

6/2017

M

MicroMega
PER UNA SINISTRA ILLUMINISTA

almanacco della scienza

l'infinito

(NEL GRANDE E NEL PICCOLO)

I TANTI ADAMO ED EVA

Telmo PIEVANI, Guido BARBUJANI, Luca PAGANI

LA NASCITA DELL'UNIVERSO

Guido TONELLI, Francesco FIDECARO

Cristiano GALBIATI, Elisa NICHELLI

I SEGRETI PERTURBANTI DEL DNA

Anna MELDOLESI, Jonathan SHAW, Manuela MONTI

Carlo Alberto REDI, Stefano VANIN, Giuseppe TESTA

CLIMA ED EVOLUZIONE

Andrea PARRAVICINI, Niles ELDREDGE, Stefano CASERINI

CHI SIAMO

Alessandro ROSSI, Pier Luigi SACCO

Siri HUSTVEDT, Vittorio GALLESE

IL PENE COME INVENZIONE SOCIALE

Una clamorosa beffa contro la deriva postmoderna e 'gender'

Peter BOGHOSSIAN e James LINDSAY

■ saggio

Adamo ed Eva nati più volte
TELMO PIEVANI

■ iceberg 1

universo in evoluzione

In principio era il vuoto
GUIDO TONELLI

Le onde gravitazionali
Quelle deformazioni dello spazio-tempo
che ci raccontano l'origine dell'Universo
FRANCESCO FIDECARO

C'è ma non si vede
Alla ricerca della materia oscura
CRISTIANO GALBIATI

Alla ricerca di una Terra gemella
ELISA NICHELLI

■ iceberg 2

da dove veniamo

Come il clima ha influenzato
l'evoluzione umana
ANDREA PARRAVICINI

Il 'secchio oscillante'
Ovvero la teoria gerarchica dell'evoluzione
NILES ELDRIDGE

Sesso libero tra *Homo sapiens*
Neandertal e altri 'Homo'?
GUIDO BARBUJANI
LUCA PAGANI
TELMO PIEVANI

■ il sasso nello stagno 1

Verso il suicidio climatico?
STEFANO CASERINI

■ iceberg 3

i segreti perturbanti del DNA

Un enzima rivoluzionario
ANNA MELDOLESI

Un mondo senza malaria?
Opportunità e rischi dell'editing genomico
JONATHAN SHAW

Biologia: dalla descrizione
alla sintesi del vivente
MANUELA MONTI
e CARLO ALBERTO REDI

Da Sherlock Holmes a Csi
Come sono cambiate le scienze forensi
STEFANO VANIN

Non di solo DNA
GIUSEPPE TESTA

■ iceberg 4

chi siamo

Il cervello a colori: fascino e insidie
delle neuroimmagini
ALESSANDRO ROSSI

La cooperazione conviene
(anche agli egoisti)
PIER LUIGI SACCO

Quel profondo desiderio
di afferrare chi siamo
SIRI HUSTVEDT
VITTORIO GALLESE
in conversazione con
BERND EBERHART e JESSICA SABASCH

■ il sasso nello stagno 2

Il pene concettuale come costruito
sociale: una beffa contro la deriva
postmoderna negli studi di genere
PETER BOGHOSSIAN
e JAMES LINDSAY

978-88-8371-552-5



9 788883 715525

Rivista bimestrale
Sped. a.p. - di 353/2003 conv
L.46/2004, art.1, c.1, Roma

15,00 €

notizie sugli autori

1763

iceberg 1

universo in evoluzione

Guido Tonelli ci accompagna in uno straordinario viaggio nel tempo fino ai primi istanti del Big Bang (p. 17); Francesco Fidecaro descrive i nuovi scenari aperti dalla scoperta delle onde gravi-

tazionali (p. 30); Cristiano Galbiati ci spiega come gli scienziati vanno a caccia della materia oscura (p. 44); e infine Elisa Nichelli ci racconta le ultime scoperte sui pianeti extrasolari (p. 57).

IN PRINCIPIO ERA IL VUOTO

In principio era il vuoto. Che non è il nulla, ma uno stato di energia minima, in cui non c'è alcuna forma di materia, che non è attraversato da particelle elementari e non contiene campi di alcun genere, ma che passa attraverso una sequenza interminabile di fluttuazioni, piccole oscillazioni casuali che lo fanno brulicare incessantemente. L'insieme delle osservazioni effettuate negli ultimi decenni sembra convergere verso la conclusione, tutt'altro che scontata, che tutto ha avuto origine proprio da una di queste minuscole fluttuazioni del vuoto.

