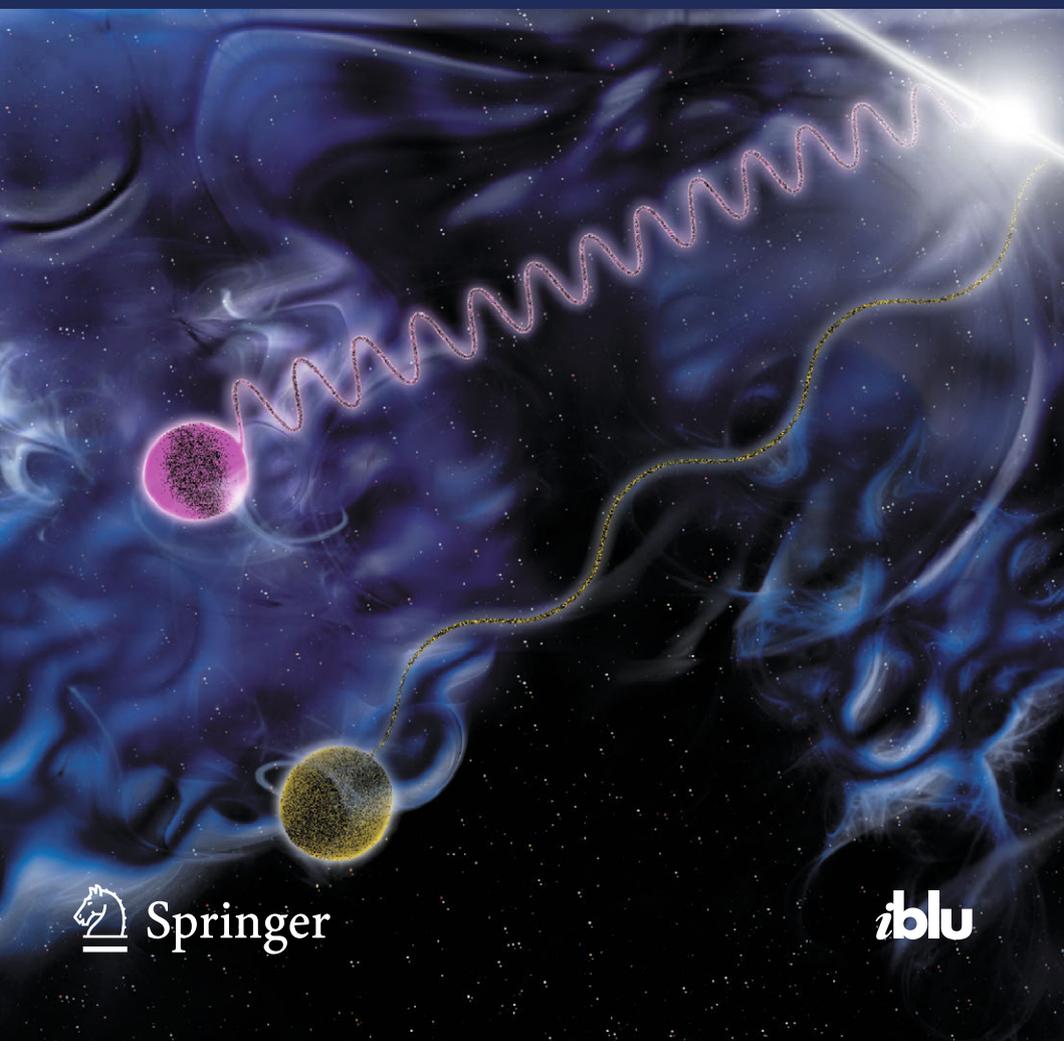


Maurizio Gasperini

Gravità, stringhe e particelle

Una escursione nell'ignoto



 Springer

iblu

*A mia Madre
con la mia più profonda gratitudine*

Maurizio Gasperini

Gravità, Stringhe e Particelle

Una escursione nell'ignoto

 Springer

Maurizio Gasperini
Dipartimento di Fisica
Università di Bari

Collana *i blu - pagine di scienza* ideata e curata da Marina Forlizzi

ISSN 2239-7477

e-ISSN 2239-7663



Springer nel rispetto dell'ambiente ha stampato questo libro su carta proveniente da foreste gestite in maniera responsabile secondo i criteri FSC® (Forest Stewardship Council®).

