ma stiamo a scherzà? Io sono un quark serio, come tutti gli altri! Non è colpa mia se a quei tontoloni dei fisici sembrava "strano" che alcuni adroni che mi contenevano avessero una vita media più lunga... Potevano chiamarmi quark elisir-di-lunga-vita! E invece no, quark strange! Grazie Murray Gell-Mann!

[as]: Non te la prendere! Oggigiorno essere strani può essere anche un complimento. Pensa piuttosto al quark down che viene raffigurato sempre come triste...

[qs]: Sì, hai ragione. Io alla fine c'ho fatto er callo, ma i fisici perseverano. Tutta la materia che mi contiene l'hanno chiamata "materia strana" e ci sono alcune particelle, come le lambda, che so' permalose assai! Del resto... so' barioni!

[as]: E che fanno queste lambda di particolare?

[qs]: In alcune condizioni, un po' estreme, diciamo, si trovano nel nucleo degli atomi. Epperò lo sanno tutti che nel nucleo ce stanno protoni e neutroni e quelli so' fatti di quark up e down. Da dove escono gli strange? Per capirlo, i fisici hanno fatto un esperimento al Continuous Electron Beam Accelerator Facility, un acceleratore che si trova al Jefferson Lab, negli Stati Uniti. In parole povere colpivano un nucleo con un fascio di elettroni: gli elettroni trasferiscono energia ai quark all'interno dei protoni e dei neutroni e così stimolano la produzione di particelle lambda. *You understand?*

[as]: Più o meno... immagino che con questo metodo abbiano potuto vedere la creazione dei barioni lambda all'interno del nucleo, dico bene?

[qs]: Piano, piano! T'ho già detto che le lambda so' permalose! Mica se fanno vedè, hanno una vita troppo breve per essere rivelate direttamente: ci hanno messo ben dieci anni per individuare il difficile segnale dovuto al loro decadimento. Studiando l'energia e la quantità di moto delle particelle che venivano prodotte da questo decadimento hanno ricostruito che cosa è successo ai quark liberati che si sono scatenati nel nucleo. E la cosa pazzesca è che hanno visto che le lambda ad alta energia e quelle a bassa energia so' differenti e ci sono ancora varie ipotesi e dubbi sui modelli per spiegarlo.

[as]: Ma quindi può essere che in uno degli atomi degli oggetti che vedo ci sia un quark strano come te?

[qs]: Nah, nun te crede che sia così facile. Come dicevo ci vogliono condizioni abbastanza estreme, come le collisioni di particelle ad alta energia o i nuclei incredibilmente densi e sottoposti a pressioni elevatissime delle stelle di neutroni. Ci vai mai?

[as]: Nelle stelle di neutroni? Ma che scherziamo?

[qs]: Che noia. Saremo strani, ma a noi piace un sacco starci. Tutta quella folla che poga... Infatti è pieno di lambda là! È proprio l'ambiente giusto per loro. Qui sulla Terra, invece, non è cosa. È difficilissimo creare una lambda, pure con gli acceleratori.

[as]: Ma qualcuno ci riesce!