GUIDO TONELLI

Un momento magico della fisica

Quello che stiamo vivendo in questi anni sarà ricordato come un momento magico della fisica. In un periodo di tempo relativamen-

te breve si sono succedute due scoperte che hanno cambiato in profondità la nostra visione del mondo. L'una, la scoperta del bosone di Higgs, nel campo dell'infinitamente piccolo; l'altra, quella delle onde gravitazionali, all'estremo opposto, nell'esplorazione delle grandi distanze cosmiche. Gli esperimenti più complessi che mente umana abbia potuto concepire hanno chiuso ricerche che duravano da molti decenni, segnando un cambiamento di paradigma destinato ad avere ulteriori sviluppi. Come spesso succede, tutto è ancora troppo vicino per permetterci di capire le conseguenze a lungo termine della nuova fase che si è appena aperta. È quindi un buon momento per fare il punto della situazione, capire a che punto siamo e quali sono le nuove sfide che ci attendono.

Occorre anzitutto ricordare che, in buona sostanza, al centro delle ricerche più sofisticate della fisica fondamentale rimane la più semplice e diretta delle domande: «Da dove viene la meraviglia di Universo materiale che ci circonda?». È la vecchia domanda che l'umanità ha cominciato a porsi fin dagli albori della preistoria. Quella da cui hanno avuto origine il mito, la religione e la filosofia e con essa le prime indagini scientifiche vere e proprie. Da quella domanda sono nati i grandi racconti delle origini che hanno costituito l'ossatura attorno alla quale si sono costruite civiltà grandi e piccole.

La fisica moderna è in grado di affrontare oggi la vecchia questione in modo completo e sistematico grazie alla potenza formidabile del metodo sperimentale. Questo strumento, concettualmente così semplice quanto sofisticato nei dettagli, inventato e messo a punto da Galilei, ha cambiato tutto. Grazie a lui, in pochi secoli, la scienza ha sviluppato un'incredibile velocità di espansione e di crescita. Mentre le altre discipline hanno continuato a progredire linearmente, la capacità di costruire un nuovo modo di guardare al mondo, in grado di inglobare quei piccoli dettagli incongruenti che le vecchie congetture non erano in grado di spiegare, ha dato alla fisica ritmi di sviluppo tumultuosi, fino alla crescita esponenziale che si è avuta a partire dai primi del Novecento.

Con lo sviluppo di relatività e meccanica quantistica si è realizzata una rottura epistemologica che ha pochi precedenti nella storia e le cui conseguenze sono destinate a durare a lungo. Ma la ricerca scientifica continua la sua corsa ed è quindi necessario fare i conti con le modifiche radicali che le scoperte più recenti apportano a concezioni che sembravano consolidate fino a pochi decenni fa.

Due strade della conoscenza

Per ricostruire la nascita dell'Universo materiale che ci circonda la fisica moderna percorre due strade, in linea di principio del tutto indipendenti. La prima indaga il mondo delle particelle elementari, le strutture più minuscole che mente umana possa immaginare. L'altra si muove all'altro estremo della scala dimensionale. Esplora gli oggetti enormi che popolano il cosmo, le galassie e i grandi ammassi, fino a investigare l'Universo nel suo complesso. Entrambe hanno bisogno di grandi apparati e di tecnologie sempre più innovative. I giganteschi acceleratori di particelle e i loro enormi rivelatori sono gli strumenti principali dell'indagine del microcosmo, mentre una rete molto variegata di strutture di osservazione del cosmo popola la terra e lo spazio a essa circostante. Cosa ha a che fare tutto questo con l'origine della materia e la nascita dell'Universo?

Per capirlo è necessaria una premessa. La materia, tutta la materia che ci circonda è molto vecchia. I componenti elementari degli atomi del nostro stesso corpo, quelli che compongono anche le nostre ossa o il nostro sangue, vagano per l'Universo da miliardi di anni. Se potessero raccontarci la loro storia, ascolteremmo un racconto meraviglioso che parte dal Big Bang, un evento che risale a miliardi di anni fa.

