

Il paesaggio della teoria delle stringhe

*Secondo la teoria delle stringhe
l'universo occupa
una «valle» a caso tra
una scelta pressoché infinita
di conche in un immenso
paesaggio di possibilità*

**di Raphael Bousso
e Joseph Polchinski**

DENTRO UNA BOLLA. La teoria delle stringhe prevede un paesaggio concettuale popolato da una serie innumerevole di universi possibili. Il paesaggio potrebbe forse contenere 10^{500} valli, ciascuna corrispondente a un insieme di leggi fisiche valide all'interno di enormi bolle di spazio. Il nostro universo visibile sarebbe una regione relativamente piccola all'interno di una di queste bolle.

Don Foley

IN SINTESI

- Secondo la teoria delle stringhe, le leggi fisiche che operano nel nostro mondo dipendono dal modo in cui le dimensioni extra dello spazio sono arrotolate in un minuscolo «fagotto».
- Una mappa di tutte le possibili configurazioni delle dimensioni extra produce un «paesaggio» all'interno del quale ciascuna valle corrisponde a un insieme stabile di leggi.
- L'intero universo visibile esiste in una regione dello spazio associata a una valle del paesaggio che dà casualmente luogo a leggi fisiche compatibili con l'evoluzione di forme di vita.

Secondo la teoria generale della relatività di Albert Einstein, la gravità ha origine dalla geometria dello spazio e del tempo, che si combinano a formare lo spazio-tempo. Qualunque corpo dotato di massa lascia una «impronta» sulla forma dello spazio-tempo, descritta da un'equazione che Einstein formulò nel 1915. La massa terrestre, per esempio, fa sì che il tempo trascorra un po' più velocemente per una mela vicina alla cima dell'albero che per un fisico che lavora alla sua ombra. Quando la mela cade, in realtà sta reagendo a questa deformazione del tempo. La curvatura dello spazio-tempo è ciò che mantiene la Terra in orbita intorno al Sole e allontana ancora di più le galassie distanti. Questa idea sorprendente e di straordinaria bellezza è stata confermata da molti esperimenti di precisione.

Ma visto il successo della sostituzione della forza gravitazionale con la dinamica dello spazio e del tempo, perché non cercare una spiegazione geometrica delle altre forze della natura, e persino della straordinaria varietà delle particelle elementari? In effetti, questa ricerca impegnò Einstein per buona parte della sua vita. Egli era particolarmente attratto dai lavori del tedesco Theodor Kaluza e dello svedese Oskar Klein, i quali proposero che, mentre la gravità rispecchia la forma delle quattro familiari dimensioni dello spazio-tempo, l'elettromagnetismo derivi dalla geometria di un'ulteriore quinta dimensione, troppo piccola per essere vista direttamente (alme-

collegamento se esistesse un'ulteriore dimensione dello spazio, tale da rendere lo spazio-tempo pentadimensionale.

L'idea è meno stravagante di quel che sembra. Se la dimensione spaziale in più è ripiegata in un cerchio abbastanza piccolo, sfuggerà anche ai migliori microscopi, vale a dire ai più potenti acceleratori di particelle (si veda la *finestra nella pagina a fronte*). Per di più, sappiamo già dalla relatività generale che lo spazio è flessibile. Le tre dimensioni che vediamo sono in espansione, e una volta erano molto più piccole, per cui non è così azzardato immaginare l'esistenza di un'altra dimensione che resta piccola ancora oggi.

Anche se non possiamo rivelarla direttamente, una piccola dimensione extra deve avere effetti indiretti significativi e osservabili. La relatività generale descriverebbe allora la geometria di uno spazio-tempo pentadimensionale. Possiamo dividere questa geometria in tre elementi: la forma delle quattro dimensioni macroscopiche dello spazio-tempo, l'angolo fra la dimensione più piccola e le altre, e la circonferenza di questa quinta dimensione. Lo spazio-tempo macroscopico segue la normale relatività generale in quattro dimensioni. In ogni punto all'interno di esso, l'angolo e la circonferenza hanno un certo valore, proprio come due campi che pervadano lo spazio-tempo e assumano particolari valori in ogni punto di esso. Curiosamente, il campo associato all'angolo «imita» un campo elettromagnetico appartenente al mondo quadridimensionale: ossia le equazioni che regolano il suo comportamento sono

Nel complesso, la teoria delle stringhe sembra più complicata di quella di Kaluza-Klein, ma la struttura matematica sottostante è, in realtà, più unificata e completa. Il tema centrale della teoria di Kaluza-Klein resta invariato: i principi fisici che osserviamo dipendono dalla geometria di altre dimensioni nascoste.