ISBN 978-88-470-5534-6

ISBN 978-88-470-5535-3 (eBook)

DOI 10.1007/978-88-470-5535-3

© Springer-Verlag Italia, 2014

Quest'opera è protetta dalla legge sul diritto d'autore e la sua riproduzione anche parziale è ammessa esclusivamente nei limiti della stessa. Tutti i diritti, in particolare i diritti di traduzione, ristampa, riutilizzo di illustrazioni, recitazione, trasmissione radiotelevisiva, riproduzione su microfilm o altri supporti, inclusione in database o software, adattamento elettronico, o con altri mezzi oggi conosciuti o sviluppati in futuro, rimangono riservati. Sono esclusi brevi stralci utilizzati a fini didattici e materiale fornito ad uso esclusivo dell'acquirente dell'opera per utilizzazione su computer. I permessi di riproduzione devono essere autorizzati da Springer e possono essere richiesti attraverso RightsLink (Copyright Clearance Center). La violazione delle norme comporta le sanzioni previste dalla legge.

Le fotocopie per uso personale possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dalla legge, mentre quelle per finalità di carattere professionale, economico o commerciale possono essere effettuate a seguito di specifica autorizzazione rilasciata da CLEARedi, Centro Licenze e Autorizzazioni per le Riproduzioni Editoriali, e-mail autorizzazioni@clearedi.org e sito web www.clearedi.org.

L'utilizzo in questa pubblicazione di denominazioni generiche, nomi commerciali, marchi registrati, ecc., anche se non specificatamente identificati, non implica che tali denominazioni o marchi non siano protetti dalle relative leggi e regolamenti.

Le informazioni contenute nel libro sono da ritenersi veritiere ed esatte al momento della pubblicazione; tuttavia, gli autori, i curatori e l'editore declinano ogni responsabilità legale per qualsiasi involontario errore od omissione. L'editore non può quindi fornire alcuna garanzia circa i contenuti dell'opera.

Coordinamento editoriale: Barbara Amorese

Progetto grafico: Ikona s.r.l., Milano

Impaginazione: CompoMat s.r.l., Configni (RI)

Springer-Verlag Italia S.r.l., Via Decembrio 28, I-20137 Milano

Springer fa parte di Springer Science + Business Media (www.springer.com)

Prefazione

Questo libro è stato ispirato dalle conversazioni avute con un amico (Pier Paolo Casalbani, detto “Smilzo”), che durante le vacanze estive, mentre prendiamo il sole sulla spiaggia di Cesenatico, tra una partita e l’altra, spesso mi chiede di raccontargli le ultime novità e le idee più curiose che riguardano il mio lavoro di fisico teorico.

In questo libro parlerò di fisica rivolgendomi dunque a lettori che non hanno necessariamente una preparazione specifica in questo campo, ma sono comunque interessati a scoprire la novità, l’originalità e le possibili strane implicazioni di alcune sorprendenti idee utilizzate dalla fisica moderna. Cercherò di non usare espressioni matematiche, a meno che non sia inevitabile per il punto che voglio illustrare. Cercherò anche di lasciar perdere, per una volta, il cauto e imparziale stile accademico, lasciandomi trasportare un po’ dall’entusiasmo e dalle mie sensazioni relative agli argomenti in gioco.