Il nostro Universo è in effetti molto vecchio; le misure più recenti gli attribuiscono un'età di 13,8 miliardi di anni. Ed è un sistema molto freddo. Non lasciamoci ingannare dal fatto che noi umani ne abitiamo un angolino molto confortevole. Alla superficie del pianeta Terra la temperatura oscilla fra i $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ dell'Antartide e i $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ dei deserti più assolati, ma basta allontanarsene per qualche centinaio di chilometri e subito la temperatura precipita a valori incredibilmente bassi. Nel vuoto siderale che circonda il sistema solare e occupa lo spazio fra le stelle e le galassie si toccano i $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$. L'Universo nel suo complesso è un ambiente gelido, a tre gradi soltanto dallo zero assoluto.

Insomma la materia, tutta la materia che ci circonda, si trova oggi in condizioni molto diverse da quelle che la caratterizzavano nei primi istanti di vita. L'Universo primordiale era un ambiente con temperature e densità spaventose e si comportava in modo radicalmente diverso rispetto a quello che ci è familiare. Se vogliamo capire non ci resta che fare un vertiginoso viaggio all'indietro nel tempo e ritornare a quei primissimi istanti di vita.

La buona notizia è che si possono seguire due strade, radicalmente diverse fra loro e totalmente indipendenti. La prima è quella che pratichiamo noi, i fisici delle particelle. Utilizziamo grandi apparecchiature, gli acceleratori, per produrre collisioni di alta energia e studiare le particelle più minuscole che ne scaturiscono. La seconda è quella seguita da astronomi e astrofisici che osservano le strutture più gigantesche che ci circondano: stelle, galassie e ammassi di galassie, fino all'Universo nel suo complesso.

Esplorazioni molto complicate

Le due strade della conoscenza esplorano regioni opposte sulla scala delle dimensioni. Alcune delle particelle elementari studiate dai fisici degli acceleratori sono oggetti di dimensioni 10^{-20} cm, mentre le galassie studiate dagli astro-fisici si estendono per 10^{+20} cm¹. Come si spiega che campi di indagine così diversi e separati da quaranta ordini di grandezza possano darci informazioni preziose sull'origine della materia?

Gli acceleratori di particelle sono enormi infrastrutture. Il Large Hadron Collider (Lhc) in funzione al Cern è un anello di 27 km di circonferenza che corre a cento metri sottoterra, nella piana del Giura, vicino al Lago di Ginevra. Pacchetti di protoni vengono fatti circolare in direzioni opposte all'interno di un tubo a vuoto; intensi campi elettrici li accelerano fino a raggiungere velocità prossime a quella della luce, mentre migliaia di supermagneti li mantengono in orbita circolare e poi li guidano fino a farli scontrare gli uni con gli altri.

I protoni sono particelle veramente minuscole, microscopici mattoncini che compongono i nuclei degli atomi. E anche le energie che scaturiscono dalle loro collisioni sono insignificanti se rapportate alla nostra vita quotidiana. Ma lì, concentrate nello spazio infinitesimo in cui questi urti avvengono, ricreano condizioni estreme che non si erano più viste dai tempi del Big Bang.

Gli acceleratori di particelle possono essere visti come una sorta di macchine del tempo, capaci di riportarci indietro di miliardi di anni per vedere fenomeni accaduti in epoche lontanissime, negli istanti immediatamente successivi al Big Bang. Sono una *fabbrica di particelle estinte*, in quanto – percuotendo la struttura del vuoto

¹ Qui è necessario far ricorso alla notazione esponenziale, che ci permette di scrivere in modo compatto numeri che altrimenti avrebbero molte cifre: 10^{-20} è un numero piccolissimo che equivale a 0,00000000000000000001, scritto con 20 zeri e 10^{+20} il numero enorme 100.000.000.000.000.000.000.

con collisioni ad altissima energia – riescono a riportare in vita, per frazioni di secondo, particelle che da miliardi di anni non popolano più il nostro Universo vecchio e freddo.

È un'applicazione della famosa relazione di equivalenza fra massa ed energia di Einstein. Quando un fascio di particelle collide con un altro, l'energia dell'urto si può trasformare in massa, $E=mc^2$: maggiore è l'energia, più massicce sono le particelle che si possono produrre, più ci avviciniamo al Big Bang.

In questo modo è possibile ricreare, in laboratorio, quelle condizioni estreme di temperatura e di pressione che caratterizzavano l'Universo primordiale. Per un istante, il piccolo volume nel quale si concentra l'energia della collisione si popola di particelle estinte da miliardi di anni. Queste decadono immediatamente in particelle più comuni, rilasciando segnali inequivocabili nei sofisticati apparati sperimentali che circondano le zone di interazione.