Troppe soluzioni?

La domanda chiave è: che cosa determina questa geometria? La risposta della relatività generale è che lo spazio-tempo deve soddisfare le equazioni di Einstein: per citare John Wheeler della Princeton University, la materia dice allo spazio-tempo come deve curvarsi, e lo spazio-tempo dice alla materia come deve muoversi. Ma non vi è una soluzione unica delle equazioni, per cui sono permesse molte geometrie differenti. Il caso della geometria pentadimensionale di Kaluza-Klein fornisce un esempio semplice di questa pluralità. La circonferenza della dimensione piccola può avere una grandezza qualsiasi: in assenza di materia, quattro dimensioni macroscopiche piane, più un cerchio di qualunque grandezza risolvono le equazioni di Einstein. (Soluzioni multiple simili esistono anche quando è presente la materia.)

Nella teoria delle stringhe abbiamo parecchie dimensioni extra, e quindi i parametri variabili sono molti di più. Una singola dimensione extra può avvolgersi solo in un cerchio. Quando ce ne sono di più, il fascio di dimensioni extra può avere molte forme differenti (tecnicamente «topologie»), come una sfera, una ciambella, due ciambelle unite insieme e così via. Ciascun anello di ciambella (un «manico») è dotato di lunghezza e circonferenza, il che dà origine a un enorme assortimento di possibili geometrie per le dimensioni più piccole. Oltre ai manici, ulteriori parametri corrispondono alla posizione delle brane e alle differenti quantità di flusso che circondano ciascun anello (si veda il box a p. 101).

Le soluzioni di questo vasto insieme non sono però tutte uguali: ogni configurazione ha un'energia potenziale, a cui contribuiscono flussi, brane e la curvatura stessa delle dimensioni arrotolate. Questa energia è detta energia del vuoto, perché corrisponde all'energia dello spazio-tempo quando le quattro dimensioni macroscopiche sono completamente prive di materia e di campi. La geometria delle dimensioni più piccole cerca di modificarsi in modo da minimizzare l'energia del vuoto, proprio come una palla posta su un pendio comincia a rotolare verso un punto più in basso.

Una mappa da completare

Per capire le conseguenze di questa minimizzazione, concentriamoci dapprima su un singolo parametro: la grandezza totale dello spazio nascosto. Possiamo tracciare una curva che mostra il modo in cui cambia l'energia del vuoto al variare di questo parametro (un esempio è mostrato nel grafico in alto a p. 103). A grandezze molto piccole, l'energia è elevata, quindi la curva parte a sinistra in alto. Poi, procedendo verso destra, si abbassa in tre «valli», ciascuna a quota inferiore alla precedente. Finalmente, a destra, dopo essere risalita dall'ultimo avvallamento, la curva si abbassa in un dolce pendio fino a un valore costante. Il fondo della valle più a sinistra è a un'energia maggiore di zero; quello della valle centrale corrisponde esattamente al valore zero; e quello della valle di destra è inferiore a zero.