Si può dire che è un libro di divulgazione scientifica, ma di stampo piuttosto non convenzionale, perché si focalizza non solo ciò che è già noto ma anche – e soprattutto – su ciò che ancora è ignoto. Molte parti di questo libro sono infatti dedicate all’introduzione e all’illustrazione di modelli e risultati teorici che sono potenzialmente di importanza cruciale per una comprensione sempre più profonda della Natura, ma che sono ancora in attesa di una definitiva conferma (o smentita) sperimentale. Da questo punto di vista il libro potrebbe avere qualche interesse anche per i fisici di professione, specializzati o no nel campo della fisica teorica e delle interazioni fondamentali.

Vorrei spiegare, infine, perché mi sono focalizzato principalmente su tre temi: gravità, stringhe e particelle. Perché questi tre argomenti? Cosa li accomuna, distinguendoli da altri importanti temi di ricerca della fisica moderna?

I legami che esistono tra loro sono molteplici, come vedremo: basti pensare che sono necessarie le stringhe per formulare una consistente teoria unificata che includa, oltre alla gravità e alle altre interazioni, anche tutte le particelle che rappresentano i componenti fondamentali della materia.

VI **Prefazione**

La mia scelta, però, è principalmente motivata dal fatto che solo uno studio congiunto dei modelli per la gravità, le stringhe e le particelle sembra in grado di fornirci la chiave di quello che (a mio avviso) rappresenta uno dei più grandi e affascinanti misteri della scienza attuale: oltre al tempo e alle tre dimensioni dello spazio, esistono altre dimensioni nel nostro Universo? In caso affermativo, quante sono?

Cesena, Febbraio 2013

Maurizio Gasperini

Notazioni

Per semplificare al massimo le (poche) formule che presenteremo in questo libro useremo sempre il sistema di unità di misura cosiddetto “naturale”, in cui la velocità della luce c e la costante di Planck \hbar sono poste entrambe uguali a uno.

In questo caso massa ed energia hanno le stesse dimensioni, l'energia ha dimensioni dell'inverso di una lunghezza, e la densità di energia ha dimensioni dell'inverso di una lunghezza alla quarta potenza.

Come distanza di riferimento useremo spesso la lunghezza di Planck L_P , definita da $L_P = \sqrt{G}$, dove G è la costante di Newton; come energia di riferimento useremo spesso la massa di Planck M_P , definita da $M_P = 1/L_P$.

Esprimeremo preferibilmente le distanze in centimetri (abbreviati con la sigla cm); le energie in elettronvolts (abbreviati con la sigla eV), oppure miliardi di elettronvolts (abbreviati con la sigla GeV), oppure migliaia di GeV (abbreviati con la sigla TeV). Occasionalmente useremo come unità di distanza anche l'anno luce, pari a circa 0.9×10^{18} cm. Infine, esprimeremo le temperature in gradi Kelvin, ricordando che un grado Kelvin (ponendo la costante di Boltzmann uguale a 1) corrisponde a circa 8.6×10^{-5} eV.

In queste unità la lunghezza di Planck è data da:

$$L_P \simeq 1.61 \times 10^{-33} \text{ cm},$$

la massa di Planck è data da:

$$M_P \simeq 1.22 \times 10^{19} \text{ GeV},$$

e il raggio di Hubble L_H , che controlla l'estensione della porzione di spazio accessibile all'osservazione diretta, è attualmente dato da:

$$L_H \simeq 1.28 \times 10^{28} \text{ cm}.$$

Altre scale di distanza e di energia, rilevanti per gli argomenti affrontati in questo libro, saranno di volta in volta introdotte e definite dove necessario.

