

Le meraviglie e i misteri della fisica ai confini dello spazio e del tempo

Questa nota si pone l'obiettivo di ripercorrere velocemente, attraverso le idee, le teorie scientifiche e i dubbi dei più grandi filosofi, fisici e matematici, l'avventura della ricerca scientifica nel campo della fisica dell'infinitamente piccolo e dell'infinitamente grande. È la storia di grandi intuizioni che hanno sconvolto il modo di pensare dell'epoca in cui sono state annunciate. Oggi l'uomo continua a confrontarsi con problemi ancora insoluti che coinvolgono gli stessi concetti di spazio e tempo. Cosa ci riserveranno i prossimi anni di ricerche e sperimentazioni?

Marcello Salmeri*



* Marcello Salmeri, Prof. Associato presso il Dipartimento di Ingegneria Elettronica dell'Università degli Studi di Roma Tor Vergata, Coordinatore del Corso di Studi di Ingegneria Elettronica.

Φύσις κρύπτεσθαι φιλει

Questo epigramma attribuito a Eraclito, filosofo greco del 500 a.C. circa, riassume mirabilmente la sensazione che l'uomo ha da sempre avuto quando, fin dai tempi più lontani, ha cercato di interpretare ciò che la Natura aveva mirabilmente costruito in milioni di anni intorno a lui cercando, spesso invano, di scoprirne le leggi che la governano.

Questo è un piccolo racconto di questa avventura alla scoperta del Mondo affidata a filosofi, a fisici e a matematici.

Parleremo di fisica dell'infinitamente piccolo e dell'infinitamente grande. Di ciò che è difficile vedere e soprattutto interpretare. Parleremo di teorie e di grandissimi uomini. Di persone che hanno avuto spesso intuizioni incredibili. Di persone che hanno sfidato nella loro epoca i pregiudizî, le comuni certezze e i potenti. Di persone che sono andate incontro alla morte pur di non rinnegare le proprie convinzioni.

L'obiettivo della fisica è stato da sempre *l'unificazione*, ovvero il cercare di vedere fenomeni apparentemente diversi come aspetti diversi dello stesso fenomeno. Da sempre le grandi idee che sono state quelle che hanno cambiato veramente il modo di concepire la Natura sono state accolte tutte nello stesso modo: con grande sorpresa. E spesso male.

Si pensi a Giordano Bruno (1548 – 1600). Negli otto libri del *De immenso* appoggia la teoria eliocentrica e ribadisce la concezione dell'infinità e molteplicità dei mondi, criticando l'aristotelismo, negando qualunque differenza tra la materia terrestre e celeste, la circolarità del moto planetario e l'esistenza dell'etere. Egli afferma che «il Sole è soltanto un'altra stella e le stelle sono soltanto soli molto lontani».

All'epoca si credeva che il Sole fosse un grande fuoco creato da Dio per scaldarci. Ma se esistono altre stelle come il Sole, possono esistere anche altri pianeti come la Terra. Allora Gesù è venuto più volte (la sua venuta tra noi non è dunque un evento unico), oppure alle persone degli altri pianeti è negata la possibilità della salvezza.

L'8 febbraio 1600 è costretto ad ascoltare inginocchiato la sentenza di condanna a morte per rogo; si alza e ai giudici indirizza la storica frase: «*Maiori forsan cum timore sententiam in me fertis quam ego accipiam*», ovvero: «Forse tremate più voi nel pronunciare questa sentenza che io nell'ascoltarla», e il 17 febbraio muore al rogo in Campo de' Fiori.

Da piccolo ho sempre avuto una forte idiosincrasia verso il tema di Italiano: forse la scarsa fantasia (o la pigrizia) era più forte del gusto nello scrivere. Mia mamma ha sempre cercato di supplire a ciò aiutandomi nella scrittura, tanto che spesso i miei temi somigliavano più a un dettato. In un tema alle elementari in cui ci si chiedeva di parlare del Sole, pensai bene di dare il mio personale contributo cambiando la frase da lei dettata «Il Sole è una stella...» con «Il Sole è *quasi* una stella...».

Evidentemente è insita dentro l'uomo la Natura a vedere le cose come appaiono. O forse nel mio caso si è rivelata una inconscia natura a evitare di essere messo al rogo...

Immaginiamo anche l'impatto che ebbe la teoria evoluzionistica di Charles Darwin (1809 – 1882). All'epoca si credeva che ogni specie fosse sta-

ta creata singolarmente da Dio e fosse eterna. La teoria di Darwin sconvolge questo quadro e afferma che le specie viventi si sono evolute e la stessa specie umana discende da un antenato comune con altre specie viventi quali le scimmie. Ma se più esseri viventi diversi hanno antenati comuni, allora devono essere composti della stessa sostanza: le cellule. Nasce la biologia moderna.

Nel 1500 Mikołaj Kopernik (Niccolò Copernico) (1473 – 1543) propone una teoria che rivoluziona quelli che fino ad allora erano i punti fermi sul cosmo. Dai tempi di Aristotele (384 a.C. – 322 a.C.) e Tolomeo (100 – 175) e fino ad allora la Terra era considerata al centro dell'Universo e intorno ad essa ruotano su *epicicli* e *deferenti* gli altri pianeti e il Sole. La teoria prevedeva il moto degli astri con una precisione pari a 1 parte su 1000. Il *movimento* e la *quiete* sono due stati profondamente differenti. Copernico afferma che è il Sole al centro e la Terra, insieme con gli altri pianeti, ruota intorno ad esso. Ma se è così come facciamo, noi che siamo sulla Terra, a non accorgerci del movimento?