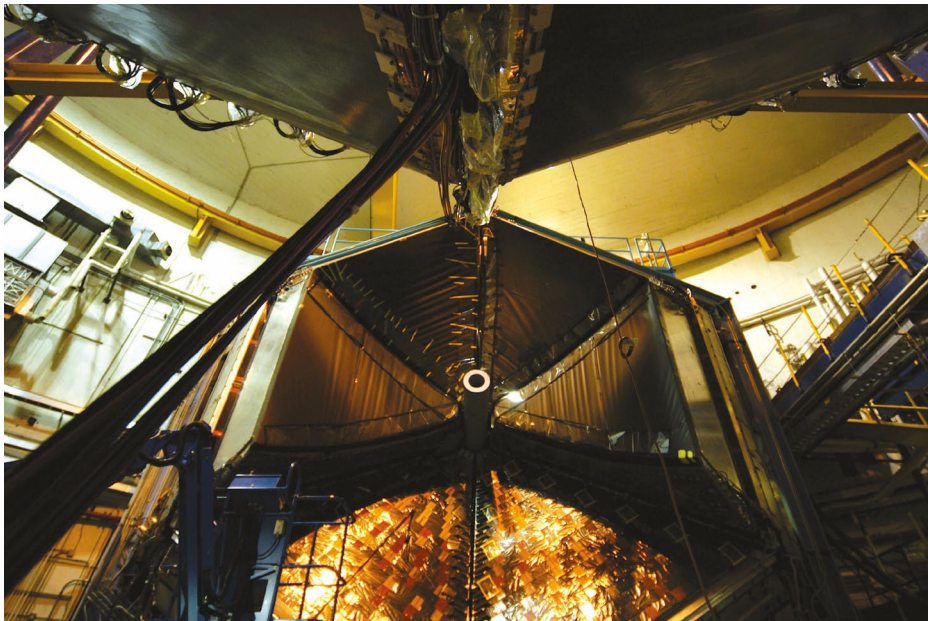
[qs]: Sì, ma a fatica... Per esempio ci sono riusciti al J-Parc, un acceleratore che si trova a Tōkai, in Giappone. Il fatto è che la lambda non è proprio sempre normale... perché c'ha degli stati eccitati che tengono dentro me più un antiquark up, due quark up e un quark down: totale cinque quark! Capisci? Di solito ce ne stanno solo tre... ma lei è strana forte! In questo caso hanno preso nuclei di deuterio, cioè coppie formate da un protone e un neutrone, e li hanno colpiti con un fascio di kaoni negativi. Quando il kaone riusciva a sfrattare il neutrone dal nucleo di deuterio e a prenderne il posto, si otteneva una struttura formata dal protone, fatto da due quark up e un quark down, e dal mesone K^- , che contiene un quark strange e un antiquark up. *Ninmu kanryō!* ("Missione compiuta!", ndr)

[as]: E che ne hanno fatto delle lambda prodotte?

[qs]: Beh, di certo le lambda non so' tipe da farsi mettere in una scatola, soprattutto gli stati eccitati! Te l'ho detto che vivono pochissimo, no? Hanno studiato lo stato eccitato lambda(1405) e hanno cercato di capire meglio come è fatta. Secondo i fisici di E31, la collaborazione che ha fatto questo esperimento, sotto sotto potrebbero essere proprio uno stato legato tra il mesone K^- e il protone. E questo ci aiuta a capire come mai stanno tanto bene nel cuore delle stelle di neutroni, a pressioni e densità pazzesche. Un posto da favola, te l'assicuro... Dovresti provare!

[as]: Siete decisamente strani. Mi spiace ma devo dare ragione a chi vi ha dato questo nome, io mi tengo alla larga da queste stelle di neutroni!

[qs]: Come dico sempre, i quark noiosi si annoiano sulla Terra, noi... 'o famo strano nelle migliori stelle!



b.
Il rivelatore della Continuous Electron Beam Accelerator Facility al Jefferson Lab con cui sono stati creati barioni lambda all'interno di nuclei atomici.

[as] traiettorie

Più donne nella fisica

di Francesca Mazzotta



Promuovere e sostenere le ragazze nello studio della fisica, questo è l'obiettivo del concorso INFN "Più donne nella fisica" che, istituito nel 2023, lo scorso settembre ha premiato venticinque brillanti giovani studentesse iscritte al corso di laurea magistrale in fisica sperimentale e teorica delle interazioni fondamentali e in fisica applicata. Ogni studentessa ha ricevuto una borsa di studio del valore di 1500 euro come incentivo per continuare i propri studi in fisica subnucleare, astroparticellare, nucleare, teorica o nel campo della ricerca tecnologica interdisciplinare e della fisica degli acceleratori. Tra di loro c'è Camilla Forgiione, studentessa all'Università degli Studi di Torino, che frequenta il corso di laurea magistrale in fisica teorica. L'abbiamo incontrata e le abbiamo chiesto di raccontarci il suo percorso di studi e come si è avvicinata alla fisica.

[as]: Com'è nato il tuo interesse per le scienze?