Indice

| | |
|---|-----------|
| Prefazione | V |
| Notazioni | VII |
| 1. Prologo: una “culla” fatta d’energia | 1 |
| 2. Gravità a piccole distanze | 7 |
| 2.1 Nuove forze della Natura? | 9 |
| 2.1.1 Il gravifotone e il dilatone | 12 |
| 2.1.2 “Camaleonti” e gravitoni “grassi” | 19 |
| 2.2 Nuove dimensioni dello spazio? | 23 |
| 2.3 Lo scenario compatto | 25 |
| 2.3.1 Le “torri” di Kaluza-Klein e il radione | 27 |
| 2.3.2 La compattificazione “spontanea” | 29 |
| 2.4 Lo scenario delle membrane | 33 |
| 2.4.1 Il confinamento geometrico della gravità | 36 |
| 3. Gravità a grandi distanze | 39 |
| 3.1 Le dimensioni extra tornano in gioco | 42 |
| 3.2 Una nuova forma di energia “oscura”? | 44 |
| 3.2.1 La quintessenza cosmica | 48 |
| 3.3 Le fluttuazioni di energia del vuoto | 54 |
| 4. Lo spazio, il tempo e lo spazio-tempo | 63 |
| 4.1 Forse il passato non è immutabile? | 64 |
| 4.1.1 Il tempo e la memoria | 69 |
| 4.1.2 Il tempo: una proprietà intrinseca dei corpi? | 70 |
| 4.2 Forse lo spazio-tempo non è unico? | 74 |
| 4.2.1 Singolarità “relative” | 76 |
| 5. Stringhe e interazioni fondamentali | 79 |
| 5.1 Come quantizzare oggetti non-puntiformi | 80 |
| 5.2 Supersimmetria e spazio multidimensionale | 86 |

| | | |
|------------|--|-----|
| 5.3 | Le cinque superstringhe | 91 |
| 5.3.1 | Il tipo IIA e il tipo IIB | 92 |
| 5.3.2 | La superstringa di tipo I | 93 |
| 5.3.3 | Le due superstringhe “eterotiche” | 96 |
| 5.4 | Invarianza conforme ed equazioni del moto | 99 |
| 5.4.1 | Lo sviluppo topologico e il dilatone | 104 |
| 5.5 | Un nuovo tipo di simmetria: la “dualità” | 107 |
| 5.5.1 | Stringhe “arrotolate” e dimensioni spaziali | 114 |
| 6. | Il passato più remoto del nostro Universo | 121 |
| 6.1 | La cosmologia delle stringhe | 128 |
| 6.2 | La cosmologia delle membrane | 131 |
| 6.2.1 | L’Universo “ekpyrotico” | 135 |
| 6.2.2 | Inflazione e anti-membrane | 137 |
| 6.3 | Segnali da epoche precedenti il Big Bang? | 139 |
| 6.3.1 | Il fondo di gravitoni fossili | 141 |
| 7. | Conclusione | 149 |
| | Bibliografia | 151 |

1. Prologo: una “culla” fatta d'energia

Si dice spesso che la fisica delle “piccole distanze” è equivalente alla fisica delle “alte energie”. In effetti è proprio così, per effetto del famoso principio di indeterminazione di Heisenberg. Questo principio stabilisce che per distinguere (e misurare) distanze sempre più piccole è necessario impiegare oggetti con quantità di moto sempre più elevate, e quindi con energie cinetiche sempre più grandi. Secondo il principio di indeterminazione, in particolare, l'energia necessaria E risulta inversamente proporzionale alla distanza d che stiamo considerando, e quindi E tende a diventare infinitamente grande quando la distanza d tende a zero.

Anche le grandissime distanze, però, ci portano inevitabilmente verso le alte energie. Questo avviene sostanzialmente per due ragioni: una, di carattere contingente, è associata all'espansione del nostro Universo; l'altra, di carattere più fondamentale, è associata al fatto che le informazioni e i segnali (di qualunque tipo) si propagano con velocità finita.

A causa di questa seconda importante proprietà della Natura, infatti, guardare “lontano nello spazio” significa anche guardare “indietro nel tempo”, perché i segnali che riceviamo da sorgenti sempre più lontane sono stati emessi in tempi sempre più remoti. Se una galassia dista dalla Terra milioni di anni luce, per esempio, la sua luce ha dovuto viaggiare per milioni di anni prima di arrivare fino a noi, e le informazioni che ci può fornire sullo stato di quella galassia si riferiscono all'epoca in cui la luce è partita, ovvero milioni di anni prima¹.