I risultati ottenuti negli ultimi decenni, con apparati sempre più complessi e congetture teoriche via via più raffinate, ci hanno portato a un'elegante descrizione della materia che è conosciuta come Modello standard delle interazioni elementari. L'Lhc, il grande acceleratore del Cern di Ginevra, è l'apoteosi di questa linea di ricerca il cui successo più recente è stata la scoperta del bosone di Higgs.

All'estremo opposto i grandi telescopi, gli osservatori astronomici basati a terra o lanciati in orbita terrestre.

Dalla fisica quantistica sappiamo che la luce è fatta di fotoni che sfrecciano a 300 mila chilometri al secondo, una velocità enorme, ma non infinita. Per oggetti distanti fino a decine o centinaia di chilometri, i più lontani che riusciamo a osservare sulla Terra, possiamo trascurare il tempo che la luce impiega a coprire la distanza. Ma quando si rivolge lo sguardo a stelle lontane decine o centinaia di anni luce, non si può ignorare il fatto che i fotoni che colpiscono la nostra retina hanno viaggiato per molto tempo; alcuni, quelli provenienti dalle stelle più lontane, per migliaia di anni. Ecco che il nostro cervello ricostruisce l'immagine dell'astro com'era nel preciso momento in cui ha emesso quella luce, quindi migliaia di anni fa. Ecco come, osservando oggetti molto distanti nello spazio, si possono studiare fenomeni avvenuti molto addietro nel tempo. I moderni telescopi, che sono in grado di raccogliere immagini di galassie distanti anche 13 miliardi di anni luce, fotografano *galassie bambine*, e le possono studiare nelle prime fasi di formazione; possono vedere in diretta l'evoluzione dell'Universo primordiale. C'è un limite, tuttavia, a questa corsa all'indietro nel tempo. La

2
2

prima luce che ha illuminato il mondo si è separata dalla materia solo 380 mila anni dopo il Big Bang. Prima la densità era troppo alta per permettere ai fotoni di scorrazzare liberi. Questa barriera impedisce ai telescopi ottici di osservare direttamente quello che è successo prima di quel momento fatidico. Tuttavia questi fotoni primitivi, che costituiscono il fondo cosmico di radiazione, sono una delle sorgenti di informazioni più importanti.

L'Universo intero si può considerare una specie di enorme forno a microonde, che è stato caldissimo miliardi di anni fa, ma che ancora non si è raffreddato del tutto. Questa radiazione, che è ovunque, e che vediamo provenire da ogni dove, è studiata con gli strumenti più sensibili, perché conserva ancora, debolissime, le tracce di tutta la storia che ha attraversato. Per studiarla, evitando i disturbi tipici degli ambienti terrestri, si mandano gli apparati in orbita o si installano rivelatori speciali nelle regioni più remote dell'Antartide.

Infine si costruiscono mappe del cosmo sempre più complete e dettagliate, cercando di utilizzare tutti i possibili segnali, non solo quelli ottici, ma anche le onde radio a tutte le frequenze, i raggi X e gamma, le emissioni di neutrini e, recentemente, anche le onde gravitazionali².

La cosa strabiliante è che le due strade della conoscenza, così diverse fra loro, che usano metodi e tecnologie totalmente indipendenti, condotte da scienziati che indagano campi di ricerca molto distanti e apparentemente scollegati, portano alle stesse conclusioni. Questi studi ci permettono di ricostruire le origini del nostro Universo con grande precisione, e con qualche sorpresa.

C'era una volta il vuoto

L'insieme delle osservazioni effettuate negli ultimi decenni sembra convergere verso la conclusione, tutt'altro che scontata, che tutto ha avuto origine da una minuscola fluttuazione del vuoto. Attenzione, il vuoto primordiale non è il nulla, al contrario è un sistema molto speciale.

In fisica si definisce vuoto lo stato di energia minima, in cui non c'è alcuna forma di materia, non è attraversato da particelle elementari e non contiene campi di alcun genere. Come tutti gli sta-

² Le onde gravitazionali sono deformazioni dello spazio-tempo che si propagano come onde.

ti, anche il vuoto, su scala microscopica, deve rispettare il principio di indeterminazione di Heisenberg³, per cui non può rimanere uguale a se stesso, immobile, bloccato. Anch'esso passa attraverso una sequenza interminabile di fluttuazioni, piccole oscillazioni casuali che lo fanno brulicare incessantemente. Dal vuoto possono emergere in continuazione coppie di particelle e antiparticelle⁴, che dopo una brevissima esistenza vengono riassorbite nello stato originario.