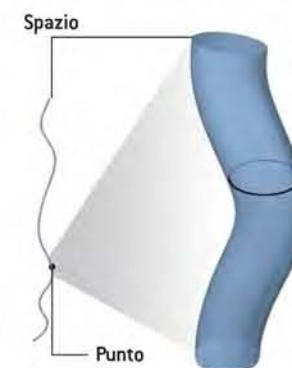
Il comportamento dello spazio nascosto dipende dalle condizioni iniziali, ovvero dal punto di partenza sulla curva della «palla» che lo rappresenta. Se la configurazione parte a destra dell'ultimo picco, la palla rotolerà via verso l'infinito, e la

ALTRE DIMENSIONI

Stringhe e tubi

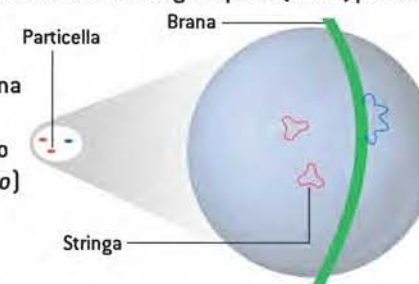
La teoria di Kaluza-Klein e la teoria delle stringhe postulano l'esistenza di dimensioni spaziali in più rispetto alle tre che percepiamo. Per immaginare queste minuscole dimensioni, consideriamo uno spazio costituito da un tubo lungo e molto sottile. Visto da una certa distanza, il tubo appare come una linea monodimensionale, ma a un ingrandimento maggiore la sua forma cilindrica

diventa evidente. Ciascun punto di dimensione zero sulla linea si rivela essere un cerchio monodimensionale sul tubo. Nella teoria originaria di Kaluza-Klein, ciascun punto del familiare spazio tridimensionale è in realtà un minuscolo cerchio.

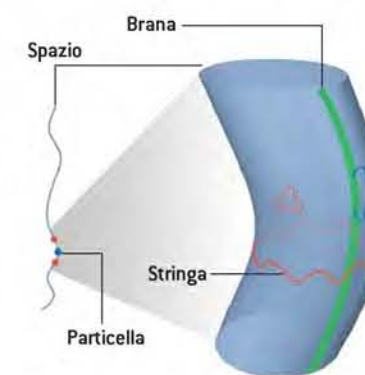


La teoria delle stringhe prevede che quelle che appaiono come particelle puntiformi siano in realtà minuscole stringhe. Oltre a ciò, prevede l'esistenza di oggetti simili a membrane chiamati brane (in verde), che possono avere dimensionalità variabile. Le stringhe aperte (in blu) posano

sempre le proprie estremità su una brana, mentre quelle ad anello chiuso (in rosso) sono libere da questa limitazione.



La teoria delle stringhe include anche quella di Kaluza-Klein, che rappresentiamo mostrando nuovamente uno spazio che sembra una linea ma in realtà è un tubo. Quest'ultimo è percorso da una brana monodimensionale ed è popolato da stringhe, alcune delle quali si avvolgono con uno o più giri intorno alla circonferenza del tubo. A ingrandimento minore, le stringhe appaiono come particelle puntiformi e la dimensione extra, compresa la sua brana, non è riconoscibile.



Le equazioni della teoria delle stringhe implicano l'esistenza di sei dimensioni extra, troppo piccole per poter essere rivelate

no finora). La ricerca di una teoria unificata da parte di Einstein è spesso ricordata come un sconfitta, ma in realtà era solo prematura: gli scienziati dovevano prima comprendere le forze nucleari e il ruolo cruciale della teoria quantistica dei campi nella descrizione della fisica. Questa comprensione non è stata raggiunta fino agli anni settanta del XX secolo.

Oggi la ricerca di una teoria unificata è un'attività centrale nella fisica teorica. E, proprio come aveva previsto Einstein, i concetti geometrici hanno un ruolo fondamentale. L'ipotesi di Kaluza-Klein è stata ripresa e ampliata come parte della teoria delle stringhe, un promettente quadro concettuale per l'unificazione della meccanica quantistica, della relatività generale e della fisica delle particelle. Tanto nella congettura di Kaluza-Klein quanto nella teoria delle stringhe, i principi fisici osservabili sono controllati dalla forma e dalla grandezza di ulteriori dimensioni microscopiche. Che cosa determina questa forma? Recenti risultati sperimentali e teorici sembrano indicare una risposta sconcertante e controversa che modifica profondamente la nostra visione dell'universo.