[Camilla Forgiione]: Fin da piccola facevo degli esperimenti con mio nonno per gioco ed era molto divertente. Mia mamma ci fotografava durante gli esperimenti e alla fine scriveva una sorta di "relazione di laboratorio". Era proprio un rito. Ancora oggi abbiamo il raccoglitore con tutti gli esperimenti eseguiti, che abbiamo intitolato "Fisica in famiglia".

[as]: Che cosa ti ha spinto a studiare fisica?

[CF]: Quando è arrivato il momento di scegliere l'università, in realtà sono stata indecisa tra fisica e matematica. Nonostante io sia sempre stata abituata a fare esperimenti molto pratici, mi piace anche il rigore con cui la matematica spiega i fenomeni fisici. L'ultimo anno delle superiori sono stata una settimana al CERN per l'alternanza scuola-lavoro e quell'esperienza mi ha fatto capire, forte e chiaro, che la mia passione era la fisica.

[as]: Com'è stato il tuo percorso di studi fino ad oggi? Hai incontrato ostacoli?

[CF]: Sono molto contenta di aver scelto di studiare fisica. Ovviamente è un percorso duro e dobbiamo dare un sacco di esami in poco tempo per rimanere in pari. Quindi studio tanto. Però sono motivata da una forte passione. Mi sono trovata molto bene durante la laurea triennale, dove ho apprezzato tanto i corsi di laboratorio. E sono felice di aver scelto "fisica teorica" come laurea magistrale, perché non solo mi permette di non trascurare la matematica, ma anche di potermi costruire delle basi solide per riuscire a spaziare tra più campi della fisica che mi interessano: dalle astroparticelle alla fisica degli acceleratori.

[as]: Quali sono, oggi, i tuoi principali interessi scientifici? Hai già scelto il tema della tua tesi di laurea?

[CF]: Ho scelto di fare una tesi in fenomenologia delle interazioni fondamentali, quindi sarà focalizzata sulla fisica degli acceleratori e sulle simulazioni di alcuni processi che si confronteranno con i dati sperimentali. Tuttavia, sono anche molto interessata alle grandi domande della fisica astroparticellare: che cos'è la materia oscura? Come potremmo trovarla? Quindi, ad oggi, mi è ancora difficile scegliere.

[as]: Che cosa ti aspetti per il tuo futuro? Dove ti vedi tra dieci anni?

[CF]: Tra dieci anni spero davvero di essere riuscita a realizzare il mio sogno: vorrei lavorare al CERN, vorrei avere il mio ufficio lì ed essere alla guida di un gruppo di ricerca. Perché, da quando ci sono stata alle superiori, mi son ripromessa che ci sarei tornata. Infatti, già quando ho scelto la mia tesi magistrale, l'ho fatto pensando a un mio possibile futuro al CERN.

[as]: Nel tuo percorso di studi hai notato delle differenze tra uomini e donne? Ti sei mai sentita fuori posto perché donna?

[CF]: Non ho mai subito discriminazioni di nessun tipo, però si nota il fatto che in fisica ci siano poche donne. Durante la triennale, che ho frequentato a Modena, eravamo in pochissime. Qui a Torino siamo un po' di più, ma comunque direi che per il corso di laurea in fisica teorica siamo in meno di dieci ragazze

su una classe di una quarantina di studenti. Questa differenza si nota anche tra i docenti: finora ho seguito una dozzina di corsi e ho avuto solo due docenti donna.

Quando frequentavo il liceo, invece, c'è stato un episodio che mi ha lasciata senza parole: quando i miei genitori hanno raccontato al padre di una mia amica che avrei studiato fisica all'università, lui ha chiesto loro se fosse la disciplina più adatta per una ragazza. Questo episodio è stato un po' una doccia fredda per me e mi ha fatto capire che c'è ancora tanta strada da fare.

[as]: Se oggi avessi un ruolo di responsabilità, quali azioni intraprenderesti per raggiungere finalmente questo obiettivo?