Da questa condizione si sviluppa il fenomeno che ha portato alla nascita del nostro Universo. Succede qualcosa, cioè, in una di quelle minuscole fluttuazioni, che possiamo immaginare come bollicine di dimensioni assolutamente trascurabili, molto più piccole dei nostri protoni. Ecco, una delle tante fluttuazioni, per un fenomeno che ancora presenta alcuni aspetti oscuri, e che chiamiamo *inflazione cosmica*, anziché richiudersi immediatamente e ritornare allo stato di vuoto, comincia improvvisamente a espandersi e assume di colpo dimensioni enormi.

Nel tempo davvero ridicolo di 10^{-35} secondi la microscopica anomalia si gonfia fino a diventare una cosa gigantesca, grande cento miliardi di miliardi di chilometri. Lo spazio-tempo si è espanso improvvisamente, a una velocità spaventosa. Attenzione, il limite della velocità della luce (c) vige quando lo spazio-tempo è già definito, cioè nulla si può muovere nello spazio-tempo a velocità superiori a c . Ma se lo stesso spazio-tempo si gonfia, in questo caso non ci sono limiti di velocità, può crescere al ritmo più forsennato.

C'è da dire che il fenomeno che ha fatto sì che la nostra bollicina si comportasse in una maniera molto diversa dalle altre non ha nulla di magico. Si tratta di un meccanismo molto materiale, determinato da una strana particella che chiamiamo *inflatone*. Basta ipotizzare che essa, per puro caso, sia comparsa proprio nella particolare fluttuazione del vuoto che ci interessa, e di colpo tutto diventa semplice.

³ Il principio di indeterminazione di Heisenberg stabilisce limiti nella misurazione dei valori di grandezze fisiche *coniugate*, quali posizione e quantità di moto, energia e tempo in un sistema fisico. Sulla base di questo principio nessun sistema microscopico può avere stabilmente un valore fisso di energia, perché altrimenti sarebbe possibile definire contemporaneamente, con precisione infinita, le due variabili. Pertanto l'energia del sistema fluttua, per piccoli intervalli di tempo, intorno al suo valore medio.

⁴ La fisica quantistica ha dimostrato che per ogni particella, per esempio l'elettrone, esiste un'antiparticella, in questo caso il positrone, con la stessa massa, ma carica elettrica opposta. Quando particelle e antiparticelle si incontrano si annichilano in un lampo di pura energia.

Da un punto di vista concettuale il meccanismo dell'inflazione cosmica ci è abbastanza chiaro e ci sono anche ipotesi su chi possa essere il responsabile dell'inflazione. Per esempio particelle scalari, prive di quella proprietà chiamata *spin* (per dirla in maniera grossolana: che non ruotano su se stesse), potrebbero produrre questo meccanismo. Una la conosciamo, l'abbiamo scoperta da poco, è il bosone di Higgs. Può darsi che sia stato proprio lui, o forse un suo cugino di primo grado. Ancora non siamo in grado di stabilirlo.

Sotto la spinta dell'inflazione si innesca una formidabile progressione. Lo strano materiale produce una pressione di energia negativa. Cioè spinge tutto, in maniera furibonda, verso l'esterno, e più si espande più la spinta aumenta. Ecco il perché del nome. L'inflazione richiama il nome usato in economia per esprimere la crescita dei prezzi, perché è un po' lo stesso meccanismo, seppure in forma parossistica. Più si ampliano le dimensioni della bollicina più essa si riempie di *inflaton* e la spinta a crescere aumenta a dismisura. È la dinamica tipica dei fenomeni di crescita esponenziale. In un tempo ridicolmente piccolo il sistema raggiunge dimensioni gigantesche, poi tutto si calma, si placa di colpo. L'espansione continuerà per miliardi di anni a venire ma sarà un soffio leggerissimo totalmente diverso dal turbinio selvaggio e furioso dei primi istanti.

E così, alla fine della *fase inflazionaria*, abbiamo già di fronte a noi lo spazio-tempo di dimensioni macroscopiche che ci è così abituale, e tutto è già pieno della materia che compone il nostro attuale Universo, anche se la forma in cui essa si presenta è assolutamente diversa rispetto a quello cui siamo abituati.

Una specie di gas impazzito di particelle elementari, prive di massa e che si muovono alla velocità della luce, riempie ogni angolo dello spazio-tempo appena nato. Tutte le interazioni fondamentali hanno la stessa intensità, ovunque agisce una specie di superforza primordiale, la madre di tutte quelle che attraversano il nostro mondo. È un Universo perfetto, in cui vige una completa, totale e assoluta simmetria. Ma se rimanesse tale non potrebbe avere alcuna evoluzione.

