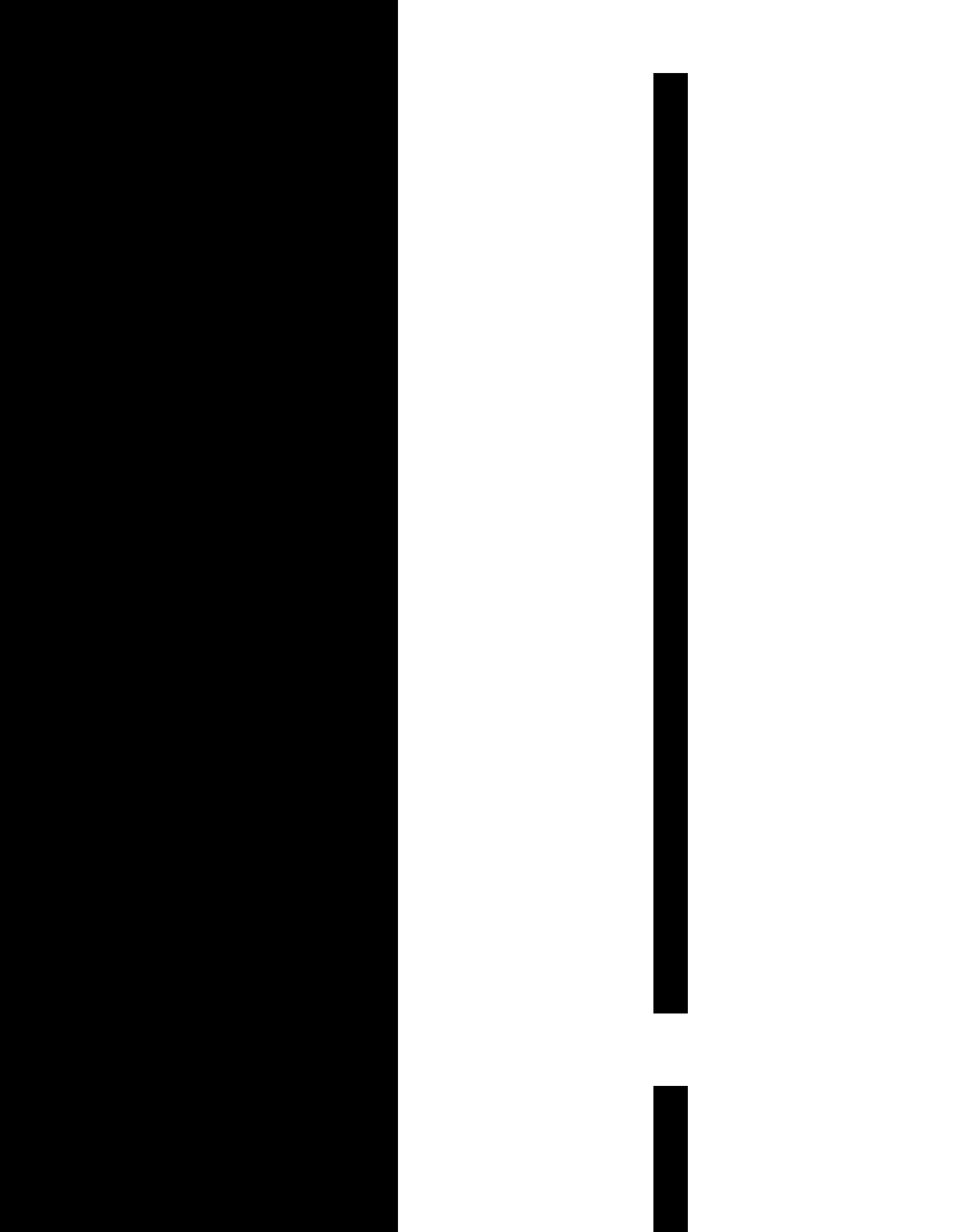


[origini]

anno 15 numero **28** / 6.20

asimmetrie

rivista semestrale dell'Istituto
Nazionale di Fisica Nucleare



asimmetrie

Care lettrici e cari lettori di *Asimmetrie*,

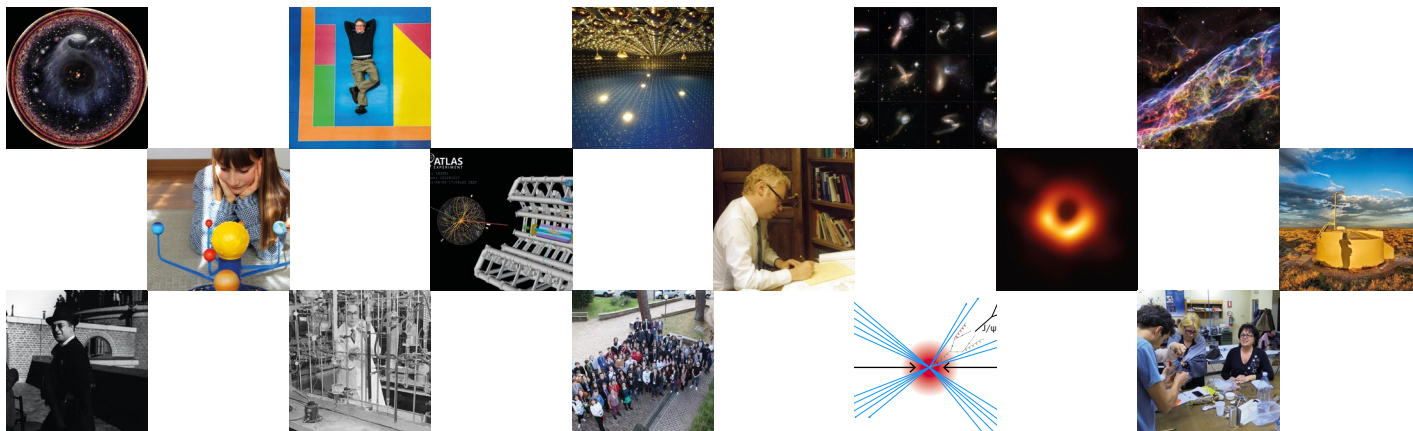
come ha avuto inizio il nostro universo? Come si sono formate le particelle elementari e le forze fondamentali della natura? Quali condizioni hanno portato alla formazione del nostro sistema solare e alla nascita della vita sulla Terra, in particolare, della vita e dell'intelligenza umane? Quello delle origini è senza dubbio l'interrogativo più genuino, antico e fondamentale che l'umanità si sia posta. La molla che ha fatto scattare il meccanismo di produzione di conoscenza, l'abbrivio del processo di ricerca, non solo scientifica.

Oggi, grazie al continuo lavoro di tanti scienziati nel corso dei secoli e all'intuito geniale di alcuni di loro, siamo riusciti a trovare alcune risposte alle domande più sostanziali che ci siamo posti, mentre per altre abbiamo elaborato ipotesi e teorie ancora in attesa di conferma sperimentale.

Ad oggi, l'immagine più antica che abbiamo del nostro universo risale a 380.000 anni dopo il Big Bang, un tempo lontanissimo se si considera che il Big Bang è avvenuto 13,8 miliardi di anni fa, ma non è abbastanza: la sfida è risalire ancora più indietro, nello spazio e nel tempo. E la fisica fondamentale lavora con questo obiettivo in molte direzioni, sia con esperimenti ai grandi acceleratori di particelle, in cui cerchiamo di ricreare le condizioni iniziali del nostro universo per poterle studiare nel dettaglio, sia interrogando il cosmo attraverso i suoi messaggeri come particelle e onde gravitazionali, per conoscerne i meccanismi e ripercorrerne l'evoluzione, fino a ricostruire la sua origine.

Il lavoro da fare per risolvere i tanti interrogativi ancora aperti sulle origini è quindi solo all'inizio, e molte sono le questioni che rimangono aperte. Potrebbe sembrare paradossale, ma più progrediamo nella conoscenza, più sorgono nuove domande che devono trovare una risposta. È con questa consapevolezza che noi fisici procediamo. Questo non ci scoraggia ma, anzi, è la scintilla che alimenta la nostra curiosità, il nostro desiderio di conoscenza, il nostro lavoro di ricerca. Insomma, quello delle origini è il tema fondamentale, che racchiude in sé l'affascinante sintesi tra l'infinitamente piccolo e l'infinitamente grande. Buona lettura.

Antonio Zoccoli
presidente Infn



asimmetrie

Rivista dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Semestrale, anno 15,
numero 28, giugno 2020

direttore editoriale

Antonio Zoccoli, *presidente Infn*

direttore responsabile

Catia Peduto

direttore comitato scientifico

Vincenzo Barone

comitato scientifico

Nicolao Fornengo
Giuliana Galati
Sandra Leone
Paolo Pani
Paolo Valente

redazione

Francesca Mazzotta
Antonella Varaschin

Francesca Cuicchio
(infografiche)

hanno collaborato

Andrea Beraudo, Emanuele Berti,
Luisa Bonolis, Lorenzo Caccianiga,
Stefania De Curtis, Ernesto Di Mauro,
Anouk Haesler, Antonio Masiero,
Francesca Matteucci, Alvise Raccanelli,
Antonio Riotto, Andrea Tesi, Guido
Tonelli, Filippo Maria Zerbi

contatti redazione

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

impaginazione

Mengarelli Grafica Multiservices srl

stampa

Mengarelli Grafica Multiservices srl

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

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

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

Finita di stampare nel mese di giugno 2020.
Tiratura 20.000 copie.

come abbonarsi

L'abbonamento è gratuito.

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

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

sito internet

**Asimmetrie 28 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 di copertina ©Tarik Kizilkaya/iStock //
foto p. 4 ©Nirian/iStock; foto a p. 5 ©The
Yorck Project; foto b p. 6 ©CERN; foto c p. 7
©The SAO/NASA Astrophysics Data System;
foto d p. 8 ©PictureLux/The Hollywood
Archive/Alamy Foto Stock; foto e p. 9 ©Pablo
Carlos Budassi // foto a p. 10 ©Deanne
Fitzmaurice /National Geographic Image
Collection/Alamy Foto Stock; foto b p. 11
©ESA and the Planck Collaboration; fig. d p.
13 ©Asimmetrie-Infn // fig. a p. 14 ©ESA; fig.
b p. 15 ©Archief Fotocollectie Anefo // fig. p.
17 ©Asimmetrie-Infn // foto a p. 18 ©NASA,
ESA; foto b p. 19 ©Illustris Collaboration; foto
c p. 20 ©T. Jarrett, IPAC, Caltech // fig. a p. 21
©Asimmetrie-Infn; foto b p. 22 ©NASA, ESA;
foto c p. 23 ©L. Rezzolla, Goethe University
// fig. a p. 24 ©Asimmetrie-Infn; foto b p. 25
©F. Cuicchio; foto c p. 26 ©L. Weinstein, Ciel
et Espace Photos // fig. a p. 27 ©Asimmetrie-
Infn ; fig. b p. 28 ©Asimmetrie-Infn; foto c p.
29 ©CERN // foto b p. 31 ©AIP Emilio Segrè
Visual Archives, Segre Collection; fig. c p.
32 ©Asimmetrie-Infn // foto a p. 33 ©EHT
Collaboration; fig. b p. 34 ©Asimmetrie-Infn;
fig. c p. 35 ©Asimmetrie-Infn; foto d p. 36
©D. Berry, NASA // foto a p. 37 ©Pierre Auger
Collaboration; foto b p. 38 ©L. Caccianiga;
fig. c p. 39 ©Asimmetrie-Infn, L. Caccianiga,
D. Rozza, I. Maris // foto a p. 40 ©Photograph
by Dorothy Davis Locanthi, courtesy of
AIP Emilio Segrè Visual Archives, Locanthi
Collection; foto b p. 41 ©AIP Emilio Segrè
Visual Archives, Physics Today Collection //
fig. a p. 42 ©Asimmetrie-Infn; foto b p. 43
©Bettmann/Getty Images // foto a p. 44 ©C.
Federici, LNF-INFN; foto b p. 45 ©C. Federici,
LNF-INFN // foto p. 48 ©A. Beraudo.

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

as

28 / 6.20 [origini]

In principio di Guido Tonelli	4	Profondo nero di Emanuele Berti	33
Un'intuizione spettacolare di Antonio Riotto	10	Proiettili dallo spazio di Lorenzo Caccianiga	37
Lo specchio rotto di Paolo Valente	14	[as] radici L'atomo primitivo. di Luisa Bonolis	40
[as] L'asimmetria materia-antimateria.	17	[as] intersezioni La vita emergente. di Ernesto Di Mauro	42
La ragnatela dell'universo di Alvisè Raccanelli	18	[as] selfie Inspyre. di Anouk Haesler	44
Polvere di stelle di Francesca Matteucci	21	[as] traiettorie La strada. di Francesca Mazzotta	46
Dopo la nube il Sole di Filippo Maria Zerbi	24	[as] illuminazioni Con gli occhi del fisico. di Andrea Beraudo	48
Le fantastiche quattro di Stefania De Curtis e Andrea Tesi	27		
Universo su misura di Antonio Masiero	30		



In principio

La fisica come ricerca delle origini

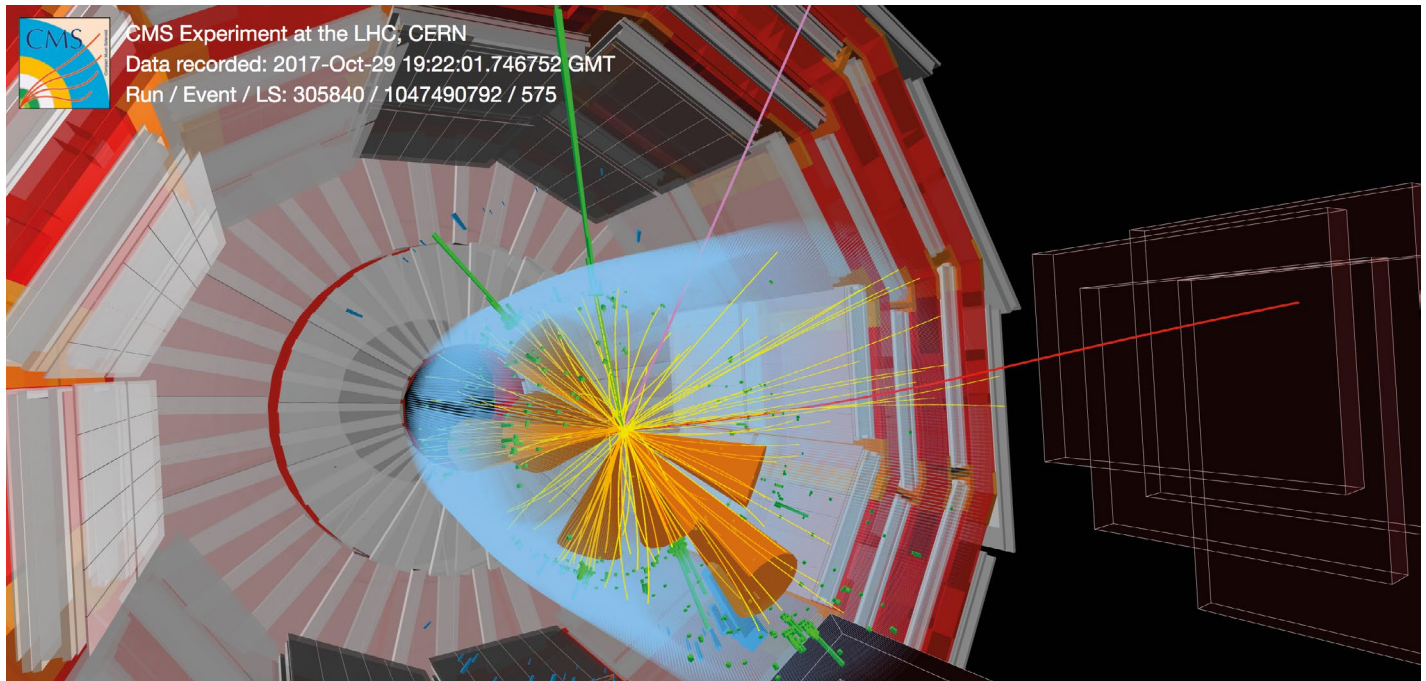
di Guido Tonelli

Il tema delle origini ha affascinato l'umanità fin dalla notte dei tempi. In epoche molto antecedenti le prime civiltà storicamente determinate, nostri lontanissimi progenitori ci hanno lasciato innumerevoli testimonianze di un universo simbolico già incredibilmente complesso. Quei primordiali racconti, raffigurati sulle pareti di caverne o magari recitati dagli anziani per tramandarli ai più giovani, memorizzati al ritmo di un tamburo o di un qualche primitivo strumento musicale, costituiscono la cellula primigenia di tutte le creazioni culturali successive, in particolare quelle più tipicamente umane: religione e scienza, arte e filosofia, musica e poesia. Mettendo ordine nel caotico e pericoloso mondo esterno, si gettano le basi per costruire l'ordine simbolico interno alla comunità. La cultura, gli utensili, i riti e gli strumenti tesi a consolidare la sopravvivenza del gruppo sociale sono il frutto di questa rivoluzione cognitiva. Nasce da qui il grande balzo che ci ha portato a occupare tutte le nicchie ecologiche del pianeta. Con l'avvento della scienza moderna lo scenario naturale in cui si muove l'umanità perde progressivamente i caratteri magici e misteriosi

che l'hanno accompagnato per millenni. Nessun'altra disciplina riuscirà a competere con la mole impressionante di osservazioni prodotte dagli scienziati e con le spiegazioni verificabili e congruenti che da esse si ricavano. Per ricostruire le nostre origini la scienza scandaglierà gli angoli più minuti del reale, si avventurerà nell'esplorazione dei mondi più remoti, dove si incontrano stati della materia così diversi da quelli abituali da fare vacillare persino le menti più brillanti. Nascono così i cambiamenti radicali nel modo di concepire la materia e l'universo che hanno portato a vere e proprie rotture epistemologiche, quelle determinate dalla relatività e dalla meccanica quantistica, talmente profonde che, a distanza di un secolo, le loro implicazioni non ci risultano ancora del tutto chiare. Mentre la ricerca scientifica procede a ritmo incalzante nella comprensione di questioni che erano rimaste oscure per decenni, con le più recenti scoperte si aprono nuovi scenari e sorgono nuove domande. Molte di queste riguardano proprio l'origine dei sistemi materiali e delle loro proprietà.

a.
"La creazione degli astri"
di Michelangelo Buonarroti,
sulla volta della Cappella Sistina.





Consideriamo per esempio la caratteristica più tangibile degli oggetti che ci circondano: la massa. Dopo la nascita della relatività e della meccanica quantistica, i fisici si sono interrogati per decenni sull'origine della massa delle particelle elementari, fino al momento in cui, con la scoperta del bosone di Higgs, tutto è apparso più chiaro. In quell'istante è crollato di colpo il pregiudizio millenario che la massa fosse una proprietà intrinseca della materia. Con l'identificazione del quanto di un nuovo campo di spin zero che pervade l'universo intero, la massa è diventata una proprietà dinamica. Essa è il risultato dell'interazione di ciascuna particella elementare con un campo che modifica il vuoto quantistico provocando la rottura spontanea della simmetria elettrodebole, la separazione tra forza elettromagnetica e forza debole. Interagendo con questo vuoto così speciale, le particelle elementari si differenziano fra loro: più intensa è l'interazione con il campo di Higgs, maggiore è la massa che acquistano. Questa differenza risulta cruciale per consentire le forme di aggregazione stabili della materia che caratterizzano il nostro universo materiale. Rimangono ancora molte questioni irrisolte. Com'è avvenuta in dettaglio la rottura della simmetria elettrodebole? La particella di Higgs è l'unica a spin zero o ce ne sono altre della stessa famiglia che non abbiamo ancora scoperto? È veramente una particella

elementare o si tratta di uno stato composito? E perché è così leggera? Quale meccanismo "protegge" la sua massa dall'instabilità quantistica? Ma il fatto importante è che con la scoperta del bosone di Higgs possiamo non solo comprendere l'origine della massa, ma anche risalire indietro nel tempo fino a un istante molto vicino a quello dell'origine di ogni cosa: la transizione di fase che ha dato massa alle particelle, infatti, è avvenuta 10^{-11} secondi (cioè un centomiliardesimo di secondo) dopo il Big Bang. Altre transizioni fondamentali, per esempio quella che ha separato la gravità da tutto il resto o la forza forte da quella elettrodebole, devono essere avvenute ancora più indietro nel tempo, ma su questi fenomeni, per ora, possiamo fare solo ipotesi. Il discorso sull'origine della massa e sull'origine delle forze ci porta così alla sfida delle sfide: ricostruire l'origine e l'evoluzione dell'universo. La moderna cosmologia nacque poco più di un secolo fa, con un'intuizione folgorante di Albert Einstein. Nel 1917, sviluppando le conseguenze della sua teoria della relatività generale, Einstein postulò un universo curvato spazialmente, statico e omogeneo. Massa ed energia deformano lo spaziotempo e tenderebbero a farlo collassare in un punto, ma se si aggiunge all'equazione un termine positivo che compensa la tendenza alla contrazione, il sistema rimane in equilibrio.

b. Visualizzazione di un evento osservato dall'esperimento Cms in cui viene prodotto un bosone di Higgs assieme a una coppia quark-antiquark top. I principali oggetti rilevati nello stato finale sono elettroni (linee verdi), un muone (linea rossa), jet di adroni (coni arancioni). L'energia trasversale mancante associata a particelle non identificate è rappresentata dalla linea rosa.

Per evitare la fine catastrofica dell'universo, che si sarebbe necessariamente prodotta in presenza della sola gravità, Einstein si inventò un termine arbitrario. Aderendo al pregiudizio di staticità e persistenza in vigore da millenni, introdusse di forza la costante cosmologica, una specie di energia del vuoto, positiva, che tende a spingere tutto verso l'esterno. Saranno Georges Lemaître ed Edwin Hubble a convincerlo, non senza fatica, che le sue equazioni potevano invece descrivere un sistema dinamico, con un'esplicita dipendenza dal tempo, e che in questo modo era possibile dar conto delle osservazioni astronomiche che indicavano una recessione delle galassie. Con questi tre grandi scienziati, accettando l'idea strabiliante che l'universo abbia avuto una nascita, la cosmologia diventava la fisica delle origini del tutto. Ma dovranno passare ancora molti decenni prima di disporre di osservazioni abbastanza precise da

poter sottoporre a verifica sperimentale i vari modelli. Fino a cinquanta o sessanta anni fa la cosmologia era ancora nella sua infanzia e l'idea che potesse fornire prove per una teoria sull'origine dell'universo sarebbe suonata folle. Tutto è cambiato con le misure di precisione del fondo di radiazione cosmica e con le osservazioni astronomiche sempre più accurate realizzate a partire dagli ultimi decenni del secolo scorso. Per dare conto di questi risultati strabilianti si sono dovute ipotizzare grosse componenti di materia oscura ed energia oscura e ha acquistato credibilità la teoria dell'inflazione cosmica: la teoria più convincente per spiegare l'estrema omogeneità e isotropia del fondo di radiazione cosmica, la peculiare distribuzione delle sue minuscole fluttuazioni di temperatura e la grande sorpresa di trovarsi a vivere in un universo a geometria piatta.

c.
Le "Considerazioni cosmologiche sulla teoria della relatività generale" di Albert Einstein (1917), il lavoro che segna l'inizio della moderna cosmologia teorica.

142 Sitzung der physikalisch-mathematischen Klasse vom 8. Februar 1917

Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie.

VON A. EINSTEIN.

Es ist wohlbekannt, daß die Poissonsche Differentialgleichung

$$\Delta \phi = 4\pi K \rho \quad (1)$$

in Verbindung mit der Bewegungsgleichung des materiellen Punktes die Newtonsche Fernwirkungstheorie noch nicht vollständig ersetzt. Es muß noch die Bedingung hinzutreten, daß im räumlich Unendlichen das Potential ϕ einem festen Grenzwerte zustrebt. Analog verhält es sich bei der Gravitationstheorie der allgemeinen Relativität; auch hier müssen zu den Differentialgleichungen Grenzbedingungen hinzutreten für das räumlich Unendliche, falls man die Welt wirklich als räumlich unendlich ausgedehnt anzusehen hat.

Bei der Behandlung des Planetenproblems habe ich diese Grenzbedingungen in Gestalt folgender Annahme gewählt: Es ist möglich, ein Bezugssystem so zu wählen, daß sämtliche Gravitationspotentiale g_{μ} im räumlich Unendlichen konstant werden. Es ist aber a priori durchaus nicht evident, daß man dieselben Grenzbedingungen ansetzen darf, wenn man größere Partien der Körperwelt ins Auge fassen will. Im folgenden sollen die Überlegungen angegeben werden, welche ich bisher über diese prinzipiell wichtige Frage angestellt habe.

§ 1. Die NEWTONsche Theorie.