Altre dimensioni

Kaluza e Klein proposero la loro ipotesi sull'esistenza di una quinta dimensione agli inizi del XX secolo, quando gli scienziati conoscevano due forze fondamentali: elettromagnetismo e gravità. Entrambe diminuiscono in maniera inversamente proporzionale al quadrato della distanza dalla loro origine, e quindi ipotizzare che fossero in qualche modo collegate era una forte tentazione. Kaluza e Klein osservarono che la teoria geometrica della gravità di Einstein potrebbe fornire questo

identiche a quelle dell'elettromagnetismo. La circonferenza determina le intensità relative della forza elettromagnetica e di quella gravitazionale. Così da una teoria puramente gravitazionale in cinque dimensioni otteniamo una teoria che descrive gravità ed elettromagnetismo in quattro dimensioni.

La possibile esistenza di altre dimensioni ha assunto un ruolo chiave anche nell'unificazione della relatività generale e della meccanica quantistica. Nella teoria delle stringhe, che è uno dei modi principali di affrontare questa unificazione, le particelle sono oggetti monodimensionali, piccoli anelli o filamenti in vibrazione. La grandezza tipica di una stringa è prossima alla lunghezza di Planck, ossia 10^{-33} centimetri (meno di un milionesimo di milionesimo della grandezza di un nucleo atomico). Di conseguenza, una stringa appare come un punto a qualunque ingrandimento inferiore alla scala di Planck.

Perché le equazioni della teoria siano matematicamente coerenti, una stringa deve vibrare in 10 dimensioni spazio-temporali, il che significa che esistono ben sei dimensioni extra, troppo piccole per essere rivelate con gli strumenti finora disponibili. Insieme alle stringhe, nello spazio-tempo possono essere immersi foglietti chiamati «brane» (abbreviazione di «membrane») di varie dimensioni. Nell'ipotesi originale di Kaluza-Klein, le funzioni d'onda quantistiche delle particelle ordinarie riempivano la dimensione in più: in realtà, le stesse particelle erano «spalmate» per tutta la dimensione extra. Le stringhe, viceversa, possono essere confinate in modo da giacere su una brana. La teoria delle stringhe contiene inoltre dei flussi, ossia forze che possono essere rappresentate da linee di campo, esattamente come si rappresentano le forze nell'elettromagnetismo classico (non quantistico).

grandezza dello spazio nascosto crescerà senza limiti (perciò esso cesserà di essere nascosto). In caso contrario, la palla andrà a fermarsi sul fondo di una delle tre valli: la grandezza dello spazio nascosto si modifica per minimizzare l'energia. Questi tre minimi locali differiscono nel fatto che l'energia del vuoto risultante abbia un valore positivo, negativo o nullo. Nel nostro universo la grandezza delle dimensioni nascoste non sta variando nel tempo: se lo facesse, vedremmo cambiare le costanti di natura. Quindi dobbiamo trovarci in un minimo: in particolare, sembra che si tratti di un minimo in cui l'energia del vuoto ha un valore leggermente positivo.

Dato che esiste più di un parametro, in realtà dovremmo immaginare questa curva dell'energia del vuoto come una sezione attraverso una complessa catena montuosa multidimensionale, che Leonard Susskind della Stanford University ha chiamato «paesaggio della teoria delle stringhe» (si veda l'illustrazione al centro a p. 103). I minimi di questo paesaggio multidimensionale – il fondo degli avvallamenti dove una palla può fermarsi – corrispondono alle configurazioni stabili dello spazio-tempo (compresi brane e flussi), denominate vuoti stabili.

In un paesaggio reale sono possibili due sole direzioni indipendenti (nord-sud ed est-ovest); ma il paesaggio della teoria delle stringhe è molto più complesso, ha centinaia di direzioni indipendenti. Le dimensioni di questo paesaggio non devono essere confuse con le vere e proprie dimensioni spaziali del nostro mondo; ciascun asse misura non una po-

Oltre a influire sull'energia del vuoto, ciascuna delle molteplici soluzioni darebbe origine a fenomeni differenti nel mondo macroscopico quadridimensionale, definendo quali tipi di particelle e di forze siano presenti e quali siano le loro masse e le intensità delle loro interazioni. La teoria delle stringhe può darci un insieme di leggi fondamentali, ma le leggi della fisica che osserviamo nel mondo macroscopico dipendono dalla geometria delle dimensioni extra.

