



# In principio

La fisica come ricerca delle origini

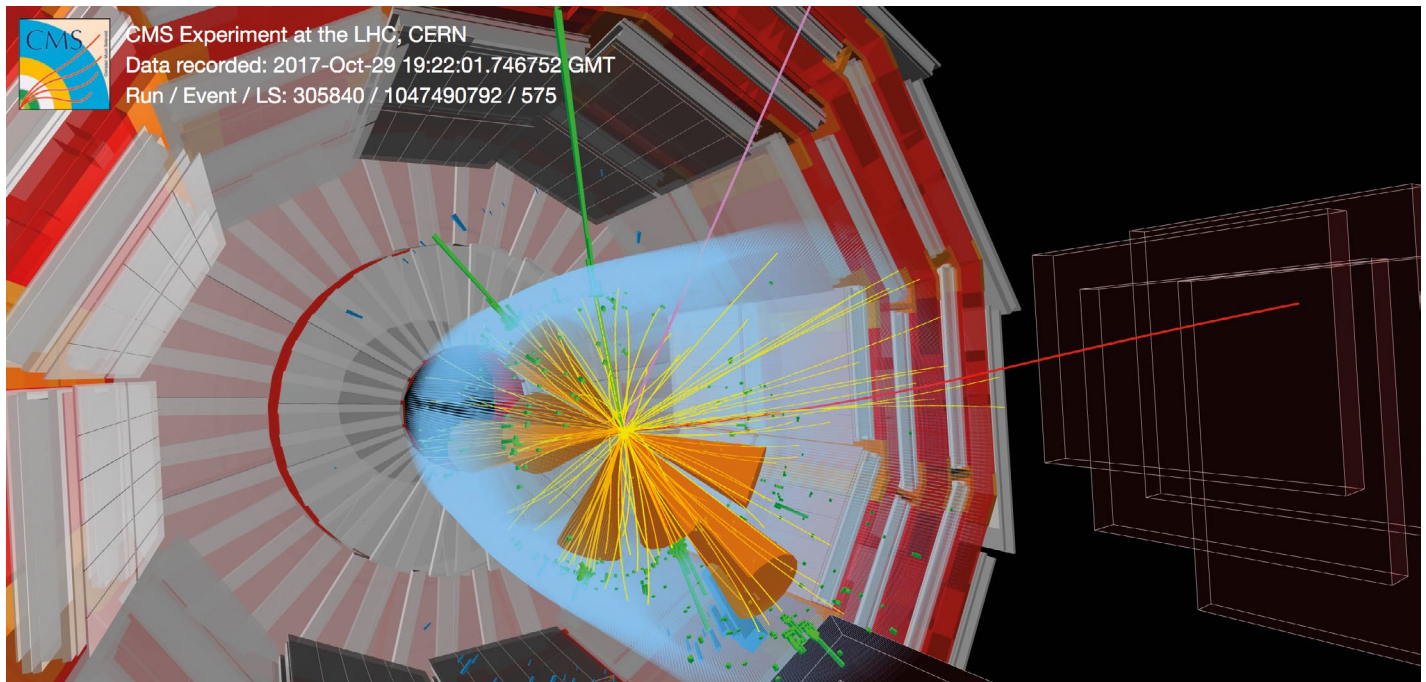
di Guido Tonelli

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 Poisson'sche Differentialgleichung

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

in Verbindung mit der Bewegungsgleichung des materiellen Punktes die Newton'sche Fernwirkungstheorie noch nicht vollständig ersetzt. Es muß noch die Bedingung hinzutreten, daß im räumlich Unendlichen das Potential  $\phi$  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  $g_{\mu\nu}$  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 Newton'sche Theorie.