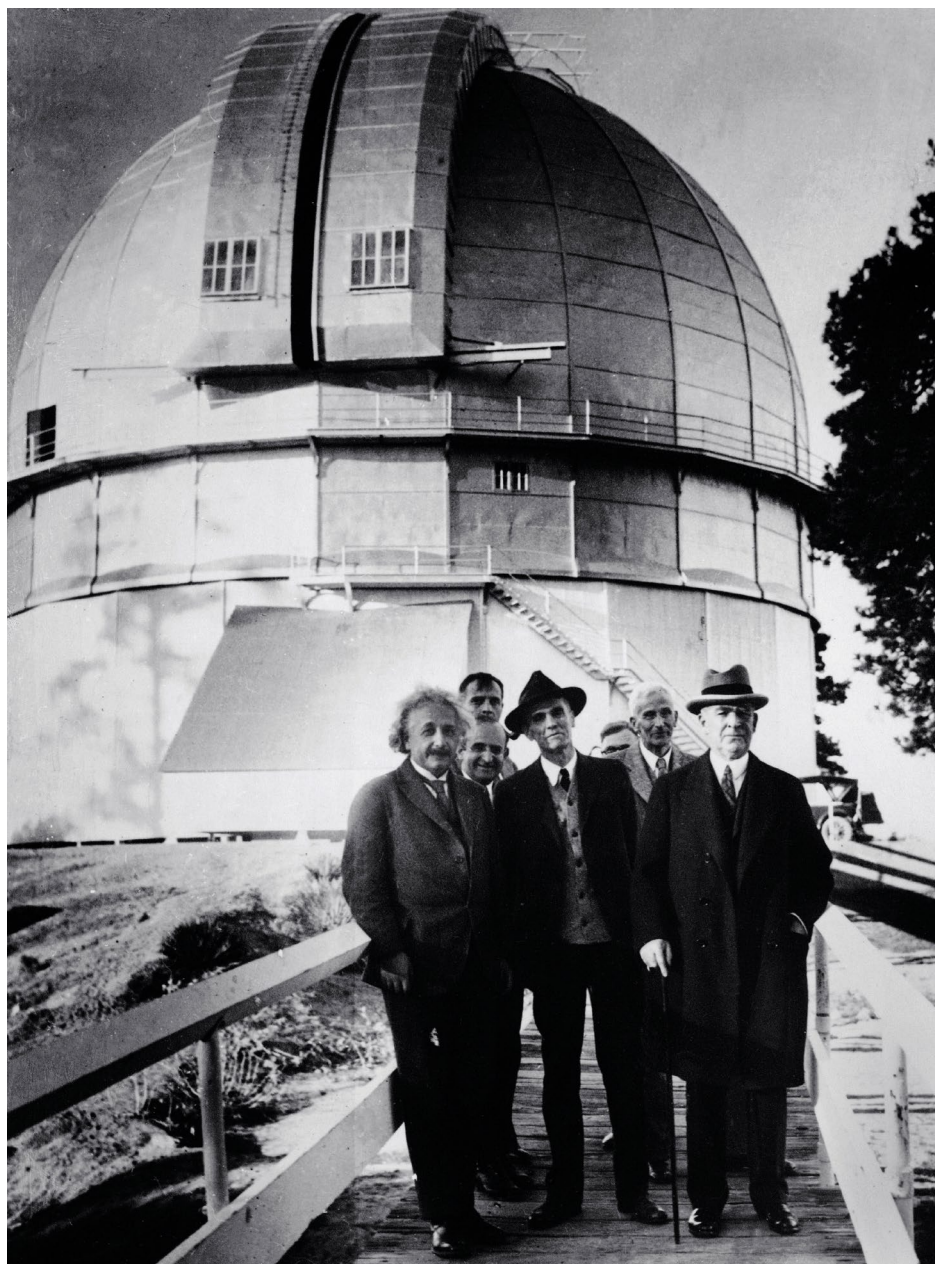
Es ist wohlbekannt, daß die Newtonsche Grenzbedingung des konstanten Limes für ϕ im räumlich Unendlichen zu der Auffassung hinführt, daß die Dichte der Materie im Unendlichen zu null wird. Wir denken uns nämlich, es lasse sich ein Ort im Weltraum finden, um den herum das Gravitationsfeld der Materie, im großen betrachtet, Kugelsymmetrie besitzt (Mittelpunkt). Dann folgt aus der Poissonschen Gleichung, daß die mittlere Dichte ρ rascher als $\frac{1}{r^2}$ mit wachsender Entfernung r vom Mittelpunkt zu null herabsinken muß, damit ϕ im

Ecco perché oggi pensiamo che l'universo nasca dal vuoto e sia il prodotto di una minuscola fluttuazione quantistica espansa a dismisura dal campo di inflazione. Ma per chiudere il cerchio oltre ogni ragionevole dubbio occorre ancora trovare la "pistola fumante", le tracce inequivocabili di quel campo di inflazione che ha spinto tutto in maniera parossistica e che dovrebbe aver lasciato dei segnali nel fondo della radiazione cosmica a microonde.

Con la sintesi tra relatività speciale e meccanica quantistica realizzata da Paul Dirac alla fine degli anni '20 del Novecento abbiamo imparato anche che esiste un intero mondo speculare a quello che conosciamo, il mondo dell'antimateria. Ciò solleva

un'altra domanda a cui non siamo ancora riusciti a dare una risposta. Se tutte le equazioni fisiche sono simmetriche e descrivono in maniera equivalente il comportamento di materia e antimateria, perché il nostro universo è dominato dalla materia? In altri termini, qual è l'origine dell'asimmetria tra materia e antimateria che osserviamo attorno a noi?

Per rispondere a questo quesito sono al lavoro migliaia di ricercatori, a livello sia sperimentale sia teorico, e si tentano strade diverse. La prima ipotizza che ci possano essere sfuggite grandi concentrazioni di antimateria nelle regioni dello spazio ancora inesplorate, gigantesche concentrazioni di antiprotoni e positroni che hanno eluso finora tutte le osservazioni.



d.

Albert Einstein in visita nel 1931 all'Osservatorio di Mount Wilson, in California, dove Edwin Hubble (in terzo piano dietro Einstein) aveva scoperto la recessione delle galassie.



e.
Immagine artistica dell'universo osservabile, con il sistema solare al centro e la radiazione cosmica di fondo in prossimità del bordo.

La seconda linea di ricerca parte dall'ipotesi che tutto sia dovuto a una sottile differenza di comportamento fra materia e antimateria. In effetti, nei processi di decadimento di particelle e antiparticelle si sono trovati diversi meccanismi che danno una leggerissima prevalenza alla materia. Ma queste differenze sono risultate troppo piccole per spiegare quanto osserviamo intorno a noi. Infine, si è prospettata un'altra ipotesi. Tutto potrebbe essere stato determinato da qualcosa di molto speciale che è successo proprio quando il bosone di Higgs ha preso il centro della scena e ha rotto quella perfetta simmetria che dominava l'universo primordiale.

Può essere bastata una leggera preferenza ad accoppiarsi con particelle di materia anziché antiparticelle ed ecco che si produce l'universo materiale che ci circonda. L'asimmetria si sarebbe creata proprio in conseguenza della modalità con cui è avvenuta la transizione di fase.

Il tema delle origini, che è stato, per millenni, oggetto di racconti mitici e riflessioni filosofiche, oggi costituisce un argomento di ricerca che attraversa e pervade l'intera fisica fondamentale, e ci propone narrazioni sul mondo non meno affascinanti di quelle partorite nel corso dei secoli dalla creatività e dalla fantasia degli umani.

Biografia

Guido Tonelli, fisico del Cern e professore dell'Università di Pisa, è uno dei protagonisti della scoperta del bosone di Higgs. Risultato per il quale è stato insignito del Breakthrough Prize for Fundamental Physics, del premio Enrico Fermi e della Medaglia d'onore del Presidente della Repubblica.

DOI: 10.23801/asimmetrie.2020.28.1

Un'intuizione spettacolare

La teoria dell'inflazione cosmica

di Antonio Riotto



a.

Alan Guth sdraiato sull'opera dell'artista Sol LeWitt "Bars of color within squares", al Massachusetts Institute of Technology (Mit).

Diversi anni fa, visitando l'Adler Planetarium di Chicago, mi capitò di imbattermi in qualcosa che catturò la mia attenzione: un semplice blocco note a righe dalle pagine ingiallite custodito quasi religiosamente all'interno di una spessa teca di vetro. In evidenza la pagina dove, la notte del 6 dicembre 1979, Alan Guth scrisse quelle due semplici parole, *spectacular realization*, intuizione spettacolare, che hanno segnato la nascita di una teoria elegante, densa di conseguenze osservative, che ha rivoluzionato il nostro modo di concepire l'origine dell'universo: la teoria dell'inflazione cosmica.

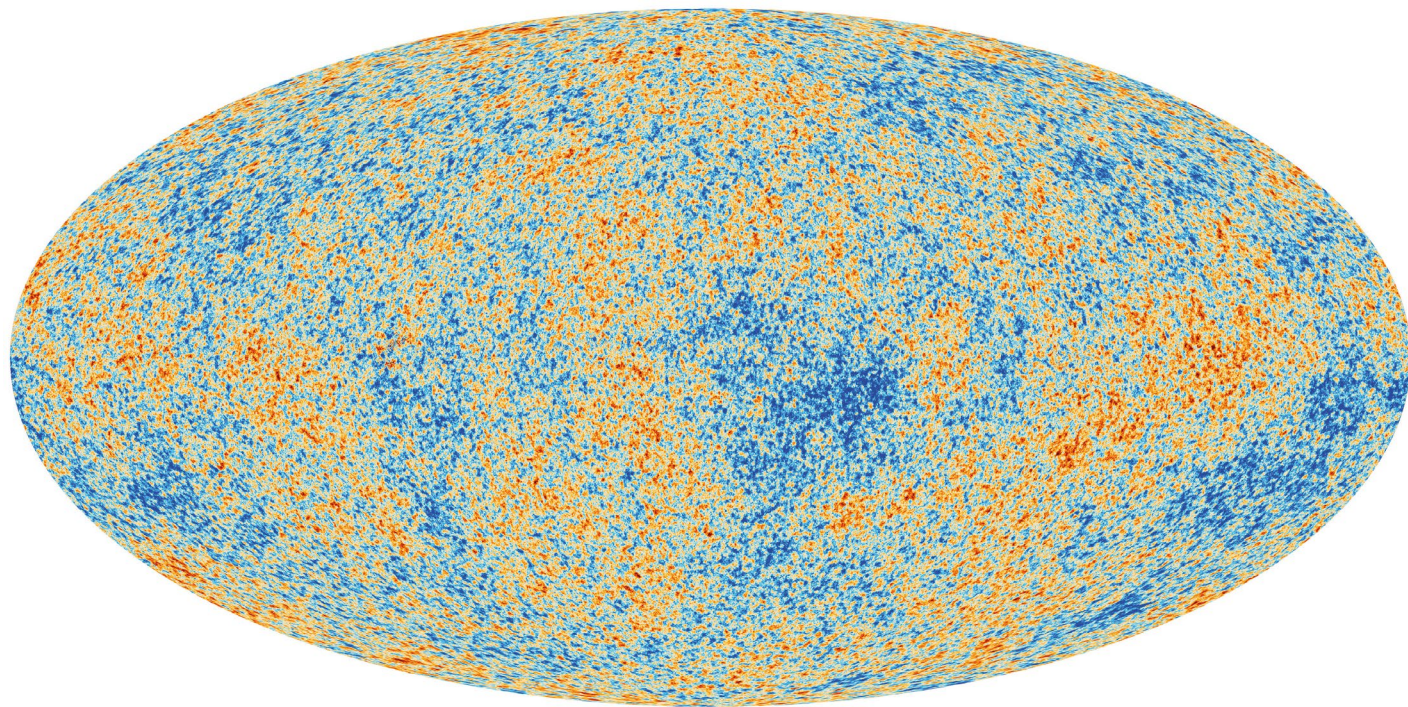
Guth ipotizzò un evento sbalorditivo e di durata brevissima. Un evento durante il quale l'universo si espanse in maniera rapidissima e accelerata, aumentando in un battito di ciglia cosmico le sue dimensioni di un fattore almeno 10^{30} : da scale microscopicamente piccole a scale cosmologicamente gigantesche.

Un evento avvenuto ai primordi e le cui predizioni osservative ci permettono di spingere la nostra conoscenza dell'universo fino a circa 10^{-36} secondi dopo il Big Bang. Che cosa aveva spinto quel giovane ricercatore a ipotizzare qualcosa di così temerario? Alla fine degli anni '70 il cosiddetto modello cosmologico standard dominava la scena. Basato sul fatto che l'universo avesse avuto un'origine, il Big Bang, esso era in grado di spiegare non solo l'espansione dell'universo a partire da una fase primordiale popolata da un gas ad altissima densità e temperatura, ma anche la nucleosintesi primordiale (ovvero la formazione degli elementi chimici leggeri avvenuta dieci secondi dopo il Big Bang), la legge di Hubble, secondo la quale le galassie si espandono tanto più velocemente quanto più sono lontane, e la radiazione cosmica di fondo. Misurata per la prima volta nel 1965, la radiazione cosmica di fondo è una radiazione elettromagnetica – un fondo a

microonde, residuo della fase caldissima attraversata dall'universo durante i suoi primissimi istanti di vita – estremamente uniforme e isotropa: in qualsiasi direzione del cielo la si guardi la sua temperatura è la stessa a meno di piccole disomogeneità dell'ordine di una parte su centomila. Nonostante il suo acclamato successo, il modello cosmologico standard era in grado di spiegare le osservazioni solo a patto di assumere che alcuni parametri della teoria fossero fissati con una precisione che aveva dell'inverosimile. La densità di energia iniziale dell'universo doveva essere prossima a un certo valore critico con una precisione di una parte su 10^{60} . Per rendersi conto di quanto implausibile ciò sia, dovrete immaginare di voler misurare la massa contenuta nel nostro universo senza tralasciare neanche la massa di una cellula umana. Se invece si ipotizza una fase di accelerazione inflazionaria, la

densità di energia dell'universo converge rapidissimamente verso quel valore critico, a prescindere dalle condizioni iniziali del nostro universo al momento del Big Bang. Ma la teoria inflazionaria non è solamente il Mr. Wolf di tarantiniana memoria della cosmologia: oltre a risolvere problemi, infatti, è anche densa di implicazioni e ricca di conseguenze osservabili e verificabili. L'inflazione elimina le tracce di qualsiasi proprietà che l'universo aveva prima di essa. In questo senso, l'inflazione rende i concetti di origine dell'universo e del Big Bang superflui: semplicemente non potremo mai verificare che cosa sia avvenuto prima dell'inflazione. Ad esempio, qualsiasi informazione su quali particelle popolassero l'universo dopo il Big Bang ma prima dell'inflazione viene necessariamente persa perché la loro densità viene ridotta a valori infinitesimi dall'espansione esponenziale.

b.
La mappa della radiazione cosmica di fondo osservata dall'esperimento Planck. I diversi colori corrispondono a piccolissime anisotropie della temperatura.

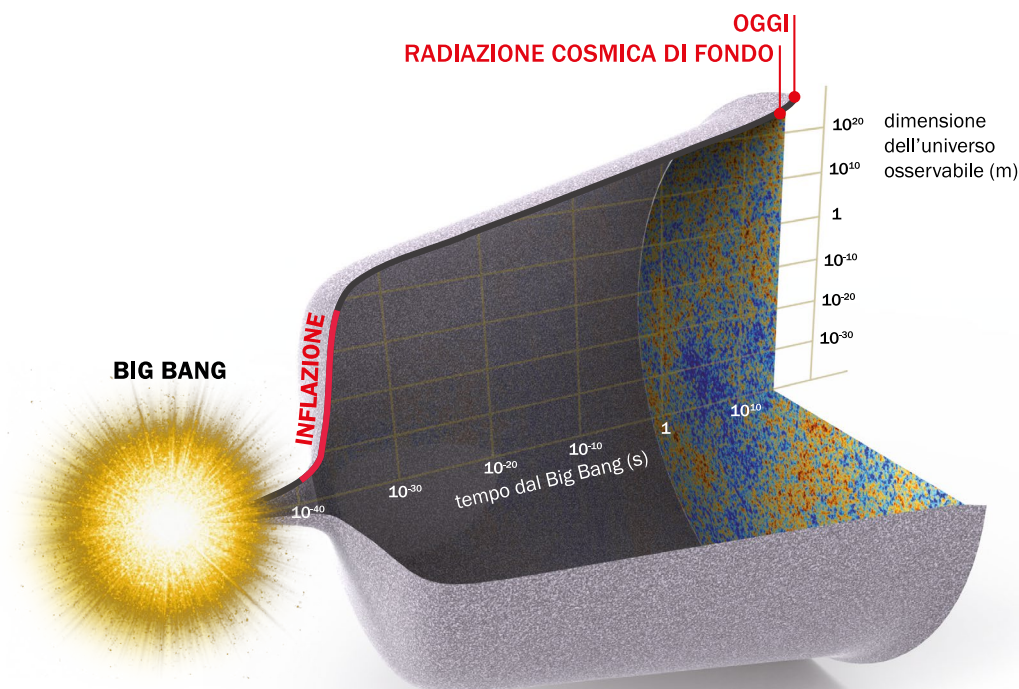


Eppure, la predizione più sbalorditiva del paradigma inflazionario è un'altra: quella che consente di spiegare la struttura su grande scala che osserviamo nel nostro universo, ad esempio galassie, ammassi di galassie, e le minuscole anisotropie della temperatura della radiazione cosmica di fondo. Poiché l'inflazione opera durante i primissimi istanti dell'evoluzione dell'universo, quando le energie sono elevatissime rispetto a quelle misurate nella vita quotidiana, le leggi della fisica che ne governano la dinamica riguardano l'infinitamente piccolo e quindi la fisica quantistica. Se da un lato è proprio l'energia del vuoto quantistico che causa l'espansione accelerata durante la fase inflazionaria, per comprendere la relazione con la struttura su grande scala, consideriamo un universo in espansione e osserviamo che cosa accade su distanze microscopiche. Nel vuoto quantistico, coppie di particelle vengono create e distrutte in continuazione grazie al principio di indeterminazione di Heisenberg. Immaginiamo però ora di aumentare rapidissimamente il volume di tale universo per mimare ciò che succede durante l'inflazione.

Invece di annichilirsi, c'è una probabilità non nulla che le particelle si separino di una distanza tale da rendere l'annichilazione impossibile. Un osservatore all'interno di questo universo vedrà quindi delle particelle prodotte dal nulla. Questo effetto quantistico si manifesta inizialmente su piccolissime scale di lunghezza ma, grazie all'inflazione, la fluttuazione viene amplificata fino a scale gigantesche, addirittura cosmologiche. Queste disomogeneità possono poi evolvere sotto l'azione attrattiva della gravità per dare vita alla distribuzione di tutte le strutture osservate nell'universo, così come alle anisotropie della radiazione cosmica di fondo. Inoltre, l'inflazione prevede anche che quanto più l'espansione dell'universo è accelerata, tanto più le perturbazioni generate devono essere invarianti per scala, ovvero la loro ampiezza non deve dipendere dalla scala di lunghezza a cui le si osserva. Questa predizione è stata recentemente verificata e confermata dal satellite europeo Planck, che ha misurato con grandissima precisione la distribuzione angolare delle anisotropie della radiazione cosmica di fondo.

c.
L'esperimento Bicep2, in Antartide, il cui successore (Bicep3) avrà lo scopo di evidenziare nella radiazione cosmica di fondo le possibili tracce di onde gravitazionali primordiali.





d. Rappresentazione schematica dell'evoluzione dell'universo. Durante l'inflazione le dimensioni dell'universo sono aumentate in maniera esponenziale di un fattore 10^{30} .

E le sorprese non sono ancora finite. Sappiamo che secondo la teoria della relatività generale lo spaziotempo non è un “tessuto” statico come nella teoria della gravitazione universale di Newton, bensì è dinamico, si deforma a seconda di ciò che l'universo stesso contiene. Un'altra predizione della teoria inflazionaria è dunque quella di amplificare le increspature dello spaziotempo provenienti dalle fasi primordiali dell'universo. Queste si manifestano sotto forma di onde gravitazionali che sono così potenzialmente osservabili. La prossima generazione di esperimenti sulla radiazione cosmica di fondo ha come obiettivo primario confermare la loro esistenza misurando i cambiamenti che tali onde gravitazionali potrebbero aver provocato nella radiazione cosmica di fondo. Questo ci aiuterebbe anche a gettare luce sulle teorie oltre il modello standard delle interazioni fondamentali che descrivono i fenomeni fisici a grandissima energia, ad esempio la teoria delle stringhe, la teoria più attraente al giorno d'oggi per unificare la forza di gravità alle altre forze note in natura.

L'inflazione potrebbe persino essere il responsabile ultimo della materia oscura, la componente di materia non ordinaria finora rilevata solo grazie ai suoi effetti gravitazionali e che compone circa un quarto del nostro universo. La scoperta, nel 2015, delle onde gravitazionali generate dalla fusione di due buchi neri di massa circa trenta volte la massa

del Sole non è solo stata l'ennesima prova della validità della teoria einsteiniana della relatività generale, ma ha anche spronato i cosmologi a ipotizzare che la materia oscura possa essere composta da buchi neri primordiali formatisi nelle fasi iniziali dell'universo. Essi potrebbero formarsi proprio grazie a quelle fluttuazioni quantistiche prodotte durante l'inflazione, rafforzando così l'idea che ciò che l'universo contiene debba la sua origine al mondo dei quanti.

La teoria dell'inflazione cosmica rappresenta dunque uno degli esempi più eclatanti in cui il mondo della meccanica quantistica dà il meglio di sé. Il fatto che non solo si possa immaginare e verificare un fenomeno alle origini dell'universo, ma che tale predizione possa essere corretta è una delle più affascinanti dimostrazioni del potere della mente umana.

Biografia

Antonio Riotto è professore ordinario di cosmologia presso l'Università di Ginevra. Si occupa di fisica oltre il modello standard con particolare attenzione agli aspetti cosmologici e astroparticellari.

Link sul web:

<https://ned.ipac.caltech.edu/level5/Peebles1/frames.html>
<https://www.worldsciencefestival.com/2015/07/cosmological-inflation-primer/>
https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Planck/

DOI: 10.23801/asimmetrie.2020.28.2

Lo specchio rotto

L'origine dell'asimmetria tra materia e antimateria

di Paolo Valente

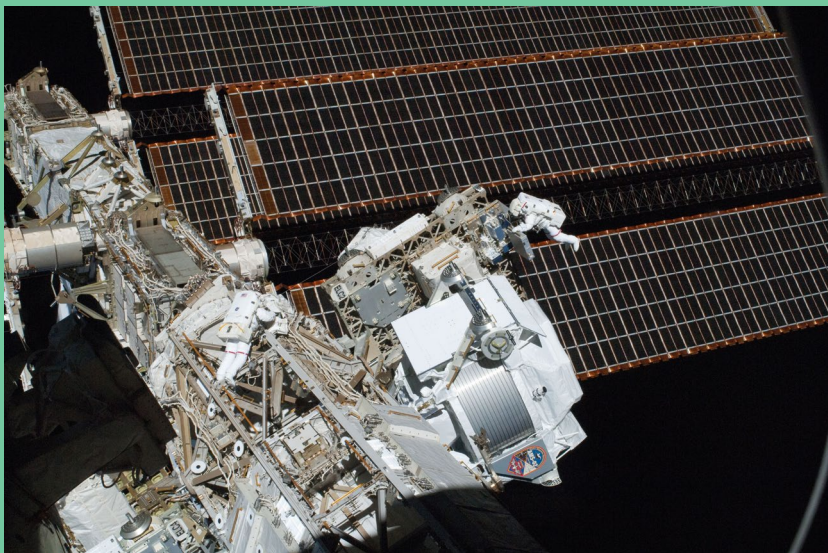
Uno dei più importanti successi della fisica delle particelle è stato la previsione e l'osservazione dell'antimateria, ossia della controparte della materia che costituisce il mondo che conosciamo, fatta di particelle con le medesime proprietà come massa e spin, ma di carica opposta. Quando si parla di carica, ci si riferisce a un concetto generalizzato che non comprende solo la carica elettrica, ma anche quelle debole e di colore, legate rispettivamente alle interazioni debole e forte. L'operazione di inversione della carica (o coniugazione di carica, C) non è una nozione puramente matematica. Infatti, poco dopo che Dirac ne aveva prevista l'esistenza, l'antiparticella dell'elettrone (chiamata positrone) fu osservata sperimentalmente nelle interazioni dei raggi cosmici.

Quando una particella interagisce con la sua antiparticella avviene un'annichilazione, cioè un'interazione che converte entrambe in radiazione elettromagnetica. L'esito dell'incontro tra materia e antimateria non è solo spettacolare, ma costituisce un prezioso strumento di scoperta con gli acceleratori, grazie alla creazione di uno stato intermedio neutro da cui è possibile che si generino nuove particelle.

Il modello standard delle particelle elementari, che con grande precisione descrive il comportamento delle particelle di materia (quark e leptoni) e di quelle portatrici delle interazioni (fotoni, bosoni W e Z, gluoni), ci dice che il numero barionico, B, ovvero il bilancio complessivo tra le particelle composte di quark e le loro antiparticelle, si conserva in tutte le interazioni.

Il modo in cui materia e antimateria emergono dalla teoria quantistica e relativistica che descrive il mondo subatomico ha indotto i fisici a formulare un'ipotesi molto precisa: nell'istante iniziale dell'universo, il Big Bang, da cui ha preso avvio la sua espansione, materia e antimateria sarebbero state create in quantità esattamente uguali, a partire da uno stato di pura energia. Non solo questa ipotesi è molto ragionevole ed elegante, ma in ogni caso una qualsiasi asimmetria iniziale sarebbe comunque stata fortemente diluita da un altro drammatico evento: l'inflazione, ovvero un periodo di espansione fortemente accelerata nelle prime fasi di vita dell'universo (vd. p. 10, ndr).