¹La famosa galassia *Andromeda*, la cui immagine viene usata anche come sfondo di scrivania nelle recenti versioni dei computers Macintosh, è una delle galassie più vicine, e dista dalla Terra circa due milioni e mezzo di anni luce, pari a 2.4×10^{19} chilometri.

A causa dell'espansione dell'Universo, d'altra parte, guardare indietro nel tempo significa anche considerare epoche in cui materia e radiazione erano concentrate in volumi di spazio sempre più piccoli, per cui la temperatura e l'energia cinetica delle singole componenti elementari erano sempre più elevate. Quindi, più remoto è il segnale che ci raggiunge, più grande è la scala di energia corrispondente all'epoca dell'emissione.

Ne consegue che le nostre osservazioni non possono spingersi all'indietro nel tempo (e lontano nello spazio) a nostro piacimento: oltre una certa epoca, ad esempio, l'Universo è così denso da non essere più trasparente alla radiazione elettromagnetica² (la luce emessa viene immediatamente riassorbita, e quindi non è in grado di raggiungerci e di portarci informazioni). Potremmo considerare altri tipi di radiazione (ad esempio onde gravitazionali) che sono più penetranti della luce, e possono arrivare a noi da epoche più remote. Anche procedendo in questo modo, però, la cosmologia tradizionale ci dice che troveremmo comunque, a una certa epoca e a una certa distanza, una barriera invalicabile dovuta alla cosiddetta "singolarità iniziale": il famoso Big Bang.

La singolarità del Big Bang, che segna l'inizio dell'espansione del nostro Universo, e che è caratterizzata da scale di energia arbitrariamente elevate, non è infinitamente lontana nel tempo (e nello spazio), ma è localizzata in un'epoca che risale a circa 14 miliardi di anni fa, e che corrisponde a una distanza dell'ordine del cosiddetto "raggio di Hubble", L_H . Questa distanza dipende dal tempo, in generale, e oggi vale appunto circa 14 miliardi di anni luce. Per distanze spaziali che tendono a L_H , dunque, la corrispondente scala di energia tende all'infinito.

Per riassumere gli argomenti precedenti, e sintetizzarne le conclusioni, possiamo fare un grafico (empirico) della scala di energia E in funzione della distanza d . Otteniamo allora una curva del tipo di quella riportata in Fig. 1.1, che cresce senza limiti sia per distanze molto piccole ($d \rightarrow 0$), sia per distanze dell'ordine del raggio di Hubble ($d \rightarrow L_H$). Questo andamento dell'energia sembra tener

²Questo avviene quando la radiazione raggiunge e supera una temperatura che è circa mille volte più elevata di quella dell'Universo attuale, ossia una temperatura di circa 2973 gradi Kelvin. Tale temperatura viene raggiunta alla cosiddetta epoca di "disaccoppiamento" della radiazione (si vedano ad esempio i testi di R. Durrer [1], S. Weinberg [2], oppure [3] per un testo in italiano).

confinare le nostre osservazioni entro un intervallo di distanze finito, limitato da due barriere fisicamente invalicabili. Ci vorrebbe infatti un'energia infinitamente elevata per aver accesso a distanze piccole a piacere o grandi a piacere, come se la Natura avesse preparato per noi una “culla” dalla quale non possiamo evadere.

Come tutte le culle, però, anche la “culla energetica” di cui stiamo parlando potrebbe essere efficace per confinare e proteggere una scienza fisica “neonata”, rivelandosi poi inadeguata, e dotata di barriere non più insormontabili, al crescere e maturare delle nostre conoscenze scientifiche. Recenti sviluppi della fisica teorica, che vedremo in dettaglio nei prossimi capitoli, sembrano infatti suggerire che le barriere energetiche della Fig. 1.1 possano essere “smussate” – sia a grandi distanze che a piccole distanze – limitandole a valori di energia molto elevati, ma *finiti*.