Occorre attendere Galileo Galilei (1564 – 1642) per avere una risposta. Egli introdusse il *Principio della relatività* in base al quale «moto e quiete hanno un significato solo relativamente ad un osservatore». Accusato di voler sovvertire la filosofia naturale aristotelica e le Sacre Scritture, Galileo venne condannato come eretico dalla Chiesa cattolica e costretto, il 22 giugno 1633, all'abiura delle sue concezioni astronomiche.

Johannes Kepler (Giovanni Keplero) (1571 – 1630) è stato un astronomo e matematico tedesco. Egli ereditò da Tycho Brahe una gran quantità dei più precisi dati mai raccolti sulle posizioni dei pianeti. Il problema era dare loro un senso. I movimenti orbitali e gli altri pianeti sono visti dal punto vantaggioso della Terra, che orbita a sua volta intorno al Sole. Questo fa sì che i pianeti sembrino muoversi disegnando strane curve. Keplero volle concentrarsi sull'orbita di Marte, anche se prima avrebbe dovuto studiare accuratamente l'orbita della Terra. Egli fu capace di dedurre le sue leggi sui pianeti senza conoscere le esatte distanze dei pianeti dal Sole, poiché le sue analisi geometriche richiedevano solo il rapporto tra le rispettive distanze dal Sole.

Keplero, a differenza di Tycho Brahe, appoggiò il modello eliocentrico del sistema solare e partendo da questo per vent'anni provò a dare un senso ai suoi dati. Alla fine giunse a formulare le sue tre leggi sui movimenti planetari che enunciò nelle tavole rudolfine, così chiamate in onore di Rodolfo II.

Alla sua epoca erano conosciuti sei pianeti (compresa la Terra). Keplero aveva osservato che ogni pianeta aveva una sua orbita ad una certa distanza dal Sole e una certa velocità non uniforme nella propria orbita intorno al Sole. Questi numeri sembrano arbitrari. La tradizione voleva che la teoria cosmologica impiegasse figure semplici. Egli fece così uso dei *solidi platonici* (cinque) al fine di spiegare il rapporto tra le orbite della Terra e degli altri pianeti. E propose una legge che chiamò *armonia delle sfere* per spiegarne le velocità. L'idea ovviamente non era corretta, sebbene elegante.

Ancora oggi sulla sua lapide si può leggere l'epigrafe da lui stesso composta: «Il mio spirito ha misurato il cielo, ora misura la profondità della Terra».

Isaac Newton (1642 – 1727) è stato un filosofo, matematico, fisico e alchimista inglese ed è considerato da molti una delle più grandi menti di tutti i tempi. Newton fu il primo a dimostrare che le leggi della Natura governano il movimento della Terra e degli altri corpi celesti e contribuì alla Rivoluzione scientifica e al progresso della teoria eliocentrica. A Newton si deve anche la formulazione matematica delle leggi di Keplero sul movimento dei pianeti. Egli generalizzò queste leggi intuendo che le orbite (come quelle delle comete) potevano essere non solo ellittiche ma anche iperboliche e paraboliche. Intuì poi che la legge che tiene legata la Terra al Sole è la stessa che tiene legati noi alla Terra stessa.

Ciò è contenuto nei *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (Principi matematici della filosofia naturale) comunemente chiamati *Principia*. L'opera, pubblicata nel 1687 in tre volumi, è unanimemente considerata un capolavoro assoluto della storia della scienza; con essa Newton stabilì le tre *leggi universali del movimento* che non sono state migliorate per i successivi trecento anni. Egli usò la parola latina *gravitas* (peso) per la determinazione analitica della forza che sarebbe diventata

conosciuta come *gravità*, e definì la *legge della gravitazione universale*: due corpi si attraggono con una forza pari a $F = G m_1 m_2 / d^2$, dove m_1 ed m_2 sono le masse dei corpi, d è la distanza dei loro centri di massa e G è una costante universale, a noi nota come *costante di Newton*.

Egli introdusse il famoso *Principio di inerzia*, in base al quale «un corpo rimane nello stato di quiete o di moto uniforme se non è sottoposto all'azione di alcuna forza». La quiete è dunque solo un caso particolare in cui la velocità è nulla. Non esiste dunque più un riferimento assoluto. Ciò di cui noi ci accorgiamo è solo il cambio della velocità, ovvero l'accelerazione. Si pensi quando siamo in auto o in metro.

Nel 1693 ebbe un forte esaurimento nervoso e si avvicinò molto alla pazzia. Alcuni ritengono che alla causa di questo momentaneo esaurimento nervoso ci fossero i vapori di mercurio respirati negli esperimenti alchemici. Newton fu anche un membro del Parlamento per un paio d'anni attorno al 1700, ma il suo solo intervento registrato fu per lamentarsi di una corrente d'aria fredda e la richiesta che venisse chiusa la finestra.

Scrisse Newton: «Non so come il mondo potrà giudicarmi ma a me sembra soltanto di essere un bambino che gioca sulla spiaggia, e di essermi divertito a trovare ogni tanto un sasso o una conchiglia più bella del solito, mentre l'oceano della verità giaceva insondato davanti a me».

James Clerk Maxwell (1831 – 1879) è stato un fisico scozzese ed elaborò la prima teoria moderna dell'*elettromagnetismo*, compendiando in poche equazioni tutte le nozioni di tale branca della fisica. Egli unificò mirabilmente l'elettricità con il magnetismo riconducendoli al concetto di un unico *campo*.

Maxwell tuttavia rimase legato ad una concezione di campo elettromagnetico la cui propagazione avviene attraverso un mezzo etereo; dapprima egli identificò l'*etere luminifero* con quello elettromagnetico e poi unificò i due fenomeni, quelli ottici e quelli elettromagnetici.