Quello che accade subito dopo deciderà il destino di quell'oggetto ancora incandescente per i miliardi di anni a venire.

È passato solo un attimo da quando tutto ha avuto inizio, ed ecco che succede qualcosa di molto strano che oggi, alla luce delle scoperte più recenti, possiamo descrivere in grande dettaglio.

Non appena l'espansione furibonda degli istanti iniziali si placa e l'oggetto gigantesco che ne è nato si raffredda a sufficienza, in quel preciso momento, esattamente un centesimo di miliardesimo di

secondo dopo il Big Bang, una miriade di bosoni di Higgs condensa per sempre in un campo onnipresente.

Il nuovo venuto cambia tutto. Rompe immediatamente la perfetta simmetria che fino a quel momento imperava, separando per sempre la forza elettromagnetica da quella debole. Le particelle elementari, che rimangono come invischiate nel campo dell'Higgs, si differenziano fra loro a seconda dell'intensità dell'interazione, e così facendo finiscono con l'acquistare masse irrimediabilmente diverse.

Grazie a questo sottile meccanismo la materia acquista le caratteristiche che ci sono così familiari. Alcuni quark, rimasti leggeri, si aggregano con i gluoni, portatori della forza forte, a formare protoni stabili. La specifica massa che assumono gli elettroni permetterà loro di orbitare stabilmente intorno a nuclei carichi e si potranno formare atomi e molecole. Così si sono prodotte le enormi nebulose gassose da cui sono nate le prime stelle e poi le galassie, e i pianeti e i sistemi solari fino ai primi organismi viventi, via via sempre più complessi, per arrivare, in ultima istanza, fino a noi. Senza il vuoto elettrodebole, senza quella sottile proprietà che il campo scalare di Higgs conferisce al vuoto, senza questa sottile impalcatura che regge l'enorme struttura materiale che chiamiamo Universo, tutto questo non sarebbe stato possibile. Le cose, tutte le cose, hanno acquistato la loro specifica forma grazie a questa sottile imperfezione che ha rotto la simmetria perfetta delle origini.

Con la scoperta del bosone di Higgs possiamo dire di avere capito un momento *clou* della nostra storia, quella particolare trasformazione del vuoto che ha consentito alla materia di assumere una forma stabile e di aggregarsi in sistemi complessi.

Cosa ha scatenato l'inflazione?

Abbiamo detto che l'inflazione cosmica è un fenomeno i cui dettagli sono ancora oscuri, e per questo risulta al centro di un frenetico lavoro di ricerca. Sarebbe difficile spiegare le misure di precisione che sono state fatte, anche recentemente, senza ricorrere a questo meccanismo e tuttavia, fin quando non si farà luce su tutti i particolari, la teoria, pur così affascinante, non potrà dirsi pienamente verificata. Per quanto sia ampiamente accettata nella comunità scientifica, autorevoli scienziati continuano a nutrire forti dubbi, che potranno essere sciolti solo con ulteriori osservazioni. Molti esperimenti cercano la cosiddetta *pistola fumante dell'inflazione*, una prova inconfutabile della correttezza della teoria. Potrebbe

venire dalla scoperta di una nuova particella scalare all'Lhc, simile al bosone di Higgs, e con tutte le caratteristiche per giocare il ruolo dell'inflatone. Oppure nuovi studi potrebbero convincerci che, in realtà, la fantomatica particella è stata già scoperta: a scatenare l'inflazione potrebbe essere stato proprio lui, il bosone di Higgs. L'ipotesi, molto suggestiva, è stata avanzata da anni. Essendo l'unica particella scalare fondamentale del Modello standard, è piuttosto naturale immaginare che possa aver giocato un ruolo nell'inflazione cosmica. Campi scalari con caratteristiche simili a quello prodotto dal bosone di Higgs, in particolari condizioni, sarebbero in grado di sviluppare quella crescita esponenziale così furibonda. Questo argomento rende la congettura plausibile, ma per concludere che abbiamo già trovato lo strano materiale che ha scatenato l'inflazione si devono produrre prove più convincenti. Per verificare davvero l'ipotesi occorrerà vedere se nel fondo di radiazione cosmica è rimasta impressa quella sottilissima impronta fossile caratteristica dell'Higgs primordiale.