Tuttavia, l'universo che è accessibile ai nostri telescopi non appare affatto composto da uguali quantità di materia e antimateria. Se così fosse, dovremmo osservare degli intensi flussi di radiazione dalle zone in cui queste si incontrano, producendo una grande quantità di annichilazioni. L'esistenza di antimateria primordiale potrebbe essere dimostrata in modo inequivocabile dall'osservazione di antinuclei di elementi leggeri, come ad esempio l'antielio. Questi antinuclei, insieme ad antiprotoni e positroni, sono oggetto dell'incessante ricerca dell'esperimento Ams-02, un vero e proprio cacciatore di antimateria installato sulla Stazione Spaziale Internazionale, sul quale ha recentemente lavorato l'astronauta Luca Parmitano per portare a termine una manutenzione che estenderà la presa dati fino al 2028.



a.
L'astronauta dell'Esa Luca Parmitano (al centro) e l'astronauta della Nasa Drew Morgan (a sinistra) al lavoro sull'Alpha Magnetic Spectrometer, Ams.

b.
Andrej Sacharov e la moglie
Elena Bonner ad Amsterdam
nel 1989.



Se, dunque, lo stato iniziale è perfettamente simmetrico, dove è finita tutta l'antimateria? In realtà la domanda è ancora più profonda e riguarda la nostra stessa esistenza. Quello che occorre spiegare è, infatti, la cosiddetta "bariogenesi", ovvero il processo con il quale, al diminuire della temperatura dell'universo, i quark (liberi nelle condizioni di altissima energia dell'universo primordiale) si sono aggregati in protoni e neutroni, i quali hanno dato luogo ai nuclei e agli atomi che osserviamo oggi. Se però si parte da uno stato iniziale con uguale numero di particelle e antiparticelle, la conservazione del numero barionico non può che portare, dopo la loro completa annichilazione, a un universo completamente vuoto, fatta eccezione per una radiazione sempre più fredda al procedere dell'espansione. La questione fondamentale è: qual è il meccanismo che ha impedito alla materia di scomparire assieme all'antimateria in un unico lampo di radiazione primordiale?

Nel 1967 Andrej Sacharov – fisico teorico sovietico, e premio Nobel per la pace per il suo impegno per la libertà e i diritti civili – formalizzò tre condizioni necessarie a produrre l'universo così come lo osserviamo.

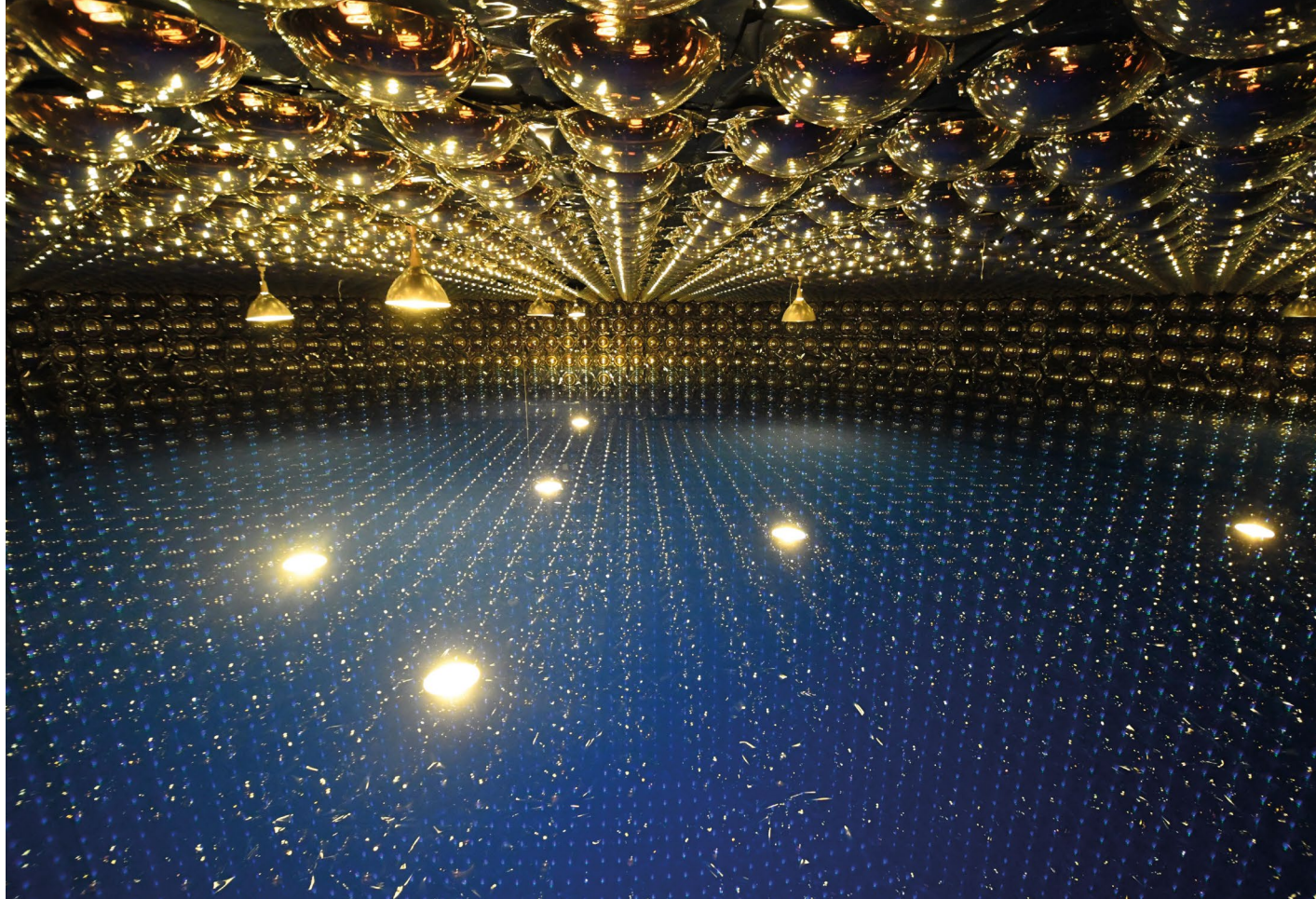
Prima di tutto è necessario un processo di interazione che violi la conservazione del numero barionico, come per esempio il decadimento del protone in un pione neutro e un positrone, in cui il numero barionico diminuisce di una unità. La probabilità di un tale processo deve essere tale da produrre la frazione attualmente osservata di circa un barione superstite per ogni miliardo di fotoni.

L'ipotesi è che un tale processo sia avvenuto a una scala di energia e temperatura molto alta, oltre il limite di validità del modello standard, alla quale si può per esempio ipotizzare che le interazioni forte, debole ed elettromagnetica fossero unite in un'unica interazione: l'idea alla base della teoria della grande unificazione (Gut), tra gli altri proposta da Sheldon Glashow e Abdus Salam quasi contemporaneamente allo sviluppo del modello standard.

La seconda condizione è che la variazione del numero barionico così prodotta non venga perfettamente compensata dal corrispondente processo per le antiparticelle, ovvero dal decadimento di un antiprotone in un pione neutro e in un elettrone. La probabilità della reazione deve essere allora diversa per barioni e antibarioni, cioè è richiesta la violazione della simmetria CP, l'invarianza rispetto all'operazione che combina l'inversione spaziale (parità, P) e la coniugazione di carica. La terza e ultima condizione richiede che il processo che produce un eccesso di materia sull'antimateria non venga compensato dalla reazione inversa. Questo può avvenire se la reazione è lenta rispetto all'espansione dell'universo che fa scendere la sua temperatura al di sotto della scala della Gut. La violazione di CP dapprima osservata sperimentalmente (da James Christenson, James Cronin, Val Fitch e René Turlay, 1964) nei decadimenti dei kaoni neutri K^0 , mesoni composti di coppie di quark e antiquark strange, è stata confermata dopo quasi 40 anni anche nelle particelle che contengono il quark beauty (dagli esperimenti Babar negli Stati Uniti e Belle in Giappone) e solo nel 2019 nei mesoni composti di quark charm (dall'esperimento Lhcb, al Cern di Ginevra). Una conferma spettacolare di un effetto minuscolo, ottenuta grazie all'estrema precisione degli esperimenti dell'Lhc.

Recentissimi risultati dell'esperimento T2K indicano una differenza di comportamento tra materia e antimateria anche nella famiglia dei leptoni. L'esperimento ha infatti misurato una differenza nella probabilità che neutrini e antineutrini si trasformino gli uni negli altri.

Il meccanismo con il quale la simmetria CP è violata fu spiegato negli anni '70 da Nicola Cabibbo, Makoto Kobayashi e Toshihide Maskawa (Ckm), tuttavia l'entità della violazione indotta dal meccanismo Ckm è troppo piccola (di diversi ordini di grandezza!) per giustificare l'abbondanza di barioni rispetto ai fotoni, osservata nell'universo. Ci devono dunque essere altri processi che violano la simmetria CP non compresi nel modello standard.



In questi decenni sono stati sviluppati numerosi modelli per la bariogenesi, ma una classe in particolare ha destato grande interesse, quella che la collega al meccanismo che ha prodotto l'analoga asimmetria tra leptoni e antileptoni. Il modello standard, infatti, conserva i numeri leptonici relativi alle tre famiglie di leptoni (elettrone, muone e tau). Rispetto al caso barionico c'è tuttavia una notevole differenza: l'osservazione del fenomeno dell'oscillazione dei neutrini ha già indicato in modo chiaro la necessità di un'estensione della teoria che non conservi i numeri leptonici.

Un modo semplice per violare la conservazione del numero leptonico è quello di aggiungere uno o più neutrini pesanti corrispondenti alle tre famiglie di leptoni del modello standard. Un tale neutrino pesante avrebbe l'interessante caratteristica di essere un fermione di Majorana, cioè l'antiparticella di se stesso, così che i suoi decadimenti sarebbero quelli che generano l'eccesso di leptoni.

La variazione di numero barionico potrebbe allora essere prodotta dagli stessi processi che producono una variazione del numero leptonico. Le nuove interazioni che, alla scala della Gut, collegano quark e leptoni, rispettano una nuova simmetria "globale", che conserva solo la differenza tra numero barionico e leptonico. Un tale scenario può essere realizzato da numerosi modelli, i cui

dettagli determinano l'ammontare di violazione di CP e l'asimmetria quark-antiquark che a sua volta dovrebbe determinare il rapporto corretto tra numero di barioni e fotoni. Una conseguenza dell'esistenza di un neutrino di Majorana verificabile senza accedere alle enormi energie della Gut sarebbe la possibilità (estremamente rara) di osservare uno speciale tipo di decadimento nucleare, detto doppio beta senza l'emissione di neutrini, nel quale due nucleoni decadono emettendo ciascuno un elettrone ma senza emettere i corrispondenti neutrini. Esperimenti come Cuore e Gerda stanno attualmente cercando di verificare questa ipotesi nel silenzio cosmico garantito dal laboratorio sotterraneo del Gran Sasso. Come per gli eventi che violano la simmetria CP, anche in questo caso la comprensione dell'asimmetria tra materia e antimateria passa dallo studio di processi estremamente rari.

c.

Super Kamiokande è un rivelatore di neutrini sotterraneo installato a Kamioka in Giappone che nell'ambito dell'esperimento T2K, Tokai to Kamioka, rivela i neutrini prodotti a 295 chilometri di distanza dal complesso di acceleratori di Jparc a Tokai.

Biografia

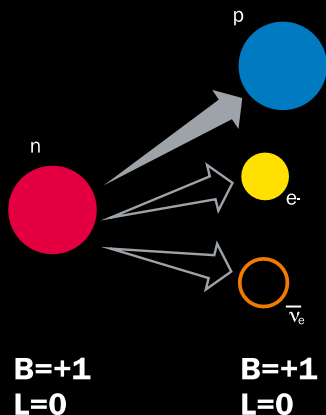
Paolo Valente è dirigente di ricerca dell'Infn presso la sezione di Roma e componente del Consiglio Direttivo dell'Infn. Lavora a esperimenti al Cern di Ginevra e ai Laboratori Nazionali di Frascati. Ha proposto ed è co-portavoce dell'esperimento Padme per la ricerca di particelle di materia oscura leggera.

DOI: 10.23801/asimmetrie.2020.28.3

[as]

L'asimmetria materia-antimateria.

MODELLO STANDARD



decadimento beta

Il neutrone si trasforma in un protone emettendo un elettrone e un antineutrino.

Il numero barionico complessivo rimane $B=+1$.

Il numero leptonico complessivo rimane $L=0$ (perché viene emesso un antineutrino assieme a un elettrone).

NUMERO BARIONICO, B



Barioni
Composti da 3 quark.
Numero barionico $B=+1$



simmetria C



Antibarioni
Composti da 3 antiquark.
Numero barionico $B=-1$



Mesoni
Composti da una coppia di quark-antiquark.
Numero barionico $B=0$

NUMERO LEPTONICO, L



Leptoni
hanno numero leptonico $L=+1$

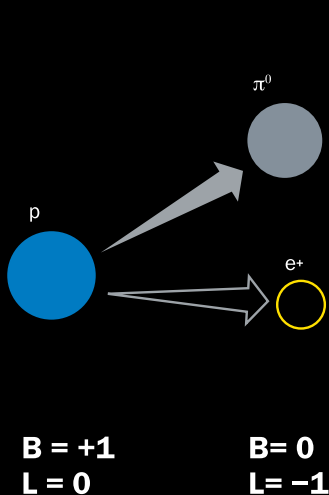


simmetria C



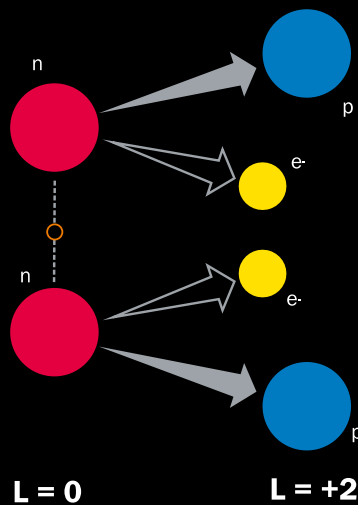
Antileptoni
hanno numero leptonico $L=-1$

OLTRE IL MODELLO STANDARD



decadimento del protone

L'unica possibilità perché il protone decada è la trasformazione di quark in leptoni, che viola simultaneamente la conservazione del numero barionico e leptonico. Questo potrebbe avvenire tramite l'accoppiamento con una particella intermedia X, molto pesante, mediatrice di un'interazione che si manifesta a una scala di energia elevata, tipica delle teorie Gut. La non conservazione del numero barionico è la prima condizione di Sacharov.

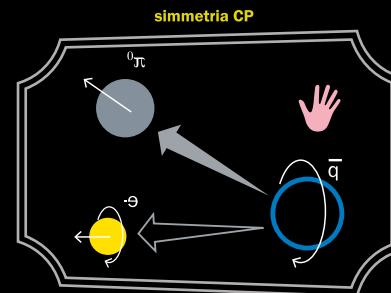
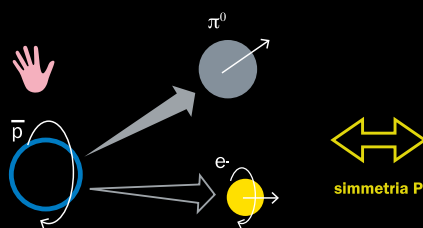
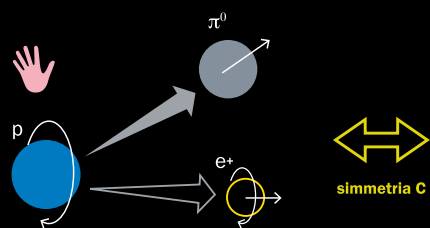


decadimento doppio beta senza neutrini

Se si verificano due decadimenti beta contemporaneamente, dovrebbero essere emessi due (anti)neutrini. Tuttavia se il neutrino è una particella di Majorana, ovvero coincide con la propria antiparticella, può essere emesso da un neutrone e riassorbito dall'altro rendendo possibile il doppio decadimento senza emissione di neutrini. Questa reazione viola di due unità la conservazione del numero leptonico.

ANTIPARTICELLE ALLO SPECCHIO

Nel modello standard le particelle di materia, quark e leptoni, sono «sinistrorse», cioè hanno lo spin opposto alla direzione del moto, mentre quelle di antimateria, cioè antiquark e antileptoni, sono «destrorse», cioè hanno lo spin che punta nella direzione del moto.



Anche per un processo che viola il numero barionico, scambiando tutte le particelle con le rispettive antiparticelle (coniugazione di carica C) otteniamo variazioni di B uguali e di segno opposto, che quindi si compensano.

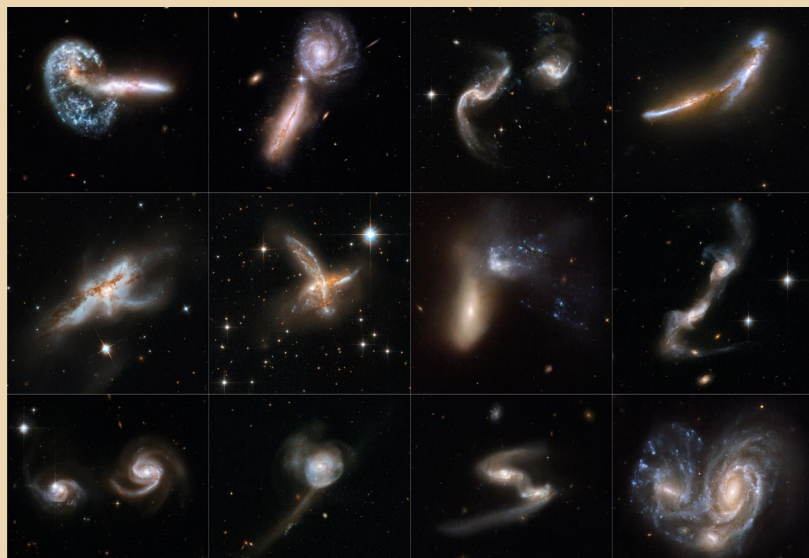
Poiché nel modello standard esistono solo leptoni sinistrorsi e antileptoni destrorsi, è anche necessario invertire la destra con la sinistra (simmetria di parità P).

Lo specchio CP applica contemporaneamente le due trasformazioni. Per ottenere uno sbilanciamento di numero barionico è necessario che ci sia una violazione di questa simmetria. Questa è la seconda condizione di Sacharov.

La ragnatela dell'universo

La formazione delle strutture cosmiche

di Alvise Raccanelli



a.
Strutture galattiche.

Se osserviamo l'universo attorno a noi, vediamo che la sua struttura è tutt'altro che uniforme: su scale più piccole ci sono le galassie, le quali sono aggregate a formare gli ammassi di galassie, mentre sulle scale più grandi la materia forma lunghi filamenti che compongono quello che viene chiamato "cosmic web", la ragnatela cosmica. Queste strutture cosmiche costituiscono la spina dorsale dell'universo. Le strutture cosmiche a larga scala si formarono in una delle prime fasi di vita dell'universo, durante la quale un meccanismo detto inflazione cosmologica (vd. p. 10, ndr) ha stirato le minuscole fluttuazioni quantistiche presenti a quel tempo fino a farle diventare molto grandi, producendo in questo delle anisotropie, o irregolarità, nella distribuzione di materia nell'universo, altrimenti molto uniforme. Queste irregolarità rappresentano i semi primordiali per la nascita delle strutture, che avverrà molto tempo dopo. Nel frattempo, sempre nei primi istanti di vita dell'universo, radiazione e materia erano tra di loro accoppiate a formare un fluido caldo e denso, opaco. L'universo, a causa della sua espansione, si è successivamente raffreddato e rarefatto, fino al punto in cui elettroni e protoni hanno formato i primi atomi neutri: in questo modo materia e radiazione si sono separate, e la radiazione così liberata ha potuto viaggiare fino a noi come radiazione cosmica di fondo (Cmb), che oggi osserviamo con una temperatura di circa 3 kelvin (-270°C). Questa temperatura, molto uniforme in tutte le direzioni, presenta però delle

piccole variazioni, di una parte su centomila: le variazioni sono dovute proprio alle piccole irregolarità presenti nell'universo primordiale e sono testimoni della presenza di quei semi che hanno cominciato a formare gli ammassi di galassie e le galassie grazie alla gravità. Le zone leggermente più dense hanno attratto la materia dalle zone un po' meno dense, e questo processo, chiamato "instabilità gravitazionale", è proseguito fino a tempi recenti, producendo le strutture cosmiche che osserviamo.

Una componente fondamentale nella formazione delle strutture e della loro evoluzione è la materia oscura, la cui esistenza è nota dai suoi effetti gravitazionali ma che fino ad ora è sfuggita a una comprensione più profonda. L'esistenza della materia oscura fu inizialmente ipotizzata negli anni '30 da Fritz Zwicky, per spiegare la discrepanza tra la quantità di materia osservata negli ammassi di galassie (dedotta dalla luce che essa produce) e la massa calcolata come necessaria per spiegare i moti delle galassie all'interno degli ammassi, che era di gran lunga superiore a quella della materia visibile.

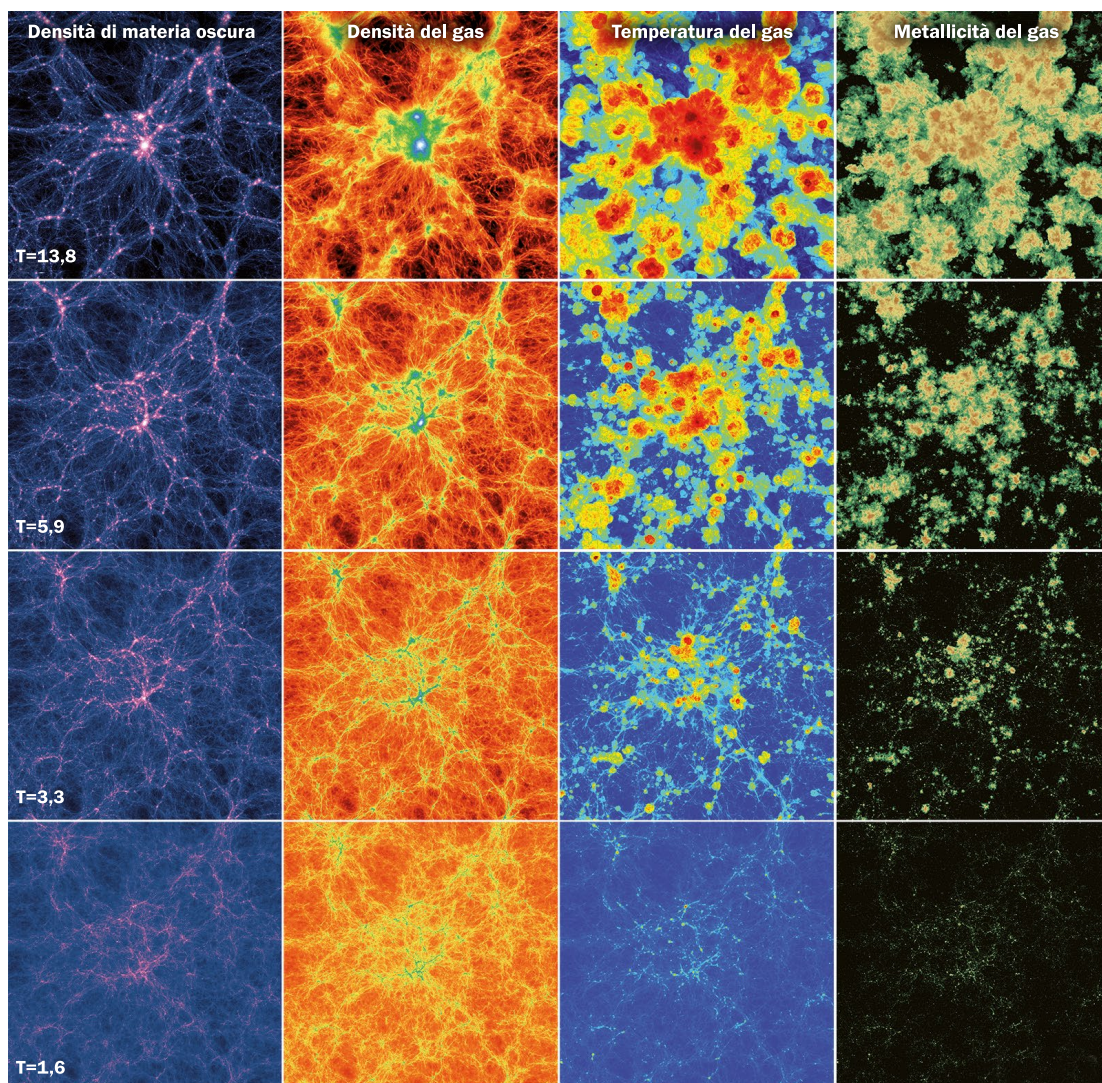
È però solo in tempi più recenti, a partire dai lavori di Vera Rubin, Kent Ford e Ken Freeman negli anni '70, che la comunità scientifica ha accumulato evidenza dell'esistenza di una componente di materia non visibile, anche su scale più piccole come le galassie. Da quel momento la comprensione di natura, origine e abbondanza della materia oscura è diventato uno dei principali campi di studio di cosmologi, astrofisici e fisici delle particelle.