L'etere fu concepito come una materia che vibrando trasportava le onde elettromagnetiche. Doveva essere di una natura estremamente densa, tale da giustificare l'alta velocità della propagazione della luce, che Ma-

xwell ricondusse ad un fenomeno elettromagnetico e ne misurò, con una ottima approssimazione per il tempo, la velocità. Tale materia doveva riempire tutto lo spazio, quindi anche quello cosmico: ma ciò contrastava con il fatto che ciò avrebbe rallentato il moto dei pianeti. L'etere quindi doveva essere un tipo di materia che non interagiva con la materia ordinaria. Questo non si accordava tuttavia con il fatto che noi, composti di materia ordinaria, siamo in grado di rilevare la luce.

Contemporaneamente si andavano scoprendo nuove proprietà della materia stessa.

Già dal IV secolo a.C. alcuni filosofi greci (Leucippo, Democrito e Epicuro) e romani (Lucrezio), i cosiddetti atomisti, ipotizzarono che la materia non fosse continua, ma costituita da particelle minuscole e indivisibili. Queste considerazioni derivavano però solo da semplici intuizioni filosofiche. I diversi atomi erano supposti differire per forma e dimensioni. L'idea atomistica fu poi avversata da Aristotele il cui pensiero, successivamente, fu adottato dalla Chiesa cattolica: per questo motivo bisogna aspettare fino al XIX secolo perché gli scienziati riprendessero in considerazione l'ipotesi atomica.

Nel 1808, John Dalton spiegò i fenomeni chimici secondo i quali le sostanze sono formate dai loro componenti secondo rapporti ben precisi fra numeri interi, ipotizzando che la materia fosse costituita da atomi. Formulò la sua teoria atomica, che si fondava su cinque ipotesi ricavate per via empirica:

- la materia è formata da particelle elementari chiamate *atomi* che sono indivisibili e indistruttibili;
- gli atomi di uno stesso elemento sono tutti uguali tra loro;
- gli atomi di elementi diversi si combinano tra loro in rapporti di numeri interi e generalmente piccoli dando così origine a composti;
- gli atomi non possono essere né creati né distrutti;
- gli atomi di un elemento non possono essere convertiti in atomi di altri elementi.

Con la scoperta della radioattività naturale, si intuì successivamente che gli atomi non erano particelle indivisibili, bensì erano oggetti composti

da parti più piccole. Nel 1902, Joseph John Thomson propose il primo modello fisico dell'atomo: aveva infatti scoperto un anno prima l'*elettrone*. Egli immaginò che un atomo fosse costituito da una sfera di materia caricata positivamente in cui gli elettroni (negativi) erano immersi.

Nel 1911, Ernest Rutherford (1871 – 1937) fece un esperimento cruciale per mettere alla prova il modello di Thomson. Bombardò un sottilissimo foglio di oro, posto fra una sorgente di particelle alfa (non nuclei ma atomi di elio) e uno schermo al solfuro di zinco. Le particelle, passate attraverso la lamina, sarebbero rimaste impresse sullo schermo. L'esperimento portò alla constatazione che i raggi alfa non venivano quasi mai deviati. Essi attraversavano il foglio di oro senza quasi mai essere disturbati. Solo l'1% dei raggi incidenti era deviato dal foglio di oro e lo era in modo notevole (alcuni venivano completamente respinti). Sulla base di questo fondamentale esperimento, Rutherford propose un modello di atomo in cui quasi tutta la massa dell'atomo fosse concentrata in una porzione molto piccola, il *nucleo* (caricato positivamente) e gli *elettroni* gli ruotassero attorno così come i pianeti ruotano attorno al Sole (modello planetario). Il nucleo è così concentrato che gli elettroni gli ruotano attorno a distanze relative enormi, aventi un diametro da 10.000 a 100.000 volte maggiore di quello del nucleo. Rutherford intuì che i *protoni* da soli non bastavano a giustificare tutta la massa del nucleo e formulò l'ipotesi dell'esistenza di altre particelle che contribuivano a formare l'intera massa del nucleo. Nel modello atomico di Rutherford non compaiono i *neutroni*, perché queste particelle furono successivamente scoperte da Chadwick nel 1932.

Il modello di Rutherford aveva incontrato una palese contraddizione con le leggi della fisica classica: secondo la teoria elettromagnetica una carica che subisce una accelerazione emette energia sotto forma di radiazione elettromagnetica. Per questo motivo, gli elettroni dell'atomo di Rutherford, che si muovono di moto circolare intorno al nucleo, avrebbero dovuto emettere onde elettromagnetiche e quindi, perdendo energia, annichilire nel nucleo stesso (teoria del collasso), cosa che evidentemente non accade. Inoltre un elettrone, nel perdere energia, potrebbe emettere onde elettromagnetiche di qualsiasi lunghezza d'onda,

operazione preclusa nella teoria e nella pratica dagli studi sul corpo nero di Max Planck e, successivamente, di Albert Einstein. Ciò portò i fisici a introdurre una nuova e rivoluzionaria teoria: la *quantizzazione dell'energia*.

Nel 1913 Niels Bohr (1885 – 1962) propose una modifica concettuale al modello di Rutherford. Pur accettandone l'idea di modello planetario, postulò che gli elettroni avessero a disposizione orbite fisse nelle quali non emettevano né assorbivano energia (questa infatti rimaneva costante): in particolare, un elettrone emetteva od assorbiva energia sotto forma di onde elettromagnetiche solo se effettuava una transizione da un'orbita all'altra, e quindi passava ad uno stato a energia minore o maggiore.