Anticipando alcuni risultati, e considerando innanzitutto la barriera “cosmologica” associata al Big Bang, possiamo infatti ricordare che la teoria delle stringhe permette di formulare modelli d'Universo in cui la singolarità iniziale viene sostituita da una fase di transizione – la cosiddetta “fase di stringa” – caratterizzata da densità e temperature con valori molto più grandi di quelli tipici della materia ordinaria, ma non infiniti. In questo caso la scala di energia E non è più divergente in corrispondenza di L_H , ma si limita a raggiungere un valore massimo E_S (determinato dalla teoria delle stringhe), do-

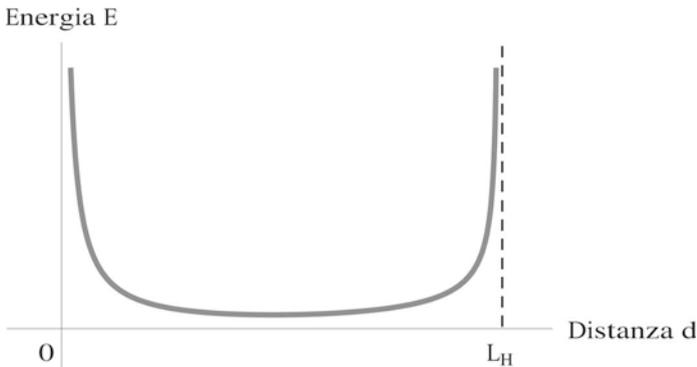


Fig. 1.1 La scala di energia E in funzione della corrispondente scala di distanza d . Le distanze fisicamente accessibili sembrano essere delimitate da due barriere di energia infinitamente elevate

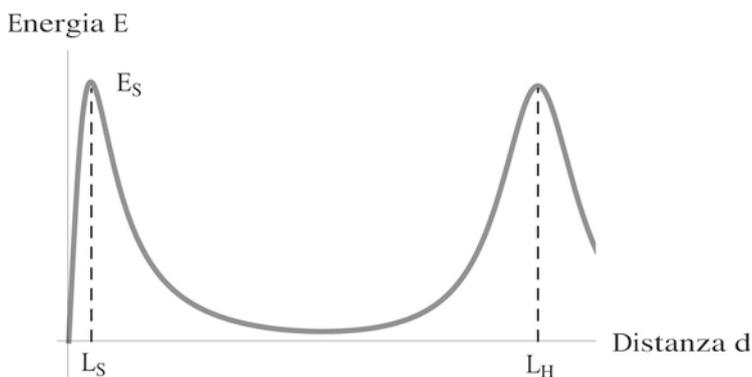


Fig. 1.2 La scala di energia E in funzione della corrispondente scala di distanza d , includendo le limitazioni suggerite dalla teoria delle stringhe. Le distanze fisicamente accessibili si estendono da zero a valori arbitrariamente elevati

poiché torna a decrescere, rendendo accessibili all'osservazione distanze spaziali (e intervalli temporali) arbitrariamente estesi (si veda la Fig. 1.2).

Possiamo aspettarci una modifica simile anche nel caso della barriera energetica presente a piccole distanze. Infatti, la scala di energia massima E_S è inversamente proporzionale a una distanza che chiameremo L_S , che è tipica della teoria delle stringhe (e più in generale degli oggetti estesi) in versione quantistica. Al di sotto di questa distanza, che possiamo associare alla lunghezza minima di un oggetto esteso quantizzato, dobbiamo aspettarci che la relazione di indeterminazione tra energia e distanza venga generalizzata in modo da rimuovere le infinite fluttuazioni di energia associate alle distanze infinitamente piccole, così da fissare la scala di energia massima E_S in corrispondenza della lunghezza L_S .

Il risultato di queste modifiche è (qualitativamente) illustrato in Fig. 1.2, che mostra come entrambe le due barriere energetiche potrebbero essere smussate intorno alle due distanze critiche L_S e L_H , per effetto delle modifiche suggerite dalla teoria delle stringhe.