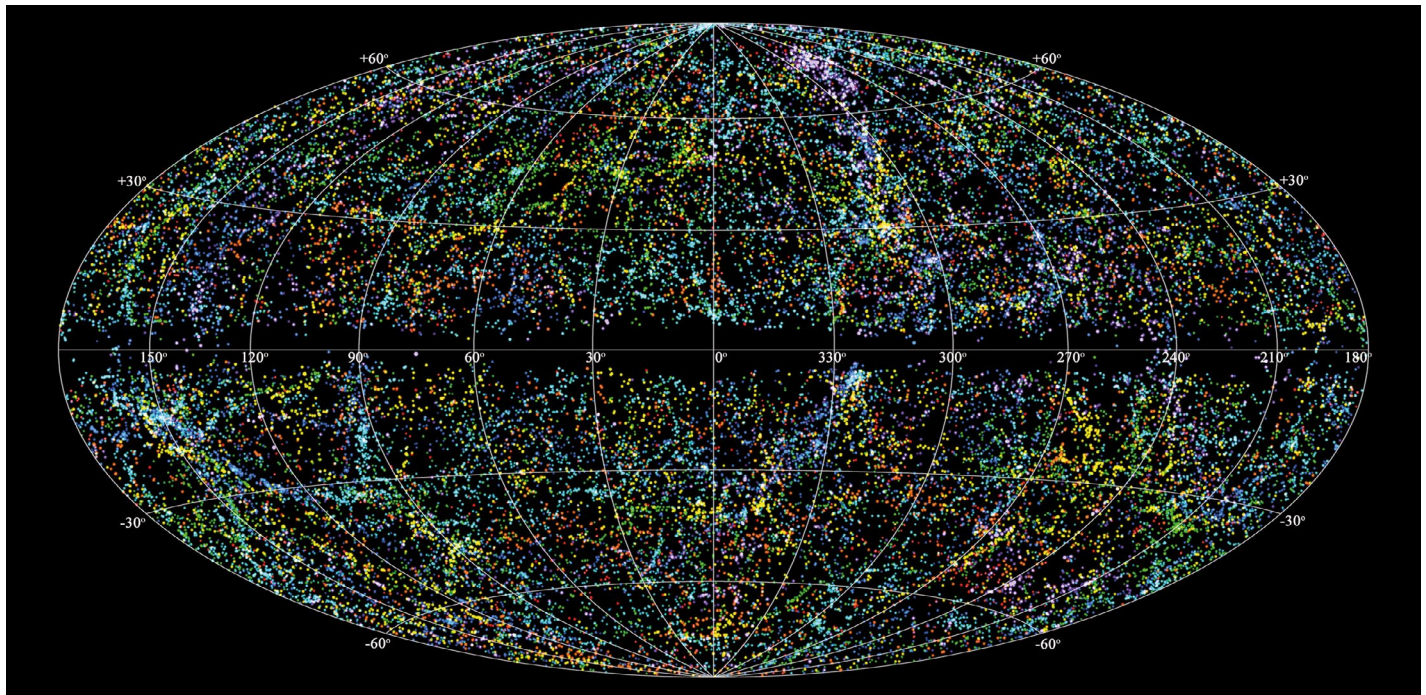
Le osservazioni recenti mostrano che l'abbondanza della materia oscura nell'universo corrisponde a cinque volte la quantità di materia ordinaria che vediamo e con cui interagiamo quotidianamente (pianeti, stelle, gas interstellari, ecc.). La materia oscura fa ormai parte del modello standard della cosmologia e costituisce proprio quella componente cosmica che forma, per instabilità gravitazionale, le strutture rappresentate dalle galassie, dagli ammassi e dal *cosmic web*: è lei l'architrave che regge tutto l'universo. Per fare questo, si è capito che deve essere particolarmente fredda, dotata cioè di poca energia di movimento. Sebbene gli effetti della materia oscura sulla dinamica delle galassie

e sulla formazione delle strutture siano evidenti, essa non è mai stata direttamente osservata, se non appunto attraverso i suoi effetti gravitazionali. L'ipotesi più accreditata sulla sua natura è che si tratti di una nuova particella, con caratteristiche tali da non potersi inserire nel modello standard della fisica delle particelle se non spingendolo oltre la sua formulazione attuale: richiede infatti, come si dice, una "nuova fisica". I candidati più accreditati per descrivere la materia oscura sono stati a lungo del tipo cosiddetto Wimp, cioè particelle massive debolmente interagenti, che interagiscono molto poco con la materia ordinaria, ma quel tanto che basta per essere prodotte nel plasma

primordiale nella giusta abbondanza che osserviamo oggi. Negli ultimi anni i cosmologi hanno iniziato ad avanzare con più insistenza anche ipotesi alternative e tra le opzioni più popolari al momento troviamo una particella chiamata assione (vd. in *Asimmetrie* n. 21 p. 34, ndr). C'è anche l'ipotesi che la materia oscura non sia una particella, ma semplicemente una grande quantità di buchi neri primordiali, formati nei primissimi istanti dopo il Big Bang. Ipotizzati per la prima volta da Stephen Hawking e Bernard Carr negli anni '70, rappresentano una diversa categoria di candidati per la materia oscura e sono tornati prepotentemente di moda dopo la rivelazione delle onde gravitazionali emesse durante la fusione di due buchi neri.

b. Simulazione dell'evoluzione nel tempo di una porzione di universo. Le quattro colonne mostrano, da sinistra a destra, la distribuzione di materia oscura, la distribuzione di gas, la temperatura del gas e l'abbondanza di elementi chimici più pesanti dell'idrogeno e dell'elio (metallicità). Il tempo (T) è indicato in miliardi di anni a partire dal Big Bang.





c. Mappa tridimensionale dell'universo. I puntini colorati rappresentano la posizione nel cielo di galassie osservate dalla survey 2Mass entro una distanza massima di circa 380 milioni di anni luce. I diversi colori codificano la distanza delle galassie da noi, dalle più vicine, viola, alle più lontane, rosse.

Tornando invece alle osservazioni cosmologiche dirette della struttura su grande scala dell'universo, le osservazioni più adatte per studiare non solo il meccanismo di formazione, ma anche l'evoluzione e le proprietà delle strutture cosmiche, sono le campagne osservative, dette *survey*, che hanno lo scopo di compilare estesi cataloghi di galassie e della loro posizione in cielo. Le *survey* permettono infatti di comprendere, tramite lo studio della distribuzione delle galassie nel cielo, il modo in cui le strutture cosmiche sono fatte e attraverso quale percorso evolutivo sono arrivate a essere come oggi le osserviamo. Attraverso questi studi è possibile sottoporre a verifica non solo i modelli standard della cosmologia da un lato e della fisica delle particelle dall'altro, ma anche modelli alternativi, oltre che cercare di misurare una serie di parametri, come ad esempio la massa dei neutrini. Come detto, le *survey*

di galassie su larga scala rappresentano al momento, e per almeno il prossimo decennio, il principale focus sperimentale (anche in termini di investimenti) in astrofisica e cosmologia. In parallelo a questo, negli ultimi anni sono state sviluppate altre due metodologie per osservare la distribuzione delle galassie in diverse epoche cosmologiche, e capire ancora meglio la formazione delle strutture cosmiche e la loro evoluzione. La prima è un'evoluzione delle *survey* di galassie tradizionali, chiamata *intensity mapping*, e consiste nell'osservazione dell'emissione radio totale della materia stellare e interstellare: in questo modo si rinuncia ai dettagli dell'emissione di ogni singola galassia, concentrandosi sul quadro generale, e quindi sulla distribuzione globale di materia, compresa quella oscura. La tecnica è inoltre particolarmente efficace poiché permette di osservare velocemente grandi porzioni di cielo. Ma la vera novità degli ultimi cinque anni in cosmologia è rappresentata dalla rivelazione di onde gravitazionali. Predette da Einstein nel 1916, le onde gravitazionali sono perturbazioni dello spaziotempo che si propagano in modo ondulatorio e alla velocità della luce. Le onde gravitazionali rappresentano una finestra sull'universo completamente nuova, e diverse tecniche sono state sviluppate di recente per poter effettuare studi di cosmologia, incluso lo studio dei modelli di formazione ed evoluzione delle strutture in diverse epoche cosmiche, consentendo misure altamente complementari a quelle delle *survey* standard di galassie.

Biografia

Alvise Raccanelli, dopo la laurea in astronomia conseguita presso l'Università di Padova con una tesi in cosmologia, ha svolto attività di ricerca presso la Nasa/Jpl, Caltech e la Johns Hopkins University. Ha ottenuto una *fellowship* Marie-Curie all'Università di Barcelona e attualmente è ricercatore al Cern.

Link sul web:

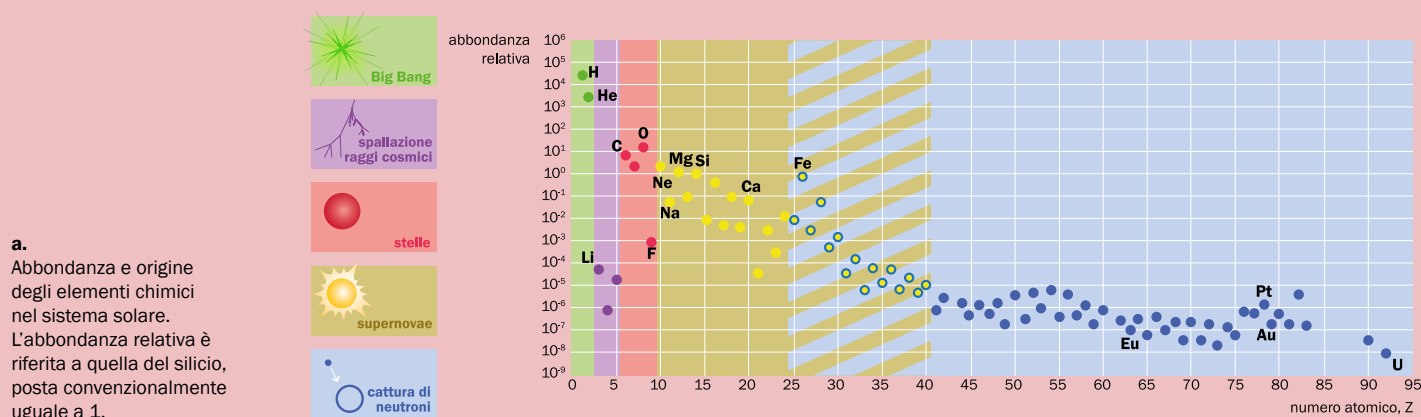
https://www.illustris-project.org/movies/illustris_movie_zoomin.mp4

DOI: 10.23801/asimmetrie.2020.28.4

Polvere di stelle

La genesi degli elementi chimici

di Francesca Matteucci



All'inizio ci fu il Big Bang, l'evento che ha dato origine al nostro universo, e nei primi tre minuti a partire dal Big Bang si formarono gli elementi primordiali, ovvero l'idrogeno, l'elio, il deuterio e il litio. Gli elementi chimici sono caratterizzati da due numeri: il numero atomico, ovvero il numero di protoni nel nucleo, che identifica un particolare elemento, e il numero di massa che rappresenta la somma di neutroni e protoni nel nucleo. Uno stesso elemento può avere vari isotopi che hanno lo stesso numero di protoni ma diverso numero di neutroni e quindi diverso numero di massa. Da qui in poi useremo solo il numero di massa. L'idrogeno ha numero di massa 1, il deuterio 2 e l'elio 4. Il litio che si formò nel Big Bang ha numero di massa uguale a 7, il numero di massa 8 non è stabile così come non lo è il 5, e tutti gli elementi con numero maggiore di 8 sono stati formati in seguito. In particolare, tutti gli elementi dal carbonio, che ha numero di massa 12, fino all'uranio e ai transuranici sono stati creati dalle reazioni nucleari che avvengono nelle stelle. Gli elementi con numero di massa 6, 9, 10 e 11 si sono formati attraverso processi di "spallazione", ovvero interazione tra raggi cosmici e atomi di carbonio, azoto e ossigeno presenti nel mezzo interstellare. Durante il Big Bang le temperature erano altissime e i nuclei degli elementi leggeri si sono iniziati a formare nell'intervallo di temperatura tra un miliardo e cento milioni di kelvin. La temperatura infatti iniziò a diminuire a partire dal Big Bang poiché l'universo si stava espandendo. Il carbonio e gli altri elementi pesanti non si formarono a quell'epoca, perché dopo la formazione degli atomi di elio, che sono i mattoni per costruire il carbonio, le condizioni di temperatura e densità nell'universo non erano sufficienti per la fusione dell'elio, che avvenne in seguito nelle stelle. Solo dopo la formazione delle prime stelle iniziò la formazione di tutti

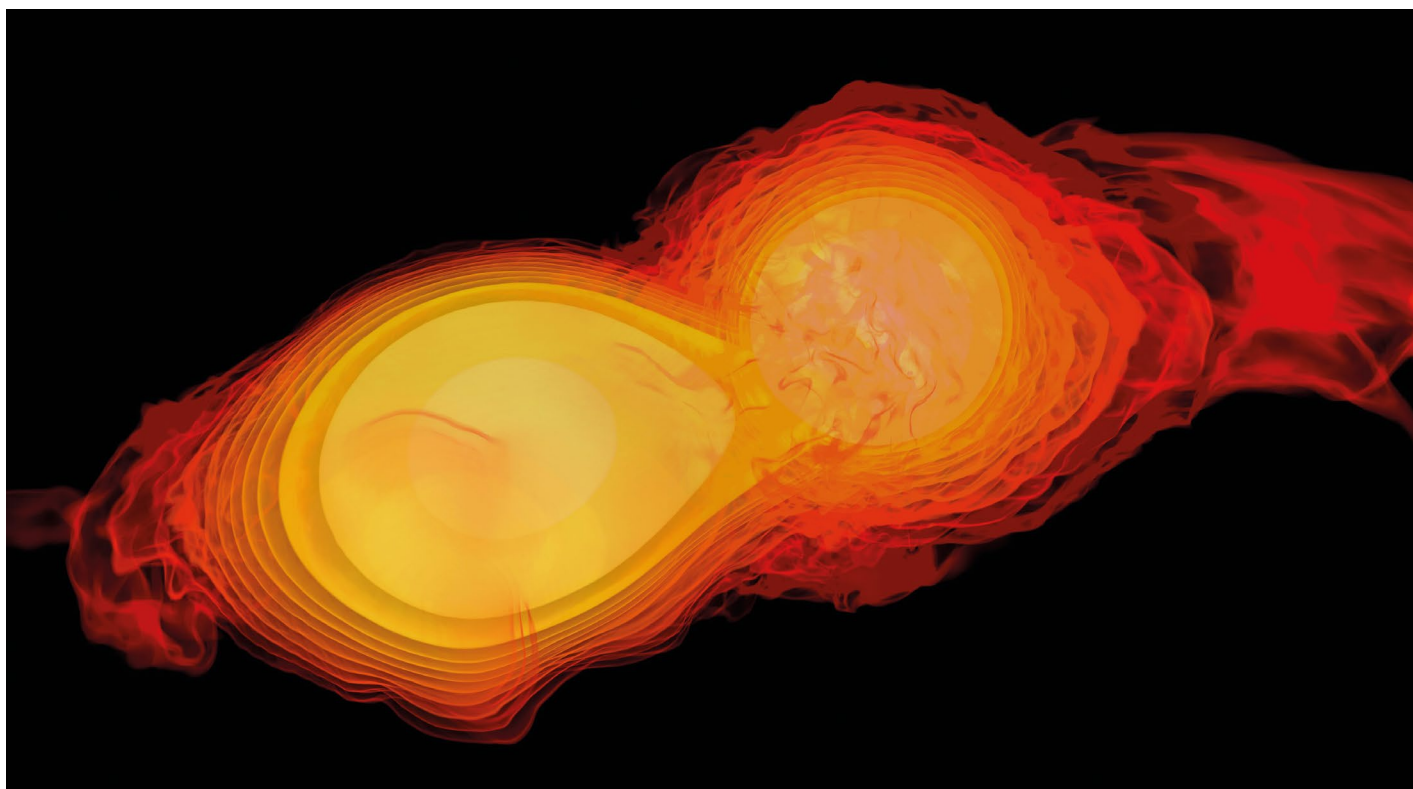
gli elementi chimici che conosciamo e che formano la tavola periodica di Mendeleev. È interessante dunque studiare come si sono formati e distribuiti questi elementi nel cosmo. In particolare, essi sono maggiormente concentrati nelle galassie dove si trova la maggioranza delle stelle che sono le cucine nucleari per la produzione degli elementi. La maggior parte delle stelle ha una massa simile al nostro Sole ma esistono anche stelle molto più massicce del Sole, da 10 a 100 volte di più. Sono proprio queste stelle massicce che producono la maggior parte degli elementi pesanti a partire dal carbonio. Ma per capirci di più dobbiamo sapere come vivono e muoiono le stelle di varie masse. Stelle come il nostro Sole trasformano idrogeno in elio al loro centro attraverso una catena di reazioni nota col nome di "catena protone-protone". All'inizio della catena due protoni si fondono per dare origine a un nucleo di deuterio, poi il deuterio cattura a sua volta un protone per formare elio con numero di massa 3. Dopo di che, due nuclei di elio 3 si fondono per dare origine all'elio 4 che è l'isotopo più abbondante. Questa catena avviene con produzione di energia e di neutrini. L'energia del Sole deriva proprio da questa catena di reazioni. Una stella come il Sole, quando ha esaurito l'idrogeno al centro, inizia a contrarre il proprio nucleo che si scalda fino ad accendere la reazione che produce il carbonio a partire da tre nuclei di elio. All'esaurimento dell'elio rimane un nucleo stellare di carbonio e ossigeno che non sarà mai più in grado di accendere le successive reazioni di fusione, poiché il nucleo della stella è troppo piccolo per riuscire, contraendosi, a raggiungere le temperature necessarie alla fusione del carbonio. Pertanto, queste stelle muoiono come nane bianche di carbonio e ossigeno, dopo aver espulso il mantello esterno ricco di idrogeno ed elio in un evento noto con il nome di "nebulosa planetaria".

Le nane bianche sono oggetti molto densi: con una massa come il Sole concentrata nelle dimensioni della Terra, la loro densità è pari a quella di una zolletta di zucchero che pesa come un camion. Le stelle più piccole del Sole muoiono anch'esse come nane bianche di carbonio e ossigeno, ma solo se hanno massa superiore a 0,5 masse solari. Le stelle al disotto di questa massa muoiono come nane bianche di elio. Per le stelle maggiori di 10 masse solari, invece, il destino è diverso: dopo aver superato le fasi di fusione dell'idrogeno e dell'elio, esse bruciano il carbonio per formare neon e, in seguito, il neon forma ossigeno per fotodisintegrazione (un processo in cui fotoni altamente energetici interagiscono col neon) e durante queste fasi si formano alcuni elementi chiamati "alfa", ottenuti da reazioni di fusione nucleare che convertono nuclei di elio in nuclei più pesanti, fino al silicio che ha numero di massa pari a 28. Anche il silicio si accende a temperature dell'ordine dei miliardi di kelvin e si formano gli altri elementi alfa fino al ferro. Il ferro, infatti, è il nucleo che possiede la massima energia di legame per nucleone.

Con la formazione del ferro le reazioni di fusione nucleare si bloccano, poiché oltre il ferro non è più possibile fondere nuclei leggeri in nuclei più pesanti. Ma allora chi ha formato gli elementi molto più pesanti dal ferro? Chi ha fatto l'oro dei nostri anelli? E l'uranio? Questi elementi vengono sempre formati dentro le stelle ma non attraverso la serie di reazioni di fusione descritte sopra, bensì per cattura di neutroni su nuclei di ferro. Questi elementi si chiamano "elementi-s" ed "elementi-r" a seconda della rapidità di cattura neutronica in relazione al tempo di decadimento beta dei nucleoni (protoni che si trasformano in neutroni e viceversa nei nuclei) (vd. asimmetrie n. 26 p. 15, ndr). In questo modo si sono formati tutti gli elementi chimici che conosciamo e la concentrazione degli elementi pesanti è cresciuta dal Big Bang ad oggi attraverso un processo che chiamiamo evoluzione chimica: le stelle nascono, vivono e muoiono restituendo al mezzo interstellare gli elementi pesanti sintetizzati nel loro interno, e così ogni nuova generazione di stelle nasce con un contenuto di elementi pesanti (detti "metalli" dagli astronomi) sempre maggiore.

b.
Una piccola sezione della nebulosa Velo, osservata dal telescopio spaziale Hubble. Questa nebulosa è un antico resto di supernova.





I maggiori produttori di metalli sono le supernovae, potentissime esplosioni di stelle che immettono i prodotti dei bruciamenti nucleari nel gas interstellare da cui si formeranno nuove stelle. Le supernovae rappresentano la morte delle stelle con massa superiore a 10 masse solari, che esplodono quando si trovano con un nucleo di ferro che non può più accendersi e può solo contrarsi fino a raggiungere l'equilibrio o come stella di neutroni (materia densa come una goccia di pioggia che contenga tutta la popolazione del mondo) o come buco nero. Durante l'esplosione la supernova espelle tutti gli elementi formati nei bruciamenti precedenti, in particolare gli elementi alfa (carbonio, ossigeno, neon, magnesio, silicio, calcio), un po' di elementi con masse vicine a quella del ferro e gli elementi-r. Altre supernovae derivano da nane bianche in sistemi binari che esplodono catastroficamente per accrescimento di gas dalla stella compagna, il quale accende il carbonio e l'ossigeno della nana bianca ad altissime temperature innescando le reazioni che portano fino al ferro. Pertanto, questi oggetti immettono soprattutto ferro nel mezzo interstellare. La loro peculiarità è che non lasciano nulla dietro di sé poiché la nana bianca viene completamente distrutta nell'esplosione. Va detto che riguardo alla produzione degli elementi-r (oro, platino, europio) si pensa che la fusione di due stelle di

neutroni o di una stella di neutroni e un buco nero in sistemi binari possa essere il canale preferenziale, come osservato nell'evento di onde gravitazionali avvenuto il 17 agosto 2017. Gli elementi-s invece (ad esempio il bario) vengono massimamente prodotti da stelle di massa piccola (da 1 a 3 masse solari) durante la fase di bruciamento dell'elio, nel corso della quale agiscono reazioni che producono neutroni che poi vengono catturati da nuclei come il ferro preesistenti nella stella. In conclusione, se nei primi tre minuti dal Big Bang si sono formati gli elementi leggeri e più diffusi in natura, come l'idrogeno e l'elio, tutti gli elementi pesanti sono stati formati dalle reazioni di fusione nucleare nelle stelle. In quegli elementi c'è la vita, ci siamo noi, i figli delle stelle.

c.
Rielaborazione grafica di una collisione di due stelle di neutroni.

Biografia

Francesca Matteucci è professore ordinario presso l'Università di Trieste e ha lavorato nel campo della formazione degli elementi chimici nelle stelle e dell'evoluzione chimica delle galassie. È socio nazionale dell'Accademia dei Lincei e socio corrispondente dell'Istituto Veneto di Scienze Lettere ed Arti.

DOI: 10.23801/asimmetrie.2020.28.5

Dopo la nube il Sole

Come si è formato il sistema solare

di Filippo Maria Zerbi

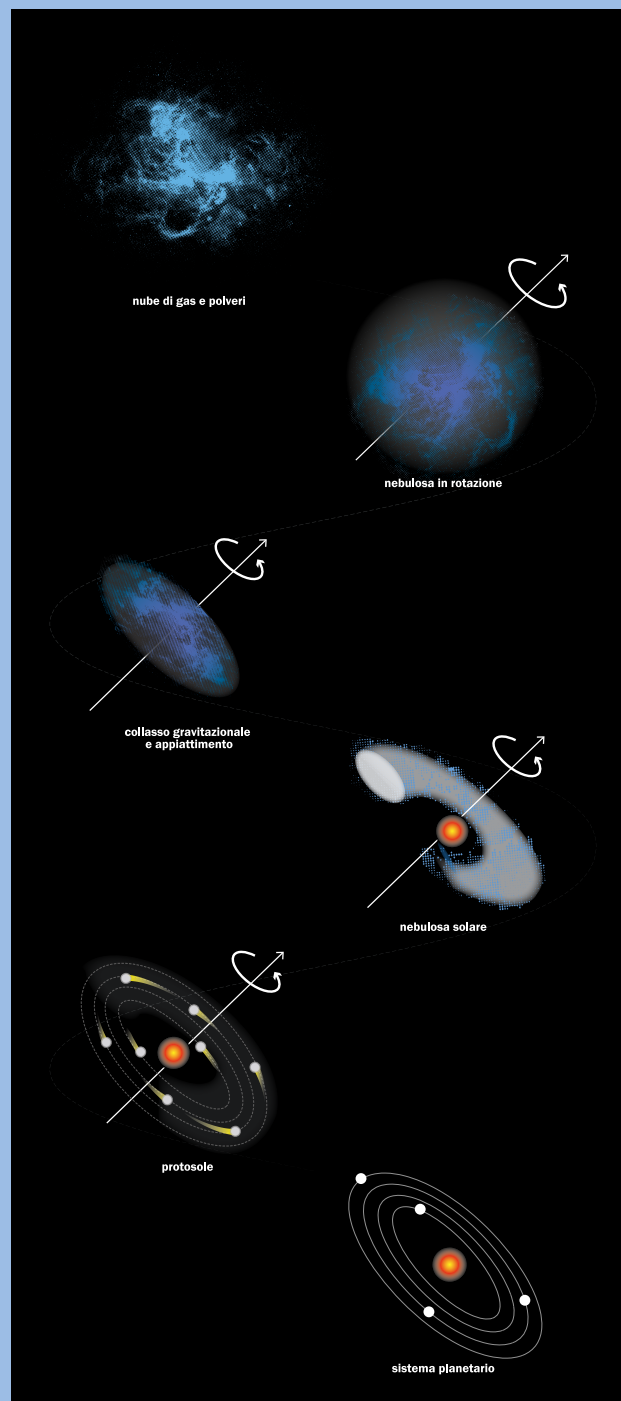
È curioso pensare come la nostra esistenza, la nostra esperienza soggettiva quotidiana, la filosofia, la musica, la fisica, l'amore, il dolore e tutto quello che ci caratterizza come specie animale dominante sul pianeta Terra, abbiano avuto origine da una modesta nube di gas e polveri in tempi abbastanza recenti, su una scala di tempi astronomica.