[CF]: Come dimostra anche l'episodio che ho raccontato, io credo che ci sia un problema culturale e che vadano intraprese azioni che possano innescare un cambiamento nel modo di pensare delle persone. In questo senso, credo che si debba puntare molto sulla divulgazione. Si potrebbe, ad esempio, iniziare a parlare di più di grandi scienziate come Lise Meitner, Emmy Nöther, Cecilia Payne, Vera Rubin, e tante altre, così da riuscire ad affascinare anche ragazze che sono cresciute in contesti culturali meno aperti.

Vorrei chiudere proprio con una frase di Emmy Nöther: "Quando si parla di matematica si pensa solo a matematici uomini, ma nella storia della matematica ci sono state e ci sono donne che hanno contribuito al suo sviluppo tanto quanto le loro controparti maschili. Anche se i loro nomi sono stati dimenticati, i loro contributi restano".

Io estenderei questa frase alla fisica e ne farei un motto.



b. Le vincitrici della prima edizione della borsa di studio "Più donne nella fisica", assieme al *management* dell'INFN, al termine della cerimonia di premiazione che si è tenuta presso l'Università Roma Tre nel settembre 2023.

[as] spazi

Quanto

di Cecilia Collà Ruvolo

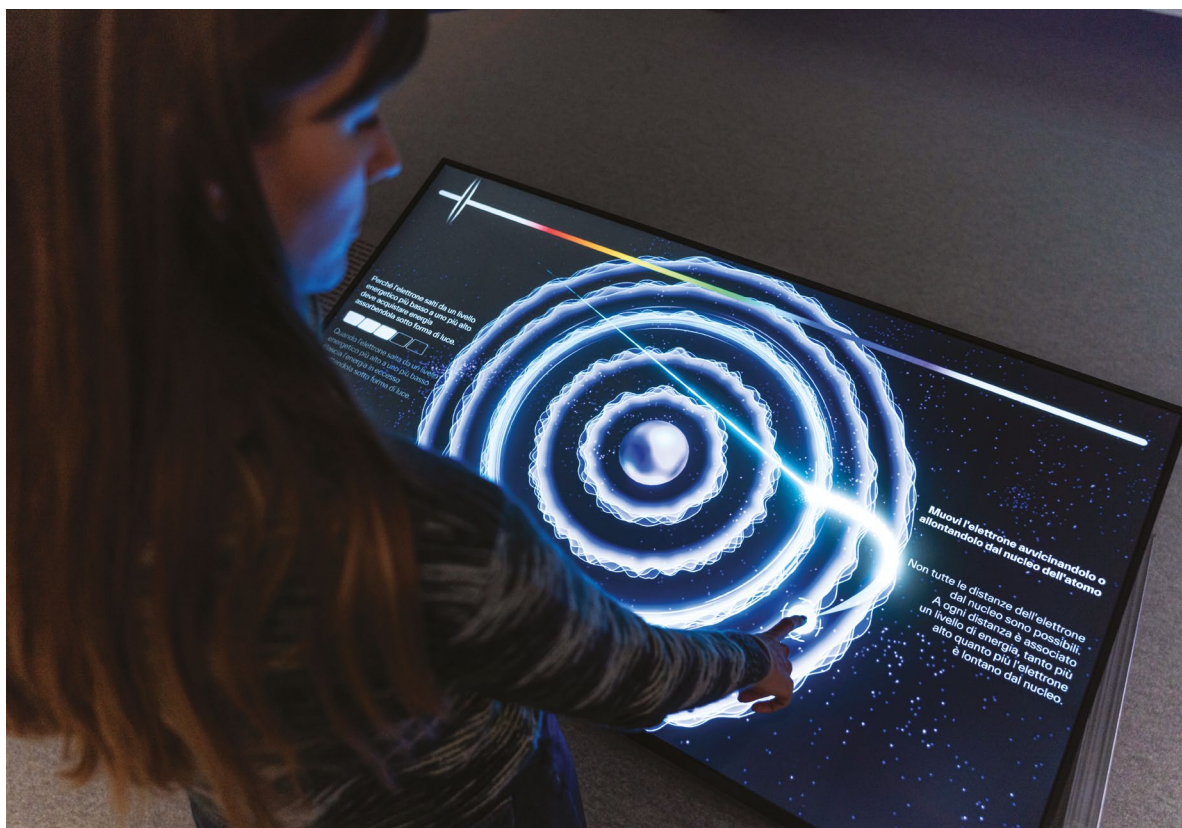
È una straordinaria rivoluzione scientifica, culturale e tecnologica quella a cui ha portato la meccanica quantistica, capovolgendo il nostro modo di comprendere l'universo e la realtà e aprendo la strada a un futuro prima inimmaginabile. In un percorso tra domande e risposte spiazzanti, la mostra "Quanto. La rivoluzione in un salto", realizzata dall'INFN e dal MUSE, il Museo delle Scienze di Trento, dove è ospitata fino al 15 giugno 2024, racconta proprio il grande cambio di paradigma rappresentato dalla meccanica quantistica. Percorrendo la mostra attraversiamo cinque sezioni che dall'universo confortante della descrizione classica di fine '800 sfociano in un universo riletto alla luce della teoria quantistica. Un universo controintuitivo e lontano dalla nostra immaginazione, indeterminato e probabilistico, difficile da accettare. Ma proprio la probabilità e