Il modello di Bohr spiegava molto bene l'atomo di idrogeno ma non quelli più complessi. Sommerfeld propose allora una correzione al modello di Bohr secondo cui si aveva una buona corrispondenza fra la teoria e le osservazioni degli spettri degli atomi (uno spettro è l'insieme delle frequenze delle radiazioni elettromagnetiche emesse o assorbite dagli elettroni di un atomo). Nel 1932 fu scoperto il neutrone per cui si pervenne presto ad un modello dell'atomo pressoché completo in cui al centro vi è il nucleo composto di protoni (positivi) e neutroni ed attorno vi ruotano gli elettroni. Ciononostante il modello di Bohr-Sommerfeld si basava ancora su postulati e soprattutto funzionava bene solo per l'idrogeno: tutto ciò convinse la comunità scientifica che fosse impossibile descrivere esattamente il moto degli elettroni attorno al nucleo, motivo per cui ai modelli deterministici fino ad allora proposti si preferì ricercare un modello probabilistico, che descrivesse con buona approssimazione un qualsiasi atomo: nasceva una teoria che cambierà totalmente il modo di pensare in ambito scientifico, la *meccanica quantistica*.

La peculiarità della meccanica quantistica è il fatto che in essa le particelle vengono descritte tramite *onde di probabilità*. Una conseguenza importante di questo è il cosiddetto *principio di indeterminazione di Heisenberg*, secondo il quale esistono coppie di variabili (dette tra loro non compatibili), come *posizione e impulso di una particella*, il cui valore non può essere conosciuto simultaneamente con precisione arbitraria, indipendentemente dall'accuratezza delle misure. In particolare, in mecca-

nica classica, la conoscenza del valore delle variabili coniugate a un dato istante permette, attraverso le equazioni del moto, di predirne l'evoluzione con precisione arbitraria, mentre l'indeterminazione quantistica permette di prevedere solo la probabilità di misurarne determinati valori all'atto dell'esperimento; questo conferisce un carattere prettamente *probabilistico* alla teoria.

Fu abbandonato dunque il concetto di *orbita* e fu introdotto il concetto di *orbitale*. Secondo la meccanica quantistica non ha più senso infatti parlare di traiettoria di una particella: da ciò discende che non si può neanche definire con certezza dove un elettrone si trova in un dato momento. Ciò che si poteva conoscere era la probabilità di trovare l'elettrone in un certo punto dello spazio in un dato istante di tempo. Un orbitale quindi non è una traiettoria su cui un elettrone (secondo le idee della fisica classica) poteva muoversi, bensì una porzione di spazio intorno al nucleo definita da una superficie di equiprobabilità definita matematicamente da una particolare funzione d'onda: *l'equazione di Schrödinger*.

Intorno alla teoria della meccanica quantistica si è da sempre scatenato un acceso dibattito sia scientifico che filosofico. A questo partecipò attivamente anche Einstein.

Albert Einstein (1879 – 1955) è stato un fisico e filosofo tedesco naturalizzato svizzero, e in seguito statunitense. Oltre a essere uno dei più celebri fisici della storia della scienza, fu un grande pensatore e attivista in molti altri ambiti (dalla filosofia alla politica). Secondo molti, forse il più grande scienziato di sempre.

Pur avendo contribuito alla nascita della meccanica quantistica, egli criticò sempre la teoria dal punto di vista concettuale. Egli non accettava l'assunto della teoria in base al quale qualcosa esiste solo se viene osservato. Einstein sosteneva che la realtà (fatta di materia, radiazione, ecc...) sia un elemento oggettivo, che esiste indipendentemente dalla presenza o meno di un osservatore e indipendentemente dalle interazioni che può avere con altra materia o radiazione. Bohr al contrario sosteneva che la realtà (dal punto di vista del fisico, chiaramente) esiste o si manifesta solo nel momento in cui viene osservata anche perché, fa-

ceva notare, non esiste neanche in linea di principio un metodo atto a stabilire se qualcosa esiste mentre non viene osservato. È rimasta famosa, tra i lunghi e accesi dibattiti che videro protagonisti proprio Einstein e Bohr, la domanda di Einstein rivolta proprio a Bohr «Allora lei sostiene che la luna non esiste quando nessuno la osserva?». Bohr rispose che la domanda non poteva essere posta perché concettualmente priva di risposta.

Alcuni fenomeni, assurdi per la meccanica classica, furono previsti dalla meccanica quantistica e successivamente verificati. Uno di questi è lo straordinario fenomeno dell'*entanglement quantistico*, in base al quale è possibile predire con sicurezza la misura dello stato di una particella anche se sottoposta alle leggi della meccanica quantistica.

Dalla scoperta del protone, del neutrone e dell'elettrone, attraverso esperimenti ad alta energia è stato possibile scoprire una serie enorme di nuove particelle, aventi ciascuna caratteristiche fisiche diverse in termini di massa, carica elettrica, spin. Il panorama del mondo dell'infinitamente piccolo si affollava sempre più di nuovi abitanti.

Ricordo che ero ancora piccolo e questa cosa mi affascinava moltissimo. Passavo giornate a copiare a mano (non c'erano i computer...) intere tabelle da fogli di una enciclopedia scientifica (non esisteva Internet...) che contenevano le caratteristiche delle particelle elementari scoperte finora. Come se questo copiarle potesse in qualche modo farmi partecipe di quello che per me era un grande mistero. Perché la Natura ha bisogno di così tante particelle, la maggior parte delle quali, tra l'altro altamente instabili e con un tempo di vita molto inferiore al miliardesimo di secondo? Questo passare il tempo a copiare cose che in effetti sembravano inutili, una volta fece chiedere a mia mamma cosa mai stessi facendo... Ma forse non lo sapevo bene neanche io.