Circa 4,5 miliardi di anni fa una perturbazione gravitazionale, probabilmente un'onda d'urto derivante da un'esplosione di supernova, ha creato un disequilibrio nella particolare regione della Via Lattea dove oggi troviamo il nostro sistema solare, allora occupata da una nube di gas diffuso e polveri in equilibrio termico e gravitazionale. A causa di questa perturbazione, si è creata una concentrazione di materia, attorno alla quale, per attrazione gravitazionale, si è aggregato il resto della nube, che ha cominciato quindi a scaldarsi e a ruotare sempre più rapidamente, trasformandosi in un disco rotante con maggiore massa e temperatura più elevata nella parte centrale: il "disco proto-planetario".

Sempre per via della gravitazione, le particelle nel disco si sono aggregate tra loro in piccoli agglomerati detti "planetesimi".

Le alte temperature in prossimità del centro del disco hanno impedito la condensazione di molecole volatili quali l'acqua o il metano, consentendo la formazione unicamente di planetesimi di massa ridotta e composti da silicati e metalli. L'accrescimento gravitazionale attorno a questi planetesimi rocciosi ha portato alla formazione dei pianeti interni del sistema solare inclusa la Terra. Al contrario nelle zone più esterne e fredde la permanenza dei gas ha favorito la formazione di pianeti giganti gassosi come Giove e Saturno e di pianeti gassosi freddi come Urano e Nettuno aggregati attorno a nuclei di ghiaccio.

Mentre il processo di formazione dei pianeti nel disco proto-planetario aveva luogo, al centro si andava accumulando sempre più massa della nube originale, aumentando contestualmente la temperatura e formando così la "protostella". Raggiunta la temperatura necessaria, nel nucleo della protostella che sarebbe di lì a poco diventata il nostro sole, si è innescata la reazione di fusione nucleare dell'idrogeno.



a.
Fasi di formazione
di un sistema planetario.

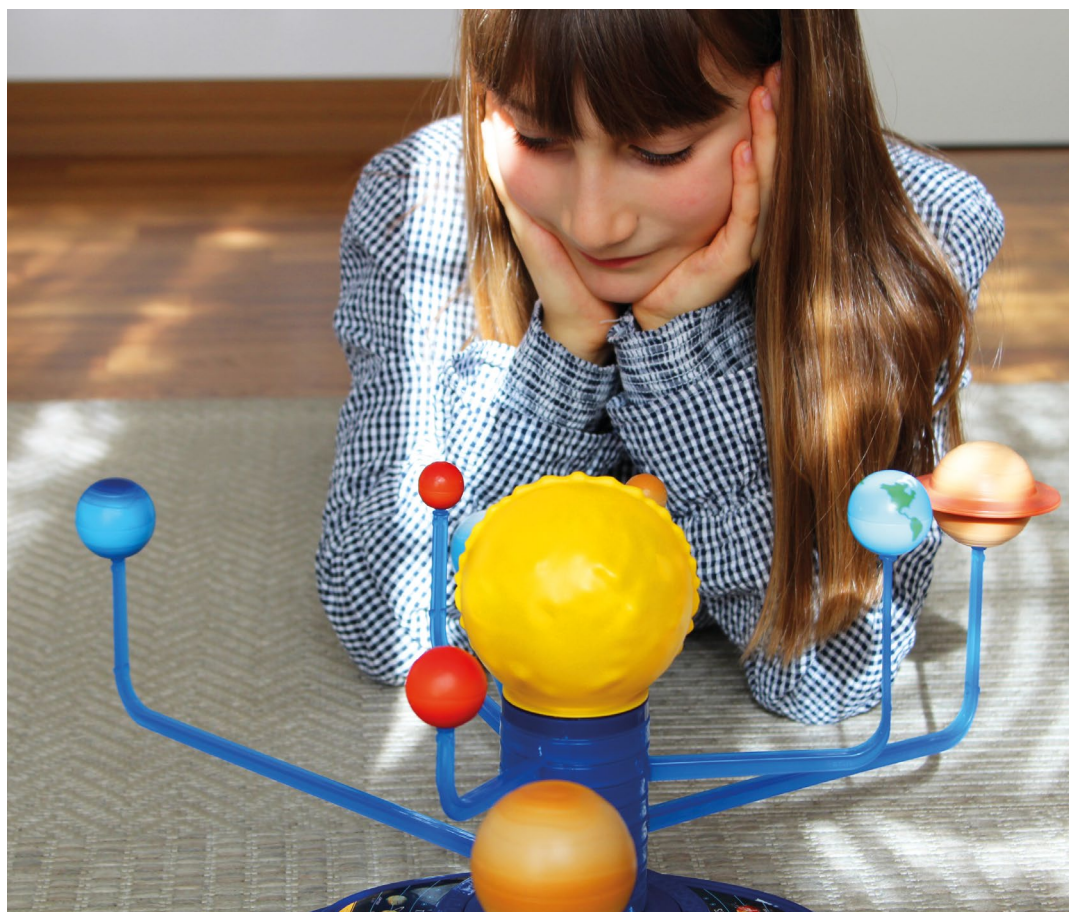
Il Sole, nuova sorgente di energia e di particelle accelerate nel “vento solare”, ha con il tempo spazzato via il gas e le polveri residue spingendole nello spazio interstellare e creando quel vuoto interplanetario, che oggi caratterizza il sistema solare. Va detto che all’epoca il sistema solare non era affatto come lo vediamo oggi. Molti più corpi di dimensioni minori, ma non trascurabili, orbitavano attorno al neonato Sole che regolava il sistema non solo sul piano energetico, ma anche su quello gravitazionale e magnetico.

Sappiamo da Keplero che due corpi celesti in rivoluzione l’uno intorno all’altro orbitano entrambi attorno al proprio centro di massa. Pertanto, per quanto piccolo possa essere un corpo e per quanto lontano possa essere dal corpo più grande attorno al quale è in rivoluzione, impercettibilmente lo muove.

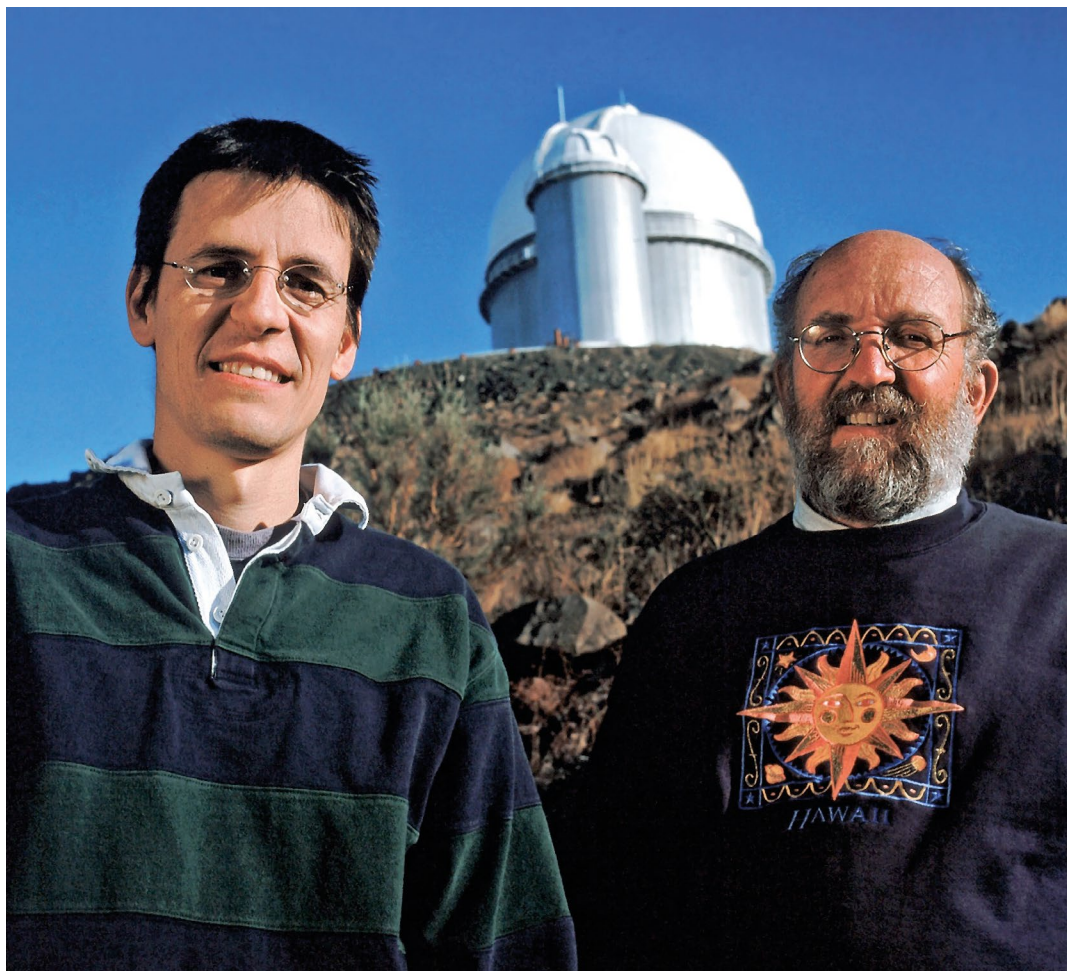
La sinergia di piccole perturbazioni e risonanze tra le componenti originarie del sistema solare ne ha determinato allontanamenti o avvicinamenti dal Sole, deviazioni dal piano originario del disco proto-planetario, la cosiddetta “eclittica”. Ci sono state anche, in una prima fase, espulsioni dal sistema verso lo spazio interstellare, aggregazioni di masse minori e impatti tra corpi piuttosto eclatanti e rovinosi; in una fase più avanzata, questi eventi sono stati meno frequenti e meno rovinosi.

Il sistema solare è un sistema planetario piuttosto tranquillo. Oggi possiamo dirlo, dopo che nei 25 anni trascorsi dall’osservazione del primo sistema planetario in una stella diversa dal Sole (51 Pegasi, per la cui scoperta sono stati insigniti del premio Nobel per la fisica 2019 Michel Mayor e Didier Queloz) ne abbiamo individuati più di un migliaio.

b.
Giocando con
il sistema solare.



c.
Didier Queloz e Michel Mayor,
premi Nobel per la fisica 2019,
di fronte al telescopio da 3,6
metri dell'Eso all'Osservatorio
di La Silla in Cile.



Il Sole è una stella di massa relativamente piccola che ha bruciato idrogeno in maniera stabile per diversi miliardi di anni e continuerà a farlo per altri miliardi di anni prima di intraprendere il suo viale del tramonto trascinando con sé il sistema planetario che con essa si è formato. In aggiunta, nel sistema solare i pianeti giganti sono esterni. L'interazione gravitazionale, se da un lato aumenta all'aumentare della massa delle componenti, dall'altro diminuisce all'aumentare della distanza tra esse. Il fatto che i pianeti massicci siano esterni rende la zona dove alberga il nostro pianeta abbastanza al riparo da grandi perturbazioni gravitazionali. Infine, il Sole non ha una compagna, ovvero non è in un sistema binario o multiplo. La Terra ha quindi vita più semplice di Proxima B, il pianeta potenzialmente abitabile più vicino che conosciamo, che orbita intorno a Proxima (alpha C) Centauri a 4,3 anni luce da noi. Proxima B si trova infatti in una complessa situazione gravitazionale nel sistema triplo di alpha Centauri A, alpha Centauri B e alpha Centauri C (o Proxima). Nel caso di Proxima B sono quindi tre i soli che ne determinano l'equilibrio energetico, magnetico e gravitazionale, con tutte le instabilità che questo comporta. Forse proprio per la stazionarietà del Sole nell'erogare energia e la stabilità orbitale della Terra in tempi lunghi,

si sono create le condizioni per la formazione ed evoluzione della vita sulla Terra. Nei prossimi anni, analizzando molti pianeti extrasolari potenzialmente abitabili, potremo scoprire quanto generiche o peculiari siano state le circostanze che hanno portato al processo che ci ha generato. Per citare l'eccellente astrofisico e divulgatore americano Carl Sagan, se la vita nell'universo si fosse formata solo sulla Terra "sarebbe un enorme spreco di spazio".

Biografia

Filippo Maria Zerbi si laurea in astrofisica presso l'Università di Pavia dove consegue anche il dottorato. Dirigente di ricerca con varie esperienze in istituti internazionali, dal 2016 è il direttore scientifico dell'Istituto Nazionale di Astrofisica (Inaf).

Link sul web:

https://youtu.be/_DnDeBaOKFc

DOI: 10.23801/asimmetrie.2020.28.6

Le fantastiche quattro

Le forze fondamentali della natura

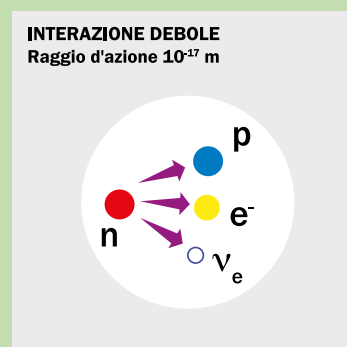
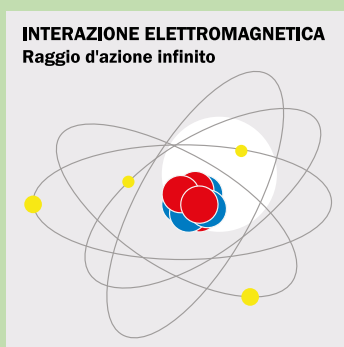
di Stefania De Curtis e Andrea Tesi

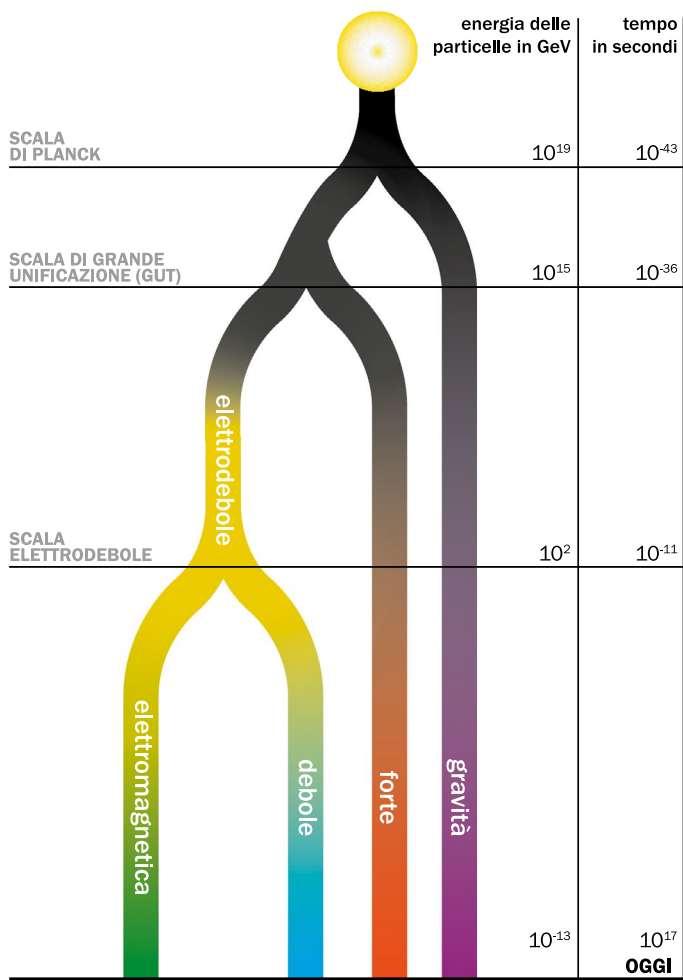
Da che cosa dipende la grande differenza tra le quattro forze che conosciamo, elettromagnetica, debole, forte e gravitazionale? Per quanto sorprendente, è solo nel contesto della fisica delle particelle che tali differenze diventano semplici da spiegare. Grazie a tale semplicità, è stato possibile organizzare in forma unificata forze all'apparenza molto diverse.

Le particelle elementari interagiscono tra loro secondo regole decodificate nell'ultimo secolo e tali interazioni danno luogo a quelle che chiamiamo forze. Alcune particelle dette bosoni sono responsabili della generazione di forze. Lo scambio di un bosone tra due particelle genera infatti una forza, intesa come la tendenza del sistema a minimizzare l'energia. Per questo motivo i bosoni vengono definiti "mediatori". Se pensiamo alle interazioni come mediate dallo scambio di particelle, non ci sorprende che le caratteristiche delle forze derivino direttamente dalle proprietà dei mediatori. Ad esempio, il raggio di interazione (*range*), una delle proprietà delle forze, è principalmente legato alla massa del mediatore. Più questo è leggero, più il *range* è grande, in accordo con l'interpretazione quantistica che associa a ogni particella una lunghezza d'onda

inversamente proporzionale alla sua massa. Le uniche forze a lungo raggio sono la forza elettromagnetica e quella gravitazionale, corrispondenti a mediatori senza massa, fotone e gravitone (questo secondo non è ancora stato osservato sperimentalmente). La forza debole invece, responsabile dei fenomeni di radioattività naturale, è associata ai bosoni W e Z. Queste particelle sono pesanti e dunque la forza debole è attiva solo su scale subatomiche (dell'ordine di 10^{-16} cm). Le interazioni sono caratterizzate da un'altra quantità, detta "accoppiamento", che determina l'intensità dell'interazione stessa e, in generale, dipende dall'energia del processo in questione. Questo nuovo ingrediente spiega l'apparente paradosso della forza forte, responsabile della stabilità dei nuclei. Sappiamo che essa è mediata da particelle senza massa, i gluoni, che si accoppiano ai quark, cioè ai costituenti di protoni e neutroni. Tuttavia, essa non ha effetti a lungo raggio perché l'accoppiamento aumenta con la distanza, come se i quark fossero legati da una molla. Non vediamo quark e gluoni liberi su distanze più grandi di 10^{-14} cm, bensì protoni e neutroni, entrambi costituiti da tre quark confinati.

a.
Le quattro forze fondamentali.





b.
Mappa dell'unificazione
delle forze.

Uno dei più importanti risultati della fisica moderna è la descrizione delle forze elettromagnetiche e deboli con un'unica teoria. Un successo per niente scontato, data la differenza che c'è tra un raggio d'azione di 10^{-16} cm e uno infinito! Com'è possibile dunque che tali fenomeni siano facce della stessa medaglia? Occorre essere pragmatici. L'approccio vincente consiste nel costruire una teoria che metta sullo stesso piano le interazioni elettromagnetica e debole e aggiungere poi un meccanismo che permetta una naturale separazione di scale. Questa teoria è descritta dal modello standard delle particelle elementari, formulato alla fine degli anni '60 da Sheldon Lee Glashow, Steven Weinberg e Abdus Salam. Il meccanismo per realizzare tale separazione di scale fu ipotizzato da Peter Higgs negli stessi anni e si basa sulla

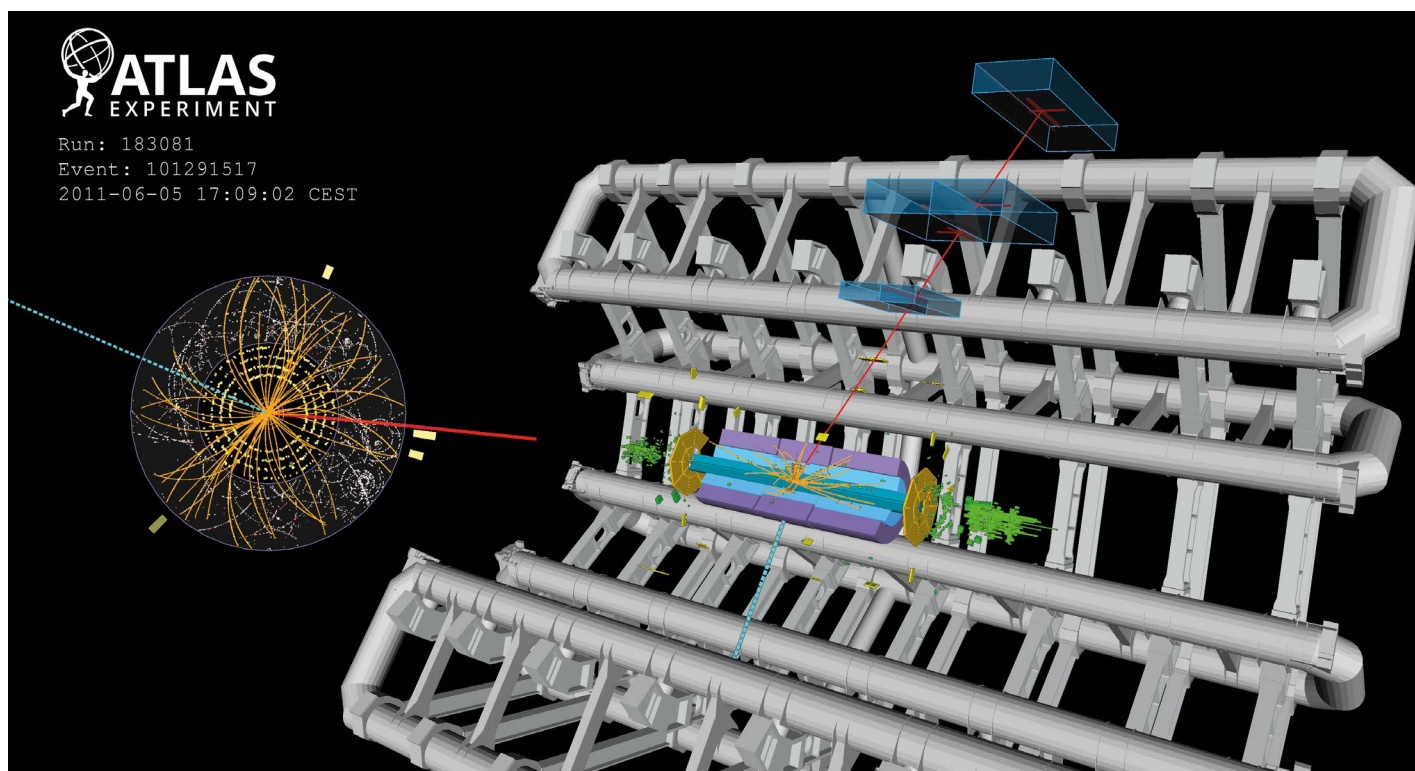
presenza di un campo (che prende il suo nome) che permea lo spazio, con cui i mediatori W e Z interagiscono grazie ai loro accoppiamenti e acquistano massa. Se il campo di Higgs avesse un valore nullo, tutte le particelle sarebbero senza massa. In presenza di un campo non nullo, invece, i bosoni W e Z acquistano massa, mentre il fotone rimane senza massa, essendo il campo di Higgs elettricamente neutro e quindi non accoppiato a esso. Da qui deriva il *range* finito delle interazioni deboli. Per verificare che siamo in effetti immersi nel campo di Higgs è stato necessario far collidere molti protoni all'acceleratore Lhc di Ginevra fino a quando, nel 2012, non è stato possibile osservare la particella di Higgs.

A distanze più piccole del *range* delle interazioni deboli, le forze elettromagnetica e debole si comportano pressoché allo stesso modo, ed è possibile trattare i bosoni W e Z come privi di massa raggiungendo quindi una profonda simmetria con i fotoni. A basse energie, invece, non è possibile trascurare le masse dei mediatori e dunque, le scale della forza debole ed elettromagnetica sono molto diverse. Con la scoperta del bosone di Higgs abbiamo finalmente celebrato il successo dell'unificazione elettro-debole.

Ma come si è originato tale campo che permea l'universo? Stiamo cercando una risposta studiando il campo di Higgs sia agli acceleratori di particelle che in cosmologia. Sembra infatti plausibile che negli istanti iniziali dell'universo, data la grande energia in gioco, si siano verificate condizioni in grado di modificare il valore attuale del campo di Higgs, cioè che a temperature dell'ordine di 10^{15} kelvin l'energia termica dell'universo primordiale sia stata in grado di annullare il valore di tale campo per mezzo di una transizione di fase cosmologica. L'unificazione elettro-debole forse non ha ancora finito di meravigliarci!

Capire quale sia stata la natura della transizione di fase elettro-debole è di cruciale importanza. Infatti, se la transizione fosse stata del primo ordine (un esempio di cui abbiamo esperienza quotidiana è la transizione tra liquido e vapore) la coesistenza di fasi con diverso valore del campo di Higgs potrebbe aver lasciato tracce cosmologiche. In tal caso l'energia rilasciata durante il passaggio di stato sarebbe stata estremamente grande e le regioni di spazio "riempite" di campo di Higgs si sarebbero espanse a velocità relativistiche. Questi sono tutti ingredienti validi per la generazione di onde gravitazionali primordiali, e ciò che rende il fenomeno ancora più interessante è che tali onde gravitazionali, se scoperte, segnalerebbero la presenza di fisica oltre il modello standard che, infatti, non prevede una transizione di questo tipo. Esperimenti futuri di misura di onde gravitazionali, come l'interferometro Lisa, hanno come obiettivo scientifico anche la verifica di questa ipotesi.