Molti scienziati sperano che la fisica prima o poi riesca a spiegare perché l'universo abbia leggi così specifiche. Ma prima che questa speranza possa realizzarsi occorrerà rispondere a molte domande fondamentali sul paesaggio della teoria delle stringhe. Quale vuoto stabile descrive il mondo fisico che percepiamo? Perché la natura ha scelto questa particolare versione di vuoto, e non un'altra? Tutte le altre soluzioni sono state degradate a pure possibilità matematiche, destinate a non realizzarsi mai? Se questo fosse vero, la teoria delle stringhe sarebbe l'opposto della democrazia: benché abbondantemente popolata di mondi possibili, concederebbe il dono dell'esistenza reale a uno solo dei suoi cittadini.

Invece di ridurre il paesaggio a un singolo vuoto privilegiato, nel 2000 abbiamo proposto un quadro molto diverso, basato su due idee principali. La prima è che il mondo non deve necessariamente avere una sola configurazione delle dimensioni più piccole, perché un raro processo quantistico permette a queste ultime di «saltare» da una configurazione a un'altra. La seconda è che la relatività generale di Einstein,

Ciascuna soluzione indurrà fenomeni diversi nel mondo macroscopico, definendo quali tipi di particelle e di forze siano presenti

sizione nello spazio fisico, ma un solo aspetto della geometria, come per esempio la grandezza di un manico o la posizione di una brana.

La mappa del paesaggio della teoria delle stringhe è tutt'altro che completa. Calcolare l'energia dello stato di vuoto è un problema difficile, la cui soluzione di solito dipende dalla ricerca di approssimazioni adeguate. Lo scorso anno sono stati compiuti notevoli progressi in questa direzione grazie al lavoro di Shamit Kachru, Renata Kallosh e Andrei Linde, della Stanford University, e Sandip Trivedi, del Tata Institute of Fundamental Research di Mumbai (in India), che hanno trovato prove convincenti del fatto che il paesaggio presenta effettivamente dei minimi in cui un universo può incastrarsi.

In cerca di stabilità

Non possiamo sapere con certezza quanti vuoti stabili esistono: in altre parole, quanti siano i punti in cui può fermarsi una palla. Ma nulla esclude che il loro numero sia enorme. Alcune ricerche fanno pensare che esistano soluzioni anche con 500 manici (ma non molti di più). Intorno a ciascun manico si può avvolgere un numero diverso di linee di flusso; ma questo numero non può essere troppo grande, altrimenti lo spazio diventerebbe instabile, come la parte destra della curva nell'illustrazione. Se supponiamo che ciascun manico possa avere da 0 a 9 linee di flusso (10 possibili valori), allora vi sarebbero 10^{500} possibili configurazioni. Ma anche se ogni manico potesse avere solo 0 o 1 unità di flusso, vi sarebbero 2^{500} , ovvero circa 10^{150} , possibilità.

che fa parte della teoria delle stringhe, implica che l'universo può accrescersi così rapidamente che configurazioni differenti saranno in grado di esistere fianco a fianco in differenti sottouniversi, ciascuno abbastanza grande da non essere consapevole dell'esistenza degli altri. In questo modo, viene a cadere il mistero del perché il nostro particolare vuoto dovrebbe essere il solo a esistere. Inoltre, la nostra teoria potrebbe risolvere uno dei più grandi enigmi della natura.