Occorre attendere comunque i primi anni '70 per avere le idee più chiare sul mondo delle particelle.

Intanto, prima della scoperta dell'atomo, nel 1905 Einstein pubblica una teoria che sconvolgerà ancora la fisica: la *teoria della relatività speciale*. Questa aveva lo scopo di rendere compatibili tra loro la meccanica e l'elettromagnetismo per trasformazioni del sistema di riferimento. Vengono considerati solo sistemi di riferimento inerziali, ovvero nei quali non hanno luogo fenomeni legati all'accelerazione.

Nella teoria di Newton lo spazio e il tempo erano assoluti, ovvero esistono indipendentemente da ogni oggetto esterno. D'altra parte le equazioni di Maxwell dovevano valere solo nell'etere. Ma esperimenti mostrarono che la velocità del nostro riferimento terrestre era nulla rispetto all'etere.

Einstein per la sua definizione partiva da due postulati:

- il *principio di relatività*: tutte le leggi fisiche sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali;
- l'*invarianza della luce*: la velocità della luce nel vuoto ha lo stesso valore in tutti i sistemi di riferimento inerziali, indipendentemente dalla velocità dell'osservatore o dalla velocità della sorgente di luce.

Questo significa anche la *fine del concetto di etere*, non solo come mezzo che trasmette la luce, ma anche come riferimento assoluto: se ogni osservatore inerziale può dire a ragione di essere fermo rispetto all'etere, cade definitivamente il concetto di spazio assoluto. Ma anche il concetto di *simultaneità* perde la sua assolutezza; infatti, se la velocità della luce è finita ed è la stessa per ogni osservatore, due eventi simultanei in un sistema inerziale non lo sono più se osservati da un altro sistema inerziale in moto rispetto a quello.

Le trasformazioni che rendono invarianti le equazioni di Maxwell, sono indicate con l'espressione *trasformazioni di Lorentz* e si ottengono in modo concettualmente semplice applicando la costanza della velocità della luce. È importante osservare che:

- le trasformazioni non trattano separatamente il tempo e lo spazio, ma che questi vengono invece correlati tra loro in un unico formalismo di spaziotempo di Minkowsky;
- tali nuovi effetti dipendono da un termine β definito come $\beta^2 = v^2 / c^2$ (dove v è la velocità del corpo e c è la velocità della luce). Tale termine diventa trascurabile per velocità non confrontabili con quelle della luce.

Viene anche definito per comodità il termine $\gamma = 1 / (1 - \beta^2)$. Questo definisce la contrazione delle lunghezze di oggetti in movimento, così come

la dilatazione dei tempi. La somma di due velocità sarà dunque inferiore alla somma algebrica delle velocità. È da notare che il fatto che la velocità della luce sia costante per ogni osservatore dipende proprio dal fatto che la velocità viene misurata come rapporto tra le misure di spazio e tempo, le quali variano (si dilatano e contraggono) con la velocità stessa dell'osservatore.

Inoltre un corpo che si trova ad una certa velocità incrementerà la sua massa inerziale di un fattore proprio pari a γ . Ciò modifica la legge di inerzia $F = m a$ in $F = \gamma m a$.

Da considerazioni sul lavoro si mostra quindi che ad ogni energia E è associata una massa inerziale E / c^2 . Quindi per simmetria, ad un corpo a velocità nulla è associata una energia equivalente pari a $E = m c^2$. È dunque stabilita una *equivalenza tra massa e energia*.

La teoria fu confermata da numerose evidenze sperimentali. La prima provenne dalla maggiore vita media di particelle generate dai raggi cosmici nell'alta atmosfera terrestre (pioni o muoni): queste vivono solo per circa 2 milionesimi di secondo, poi si trasformano in altre particelle. Muovendosi al 99% della velocità della luce, la distanza che dovrebbero percorrere risulta essere pari a 600 metri e dovrebbero decadere prima di arrivare sulla superficie della Terra. Nella realtà essi arrivano fino al livello del mare, cosa che viene interpretata come un aumento della loro vita media a causa dell'alta velocità: rispetto ad un osservatore sulla superficie terrestre, la loro vita si allunga (perché il loro tempo scorre più lentamente), e sono quindi in grado di percorrere distanze più grandi di quelle attese.

Dalla relatività speciale rimanevano fuori tuttavia sia i sistemi non inerziali, sia la gravitazione.

E poi dal punto di vista teorico la teoria gravitazionale di Newton ed il relativo modello cosmologico presentavano alcuni problemi di fondo, come ad esempio:

- Il modello di Newton porta ad alcuni paradossi fra cui il più eclatante è che *la notte non potrebbe essere buia*, ma dovrebbe essere illumi-

nata (addirittura di luminosità infinita), essendo le stelle in numero infinito ed esistenti da un tempo infinito.

- Nella teoria di Newton *la forza gravitazionale agisce istantaneamente* (nella formula di Newton non vi è traccia del tempo) anche a distanze astronomiche.
- All'interno della teoria della gravitazione di Newton non vi è alcuna considerazione del fatto assolutamente singolare che *i corpi soggetti a gravità cadono tutti con la stessa accelerazione indipendentemente dalla massa*. Un caso così singolare non può essere una pura casualità e dovrebbe avere un ruolo importante nella teoria della gravitazione.

Nel 1915 Einstein completa la sua teoria sulla relatività attraverso una delle più grandi intuizioni della storia della scienza pubblicando la *teoria della relatività generale*.