Ci sono inoltre ulteriori motivazioni teoriche che privilegiano questo scenario, dettate dalla possibilità di risolvere il mistero dell'asimmetria materia-antimateria nell'universo (vd. p. 14, ndr). Possiamo spingerci oltre l'unificazione elettro-debole? Abbiamo già detto che ad alte energie, cioè a piccole distanze, tutte le particelle del modello standard possono essere considerate prive di massa. In questo limite le forze diventano dunque tutte a lungo raggio, inclusa la forza forte, con il caveat che la dipendenza dall'energia dei tre accoppiamenti fondamentali (tralasciando la gravità) in generale è diverso.



Sulla base delle predizioni del modello standard, si evince però, e in modo sorprendente, che tutti gli accoppiamenti diventano simili, con differenze del 10%, a scale dell'ordine di 10^{15} GeV. A tali energie, 9 ordini di grandezza maggiori di quelle raggiungibili da Lhc, diventa intrigante l'idea che le tre forze fondamentali si unifichino in una sola, caratterizzata da un comune accoppiamento fondamentale. La prima Teoria di Grande Unificazione (Gut) fu proposta da Howard Georgi e Sheldon Glashow nel 1974. Questa prevede che le tre forze fondamentali vengano unificate sotto la guida di un'unica simmetria in grado di descrivere sia le interazioni dovute alle forze esistenti che nuove forze. Queste ultime, tuttavia, non sono osservabili a energie molto inferiori a 10^{15} GeV, perché sono mediate da particelle molto massive, dette X e Y. Altri scenari Gut sono stati proposti successivamente e tutti utilizzano in modo cruciale la “separazione di scale” che si può ottenere tramite nuovi campi di Higgs, con valore pari a circa 10^{15} GeV, che danno massa ai nuovi mediatori e lasciano invece privi di massa tutti i mediatori delle forze noti (fotoni, W e Z e gluoni). La versione più semplice di teoria Gut, quella del '74, porta con sé alcuni problemi fenomenologici e altri di natura più tecnica relativi alla struttura delle interazioni dei nuovi

campi di Higgs. In particolare, essa predice il decadimento del protone dovuto alle nuove forze mediate da X e Y e questo porterebbe a una instabilità della materia. Nonostante siano necessari alcuni accorgimenti per migliorare la teoria originaria, lo scenario Gut rimane affascinante e predice l'esistenza di fisica oltre il modello standard che dovrà essere verificata dai futuri esperimenti. In modo ancora più ambizioso vorremmo arrivare a formulare una nuova teoria che includa anche le interazioni gravitazionali. Questo richiede la quantizzazione della teoria della relatività generale a grandi energie e una nuova simmetria o forse, addirittura, un nuovo spaziotempo.

C. Visualizzazione di un evento in cui un bosone W decade in un muone e un neutrino in collisioni protone-protone registrate dall'esperimento Atlas al Cern.

Biografia

Stefania De Curtis è dirigente di ricerca in fisica teorica presso la sezione Infn di Firenze. Ha conseguito il PhD alla Sissa e trascorso lunghi periodi presso l'Università di Ginevra e il Cern per svolgere ricerche in fisica delle interazioni fondamentali. È direttrice del Galileo Galilei Institute for Theoretical Physics, Centro Nazionale di Studi Avanzati dell'Infn.

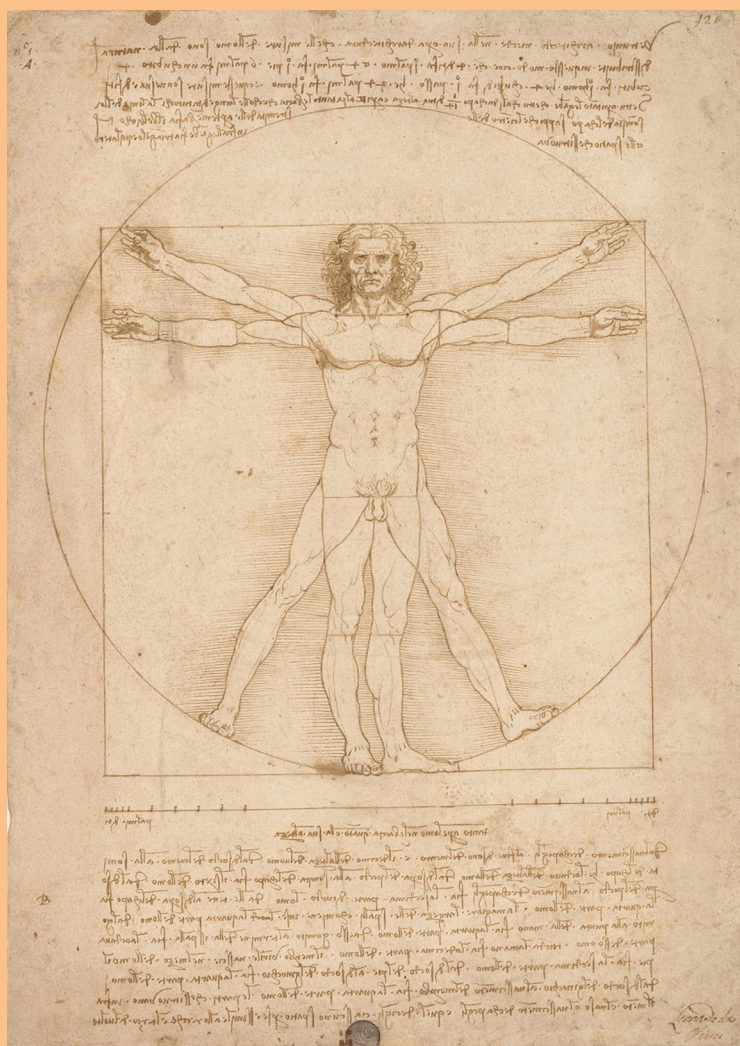
Andrea Tesi è ricercatore presso la sezione Infn di Firenze. Ha ottenuto il PhD alla Scuola Normale Superiore di Pisa nel 2014, e ha lavorato presso la University of Chicago. La sua attività di ricerca in fisica teorica è dedicata principalmente alla fisica oltre il modello standard.

DOI: 10.23801/asimmetrie.2020.28.7

Universo su misura

Il dibattito sul principio antropico

di Antonio Masiero



a.
L'uomo vitruviano
di Leonardo Da Vinci.

L'universo, dalle sue scale di lunghezza più piccole a quelle più grandi, viene al momento descritto in fisica da due teorie: il modello standard delle particelle elementari e delle loro interazioni fondamentali e il modello standard cosmologico del Big Bang caldo.

In entrambe le teorie compaiono parecchi “parametri liberi”, vale a dire quantità fondamentali (come ad esempio le masse delle particelle elementari, le intensità delle interazioni, la velocità con cui si espande l'universo, eccetera) il cui valore non è teoricamente predicibile. Esse devono essere misurate sperimentalmente e il loro valore viene poi introdotto come input nei due modelli standard. L'intera storia dell'universo, sino ad arrivare alla presenza di vita intelligente in esso, è strettamente legata ai valori di tali parametri. Si può pensare che eventuali estensioni teoriche dei modelli standard permettano di prevedere almeno alcuni di questi valori. Ma c'è un'alternativa a questo modo di procedere, rappresentata dal cosiddetto principio antropico. La prima formulazione esplicita di questo principio, sia nella sua forma debole che in quella forte, per opera di Brandon Carter nel 1974, venne poi rivista da John Barrow e Frank Tipler nel 1988. Nella loro versione, il principio antropico debole asserisce che i valori possibili delle quantità fisiche e cosmologiche sono ristretti dal prerequisito che l'universo a cui danno luogo permetta, a un certo punto della sua storia, l'esistenza della vita, anzi, più precisamente, di una forma di vita come la nostra, basata sul carbonio. Nella sua forma forte, invece, il principio antropico afferma che “l'universo deve avere le proprietà che gli permettano di sviluppare la vita in un qualche momento della sua evoluzione”.

Naturalmente quel “deve” può far prendere strade distanti da un percorso scientifico, in particolare quella di un disegno intelligente alla base dell'origine dell'universo. Pertanto, ci soffermeremo solo sul principio antropico debole, che in realtà non è un vero e proprio principio, ma una forma di argomentazione. A prima vista,

b.

Steven Weinberg, premio Nobel per la fisica nel 1979.



l'affermazione contenuta nel principio antropico debole può sembrare una tautologia: l'universo ha le caratteristiche giuste per poter essere così com'è, cioè per poter ospitare noi quali suoi osservatori. Ma in qualche caso gli argomenti antropici possono permettere di predire i valori di quantità fisiche fondamentali. Nel 1987 Steven Weinberg (uno dei costruttori del modello standard particellare e per questo premio Nobel per la fisica nel 1979) affrontò il problema della costante cosmologica usando il principio antropico. Nell'equazione della relatività generale di Einstein, che mette in relazione la geometria dell'universo con il suo contenuto in energia, vi è una costante (chiamata da Einstein "costante cosmologica") legata all'energia dello stato di vuoto quantistico in cui si viene a trovare l'universo (vd. asimmetrie n. 18 p. 30, ndr). La costante cosmologica è un parametro libero nel senso che la relatività generale non ne predice il valore. In effetti, nessuna teoria a tutt'oggi è riuscita a render conto del suo valore osservato. Weinberg considerò un universo nel quale la costante cosmologica potesse assumere valori diversi in varie sue regioni. Studiando per quali valori nella "nostra" regione dell'universo fosse possibile la formazione di galassie, Weinberg risalì a un limite superiore sul valore della costante cosmologica (per valori più grandi l'espansione dell'universo sarebbe così rapida da precludere la formazione di galassie). A quel tempo, la maggior parte dei fisici cercava di ottenere teorie in cui la costante cosmologica fosse rigorosamente nulla (a causa, ad esempio, di una qualche simmetria). Weinberg affermò invece che, essendo un valore della costante cosmologica non nullo compatibile con l'universo osservato, era improbabile che il valore della costante fosse proprio zero, mentre risultava molto più probabile che tale valore

fosse non nullo e dell'ordine di grandezza del limite superiore da lui trovato. Perfezionando l'idea di Weinberg, Alexander Vilenkin nel 1995 arrivò a una "predizione", intesa in termini di distribuzione di probabilità, della costante cosmologica non distante dal valore misurato sperimentalmente qualche anno dopo. Un'immediata e ragionevole obiezione a un argomento di questo genere, secondo cui una certa quantità fisica ha il valore che appare più probabile compatibilmente con il nostro universo, è che in realtà c'è un unico universo, e non si capisce bene a che cosa si applichi la distribuzione di probabilità di cui si è parlato. Due importanti evoluzioni in fisica e cosmologia sono però intervenute a modificare la nostra visione sull'unicità dell'universo. Nel modello standard cosmologico, subito dopo il Big Bang, si verifica una fase, detta di "inflazione cosmica primordiale" in cui lo spaziotempo dell'universo si espande in maniera estremamente accelerata. Tale espansione è causata dalla transizione dell'universo da uno stato di vuoto quantistico che si trova a energia maggiore (vuoto falso) a un altro di energia inferiore (vuoto vero) (vd. p. 10, ndr). Tuttavia, il tasso di espansione durante l'inflazione è così rapido da non permettere, presumibilmente, che la transizione avvenga ovunque nell'intero universo allo stesso istante. Come siamo abituati a vedere nella transizione di fase che porta all'ebollizione dell'acqua, si sarebbero formate nel primo universo tante bolle che si espandono in modo accelerato. Noi potremmo pertanto vivere in un universo-bolla con tanti, tantissimi, forse infiniti altri universi; bolle con cui non possiamo comunicare, essendo ognuno di questi uni-versi causalmente disconnesso da tutti gli altri. In schemi inflazionari, quali l'inflazione caotica di Andrei Linde, in ciascun universo-bolla i parametri fondamentali liberi assumono valori diversi, anche con differenti leggi fisiche.



c.
Raffigurazione artistica
del multi-verso.

L'uni-verso viene a essere così sostituito da un "multi-verso". Lo scenario di nascita continua di un numero grandissimo, se non addirittura infinito, di universi con quantità e leggi fisiche molto diverse da quelle presenti nel nostro trova supporto in alcune versioni della teoria delle stringhe in cui esiste una pletora di vuoti veri alla stessa energia a cui può giungere l'universo nella sua transizione da vuoto falso a vuoto vero. Secondo Linde e altri fisici, la teoria delle stringhe, insieme a uno schema di inflazione di tipo caotico, può fornire la base per giustificare l'uso del principio antropico: non c'è più necessità di richiedere che il nostro universo sia

l'unico possibile, ma basta che risulti essere tra quelli possibili (e, naturalmente, avendo a disposizione un numero grandissimo o infinito di universi con diversi valori delle costanti fondamentali, non è difficile immaginare che ne esista uno in cui sia garantita la nostra presenza di osservatori dell'universo stesso). Lo scopo della fisica, e della scienza più in generale, è quello di capire la natura dei fenomeni studiati sperimentalmente inquadrandoli nell'ambito di teorie predittive. Alle volte, come nel caso del problema della costante cosmologica, non riusciamo a intravedere alcuna teoria che riesca a fornire una tale spiegazione. È importante, comunque, che anche in questi casi l'utilizzo del principio antropico sia visto quale strumento di *extrema ratio* che non può e non deve frenare la nostra ricerca di una reale spiegazione scientifica di quanto osservato.

Biografia

Antonio Masiero è professore dell'Università di Padova e per sette anni è stato vicepresidente dell'Infn. La sua attività verte sulla ricerca di nuova fisica al di là del modello standard con particolare attenzione alle connessioni tra fisica delle particelle e cosmologia.

Profondo nero

Origine ed evoluzione dei buchi neri

di Emanuele Berti



Qual è l'origine di un buco nero? Un buco nero nasce nel momento in cui la forza di gravità che agisce sulla materia diventa insostenibile, e il collasso gravitazionale rende ogni fuga di informazione impossibile. In questo senso, un buco nero è quanto vi è di più vicino in fisica alla morte biologica. Dal punto di vista di un astrofisico (o di un amante dei film dell'orrore!) l'origine di un buco nero è un po' una

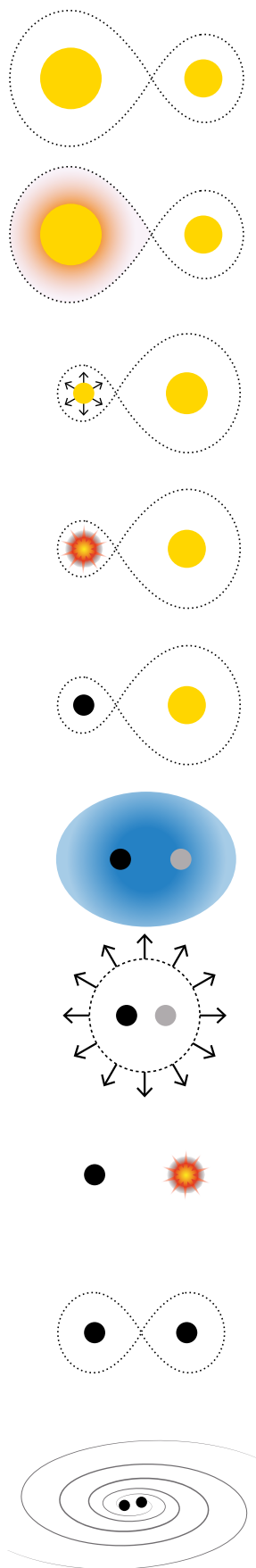
reincarnazione: un buco nero è il modo in cui una stella di massa molto grande rinasce dopo aver esaurito la catena di reazioni nucleari che la manteneva in vita. Come nei sistemi biologici (e nei film dell'orrore), però, anche in astrofisica le cose sono spesso più complesse: per esempio, alcuni dei buchi neri osservati in natura hanno massa troppo grande per essere nati dal collasso di una stella.

a.
La prima immagine di un buco nero, ottenuta dalle osservazioni del centro della galassia M87 compiute dall'Event Horizon Telescope.

Fisici e astrofisici hanno proposto molti meccanismi per spiegare la nascita e la crescita di un buco nero. Quali e quanti dei meccanismi proposti in teoria producono i buchi neri osservati dagli interferometri per onde gravitazionali come Ligo e Virgo, o i buchi neri supermassicci al centro delle galassie? La risposta a questa domanda è legata a questioni profonde, come l'origine delle strutture osservate nell'universo, o la natura della materia oscura. L'origine di un buco nero è stata per lungo tempo una questione di principio, strettamente relegata nel dominio della fisica teorica. Stelle con massa confrontabile al Sole terminano la loro vita come nane bianche o stelle di neutroni. D'altra parte, osserviamo molte stelle con massa ben maggiore di quella del Sole. Che cosa succede a una stella di massa molto grande? Nel 1939 Robert Oppenheimer e Hartland Snyder dimostrarono che il collasso è inevitabile per una stella sufficientemente massiccia. Lo stato finale è quello che oggi chiamiamo un buco nero. A meno di correzioni di natura quantistica, la materia che attraversa l'orizzonte degli eventi, ovvero il confine di un buco nero, è destinata a incontrare una singolarità: una regione in cui la curvatura dello spaziotempo è infinita. L'esistenza di singolarità è un problema molto serio: la teoria della gravità di Einstein prevede il proprio fallimento a scale di energia (o curvatura spaziotemporale) molto alte. Per questo il dibattito sul collasso gravitazionale occupò i fisici per decenni. In un famoso articolo del 1969, Roger Penrose mostrò che nessuna delle possibili obiezioni (effetti dovuti a interazioni nucleari, accrescimento, carica elettrica, campi magnetici, rotazione e asimmetrie, presenza di una costante cosmologica, effetti quantistici, o perfino la possibilità che la relatività generale non sia corretta) può fermare il collasso gravitazionale: la formazione di buchi neri è inevitabile quando una stella ha massa abbastanza grande.

È possibile creare buchi neri sempre più grandi al crescere della massa di una stella? Modelli numerici del collasso gravitazionale indicano che è molto difficile, se non impossibile, produrre buchi neri con massa compresa tra circa 50 e 130 masse solari: per masse così grandi tutta la materia viene espulsa senza produrre un buco nero, a causa della creazione di coppie elettrone-positrone all'interno della stella.

b.
L'origine stellare di un sistema binario di buchi neri.
T è la durata media del processo o della fase raffigurati a lato.



T ~ 3×10^6 anni

Due stelle sono in un sistema binario.

T ~ 10^4 anni

Gli strati esterni della stella più massiccia (detta primaria) si espandono e trasferiscono su quella meno massiccia (detta secondaria).

T ~ 2×10^5 anni

Della stella primaria rimane solo il nucleo di elio.

1 evento ogni 100 anni

Il nucleo di elio della primaria esplode in una supernova.

T ~ 10^4 anni

La primaria diventa un buco nero.

T ~ 10^4 anni

Il sistema binario formato dal buco nero e dalla stella secondaria adotta un'orbita ellittica e la secondaria continua a evolvere ed espandersi.

T ~ 2×10^4 anni

Comincia un secondo processo di trasferimento di massa dalla secondaria alla primaria (buco nero). Emissione di raggi X.

1 evento ogni 100 anni

Esplosione della secondaria.

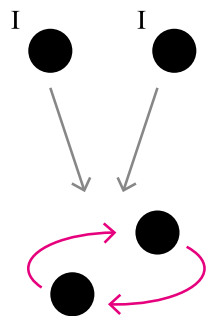
T ~ 10^9 anni

L'orbita del sistema binario è così stretta che l'esplosione della secondaria in una supernova raramente distrugge il sistema binario.

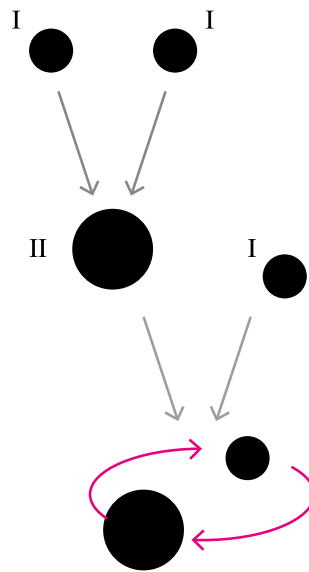
1 evento ogni 10.000 anni

I buchi neri prodotti dalle successive esplosioni continuano a perdere energia emettendo onde gravitazionali, finché non si fondono in un unico buco nero.

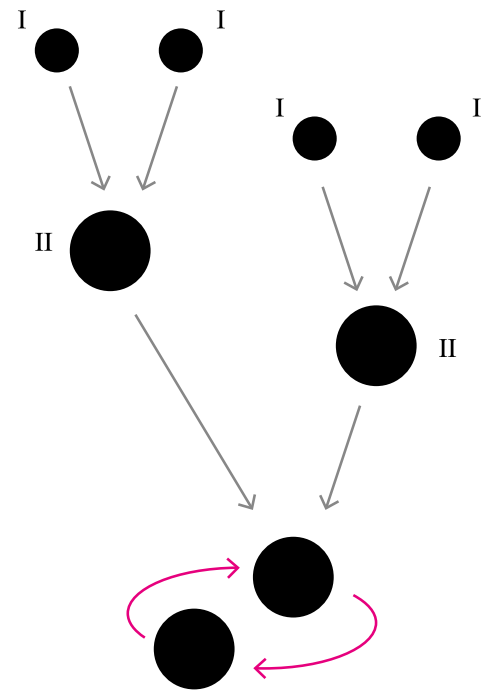
c.
Tre scenari possibili per la formazione di buchi neri. Buchi neri di prima generazione (I) possono formare buchi neri di seconda generazione (II) tramite fusione; questi a loro volta possono fondersi tra loro e generare buchi neri di generazioni successive.



I + I



I + II



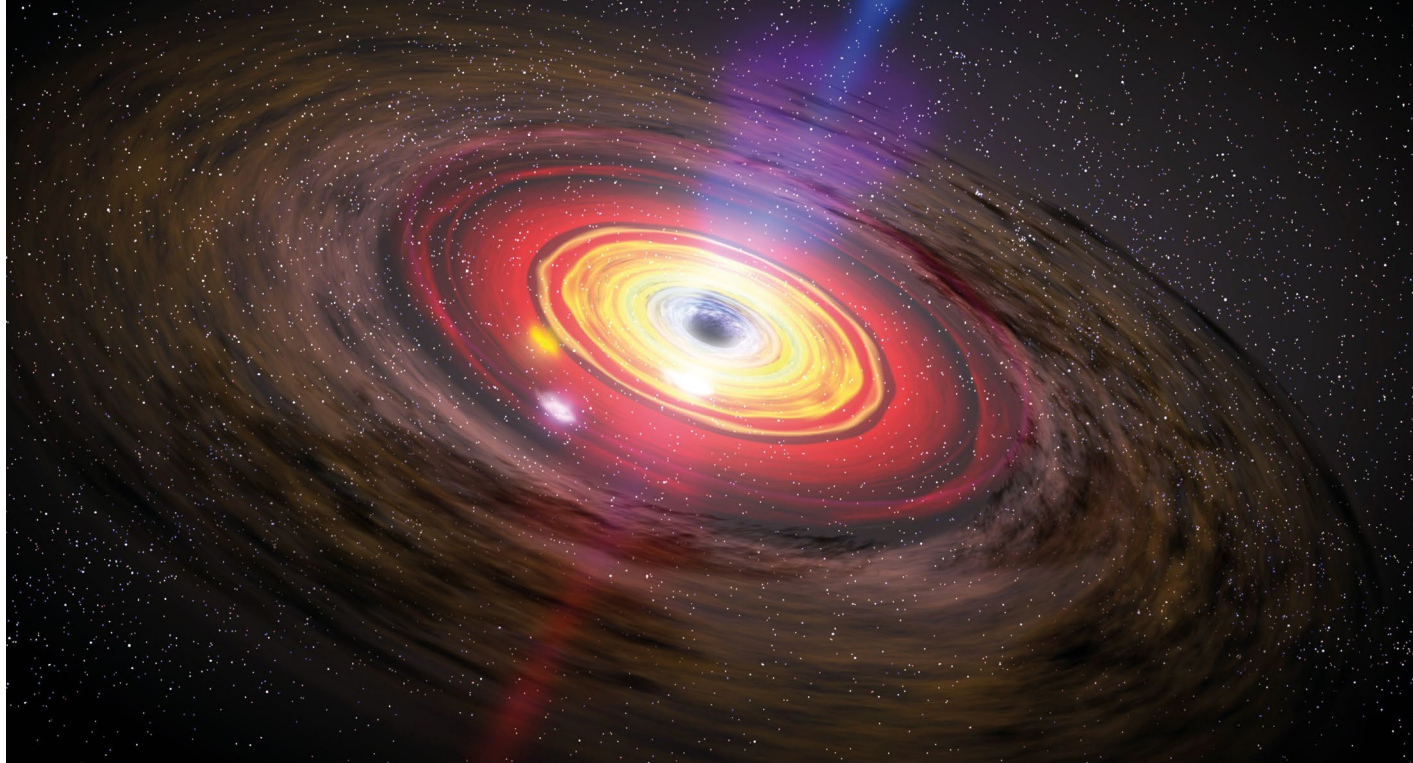
II + II

Secondo la relatività generale, due buchi neri in un sistema binario perdono energia sotto forma di onde gravitazionali. L'orbita si stringe finché i due buchi neri collidono, nella cosiddetta "fusione" (o "merger"), in un solo buco nero rotante con massa poco inferiore alla somma delle masse dei buchi neri iniziali. In genere la scienza progredisce in maniera graduale, ma a volte è possibile datare il momento in cui succede un evento rivoluzionario. Il 14 settembre 2015 è una di queste date: è il giorno in cui, per la prima volta, sono state osservate le onde gravitazionali emesse dalla fusione di due buchi neri. Tramite *merger* è possibile produrre buchi neri di seconda (o terza, o quarta...) generazione che non sono figli diretti del collasso gravitazionale, e possono avere massa superiore a 50 masse solari.