Poiché la figura è qualitativa e non rispetta le proporzioni reali è opportuno sottolineare, per chiarezza, che le due scale di distanza L_S e L_H sono enormemente diverse tra loro: L_S è una lunghezza piccolissima, dell'ordine di 10^{-32} cm, mentre L_H (come abbiamo già visto) è estremamente grande, dell'ordine di 10^{28} cm (pari a circa 14 miliardi di anni luce).

Inoltre, l'altezza E_S della barriera energetica rappresenta un'energia enorme rispetto alla scala di valori tipici della fisica nucleare e subnucleare. La teoria delle stringhe suggerisce infatti per E_S un valore dell'ordine di 10^{15} TeV, vale a dire un'energia che è un milione di miliardi di volte più grande dell'energia massima attualmente raggiungibile dal grande acceleratore LHC (*Large Hadron Collider*), in funzione presso i laboratori del CERN di Ginevra.

Si tratta quindi di due barriere di altezza finita ma molto elevata, posizionate a distanza enorme tra loro. Quali altri mondi, o quali nuovi fenomeni naturali, ci aspettano al di là di quelle barriere che la fisica del secolo scorso considerava invalicabili?

Siamo un po' incuriositi e un po' intimoriti, come un bambino piccolo che per la prima volta solleva il capo per guardare oltre le pareti della sua culla.

2. Gravità a piccole distanze

La forza gravitazionale, tra tutte le varie forze fondamentali della Natura, è forse quella che crediamo di conoscere meglio – se non altro perché è quella che da sempre ha condizionato il nostro modo di vivere e la nostra esperienza.

Alle scuole superiori si insegna ancor oggi la legge di gravitazione universale di Newton: due masse si attirano con una forza che è inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza. Secondo questa legge, se dimezziamo la distanza la forza diventa il quadruplo. Se la distanza si riduce a un quarto, la forza gravitazionale diventa sedici volte più intensa. E così via. Ma cosa succede se andiamo a distanze sempre più piccole e sempre più piccole? La forza di gravità continua ancora a seguire l'andamento previsto da Newton?

A questo punto devo fare una precisazione importante. Le piccole distanze di cui sto parlando, per il momento, non sono “così piccole” da dover richiedere l'applicazione dei principi della fisica quantistica. Se entriamo nel regime in cui è necessario “quantizzare” l'interazione gravitazionale, infatti, sappiamo già che ci saranno correzioni dovute alla produzione virtuale di particelle¹, e che le leggi classiche della gravitazione risulteranno inevitabilmente modificate. Non vogliamo occuparci per ora di queste correzioni, e quindi ci limitiamo a un regime di distanze in cui la fisica classica è valida.

Dovrei inoltre sottolineare che, anche restando in un contesto classico, la teoria di Newton fornisce comunque un modello approssimato e incompleto dell'interazione gravitazionale. Il modello corretto, secondo la scienza moderna, è fornito dalla teoria della relatività generale di Einstein, che descrive la gravità come una conseguenza geo-

¹Chi è esperto di fisica certamente capirà che mi sto riferendo alle correzioni dovute ai *loops* quantistici, descritte dai grafici di Feynman.

metrica della curvatura dello spazio-tempo. Però, nel limite in cui le masse sono statiche, il campo gravitazionale sufficientemente debole, e la curvatura dello spazio così piccola da essere trascurabile, anche la teoria di Einstein prevede che la forza tra due corpi puntiformi abbia l'andamento descritto dalla legge di Newton.

La domanda formulata in precedenza rimane dunque lecita. Fino a che distanza la legge classica della gravità Newtoniana è valida? La risposta può venire solo da una verifica sperimentale diretta, effettuata a distanze sempre più piccole, fino ai limiti massimi consentiti dalla tecnologia corrente.