Mentre venivano continuamente emessi e riassorbiti dalla materia, i fotoni hanno avuto tutto il tempo di interagire con lo tsunami di onde gravitazionali che era stato prodotto dall'inflazione e che ha continuato ad agitare per millenni lo spazio-tempo primordiale. Le perturbazioni della metrica gravitazionale si sono perciò trasmesse ai fotoni con cui le onde interagivano, e questi ultimi hanno subito una specie di *imprinting*. Una polarizzazione caratteristica, un modo peculiare di oscillare, che è specifico di questa particolare interazione, che si è come cristallizzato nel momento della separazione e di cui sono rimaste tracce sottili, per i miliardi di anni successivi.

Se l'Higgs ha scatenato l'inflazione, sappiamo che la sua azione ha lasciato questa impronta, ma quando si prova a calcolarla, risulta che il «tocco» sarebbe molto delicato. L'effetto, cioè, sarebbe piuttosto lieve, e finirebbe sepolto sotto molti altri fenomeni. Insomma, questo segnale sarebbe ben al di sotto della sensibilità degli esperimenti attuali. Ma una nuova generazione di apparati, molto sofisticati, è pronta a raccogliere la sfida di riuscire a registrare questa polarizzazione così sottile.

Nel frattempo, con la rivelazione diretta delle onde gravitazionali, è cominciata la corsa per spingere la sensibilità degli attuali interferometri al punto da riuscire a estrarre dal rumore di fondo il segnale di onde gravitazionali fossili, quelle originate direttamente dal Big Bang. Diversamente dalla luce, infatti, le perturbazioni dello spazio-tempo emesse durante la fase inflazionaria si sono sepa-

rate dalla materia immediatamente e ancora oggi fluttuano intorno a noi. Chi riuscisse ad aumentare la sensibilità degli attuali strumenti al punto da riuscire a rivelarle potrebbe ricostruire, in tutti i dettagli, quel momento straordinario. Si spera in questo modo di mettere la parola fine a questa saga e produrre evidenze indiscutibili del meccanismo che ha prodotto questo fenomeno così importante per la nostra storia.

Di cosa è fatta la materia oscura?

Le evidenze di materia oscura sono ormai inconfutabili. Per esempio la velocità delle stelle periferiche nelle galassie a spirale, come la nostra Via Lattea, si spiega solo assumendo che oltre alla materia visibile – stelle, polveri e il grande buco nero che quasi sempre sta al centro della spirale – contengano enormi quantità di un altro ingrediente non meglio identificato. Insomma una forma di materia invisibile, inspiegabile, che non fa luce e che viene perciò chiamata «oscura», avvolge completamente le galassie, riempie tutto lo spazio che occupano e le circonda, su dimensioni enormi, con una specie di gas pesante e sottile la cui composizione ci è completamente sconosciuta.

Circa un quarto dell'Universo è costituito da queste enormi strutture di materia misteriosa ed è imbarazzante per noi dover ammettere che nessuna delle particelle note, descritte cioè dal Modello standard, è in grado di spiegare questo fenomeno.

La ricerca diretta di particelle supersimmetriche, che potrebbero risolvere il mistero, è una delle attività più importanti della fisica ai grandi acceleratori. Sotto il nome di «supersimmetria» si nasconde in realtà una complessa famiglia di teorie accomunate dall'ipotesi che la materia conosciuta sia soltanto una parte della materia primordiale prodotta nel Big Bang. La teoria prevede che ogni particella conosciuta abbia un partner supersimmetrico, una particella cioè che le assomiglia in tutto e per tutto, salvo che è molto più pesante e ha un diverso *spin*.

Queste particelle popolavano l'Universo primordiale in uguale proporzione rispetto alla materia ordinaria. Quell'Universo incandescente era un ambiente assolutamente favorevole per particelle così energetiche. Ma il rapido raffreddamento dovuto all'espansione ne ha prodotto l'estinzione di massa. Impossibilitate a sopravvivere, si sono disintegrate, quasi immediatamente, in materia ordinaria, per questo non se ne trovano più in giro. In realtà potreb-

bero essere sparite tutte, tranne una. La teoria prevede, infatti, che la più leggera della famiglia sia stabile e che non possa decadere in alcunché. Questa particella si chiama *neutralino*, non interagisce se non debolmente, ma è molto pesante e può costruire enormi ammassi capaci di un'intensa attrazione gravitazionale. Ecco che allora potremmo spiegare cosa succede in una galassia o in un ammasso di galassie. La materia oscura che tiene assieme queste enormi strutture cosmiche potrebbe non essere altro che un gas di pesanti neutralini, residui fossili di quell'epoca primordiale in cui la materia supersimmetrica dominava il mondo.