I rivelatori di onde gravitazionali osservano gli ultimi secondi di vita di una binaria di buchi neri. Dalla forma d'onda possono misurare le masse dei buchi neri, una certa combinazione dei loro momenti rotazionali nota come "spin effettivo", e la distanza a cui si trova la binaria. Queste quantità sono simili ai fossili di un dinosauro: dallo scheletro possiamo risalire alla vita del dinosauro, ovvero all'evoluzione della binaria prima del *merger*, e collezionando molti scheletri possiamo fare archeologia e risalire alle proprietà dell'intera specie. Fuor di metafora: Ligo e Virgo stanno ormai osservando decine o centinaia di fusioni di buchi neri, e la combinazione di queste osservazioni ci dirà qual è il meccanismo più probabile per l'origine delle binarie osservate. Gli scenari più probabili includono l'evoluzione di binarie stellari isolate, la dinamica di binarie in ambienti molto densi (*cluster*), la produzione in dischi di nuclei galattici attivi, o addirittura una possibile origine primordiale. In quest'ultimo scenario i buchi neri si formerebbero nei primi istanti di vita

dell'universo (vd. p. 10, ndr), e potrebbero spiegare almeno parte della materia oscura che sembra comporre l'universo. Nello scenario forse più comune, il punto di partenza sono due stelle in un sistema binario (vd. fig. b). Gli strati esterni della stella più massiccia, detta primaria, si espandono e comincia un processo di trasferimento di massa sulla secondaria. Il nucleo di elio della primaria esplode in una supernova creando così un buco nero. In genere l'esplosione è asimmetrica e gli scenari possibili sono due: o il sistema binario si distrugge o assume un'orbita ellittica. Se il sistema binario sopravvive, dopo l'esplosione consiste di un buco nero e una stella, detta secondaria, che continua a evolvere e si espande finché non comincia un secondo processo di trasferimento di massa, stavolta dalla secondaria alla primaria. Il gas che circonda il sistema binario ne assorbe parte dell'energia e alla fine viene espulso. Dopo questo trasferimento di energia, l'orbita del sistema binario è così stretta che l'esplosione della secondaria in una supernova raramente distrugge il sistema: i buchi neri prodotti dalle due successive esplosioni continuano a perdere energia in onde gravitazionali finché non si fondono in un unico buco nero. Questo scenario può riprodurre le masse e il numero di eventi osservati dalla collaborazione Ligo-Virgo, ma prevede che la maggior parte degli eventi abbia uno spin effettivo maggiore di zero, mentre la maggior parte degli eventi osservati hanno spin effettivo molto vicino a zero.

Come è possibile spiegare spin effettivi vicini a zero? La possibilità più semplice è che le binarie si formino in isolamento ma che il collasso produca quasi sempre buchi neri non-rotanti. Una seconda possibilità è che la binaria si formi tramite interazioni dinamiche in un ambiente stellare molto denso, detto "ammasso stellare".



In questo caso ci sono due effetti principali: un sistema triplo tende a espellere il corpo più leggero dei tre, e questo favorisce la formazione di binarie più massicce; e per la conservazione dell'energia, i corpi più pesanti tendono ad affondare verso il centro del *cluster*. Entrambi gli effetti tendono a produrre buchi neri di massa più grande. In interazioni dinamiche l'orientamento dello spin dei buchi neri è generalmente casuale, e quindi è più probabile avere uno spin effettivo vicino a zero. È possibile che in futuro Ligo e Virgo osservino binarie con componenti di massa superiori alle 50 masse solari. Questi buchi neri possono essere formati tramite successive generazioni di *merger* in un ammasso, ma solo se gli ammassi stellari sono abbastanza densi. Un'altra possibilità per formare buchi neri pesanti è che si formino tramite meccanismi simili a quelli che hanno formato i pianeti nel sistema solare: in questo caso i buchi neri si formerebbero nel disco di accrescimento di un buco nero supermassiccio (un "nucleo galattico attivo", o Agn), che crea delle "trappole orbitali" dove è possibile accumulare buchi neri e farli incontrare molte volte.

Un'altra possibilità affascinante è stata proposta molti anni fa da Hawking: i buchi neri osservati da Ligo e Virgo potrebbero essersi formati da fluttuazioni dell'universo primordiale durante l'inflazione (vd. p. 10, ndr).

Se questo fosse vero, gli interferometri potrebbero aver osservato (parte) della materia oscura! Questa possibilità è la più entusiasmante, ma forse anche la più improbabile.

Grazie al lavoro infaticabile dei fisici sperimentali, nei prossimi anni avremo più interferometri (incluso uno in Giappone e uno in India) operanti con maggiore sensibilità. I rivelatori terrestri di terza generazione, come Einstein Telescope e Cosmic Explorer, e Lisa, un rivelatore spaziale in collaborazione tra Nasa ed Esa, saranno così sensibili da osservare fusioni di buchi neri nell'intero universo. Questo è importante perché i buchi neri supermassicci al centro delle galassie sono troppo grandi per essersi formati dal collasso stellare: questa famiglia di buchi neri deve essere cresciuta tramite una combinazione di *merger* e accrescimento. Osservando sorgenti di onde gravitazionali molto lontane sarà possibile, per esempio, stabilire se i primi buchi neri erano relativamente leggeri e prodotti dal collasso di stelle primordiali, o se invece si sono formati dal collasso di gas in protogalassie, galassie giovanissime e lontanissime. L'astronomia gravitazionale è ai primi passi, ma presto ci dirà come l'universo primordiale ha piantato i semi da cui i buchi neri hanno iniziato a crescere.

d.

Rielaborazione artistica di un nucleo galattico attivo.

Biografia

Emanuele Berti è professore alla Johns Hopkins University negli Stati Uniti. Svolge attività di ricerca nell'ambito della fisica di buchi neri e stelle di neutroni, lavora a verifiche osservative della relatività generale e si occupa di astronomia con onde gravitazionali.

DOI: 10.23801/asimmetrie.2020.28.9

Proiettili dallo spazio

Il mistero dei raggi cosmici

di Lorenzo Caccianiga

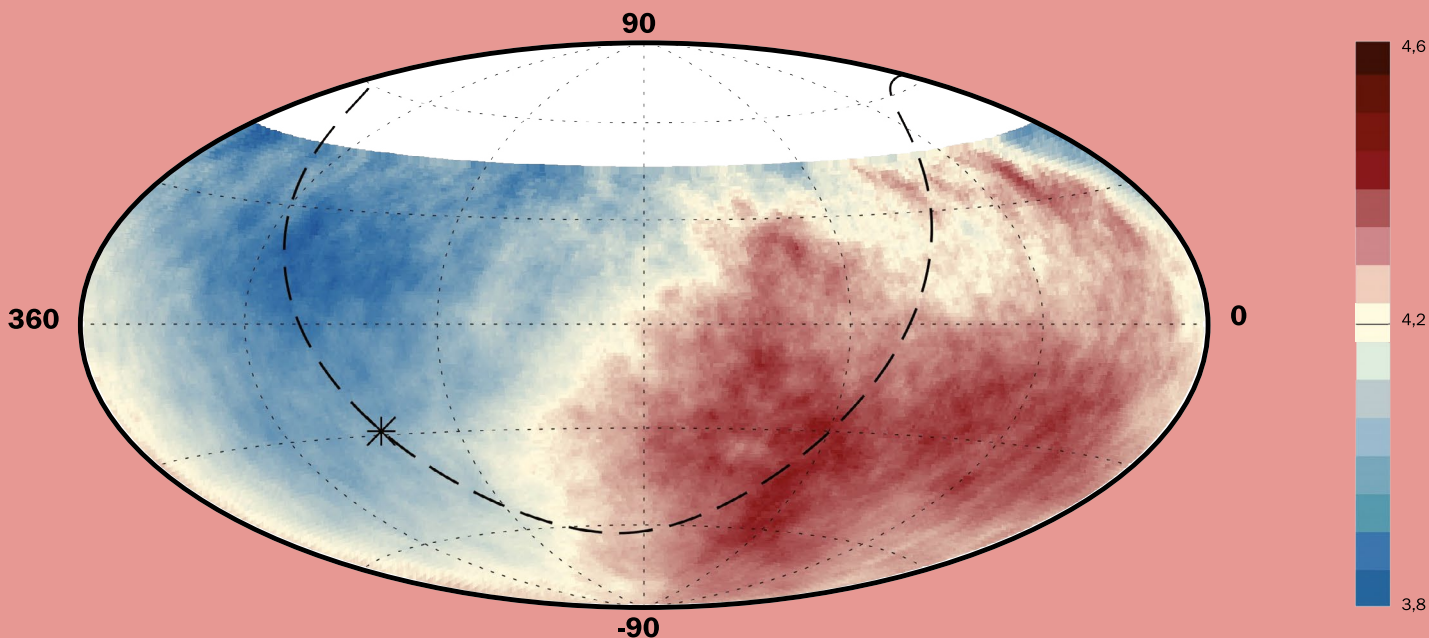
Qual è la montagna più alta? E qual è il fiume più lungo? Quando si è piccoli, gli estremi esercitano una forte attrazione. Difficilmente un bimbo, che non ha esperienza del mondo particellare, chiederà “Qual è la particella più energetica dell’universo?”, ma chiunque si avvicini a questo ambito probabilmente si sarà posto questa domanda.

Molti potrebbero pensare che la risposta sia “quelle che facciamo collidere negli acceleratori come Lhc al Cern”, ma le particelle accelerate dall’uomo, in quanto a energia, non si trovano neanche sul podio. Sono invece i “raggi cosmici”, termine che include in generale tutte le particelle cariche (protoni, elettroni, nuclei) che raggiungono la Terra dallo spazio, a detenere il record. La domanda successiva viene spontanea: “E da dove arrivano?”. La risposta è la più deludente per un bambino, ma la più eccitante per uno scienziato: “Non si sa”. Anche per questo, quando dovetti scegliere la mia tesi di laurea triennale, scelsi questo ambito. Dieci anni dopo, molte cose sono

cambiate: la risposta rimane quella. Come bravi investigatori stiamo però riducendo il campo dei sospettati.

I raggi cosmici, in realtà, non sono tutti super-energetici, anzi: in gran parte sono di energie inferiori o paragonabili a quelle dei nostri acceleratori. Di questi, ne arriva uno per metro quadro al secondo. Le particelle più energetiche osservate, invece, sono decine di milioni di volte più energetiche di quelle a Lhc e sono rarissime: meno di una per kilometro quadro per secolo! Le differenze tra raggi cosmici di bassa e alta energia non si fermano qui: quando colpiscono l’atmosfera i primi fermano subito la loro corsa, mentre i secondi, sfruttando l’equazione più famosa della fisica, $E=mc^2$, e tenendo conto che la velocità della luce nel vuoto c è costante, convertono la propria E , cioè l’energia, in m , cioè massa, materia, creando altre particelle che a loro volta hanno abbastanza energia per crearne altre e così via, fino a generare uno sciame di particelle secondarie (che possono essere anche decine di miliardi) che arrivano a terra.

a. Mappa del cielo che indica la provenienza dei raggi cosmici di alta energia. I colori indicano, secondo la scala a destra, il numero di raggi cosmici che arriva in un’area di cento chilometri quadrati in un anno per unità di angolo solido (il rosso indica le zone di più alta intensità, il blu quelle di più bassa intensità). Sono indicati il centro galattico (asterisco) e il piano galattico (linea spezzata).



Per osservare i raggi cosmici di bassa energia bisogna quindi andare negli strati alti dell'atmosfera, ad esempio con palloni stratosferici, o addirittura fuori, con satelliti. Un esempio di rivelatore di questo tipo è l'Alpha Magnetic Spectrometer o Ams. Installato sulla Stazione Spaziale Internazionale, Ams dispone di un forte campo magnetico che permette di distinguere protoni, elettroni e nuclei.

I satelliti, però, non possono essere più grandi di qualche decina di metri. Anche pensando di poter inviare nello spazio un rivelatore grande un chilometro quadro (e chissà quanto costerebbe!), dovremmo comunque aspettare un secolo per riuscire a vedere un singolo raggio cosmico di alta energia: decisamente troppo. Quindi, per vederli si sfruttano le particelle secondarie: andando a misurarle a terra, riusciamo a ricostruire la direzione di arrivo e l'energia del raggio cosmico primario. Così funziona l'osservatorio Pierre Auger, in Argentina, che copre con una rete di 1600 rivelatori di particelle e 27 telescopi una superficie pari a circa 3000 chilometri quadri, grande quanto la Val D'Aosta.

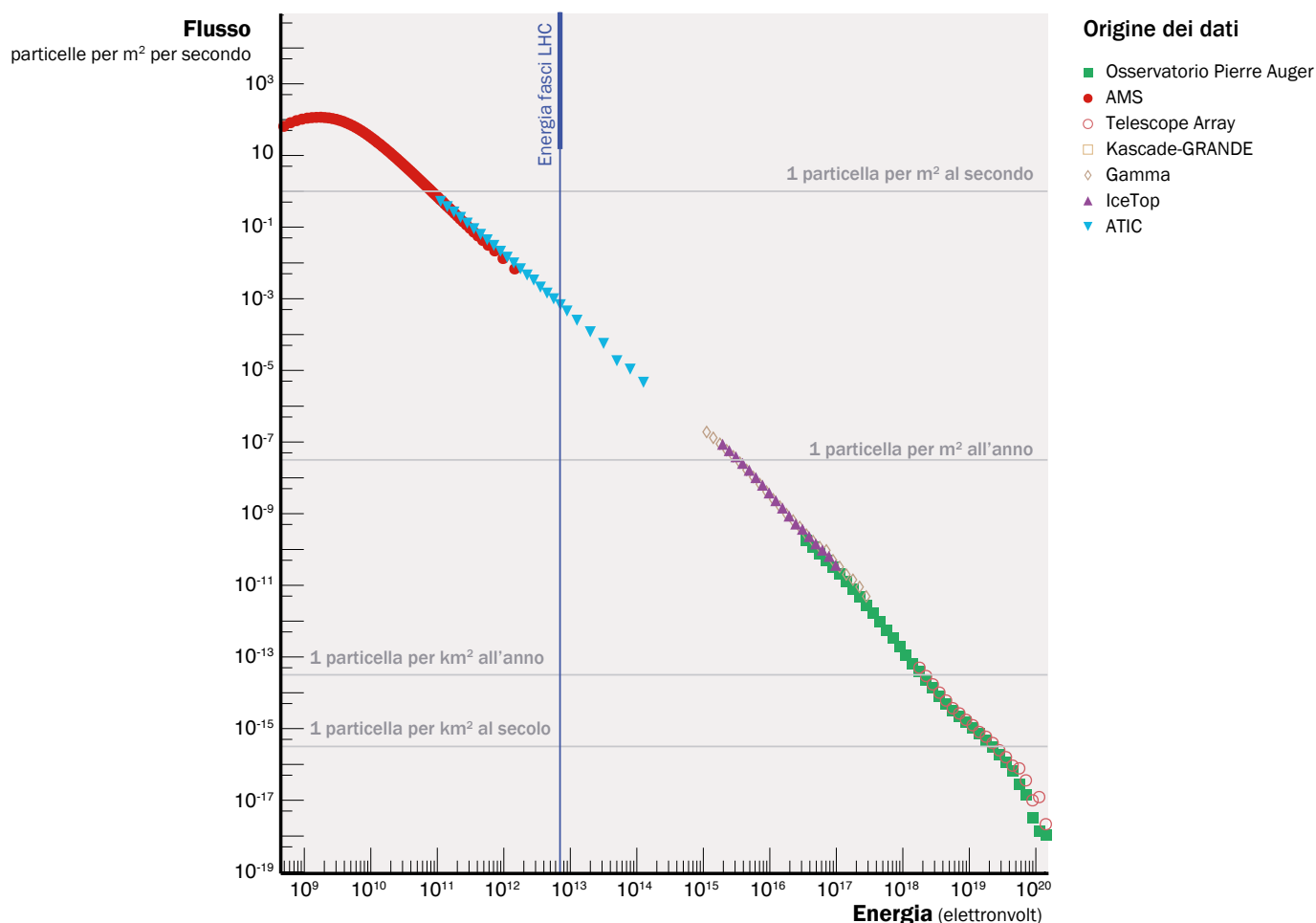
Bene, si potrebbe pensare: abbiamo misurato i raggi cosmici e capito da dove arrivano, sappiamo quindi che cosa li ha generati, giusto? Purtroppo, non è così semplice; i raggi cosmici sono particelle cariche e subiscono deflessioni nei campi magnetici che permeano la nostra galassia e lo spazio intergalattico: quello che ci arriva da una direzione potrebbe aver fatto un lungo giro e provenire in realtà da un oggetto che si trova nella direzione opposta! Per questo bisogna farsi furbi e cercare altre tracce del loro passaggio. Ad esempio, i raggi cosmici possono interagire con la materia o con la luce intorno alla sorgente producendo altre particelle, in particolare

pioni, particelle instabili che decadono in fotoni, cioè luce, di un'energia ben precisa. Non ci sono altri meccanismi naturali conosciuti che producano pioni e quindi osservare fotoni di questa energia provenire da un oggetto celeste sarebbe una prova inconfutabile del fatto che lì si accelerano raggi cosmici. Il satellite Fermi ha inchiodato in questo modo i resti di supernova, le gigantesche esplosioni con cui concludono la vita le stelle più grandi, che ora possiamo affermare con certezza che accelerano raggi cosmici, almeno fino a energie paragonabili a quelle dei nostri acceleratori.

E i raggi cosmici di energia altissima? La cosa diventa più difficile, dato che sono rari. L'osservatorio Pierre Auger ha però osservato che non sono distribuiti a caso sul cielo, ma c'è una zona da cui ne arrivano di più (vd. fig. a). Si può anche vedere che questa è molto lontana dal centro della nostra Galassia. Questo significa che, anche tenendo conto degli effetti del campo magnetico, i raggi cosmici devono venire da fuori dalla nostra galassia. Da dove però? Una cosa è sicura: queste particelle non nascono avendo già energie così elevate. Le teorie che proponevano che i raggi cosmici nascessero direttamente ad alta energia dal decadimento di particelle ancora ignote (ad esempio quelle che potrebbero comporre la materia oscura) sono state smentite dal fatto che tutte prevedevano la contemporanea creazione di fotoni di altissima energia, che non abbiamo visto. Quindi, c'è qualcosa nell'universo che prende particelle ferme, o quasi, e le accelera fino ad energie incredibili, ma cosa? Ci sono due teorie principali: gli acceleratori possono essere oggetti compatti con un campo magnetico intensissimo, come le cosiddette "*magnetar*", stelle composte da soli neutroni che sono i resti di esplosioni di supernova particolari.



b.
Uno dei rivelatori
dell'osservatorio Pierre Auger.



Anche se alcune di queste *magnetar* sono state osservate nella nostra galassia, evidentemente non sono abbastanza potenti da accelerare i raggi cosmici fino alle energie più alte, ma stelle di questo tipo potrebbero esserci nelle galassie vicine. L'altra ipotesi è che i raggi cosmici di più alta energia provengano invece dalle cosiddette "galassie attive", galassie, cioè, il cui nucleo è attivo, ovvero estremamente luminoso. Al loro interno c'è, infatti, un buco nero che mangia costantemente materia, emettendo radiazione. Quest'ultima, sottoposta all'enorme forza gravitazionale, diventa un plasma magnetizzato che avrebbe le caratteristiche necessarie per accelerare i raggi cosmici.

Magnetar o buchi neri: chi dei due sospettati è colpevole? Purtroppo, le prove a nostra disposizione non sono conclusive. Molti raggi cosmici di altissima energia sembrano arrivare dalla direzione in cui si trova Centaurus A, la galassia attiva più vicina a noi, ma in quella direzione ci sono anche delle galassie *starburst*, ossia con un tasso di nascita di stelle più alto del normale: più stelle che nascono significa anche più stelle che muoiono e quindi più

alta probabilità che si formi una *magnetar*. Attualmente, per i dati di Auger, la distribuzione dei raggi cosmici di energia estrema sembra più compatibile con l'ipotesi delle *starburst*, ma non è ancora detta l'ultima parola: ci servono più dati e nuovi strumenti per migliorare la nostra conoscenza e identificare finalmente il colpevole. Auger sta attualmente migliorando il proprio rivelatore, che si chiamerà AugerPrime e prenderà dati per un'altra decina di anni almeno: speriamo per allora di poter dare finalmente un volto a chi accelera le particelle più energetiche dell'universo.

c.
Flusso dei raggi cosmici che arrivano sulla Terra in funzione dell'energia, con i dati registrati da vari esperimenti.

Biografia

Lorenzo Caccianiga è ricercatore presso la sezione Infn di Milano. Si occupa di raggi cosmici di altissima energia e astrofisica multimessaggera sin dalla laurea triennale. È conferenziere regolare al Civico Planetario U. Hoepli di Milano e si occupa di molti eventi di divulgazione.

DOI: 10.23801/asimmetrie.2020.28.10

[as] radici

L'atomo primitivo.

di Luisa Bonolis

storica della fisica



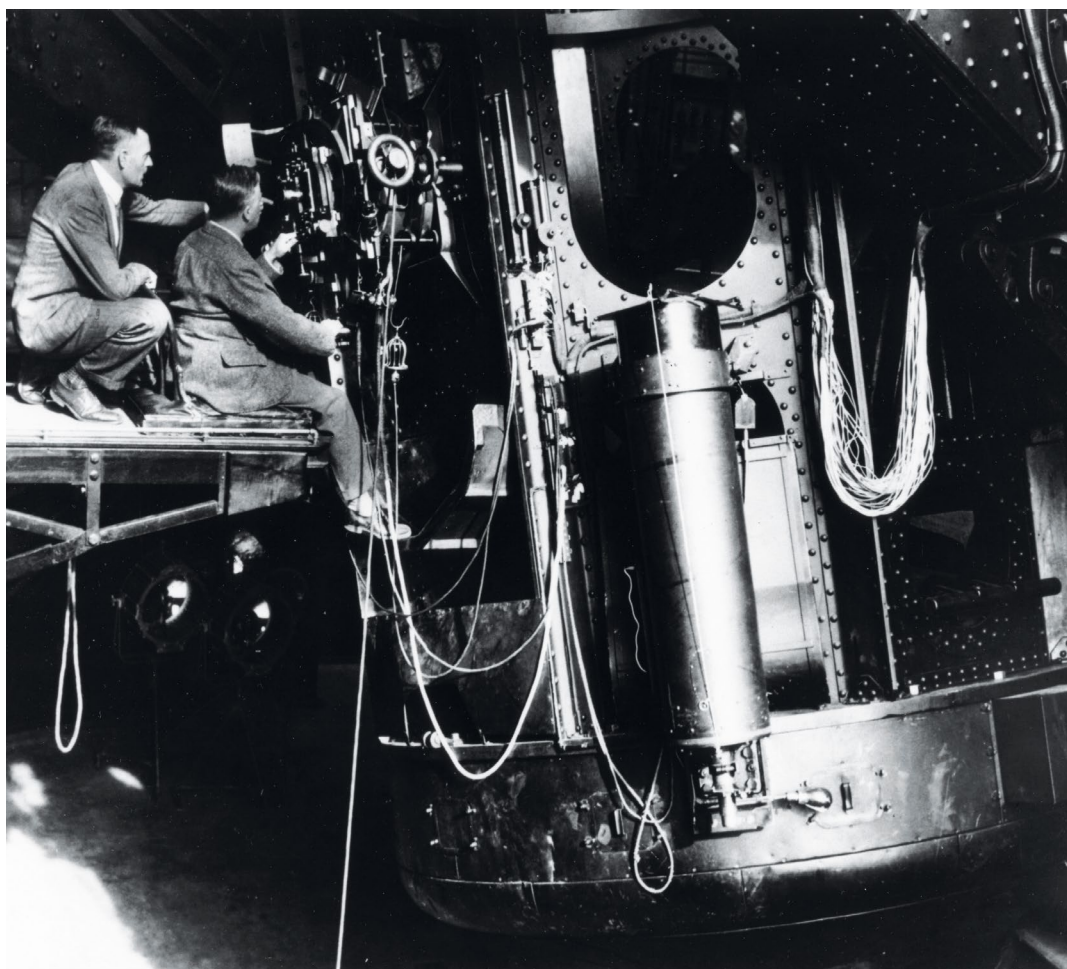
a.
Georges Lemaître
(1894-1966).