l'incertezza intrinseca racchiudono la ricchezza di possibilità che la meccanica quantistica ha portato e porterà nel nostro modo di comprendere l'universo e di immaginare la realtà. E, infatti, "a partire dalla meccanica quantistica – commenta Antonio Zoccoli, presidente dell'INFN – si continuano a sviluppare nuove tecnologie che porteranno ad applicazioni, alcune delle quali con ogni probabilità potranno rivelarsi rivoluzionarie per le nostre vite e la nostra società".

Come ogni rivoluzione, anche la meccanica quantistica ha avuto origine da una crisi, la crisi di una descrizione della realtà che a fine '800 sembrava perfetta: la fisica classica, con la meccanica newtoniana e l'elettromagnetismo di Maxwell, che tenevano ben separati il mondo della materia, fatto di corpi che cadono e rotolano, occupano un punto preciso dello spazio e si muovono



a. Installazioni multimediali interattive, proiezioni immersive, testi e video di approfondimento, exhibit e strumenti della ricerca accompagnano il visitatore in un viaggio attraverso la meccanica quantistica.



b. Installazione interattiva sull'atomo di Bohr.

in modo prevedibile, e il mondo della luce, descritta come un'onda elettromagnetica, che come tutte le onde è dispersa nello spazio. Con questa crisi si apre la mostra "Quanto", che ci porta nel profondo della materia, al livello microscopico degli atomi, e poi al loro interno. Lì le regole della fisica classica vacillano, principi che sembravano ovvi crollano. Nasce l'idea del quanto di luce, il fotone, e del salto quantico dell'elettrone, che nell'atomo può occupare solo alcuni livelli energetici e saltare tra l'uno e l'altro assorbendo o emettendo quantità fisse di energia. I fotoni e gli elettroni, e poi le altre particelle, rivelano presto un duplice comportamento: talvolta sembrano onde talvolta corpuscoli, aspetti che si escludono l'uno l'altro, ma che allo stesso tempo coesistono. Eppure, il dualismo onda-particella è solo il primo dei tanti fenomeni apparentemente paradossali della meccanica quantistica. Presto si fanno strada il principio di sovrapposizione e l'indeterminazione di Heisenberg, fondamenti della teoria che rivelano il ruolo strutturale, ineluttabile, che la probabilità assume in meccanica quantistica. Tanto difficile da accettare anche per i suoi stessi pionieri, la nuova teoria smuove una domanda profonda: che cos'è la realtà? Proprio intorno a questa domanda cruciale si sviluppa uno dei dibattiti culturali più importanti del '900, quello tra Einstein e Bohr, che ha generato grandi cambiamenti nella ricerca scientifica, nella società e nella nostra concezione della realtà. In mostra, questo dibattito tra menti straordinarie e gli esperimenti pionieristici che ha ispirato ci traghettano nel nuovo millennio, fino al Nobel per la fisica del 2022 e alle nuove tecnologie, dalla crittografia ai computer quantistici.