Egli stabilisce l'equivalenza tra *massa inerziale* e *massa gravitazionale* e mostra come la gravità è indistinguibile dalla accelerazione e agisce sullo spaziotempo deformandolo.

Dalla formulazione matematica della teoria (*equazione di Einstein*), lo stesso Einstein rimase sconcertato: sembravano derivare infatti conseguenze che andavano contro le concezioni maturate dall'umanità in secoli di storia.

Come nella teoria di Newton era previsto che la forza gravitazionale a distanza nulla da una ipotetica particella avente massa propria, divergesse all'infinito, così come fosse invece nulla ad una distanza infinita. Ma compariva nell'equazione un termine per cui succedeva qualcosa di veramente strano ad una distanza pari a $2 G m / c^2$, dove G è la costante di gravitazione di Newton. Il fenomeno venne spiegato nel 1940 ipotizzando che per oggetti estremamente compatti si creasse un *orizzonte degli eventi* in base al quale una particella che ne entrasse all'interno, non ne potesse mai più uscire. Era ciò che più tardi si dimostrò essere la *teoria dei buchi neri*. In realtà fu successivamente mostrato che, per fenomeni legati alla meccanica quantistica, anche un buco nero può emettere radiazione. L'orizzonte degli eventi per la Terra è di circa 0.9 cm e per il Sole è di circa 3 km.

Altri fenomeni spiegati o previsti dalla teoria della relatività generale furono ad esempio lo *spostamento verso il rosso gravitazionale*, lo *spostamento del perielio di Mercurio*, la *deviazione della posizione apparente delle stelle per effetto gravitazionale*, come nelle vicinanze della superficie solare, le *onde gravitazionali* (non ancora osservate).

Ma fu un altro fenomeno quello che sconvolse di più lo stesso Einstein. Le sue equazioni prevedevano un Universo *non statico*, ossia un Universo in evoluzione. Egli addirittura modificò le sue equazioni introducendo una *costante cosmologica* che avrebbe dovuto assumere un valore opportuno tale da rendere l'Universo statico. Successivamente Einstein ammise che quello fu il più grande errore della sua vita. In realtà le scoperte di Hubble del 1929 relative allo *spostamento verso il rosso cosmologico* mostrarono che l'Universo era in espansione, ma comunque quel termine aggiunto da Einstein era corretto e attualmente compare nelle formulazioni della cosmologia come *R*.

Dalla verifica dell'espansione dell'Universo discende quindi la *teoria del Big Bang*, in base alla quale l'Universo ha avuto un inizio, stimabile attualmente a circa 13.7 miliardi di anni fa.

La teoria riuscì a prevedere che del Big Bang iniziale sarebbe dovuta rimanere ancora ai giorni nostri una qualche traccia sotto forma di radiazione termica ad una temperatura bassissima. Questa radiazione, detta *radiazione cosmica di fondo* fu scoperta nel 1964 da Arno Penzias e Robert Woodrow Wilson. Da allora misure sempre più sofisticate hanno permesso di farne una mappa verificando che questa è costante, ma con lievi variazioni attorno ad una parte su 100 000. Si è ipotizzato che tale anomalie risentano di fenomeni quantistici verificatisi immediatamente dopo il Big Bang stesso.

Esperimenti attraverso precise misure da parte di satelliti hanno permesso inoltre di arrivare alle seguenti considerazioni:

- L'Universo è largo almeno 78 miliardi di anni luce.
- L'Universo è composto per il 4% da materia nota, per il 23% di un tipo di materia ignota (*materia oscura*) e per il 73% da una misteriosa *energia oscura*.
- L'Universo si espanderà per sempre.

Questi punti portano a pesanti interrogativi.

Il primo punto sembra contrastare con la relatività speciale di Einstein. Come fanno oggetti ad essere lontani tra loro 78 miliardi di anni luce se hanno avuto un tempo per allontanarsi tra loro solo di 13.7 miliardi di anni? Ciò non viola forse la legge in base alla quale un oggetto non può superare la velocità della luce? In realtà ciò che dal Big Bang si espande è lo spazio stesso. E la legge di Einstein vieta alla materia di viaggiare a velocità maggiori di quelle della luce, non allo spazio di espandersi. Si è ipotizzata quindi una fase in cui lo spazio si è espanso per un breve intervallo di tempo ad una velocità molto maggiore della velocità della luce. Tale fase è detta *inflazione*. Su questo tema tuttavia ancora c'è dibattito tra gli scienziati.

Il fatto che l'Universo sia composto solo dal 4% di materia ordinaria è uno dei grandi misteri attuali. Dov'è il resto della materia? In realtà dalla Terra noi possiamo misurare solo la materia che emette radiazione ed è per questo visibile, ma sembra inverosimile che questa sia una percentuale così bassa rispetto al totale. Sono state formulate per questo varie ipotesi che cercano di identificare l'origine dell'azione gravitazionale di qualcosa che sembra non esistere. Potrebbero essere particelle subatomiche ancora non scoperte, oppure oggetti cosmici nascosti, o ancora la stessa legge di Newton, in base alla quale si possono verificare con sufficiente precisione gli effetti gravitazionali, potrebbe non essere più valida per distanze molto grandi. Relativamente a quest'ultima ipotesi sono state proposte alcune teorie come la *MOND* che prevede la non validità della legge di Newton per distanze superiori ad un certo valore che corrisponde ad un valore dell'accelerazione che è in relazione con la *costante cosmologica R*, la quale giustifica l'energia oscura, e la velocità della luce (c^2 / R). Tale relazione è assolutamente inspiegabile ed è nota come *legge di Milgrom*. Sembra esistere una violazione della legge di Newton che fa in modo che stelle in una galassia che si trovano più lontane di una certa distanza hanno una accelerazione maggiore di quanto previsto. Per molti scienziati tuttavia tale teoria contrasta con tutte le altre ed è priva di senso scientifico... Ma anomalie simili sono state riscontrate anche nelle orbite di satelliti artificiali.