Un sentiero nel paesaggio

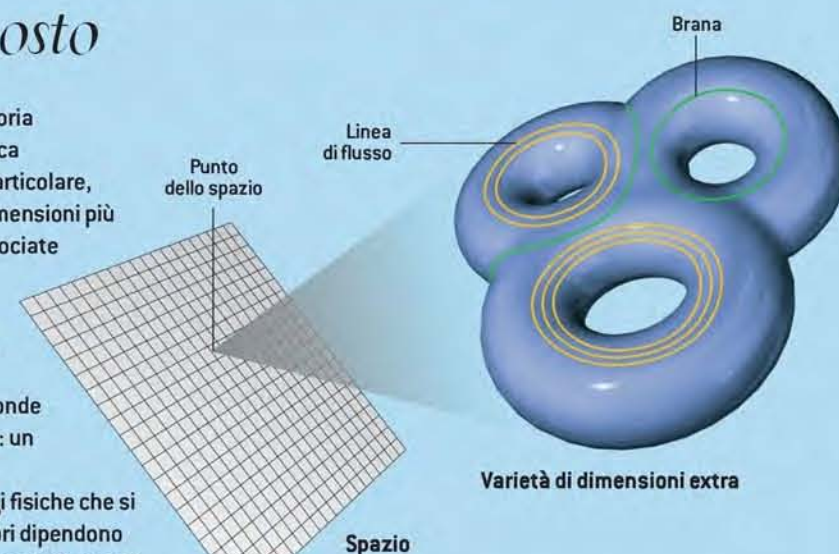
Come abbiamo accennato prima, ciascun vuoto stabile è caratterizzato dal suo numero di manici, brane e quanti di flusso. Ma ora dobbiamo tener conto del fatto che ciascuno di questi elementi può essere creato e distrutto, e che quindi, dopo un periodo di stabilità, il mondo può passare all'improvviso in una configurazione differente. Nel nostro paesaggio, la scomparsa di una linea di flusso o un altro cambiamento topologico corrisponde a un salto quantico al di là di una catena montuosa, fino a una valle sottostante.

Di conseguenza, col passare del tempo, possono venire a esistere numerosi vuoti. Supponiamo che ognuno dei 500 manici del nostro esempio precedente inizi con nove unità di flusso. Una alla volta, le nostre 4500 unità di flusso decadrebbero in una certa sequenza, determinata dalle previsioni probabilistiche della teoria dei quanti, finché tutta l'energia immagazzinata nei flussi non verrà consumata. Partiamo da una valle ad alta quota e saltiamo a caso sopra le catene montuose circostanti, visitando in successione 4500 valli più in basso.

STATO DI VUOTO

Lo spazio nascosto

Ogni soluzione delle equazioni della teoria delle stringhe rappresenta una specifica configurazione di spazio e tempo. In particolare, essa definisce la disposizione delle dimensioni più piccole, nonché delle brane a esse associate (in verde) e delle linee di forza chiamate linee di flusso (in arancione). Poiché il nostro mondo ha sei dimensioni extra, ogni punto del familiare spazio tridimensionale nasconde un minuscolo spazio esadimensionale: un analogo in sei dimensioni del cerchio nell'illustrazione in alto a p. 99. Le leggi fisiche che si osservano nelle tre dimensioni maggiori dipendono dalla grandezza e dalla struttura della varietà: quanti «manici» a forma di ciambella ha, quali sono la lunghezza e la circonferenza di ciascun manico, il numero e la posizione delle brane e il numero di linee di flusso avvolte intorno a ogni ciambella.



Don Foley

GLI AUTORI

RAPHAEL BOUSSO e JOSEPH POLCHINSKI hanno iniziato a collaborare in occasione di un seminario sulla dualità delle stringhe a Santa Barbara, in California, combinando la specializzazione di Bousso in gravità quantistica e cosmologia inflazionaria e quella di Polchinski in teoria delle stringhe. Bousso è professore aggiunto di fisica all'Università della California a Berkeley; tra le sue ricerche vale la pena di ricordare una formulazione generale del principio olografico, che correla la geometria dello spazio-tempo al suo contenuto di informazione. Polchinski è professore al Kavli Institute for Theoretical Physics dell'Università della California a Santa Barbara. Fra i suoi contributi alla teoria delle stringhe vi è la fondamentale proposta che le brane costituiscano un aspetto significativo della teoria.

LA NEBULOSA CASSIOPEA A è il resto di una supernova. Recenti osservazioni di supernove lontane hanno dimostrato che l'espansione dell'universo visibile sta subendo un'accelerazione.