Così la mostra "Quanto", tra installazioni multimediali interattive, proiezioni immersive, testi e video di approfondimento, exhibit e strumenti della ricerca, è un viaggio tra un susseguirsi di paradigmi messi in crisi, domande inspiegabili e risposte che aprono un dibattito che si fa sempre più profondo. È un percorso emblema della ricerca scientifica e della sua storia. È "un ragionamento in forma di mostra che ci porta a comprendere le teorie scientifiche quali somma di modifiche e miglioramenti continui in base alle nuove evidenze e ai risultati della ricerca", racconta Michele Lanzinger, già direttore del MUSE e presidente dell'International Council of Museums (ICOM) Italia. Dopo le grandi prove sperimentali a cui è stata sottoposta, la meccanica quantistica si è rivelata una finissima descrizione della realtà microscopica, ma allora che cosa dire del macroscopico? Quanto è quantistico il cosmo? Questa è l'ultima domanda della mostra che porta visitatori e visitatrici a fare un altro salto, dall'infinitamente piccolo di elettroni e fotoni al cosmo, dove le manifestazioni della meccanica quantistica non mancano. E risucchiato da un gigantesco buco nero interattivo, proiettato sulla parete, il visitatore esce dalla mostra con la consapevolezza che sì la meccanica quantistica ha dato il via a una profonda rivoluzione, portandoci a grandi tecnologie e a una maggiore conoscenza della natura e della realtà stessa, ma che ancora molti misteri e domande restano aperti.

Per informazioni: <https://www.muse.it/events/quanto-2023/>

[as] illuminazioni

Solido o liquido?

di Anna Greco



a.

Il ketchup è un fluido non newtoniano con un comportamento differente dalla miscela di amido di mais e acqua. Può essere difficile versare il ketchup imprimendo una forza al centro di una bottiglia piena, come se si stesse cercando di far uscire un solido, ma agitandola prima, ecco che il ketchup scorre. Il movimento ha modificato temporaneamente il comportamento del fluido. Se si attende qualche minuto, l'effetto termina.

Lava, dentifricio, asfalto e vernice: cosa hanno in comune? Sono tutti “fluidi non newtoniani”, ovvero sostanze che manifestano comportamento differente a seconda della forza a cui sono sottoposti, deformandosi in alcuni casi come liquidi, in altri come solidi.

La “legge di Newton” a cui si fa riferimento in questo ambito è infatti quella che descrive come si muove un fluido in una certa direzione, quando gli viene impressa una forza lungo quella stessa direzione. La risposta del materiale dipende dalla sua viscosità, che misura proprio la resistenza del fluido a “scorrere” nella direzione in cui è applicata la forza. Per la maggior parte dei fluidi, come aria e acqua, la viscosità è costante a una data temperatura. Per i fluidi non newtoniani, invece, la viscosità non è costante, e cambia a seconda di come si applica la forza.

Si può facilmente realizzare un fluido non newtoniano a casa o in classe. Sono necessari solo due ingredienti: l'acqua e l'amido di mais (o la fecola di patate). L'esperimento si può eseguire anche con studenti delle scuole elementari, dal momento che i materiali sono atossici, e utilizzare come ingrediente opzionale del colorante alimentare. Mescolando un po' alla volta una misura di acqua con due misure di amido di mais, con l'aiuto di un cucchiaino o con le mani, si ottiene un fluido dalla consistenza collosa. Già nella preparazione si manifesta da subito il

comportamento non newtoniano: si capisce di aver raggiunto la consistenza corretta quando provando a mescolare lentamente il fluido con il cucchiaino, scorre come un liquido, ma cercando di raccogliarlo e staccarlo dal fondo del recipiente con decisione, ecco che diventa solido.

Allo stesso modo, si può provare a immergere piano piano la mano nel fluido, a dare un colpo secco, oppure a creare una “polpettina”: fino a che si manterrà in movimento con piccoli colpetti delle mani, la pallina resterà compatta, appena ci si fermerà, si “scioglierà” come un liquido.