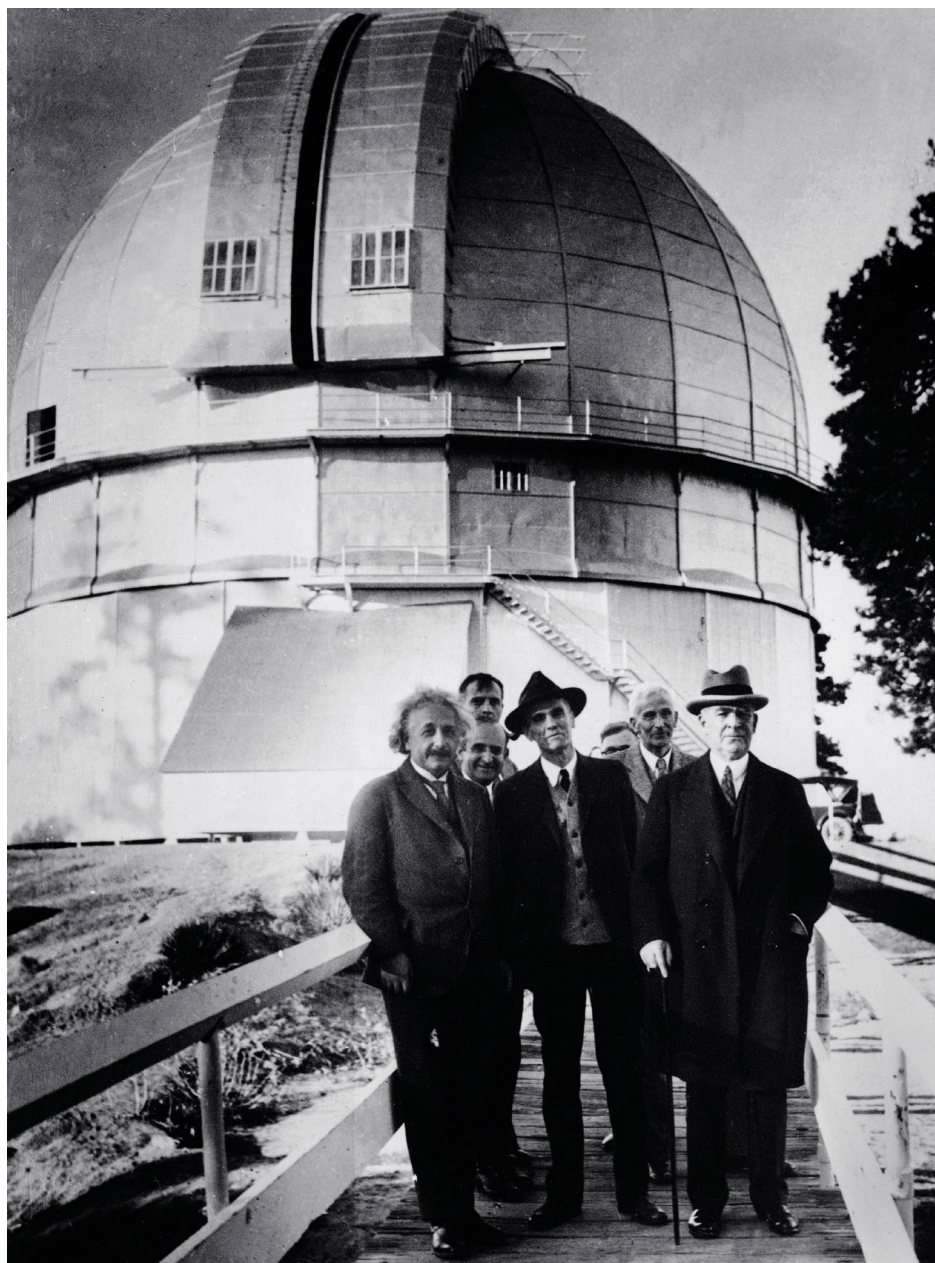
Es ist wohlbekannt, daß die Newton'sche Grenzbedingung des konstanten Limes für  $\phi$  im räumlich Unendlichen zu der Auffassung hinführt, daß die Dichte der Materie im Unendlichen zu null wird. Wir denken uns nämlich, es lasse sich ein Ort im Weltraum finden, um den herum das Gravitationsfeld der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