Relativamente al mondo delle particelle subatomiche, tra il 1970 e il 1973 viene sviluppata la *teoria del Modello Standard*: una teoria, compatibile sia con la meccanica quantistica che con la relatività speciale, che spiega il Mondo attraverso famiglie di particelle e interazioni tra esse.

Le particelle come protoni e neutroni si ipotizza siano costituite da particelle più elementari: i *quark*. Le particelle elementari (tra le quali è classificato anche l'elettrone) sono suddivise in tre *generazioni* e due *famiglie* (quark e leptoni) per un totale di 12 particelle elementari. Nascono due nuove forze che si aggiungono a quelle note (gravitazionale e elettromagnetica): la *forza debole* e la *forza forte*.

Anche se il Modello Standard ha avuto un grosso successo nello spiegare i risultati sperimentali, esso non è mai stato accettato come una teoria completa della fisica fondamentale, a causa della sua incompletezza in particolare nei due seguenti punti:

1. Il modello contiene ben *19 parametri liberi* che devono essere determinati sperimentalmente. Tra questi le masse delle particelle.
2. Il modello ignora completamente *l'interazione gravitazionale*.

A questi 19 parametri se ne sono aggiunti nel 1998 altri 10 quando si è scoperto che una famiglia di particelle (i *neutrini*) che il modello prevede prive di massa, invece ne hanno.

Ciò pregiudica non poco la struttura iniziale del modello.

Inoltre la configurazione di questi parametri (almeno dei 19 originali) è tale per cui una piccola variazione di uno solo di essi renderebbe impossibile l'Universo come noi lo conosciamo. È un caso che abbiano questi valori oppure ci sta sfuggendo qualcosa di profondo?

Sono state quindi sviluppate teorie che tentano di mantenerlo valido attraverso l'introduzione di altrettante particelle "compagne" di quelle esistenti (*teoria supersimmetrica*). Ma tali particelle non sono mai state osservate, e, se esistono, se ne ignora la massa e quindi non è facile prevedere se e quando verranno osservate.

Gli esperimenti sulle particelle si basano su macchine estremamente potenti che accelerano particelle stabili fino a velocità prossime a quelle della luce. In questo modo, per effetto relativistico, la loro massa aumenta (sono state osservate particelle la cui massa è 100.000 volte superiore a quella in condizioni di quiete). Lo scontro tra fasci di queste particelle accelerate produce nuove particelle che possono essere rilevate nonostante il loro tempo di vita estremamente breve.

È per questo che vengono costruiti laboratori sempre più grandi e potenti per poter osservare nuovi fenomeni e validare le teorie esistenti in casi estremi. È alle altissime energie che sarà forse possibile capire come la Natura funziona.

Un esperimento tuttora in atto sta verificando la teoria della relatività sfruttando come laboratorio lo stesso Universo. Essa prevede che protoni che viaggiano nello spazio non possano avere energie (e quindi velocità) superiori a un certo limite poiché ad energie superiori questi interagirebbero con la radiazione di fondo rallentando. I primi risultati fanno ipotizzare che la relatività speciale cessa di valere ad alte energie.

In ogni caso una scala definisce il limite di validità di tutte le leggi della Natura incluse la relatività e la meccanica quantistica: è la *scala di Plank*. È una distanza pari a $\sqrt{8\pi G \hbar / c^3} \approx 10^{-35} m$. Analogamente è definito anche il *tempo di Plank* così come altre grandezze. Si ipotizza che esse rappresentino la quantizzazione delle rispettive grandezze fisiche.

Attualmente i fisici teorici di tutto il mondo sono impegnati in alcuni grandi misteri che tuttora sembrano lontano dalla soluzione.

1. Uno di essi è rendere compatibili le due grandi teorie della relatività generale e della meccanica quantistica. Ognuna di esse descrive perfettamente, per quanto è possibile osservare, la Natura in certi ambiti. Ma esse sono in contrasto e producono assurdi fisici quando si tenta di farle convergere.
2. L'intuizione lascerebbe supporre che le diverse forze della Natura (gravitazione, elettromagnetismo, forza forte e forza debole) siano diverse manifestazioni di un'unica forza. Ma la gravitazione sembra rimanere fuori da qualsiasi possibile unificazione.

3. Il Modello Standard prevede diverse famiglie di particelle ed ogni particella sembra avere una massa ed un tempo di vita caratteristico totalmente arbitrari. Cosa lega tra loro queste grandezze?
4. E quelle che oggi conosciamo come *costanti della Natura* (velocità della luce, costante di Newton, carica dell'elettrone, ecc...) sono veramente costanti e lo sono sempre state? Alcuni esperimenti recentissimi sembrerebbero indicare di no... E a cosa sono dovuti i valori?
5. Cosa sono lo spazio e il tempo? Perché le dimensioni dello spazio che noi osserviamo sono proprio 3?
6. Il nostro Universo è unico? E cosa c'era prima del Big Bang, ammesso che abbia ancora senso parlare di tempo?
7. Perché la Natura ha assunto proprio la struttura che conosciamo? È unica o è solo una delle possibili soluzioni?

Diverse teorie scientifiche oggi stanno tentando di affrontare questi problemi seguendo diverse strade.