Si osserva così che questo particolare fluido – detto “fluido non newtoniano dilatante” – si comporta come un liquido quando è a riposo oppure gli viene applicata una forza moderata, come un solido quando la forza applicata è intensa e rapida. Ciò è dovuto alle particelle di amido di mais, che non si sono sciolte nell'acqua ma sono rimaste in sospensione, e che si aggregano quando si imprime una forza intensa, mentre rimangono separate quando la forza è di debole intensità.

Un esempio di fluido non newtoniano che funziona al contrario di quello appena descritto sono le sabbie mobili: se rimanete intrappolati, non agitatevi, le rendereste solo più liquide. Il trucco è mantenere la calma, pensare “da fisici” e... muoversi lentamente.

[as] lampi

Versi 1052-66 del libro II del “De Rerum Natura” di Lucrezio

*Nulla iam pacto veri simile esse putandumst,
undique cum versum spatium vacet infinitum
seminaque innumero numero summaque profunda
multimodis volitent aeterno percita motu,
hunc unum terrarum orbem caelumque creatum,
nil agere illa foris tot corpora materiai;
cum praesertim hic sit natura factus, ut ipsa
sponte sua forte offensando semina rerum
multimodis temere incassum frustra que coacta
tandem coluerunt ea quae coniecta repente
magnarum rerum fierent exordia semper,
terrai maris et caeli generisque animantum.
Quare etiam atque etiam talis fateare necesse est
esse alios alibi congressus materiai,
qualis hic est, avido complexu quem tenet aether.*

Se si spalanca da ogni parte lo spazio libero e immenso, se innumerevoli atomi, una quantità smisurata, volteggiano in mille modi animati da un movimento eterno, non è verosimile pensare davvero che siano stati creati unicamente la nostra terra e unicamente il nostro cielo e che fuori di loro rimanga inoperosa una moltitudine di corpi. Tanto più che la natura ha dato vita a questo mondo perché gli atomi, dopo essersi urtati a caso per forza spontanea, dopo essersi uniti in mille modi alla cieca e senza alcun risultato, sono riusciti alla fine a formare quegli aggregati che sarebbero poi divenuti per sempre i principi delle grandi sostanze come le terre, i mari, i cieli e tutte le specie viventi. Allora lo ripeto, e tu non potrai che darmi ragione: esistono altre unioni di corpi in altri luoghi simili a quelle che il cielo rinchiede nel suo abbraccio geloso.

tratto da “De Rerum Natura”, di Lucrezio
trad. di Milo De Angelis
© 2022 Mondadori Libri S.p.A., Milano

[as] segni



Trasfigurazione della materia: dal non vivente al vivente. Una possibile strada evolutiva, dal primordiale plasma di quark e gluoni al complesso ecosistema vivente. Lo sguardo umano contempla la delicata gerarchia del conosciuto.

“L'albero di una vita”, pittura acrilica su carta, illustrazione e testo di Alessandro Nagar



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Per contattare
i laboratori dell'Infn:

Laboratori Nazionali di Frascati (Lnf)

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

Laboratori Nazionali del Gran Sasso (Lngs)

T +39 0862 437265/450
visits@lngs.infn.it
www.lngs.infn.it

Laboratori Nazionali di Legnaro (Lnl)

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

Laboratori Nazionali del Sud (Lns)

T + 39 095 542296
visiteguidate@lists.lns.infn.it
www.lns.infn.it



Raccontaci che cosa pensi di Asimmetrie su Instagram. Pubblica storie, post e reel con l'hashtag #AsimmetrieInfn e taggando l'account @infn_insights. Condivideremo i tuoi contenuti.

www.infn.it



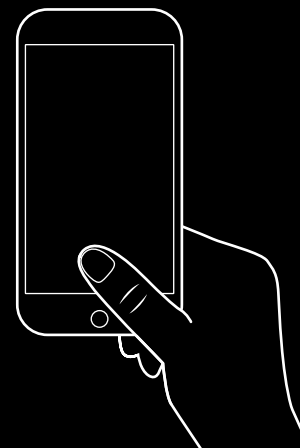
Sul sito www.asimmetrie.it
vengono pubblicate periodicamente
notizie di attualità scientifica.

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 nuovi contenuti multimediali.





www.infn.it

rivista online
www.asimmetrie.it