L'idea che l'universo attualmente osservabile si sia espanso da uno stato ad altissima densità e temperatura in un istante definito del tempo è apparsa per la prima volta nella sua forma scientifica nel 1931, in un articolo del cosmologo e astronomo Georges Lemaître, un sacerdote cattolico belga.

Nato nel 1894 a Charleroi, Lemaître fu precocemente attratto sia dalla scienza che dalla teologia. Dopo gli studi di fisica si recò negli Stati Uniti, dove visitò la maggior parte dei più importanti centri di ricerca astronomica e ricevette il dottorato

presso il Massachusetts Institute of Technology. Nel 1927, Lemaître pubblicò il lavoro "Un universo omogeneo di massa costante e raggio crescente", in cui forniva una soluzione delle equazioni della relatività generale di Einstein per il caso di un universo il cui raggio cresce esponenzialmente nel tempo, e stimava anche un valore numerico per la costante di espansione. In effetti tale soluzione era già stata derivata indipendentemente dal fisico e matematico russo Alexander Friedmann nel 1922. Tuttavia, Friedmann era principalmente interessato alla

matematica di un insieme di soluzioni che includevano universi in contrazione e in espansione. Basandosi sull'uso di dati osservativi, Lemaître affrontò invece il problema da un punto di vista prettamente fisico, mostrando che la sua soluzione prediceva sia l'espansione di un universo reale, costituito dall'insieme di galassie (all'epoca chiamate "nebulose extragalattiche"), che le osservazioni astronomiche stavano iniziando a rivelare, sia l'esistenza di una relazione lineare tra lo spostamento verso il rosso osservato per le galassie e la loro distanza.



b.
Edwin Hubble e James
Jeans davanti al grande
telescopio da 100 pollici
dell'Osservatorio di
Mount Wilson.

Due anni dopo, nel 1929, l'astronomo americano Edwin Hubble pubblicò i risultati delle sue ricerche sulla relazione tra spostamento verso il rosso e distanza delle galassie, riassunti in un grafico che conteneva i dati astronomici precedentemente derivati da Vesto Slipher e quelli ottenuti da Hubble stesso con il telescopio di Monte Wilson, il più grande telescopio dell'epoca. Tale grafico, che stabiliva una relazione approssimativamente lineare fra le velocità e le distanze tra le galassie, confermando la visione di Lemaître, fu accettato da molti teorici come la prima evidenza della recessione delle galassie e dell'espansione dell'universo.

Nel 1931 Lemaître esplorò le conseguenze logiche di un universo in espansione in una breve nota sulla rivista *Nature* intitolata "L'inizio del mondo dal punto di vista della teoria dei quanti", in cui suggeriva che il mondo fosse iniziato in un istante ben preciso con una grande esplosione in seguito alla quale un "atomo primitivo", una sorta di gigantesco nucleo atomico che racchiudeva l'intera massa dell'universo, si sarebbe frammentato dividendosi in tanti atomi sempre più piccoli, e dando successivamente origine alle galassie più lontane. Nel periodo 1946-1953, la visione cosmologica di

Lemaître fu ripresa in termini moderni da George Gamow e dai suoi collaboratori Ralph Alpher e Robert Hermann. Fu soltanto con il loro lavoro pionieristico che l'universo primordiale – un "brodo" super denso di neutroni e protoni – fu inquadrato in termini di processi termonucleari e in particolare di formazione di nuovi elementi chimici. Alpher e Hermann predissero anche l'esistenza di un fondo di radiazione cosmica, residuo dell'universo primordiale.

Il modello esplosivo di Gamow fu etichettato dispregiativamente "Big Bang" dal grande astrofisico Fred Hoyle all'inizio degli anni '50. A quell'epoca Hoyle, insieme a Hermann Bondi e Thomas Gold, aveva proposto una "teoria dello stato stazionario" in cui l'universo – attraverso la costante creazione di nuova materia – rimaneva uguale a se stesso nello spazio e nel tempo, evitando così la singolarità iniziale.

Ma nel 1964, poco prima della sua morte, Lemaître ebbe modo di assistere alla scoperta che confermava l'esistenza della radiazione cosmica di fondo da parte di Arno Penzias e Robert Wilson. Vendicando la teoria cosmologica di Lemaître e Gamow questa scoperta costituì la prima e più importante evidenza osservativa in supporto del Big Bang.

La vita emergente.

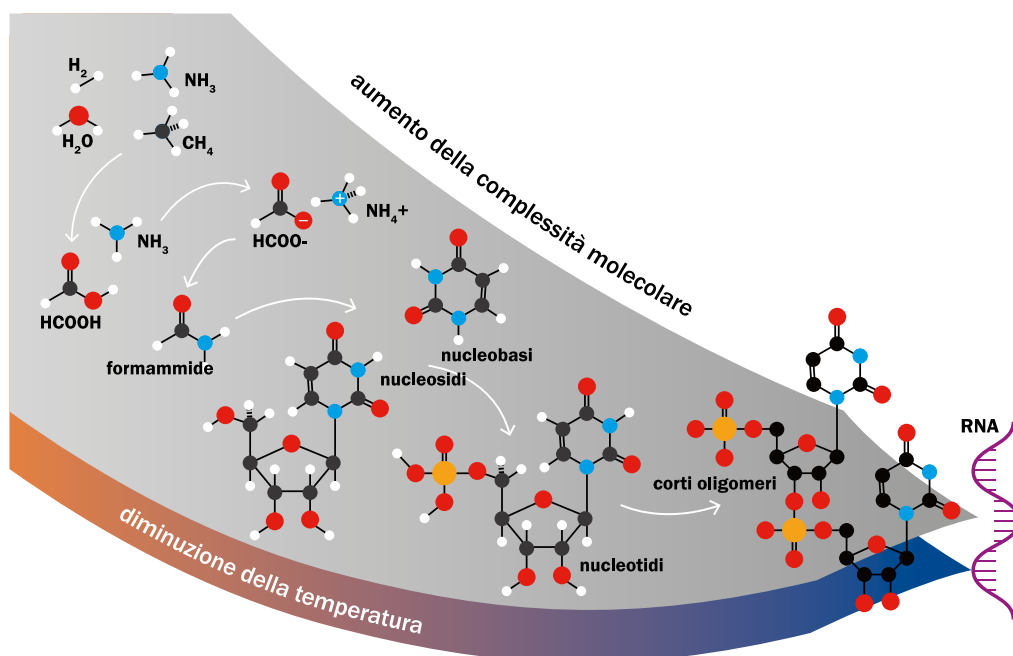
di Ernesto di Mauro

biologo molecolare

L'interpretazione di che cosa si intende per origine della vita richiede prima di tutto di definire che cosa sia la vita ("Ogni esegesi richiede una filologia", nelle parole di Mircea Eliade). Ci potremo poi porre la domanda: esiste una vera origine? Una definizione di vita cui spesso si fa riferimento è quella fornita dalla Nasa: la vita è un sistema chimico che si autosostiene ed è soggetto a evoluzione darwiniana. Questa definizione non incontra grosse obiezioni ma non regge a una analisi formale. La vita non si autosostiene, poiché assorbe ed elabora energia dall'esterno; non è un sistema, ma un processo; e definire un processo non per quello che è ma perché può evolvere è una contraddizione formale. Un'analisi strutturale, basata sulla ricorrenza dei termini e dei concetti in 123 definizioni, fatta da Edward Trifonov, porta alla seguente meta-definizione: la vita è autoriproduzione con variazioni. Questa meta-definizione non ha un valore assoluto ma è una completa analisi di cosa la scienza ritenga essere

la natura intima della materia vivente. Una sua caratteristica è la generalità; si può considerare applicabile non solo alla vita terrestre ma a ogni forma di vita che l'immaginazione possa concepire, come la vita extraterrestre, forme di chimica alternativa, modelli di computer, forme astratte. Essa suggerisce una base unica comune: è vita tutto ciò che copia se stesso e cambia.

Le entità viventi, come le concepiamo nella nostra corrente visione "terrocentrica" e minimalista, sono un insieme di reazioni chimiche coordinate, selezionate nel tempo e integrate con reazioni preesistenti. Ciò pone la vita nel dominio dei processi caratterizzati da proprietà emergenti, cioè da proprietà che non erano presenti prima che il sistema raggiungesse un dato livello di complessità. La vita è dunque complessità auto-generata basata su informazione che riproduce se stessa. Alla luce di tali considerazioni si può riflettere in modo coerente sul problema della sua origine.



a. Generazione dei primi oligonucleotidi sulla Terra. L'aumento della complessità molecolare da molecole con un atomo di carbonio e uno di azoto fino a molecole di Rna è un processo spontaneo.



Esiste uno schema chimico nel quale sia possibile seguire in modo filologico l'emersione di questo speciale tipo di complessità dai suoi inizi? È questo schema chimico veramente unitario, o non dobbiamo piuttosto ricercare la convergenza di flussi multipli e indipendenti di molecole latrici di informazione? Esistono altre nicchie termodinamiche (essendo la vita un fenomeno non all'equilibrio) al di fuori del pianeta Terra, nelle quali sia possibile rintracciare schemi chimici biogenici simili? Sulla Terra, gli organismi viventi sono l'insieme di un "fenotipo" (i sistemi metabolici che raccolgono ed elaborano energia, fatti di proteine, lipidi, zuccheri) e di un "genotipo" (le informazioni che vengono trasmesse attraverso le generazioni), che è costituito di Dna e determina il fenotipo. Numeri altissimi di unità di informazione (i "nucleotidi") sono messi in fila in ordine perfettamente (geneticamente) definito. Un computer procede con scelte successive in base a informazioni espresse da due "lettere", 0 e 1. Il Dna è organizzato in modo simile: le sue "lettere" di base sono due strutture chimiche distinte (nucleotidi purinici e nucleotidi pirimidinici), allineate lungo un filamento polimerico. Per aumentare la propria ricchezza di informazione il codice binario del Dna a un certo momento della propria evoluzione si è sdoppiato e sia le purine che le pirimidine sono diventate due: A (adenina) e G (guanina) sono le purine, C (citosina) e T

(timina) sono le pirimidine. Il filamento di Dna si avvolge e si sostiene intorno a un filamento speculare: il Dna è una doppia elica, e questa specularità è alla base della sua capacità di autoriproduzione.

I processi chimici che hanno generato questo sistema sono determinabili a ritroso. Data la nostra composizione, non possiamo non derivare dalla chimica dell'acido cianidrico, e da quella dei suoi primi derivati: acido formico e, soprattutto, formammide. Gli spazi interstellari contengono elevate quantità di queste sostanze, in nubi le cui dimensioni sono dell'ordine delle migliaia di anni luce. Le reazioni che dai composti primordiali portano ai costituenti di base del vivente (aminoacidi, basi nucleiche, acidi carbossilici, catene alifatiche) sono ormai in gran parte note. Sono anche chiari i principi per i quali queste molecole, generate spontaneamente in presenza di diffusi e adatti catalizzatori, e senza particolari richieste energetiche, possono polimerizzare creando il successivo livello di complessità chimica (le proprietà emergenti di cui sopra). Ne deriva che il filo di reazioni che unisce queste prime molecole biogeniche autogenerate dagli organismi complessi quali noi siamo non conosce interruzioni; e che la vita non ha avuto un vero inizio, poiché non è possibile definire un momento lungo questo filo in cui sia possibile dire: da qui in poi è vita, prima è non-vita.

b.
In un pionieristico esperimento condotto nel 1952 Stanley Miller (nella foto) dimostrò che sotto l'azione di scariche elettriche i composti presenti nell'atmosfera primordiale della Terra potevano interagire con l'acqua producendo molecole organiche (amminoacidi).

[as] selfie Inspyre.

di Anouk Haesler

studentessa del liceo Clelab, Francia



a.
Anouk (a sinistra) e altre studentesse partecipano a un laboratorio di Inspyre 2019.

L'anno scorso, grazie alla classe europea del mio liceo Clelab (Collège Lycée Expérimental Laboratory), ho avuto la possibilità di partecipare al tirocinio Inspyre (International School on Modern Physics and Research) presso i Laboratori Nazionali di Frascati (Lnf) dell'Infn dall'1 al 5 aprile 2019. Eravamo 90 studenti provenienti da 14 paesi in tutto il mondo e 44 scuole diverse. Durante questa settimana abbiamo alloggiato in un hotel a Frascati e lo stage è stato un'introduzione al mondo della ricerca. In quei pochi giorni abbiamo imparato tanto e abbiamo incontrato molte persone. Innanzitutto, siamo stati accolti da Catalina Curceanu, una delle direttrici di Inspyre e ricercatrice presso i laboratori. Il primo giorno, abbiamo

imparato su che cosa si basa il lavoro dei Lnf e abbiamo avuto l'opportunità di conoscere gli altri studenti grazie a un'attività di *speed dating*. Abbiamo partecipato alla nostra prima lezione sul modello standard di fisica delle particelle tenuta da Antonio Polosa della Sapienza Università di Roma. I giorni seguenti abbiamo assistito a quasi 40 ore di conferenze sulla fisica moderna fatte da molte ricercatrici e ricercatori. Alcuni argomenti erano tecnici e difficili da capire, ma ho imparato molto sulle basi della fisica moderna e della fisica in generale. Poiché sono interessata alla fisica, ho sempre cercato di memorizzare la maggior parte delle informazioni che potevo. Ora il mio libro di scienze è pieno di bellissimi calcoli.

Il 3 e il 4 aprile abbiamo poi condotto in piccoli gruppi due esperimenti: io ho partecipato a un'attività chiamata "esperienze di meccanica quantistica", in cui abbiamo calcolato la costante di Planck con l'aiuto dei fisici Susanna Bertelli ed Ennio Turri, e a un esperimento su "medicina e fisica" con Giacomo Gadda della sezione Infn di Ferrara. Durante questo esperimento ho imparato come la gravità, o piuttosto la mancanza di gravità, sia un problema per il sistema nervoso degli astronauti sulla Stazione Spaziale Internazionale. Abbiamo anche studiato il funzionamento della risonanza magnetica e degli ultrasuoni, testando un piccolo scanner. Per me è stato un fatto nuovo scoprire

il collegamento tra questo tipo di fisica e le applicazioni concrete. Inoltre, alcuni giovani ricercatori sono venuti a presentare il loro lavoro. Quando li abbiamo incontrati abbiamo potuto vedere tutte le difficoltà che hanno attraversato e siamo riusciti a calarci nei loro panni. Il terzo giorno, nel pomeriggio, abbiamo assistito a una *lectio magistralis* di Paolo Villorresi dell'Università di Padova dal titolo "Incontra il qubit... e invialo in giro!". Questo evento era aperto al pubblico e incontrare altre persone interessate alla fisica è stato molto bello perché, come studenti, ci sentivamo accomunati dall'essere persone a cui piace vedere equazioni complesse e capire cose inverosimili sul mondo. E anche se non mi è capitato di avvicinarmi molto agli altri studenti, ho visto che poteva essere un'ottima occasione per fare nuove amicizie.

La parte che ho preferito di questo stage è stata quando abbiamo visitato i Laboratori di Frascati e il loro *visitor centre*; soprattutto la visita di Dafne, il più grande acceleratore dei Laboratori. Le infrastrutture di fisica nucleare mi hanno sempre affascinato. In effetti, tutto ciò che ho fatto e visto è stato davvero *inspiring*, stimolante! L'esperienza Inspyre è stata importante per me. Penso che sia stato un momento decisivo per la mia carriera, perché mi ha dato una nuova visione della fisica: una visione che non siamo abituati ad avere a scuola o nella nostra vita quotidiana. Non so ancora se mi dedicherò alla fisica nucleare o alla fisica moderna, ma non dimenticherò mai i momenti trascorsi ai Laboratori di Frascati. Sono grata ai direttori di questa attività di formazione e a tutte le persone che l'hanno resa possibile e piacevole.

b.
Foto di gruppo dei
partecipanti a Inspyre 2019.



[as] traiettore La strada.

di Francesca Mazzotta



“La fisica mi ha appassionato fin da quando ero bambino. Mi ha sempre incuriosito capire come fenomeni che osserviamo nella vita di tutti i giorni possano essere studiati e previsti con estrema precisione ricorrendo semplicemente alla matematica e alla logica.” Inizia così il racconto di Yiannis Makris, giovane fisico teorico che ha da poco iniziato a lavorare presso la sezione Infn di Pavia grazie a Fellini, un innovativo programma di *fellowship* cofinanziato dalla Commissione Europea e dall’Infn.

[as]: Negli ultimi dieci anni hai lavorato in tre paesi diversi, che cosa ti ha portato in Italia?

[Yiannis]: Dopo aver studiato fisica a Cipro, il mio paese, ho deciso di iscrivermi a vari programmi di dottorato negli Stati Uniti che offrivano molte opportunità di carriera post-laurea e sostegno finanziario per coprire spese di vita, studio e ricerca. In più, mi affascinava l’idea di andare a vivere in un altro paese. Così nel 2012 ho iniziato il mio dottorato presso la Duke University in North Carolina, a cui è succeduta un’esperienza nel gruppo di fisica nucleare e delle particelle del Los Alamos National Laboratory. Dopo sette anni negli Stati Uniti però avevo voglia di sperimentare una scuola di pensiero diversa che potesse arricchire la mia visione della ricerca. E su un sito web di annunci di lavoro accademici ho scoperto il programma Fellini. Quando mi sono imbattuto in questa opportunità, conoscevo già il gruppo di Pavia composto da scienziati molto apprezzati negli Stati Uniti, e collaborare con loro mi è sembrata un’ottima occasione per crescere come ricercatore. La scelta non è stata però solo professionale, in Italia sono più vicino a Cipro sia fisicamente sia culturalmente.

[as]: Qual è l'oggetto della tua ricerca?

[Yiannis]: Il mio studio riguarda principalmente gli adroni e la forza forte che tiene insieme i quark che li compongono. In particolare, studio la loro struttura e come si formano a partire da quark e gluoni.

Nello specifico, mi interessano due temi: la fisica dei jet, che sono sciame di particelle che nascono nei collisori come Lhc e portano alla formazione di nuovi adroni, e quella del "quarkonio", una classe di adroni formati da un quark charm o beauty e dal corrispondente antiquark (vd. asimmetrie n. 16 p. 24, ndr).

[as]: Come ti sei avvicinato a questo argomento?

[Yiannis]: Nel 2013, quando ero alla Duke University, ho incontrato il professor Thomas Mehen e ho iniziato a lavorare insieme a lui e a un altro studente su un'idea per combinare la fisica dei jet a quella del "quarkonio". L'argomento mi è sembrato fin da subito interessante perché, richiedendo una profonda conoscenza sia dei jet sia del quarkonio, mi ha permesso di imparare tanto in poco tempo.

Negli ultimi anni, però, il mio lavoro si è allontanato dallo studio di questi sistemi in quanto tali, e si è spostato verso un loro impiego come strumenti per studiare oggetti più fondamentali. La mia attività di ricerca all'Infn prevede quindi lo sviluppo di una nuova teoria per descrivere la produzione di quarkonio. Questa teoria potrebbe avere un ruolo importante

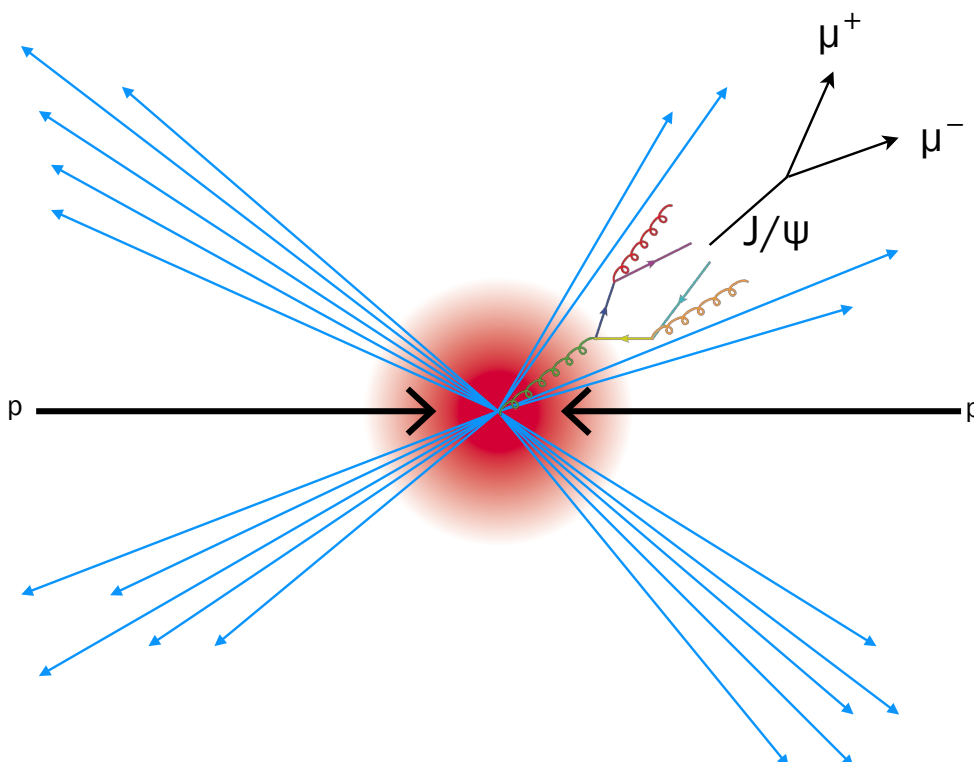
in futuri studi sull'utilizzo del quarkonio come sonda per conoscere meglio la struttura del protone e del neutrone.

[as]: Ritieni che avere una forte esperienza internazionale sia un valore aggiunto per un ricercatore?

[Yiannis]: Sì, credo che esporre il proprio lavoro di ricerca a diverse scuole di pensiero sia un obbligo per un ricercatore e il modo migliore per farlo è attraverso una lunga carriera internazionale. Esperienze in paesi diversi ti permettono di avere collaborazioni con ricercatori in tutto il mondo e ti aprono la mente.

[as]: Che cosa ti aspetti dal tuo futuro?

[Yiannis]: È una domanda delicata. Come ogni ricercatore a inizio carriera, vorrei diventare un professore ordinario o un ricercatore a tempo indeterminato per poter continuare a lavorare su quello che mi interessa e crescere come scienziato. Ma c'è un problema: ci sono molti meno posti a tempo indeterminato rispetto ai posti come dottorando o ricercatore a tempo determinato. Questo significa che molti di noi non ce la faranno. Il mio obiettivo rimane quello di lavorare sodo per ottenere una di queste posizioni, ma mi è chiaro che il mio percorso professionale a un certo punto potrebbe cambiare. Devo essere onesto, mi reputo fortunato di essere arrivato fino a questo punto.



b.
Produzione di una forma di quarkonio, la particella J/ψ , in un urto protone-protone. Le frecce azzurre indicano i jet adronici.

[as] illuminazioni

Con gli occhi del fisico.

La vita di tutti i giorni pone continuamente sotto i nostri occhi fenomeni che possiamo definire “semplici” solo per il fatto che coinvolgono oggetti della nostra quotidianità, ma dare a questi fenomeni una spiegazione scientifica corretta e accessibile a tutti richiede uno sforzo non inferiore a una misura di fisica delle particelle. La soddisfazione finale per il ricercatore è forse anche maggiore, specie quando la cosa non rimane fine a se stessa, ma porta l'interlocutore, adulto o ragazzo, a vedere la realtà con gli occhi dello scienziato. Semplici esperimenti con bicchieri, palloncini o siringhe, che si possono realizzare nella cucina di casa, sono un'eccellente palestra per impadronirsi del metodo scientifico e per imparare leggi fondamentali della natura senza bisogno di un pesante formalismo matematico che rischia di allontanare molti. Un bicchiere riempito d'acqua, coperto da una superficie impermeabile e capovolto può essere l'occasione per comprendere concetti come la pressione di un fluido,

portando i ragazzi a visualizzarne l'origine microscopica attraverso immagini familiari. In un metro cubo di aria ci sono 3×10^{25} particelle (30 milioni di miliardi di miliardi, ecco a cosa servono le potenze di 10!) che continuamente urtano contro qualsiasi superficie alla velocità media di 1800 km/h (il doppio della velocità di un aereo!): sono gli urti di queste particelle a sostenere l'acqua del bicchiere.

Questo approccio si presta a fornire a insegnanti e studenti spunti per lezioni non convenzionali dalle proprie abitazioni. Questa è l'idea che ha portato alla realizzazione di *Homemade Physics*: brevi clip distribuite sulla pagina Facebook con semplici esperimenti realizzabili anche in cucina con quanto si trova in dispensa. Punto di partenza è stato il progetto AggiornaMenti: iniziativa dell'Infn rivolta alla formazione dei docenti di scuola media, pensata per rendere possibile un insegnamento attivo e inclusivo della fisica anche in assenza di laboratori attrezzati. [Andrea Beraudo]





Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

I laboratori dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare sono temporaneamente chiusi alle visite per l'emergenza sanitaria Covid-19.

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 4371
(chiedere dell'ufficio prenotazione visite)
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

www.infn.it



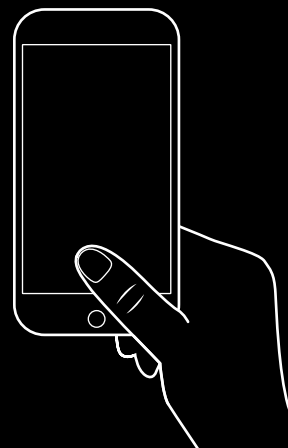
Sul sito **www.asimmetrie.it**
vengono pubblicate periodicamente
notizie di attualità scientifica.

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