Ma perché la teoria sia verificata occorrerà trovare queste particelle così strane e, finora, nessuno c'è riuscito. Può darsi quindi che la teoria sia sbagliata. Oppure, le particelle supersimmetriche potrebbero essere così massicce che neanche all'Lhc riusciamo a produrle. In questo caso ci si potrebbe accorgere della loro presenza attraverso i loro effetti «virtuali». Particelle ultramassicce possono aleggiare come fantasmi attorno alle particelle conosciute e interferire con i meccanismi noti previsti dal Modello standard. Ne nascerebbero anomalie che potrebbero essere registrate dai nostri rivelatori e costituire un'importante scoperta «indiretta» della nuova fisica.

Un grosso aiuto a questa indagine potrebbe venire dai nuovi studi sul bosone di Higgs. Si pensa di produrne centinaia di milioni, in condizioni controllate, per misurarne con grande precisione tutte le caratteristiche. Questa particella così speciale interagisce infatti con tutte le altre particelle, sia quelle note sia quelle non ancora scoperte. Se si trovasse la più piccola delle anomalie, ecco che avremmo l'evidenza indiretta che c'è un altro mondo al di fuori del Modello standard. Lì potremmo trovare spiegazioni all'enigma delle particelle che compongono la materia oscura e forse avremmo indicazioni sulla regione di energia in cui cercarle.

Che fine ha fatto l'antimateria?

Se ci appare naturale immaginare che dal vuoto primigenio possano emergere *naturalmente* uguali quantità di materia e di antimateria, resta da spiegare come mai nel nostro Universo la materia ha finito per prevalere inesorabilmente rispetto all'antimateria. Per rispondere a questo quesito sono al lavoro migliaia di ricercatori e si seguono strade molto diverse fra loro. La prima ipotizza che ci possano essere sfuggite grandi concentrazioni di antimateria nelle

regioni dello spazio ancora inesplorate; interi mondi fatti di antimateria, gigantesche galassie di antiprotoni e positroni che hanno eluso finora tutte le osservazioni. La seconda ricerca ipotizza che tutto sia dovuto a una sottile differenza di comportamento fra materia e antimateria, una piccola anomalia, che rompe l'originaria simmetria ed è alla base di tutto. Sono stati condotti studi dettagliati e, in effetti, si sono trovati diversi meccanismi che danno una leggerissima prevalenza alla materia nei processi di decadimento di particelle e antiparticelle. Queste differenze sono previste dal Modello standard, ma la preferenza accordata alla materia risulta troppo minuscola per spiegarne l'eccesso che osserviamo intorno a noi. Infine, negli ultimi anni, si è prospettata un'altra ipotesi. Tutto potrebbe essere stato determinato da qualcosa di molto speciale che è successo quando il bosone di Higgs ha preso il centro della scena e ha rotto quella perfetta simmetria che dominava l'Universo primordiale. A seconda di come si è realizzato questo passaggio, può essere bastata una leggerissima preferenza del bosone di Higgs ad accoppiarsi con la materia anziché con l'antimateria ed ecco che si produce l'Universo materiale che ci circonda. Ma studiare in dettaglio questo fenomeno non sarà possibile all'Lhc, e forse occorrerà costruire un acceleratore molto più potente.

Conclusioni

Noi fisici siamo molto orgogliosi del successo del Modello standard, ma siamo anche consapevoli che esso non spiega fenomeni fondamentali, come la materia oscura, l'inflazione e l'asimmetria fra materia e antimateria. Sappiamo già che prima o poi saremo costretti ad abbandonare questa teoria di così grande successo a favore di una nuova descrizione della natura, più accurata e completa. La bellezza del nostro lavoro è che questo potrebbe accadere in qualunque momento: potrebbe succedere la settimana prossima o magari dovremo attendere altri cinquant'anni.

In quale direzione andrà la nuova fisica non lo sa nessuno. La natura potrebbe avere scelto alcune delle strade che sono state ipotizzate, come la supersimmetria, ma potrebbe anche avere imboccato dei sentieri assolutamente nuovi, che nessun teorico è riuscito a immaginare.

Quello di cui sono certo e che, generazione dopo generazione, non lasceremo nulla di intentato per capire i misteri più profondi della materia e dell'Universo.