Esperimenti che mettono alla prova la legge Newtoniana dell'inverso del quadrato della distanza sono stati – e vengono tuttora – effettuati con precisione sempre crescente. Si sono presi in considerazione molti tipi di possibili correzioni. Si è supposto, ad esempio, che a piccole distanze la forza di gravità sia inversamente proporzionale non al quadrato, ma al cubo, o alla quarta potenza, o a qualche altra potenza della distanza. Oppure, che la forza decresca con la distanza in modo esponenziale. Si è anche considerata la possibilità che la costante gravitazionale di Newton – la famosa costante G – non sia universale, e che il suo valore cambi con la distanza.

Tutte queste possibili modifiche sono state messe alla prova con moderni strumenti di precisione in grado di misurare la forza di gravità a piccole distanze²: le bilance di torsione, i pendoli di torsione, gli oscillatori di torsione ad alte e basse frequenze, e i cosiddetti “*microcantilevers*” (microscopici vibratorii formati da minuscole schegge di silicio disposte come piccoli trampolini).

Nessun esperimento è mai riuscito, finora, a rivelare alcuna violazione della legge dell'inverso del quadrato della distanza. Se assumiamo che tali violazioni siano controllate da una costante gravitazionale che ha lo stesso valore a tutte le distanze³, le misure effettuate ci dicono, in particolare, che la legge di Newton potrebbe essere eventualmente modificata solo su scale di distanze sub-millimetriche: più precisamente, su distanze inferiori ai due decimi di millimetro (ci si aspetta che questo limite possa essere presto esteso fino a due cente-

²Il lettore interessato può trovare una descrizione dei vari esperimenti nell'articolo di rassegna di E. G. Adelberger, B. R. Heckel e A. E. Nelson [4].

³Deve essere così se vogliamo che il principio di equivalenza resti valido (si veda il paragrafo successivo).

simi di millimetro). A distanze più grandi, dell'ordine (per esempio) del centimetro, eventuali modifiche sarebbero possibili solo se caratterizzate da una costante gravitazionale – ovvero, da un'intensità effettiva – che risulta almeno mille volte più piccola della costante G di Newton.

Questi risultati sperimentali sono sorprendenti, e non perché forniscano un'accurata conferma della legge di gravità di Newton. Piuttosto, per il motivo contrario: la legge di Newton risulta infatti confermata solo fino a distanze di poco inferiori al millimetro, e quindi rimane molto spazio a eventuali modifiche.

È facile osservare, infatti, che le correzioni alla legge di Newton previste dalla relatività generale diventano cruciali per distanze confrontabili con il cosiddetto raggio di Schwarzschild, che per corpi di massa dell'ordine del kilogrammo (come quelle impiegate negli esperimenti) risulta circa 10^{-25} cm. Le correzioni dovute ad effetti di gravità quantistica, d'altra parte, risultano cruciali per distanze ancora più piccole, dell'ordine della lunghezza di Planck L_P che vale circa 10^{-33} cm. Tra queste distanze e quelle relative alle verifiche sperimentali (che sono dell'ordine di 10^{-2} cm) c'è chiaramente un enorme vuoto di informazioni.

Nel “vuoto” di queste distanze intermedie potrebbero nascondersi importanti modifiche alla legge di gravitazione che ancora non abbiamo scoperto, e che, una volta scoperte – o smentite – potrebbero aiutarci a capire meglio la Natura e le sue interazioni fondamentali.

Infatti, ci sono attualmente vari modelli teorici che prevedono la possibilità – e la necessità – di correggere la legge gravitazionale di Newton a piccole distanze. Come vedremo nel resto del capitolo, tali correzioni possono essere di tre tipi: correzioni dovute alla presenza di nuove forze della Natura, nuove proprietà intrinseche dell'interazione gravitazionale oppure di nuove dimensioni dello spazio.

2.1 Nuove forze della Natura?

Nella seconda metà degli anni '80, quando ero un giovane ricercatore in servizio presso il Dipartimento di Fisica Teorica dell'Università di Torino, ricordo che fece molto scalpore un articolo pubblicato da