La *teoria delle stringhe* ipotizza che esista una sola entità in grado di unificare particelle e interazione tra esse, la *stringa*: un elemento unidimensionale che vibrando in diversi *modi* spiegherebbe le diverse strutture conosciute. Essa necessita però di un certo numero di *dimensioni spaziali extra* fino a portare dalle 3 che osserviamo a 11.

La tecnica di indagare una configurazione dello spaziotempo con una dimensione spaziale aggiuntive già era stata investigata tra il 1919 e il 1927 dai due fisici Theodor Franz Eduard Kaluza e Oskar Klein.

Le dimensioni aggiuntive sarebbero "arrotolate" in modo che ci appaiano invisibili e descritte da particolari geometrie matematiche come gli *spazi di Calabi-Yau*. Purtroppo la teoria non ha tuttora prodotto, al di là di spettacolari sviluppi matematici nel settore della geometria, alcun risultato sperimentale, né alcuna previsione verificabile in grado di *confermarla* o *confutarla*. Le configurazioni geometriche possibili sono infatti almeno 100.000 per cui non si tratta di una teoria, ma piuttosto di una famiglia di "possibili teorie".

Altre teorie della cosiddetta *gravità quantistica* sembrano essere una valida alternativa alla teoria della stringhe, almeno per il fatto che sono possibili esperimenti per dimostrarne o meno la validità.

Tra queste la *VSL* del portoghese João Magueijo (indipendentemente sviluppata anche da John Moffat) nella quale si ipotizza che la velocità della luce possa non essere stata sempre la stessa, ma molto superiore subito dopo il Big Bang, ovvero quando le energie in gioco erano altissime. Tale teoria renderebbe superflua la fastidiosa congettura dell'inflazione.

Da questa teoria e dalla relatività speciale discende anche un'altra recente congettura in contrapposizione a quella delle stringhe dovuta al giovane ricercatore italiano dell'Università "La Sapienza" di Roma Giovanni Amelino-Camelia. Si tratta della cosiddetta *DSR*, o *relatività doppiamente speciale*, successivamente evoluta in *DSR II* per mano dello stesso João Magueijo e Lee Smolin. In essa si ipotizza che all'energia di Plank la velocità della luce sia infinita. Ciò è, in modo insospettabile, in accordo con i principi della relatività generale. Di essa ne è stata dimostrata matematicamente la coerenza. Comunque sarebbe valida sicuramente in un Universo a due dimensioni. Si sta cercando la verifica nel nostro Universo a tre dimensioni.

Quella dello spazio è comunque una questione molto difficile da affrontare. Perché il nostro Universo ha 3 dimensioni spaziali? E soprattutto cos'è e da dove ha origine lo spazio?

Recenti teorie, molto promettenti stanno indagando il problema dal punto di vista opposto a quanto fatto finora. Ovvero: costruire una teoria nella quale lo spaziotempo è una *conseguenza* inevitabile e non lo *scenario* nel quale studiare la Natura. Forse potrebbe essere questa la chiave di volta per una profonda comprensione.

Cosa ci riserveranno i prossimi anni?

Riuscirà mai l'uomo con la sua intelligenza e il suo intuito a comprendere la Natura?

O la Natura stessa è progettata in modo da difendere i suoi segreti ad oltranza?

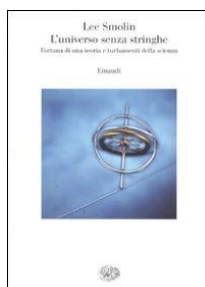
Φύσις κρύπτεσθαι φιλει

Per approfondire leggendo...



*João Magueijo,
Più veloce della luce*

L'avventura romanzata di una speculazione scientifica che potrebbe rivoluzionare le basi della fisica moderna, ma in grado di spiegare in modo semplice misteri ancora irrisolti. Un libro bellissimo ricco di emozioni umane oltre che scientifiche.



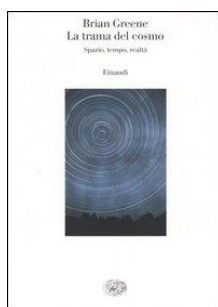
*Lee Smolin,
L'universo senza stringhe*

Una analisi storica critica delle teorie scientifiche dalle particelle elementari alla cosmologia. Un libro appassionante e completo.



*Brian Greene,
L'universo elegante*

La descrizione delle ultime teorie scientifiche dall'infinitamente piccolo all'infinitamente grande unificate da una descrizione matematica straordinariamente elegante e completa.



*Brian Greene,
La trama del cosmo*

Dalla filosofia alla scienza dei segreti più reconditi del cosmo passando dallo spazio al tempo.



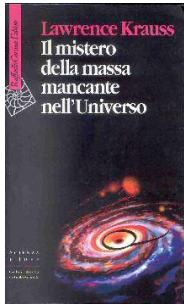
*Robert Foot,
La materia specchio*

Una nuova affascinante teoria scientifica che ipotizza un nuovo tipo di materia che potrebbe spiegare molti fenomeni finora misteriosi.



*Amir D. Aczel,
Entanglement*

La descrizione di uno dei più incredibili fenomeni della fisica, ipotizzato matematicamente ben prima della sua verifica sperimentale.



*Lawrence Krauss,
Il mistero della massa mancante nell'Universo*

Viene affrontato il problema, ancora irrisolto, della massa dell'universo che risulta esistere dalle osservazioni di molti fenomeni, ma non è spiegata scientificamente.

Si riporta, per gentile concessione, il testo ed il [video](#) di una conferenza tenuta in Roma nel febbraio 2008.