Cortesia NASA

Nel far questo, attraversiamo molti panorami diversi, ma passiamo comunque solo per una minuscola frazione delle 10^{500} soluzioni possibili. Sembrerebbe quindi che la maggior parte dei vuoti sia destinata a non godere mai del proprio quarto d'ora di celebrità.

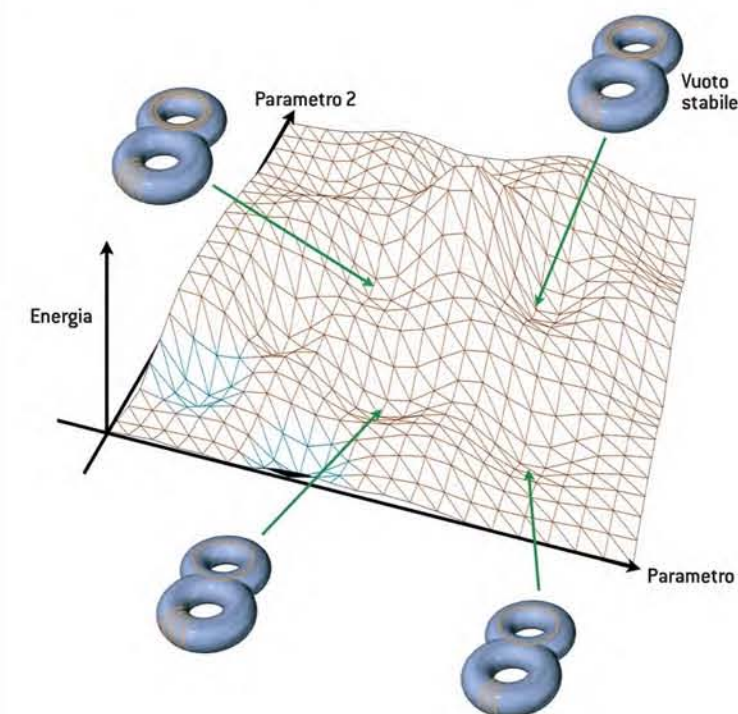
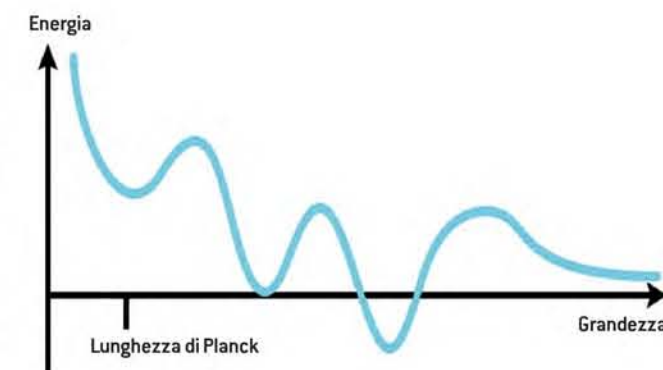
Ma stiamo trascurando un aspetto chiave: l'effetto che l'energia del vuoto esercita sull'evoluzione dell'universo. Gli oggetti ordinari, come stelle e galassie, tendono a rallentare un universo in espansione e possono addirittura indurlo a ricollassare. L'energia del vuoto positiva, però, funziona come l'antigravità: secondo l'equazione di Einstein, fa sì che le tre dimensioni che vediamo crescano sempre più rapidamente. Questa veloce espansione ha un effetto importante e sorprendente quando le dimensioni nascoste passano a una nuova configurazione.

Ricordiamo che in ogni punto del nostro spazio tridimensionale si trova un piccolo spazio esadimensionale, che abita in qualche punto del paesaggio. Quando questo piccolo spazio passa in una nuova configurazione, il balzo non avviene ovunque nello stesso istante. Il fenomeno accade in un punto dell'universo tridimensionale, e poi una bolla della nuova configurazione di bassa energia si espande rapidamente (si veda il box a p. 104). Se le tre dimensioni più grandi non fossero in espansione, la bolla in crescita finirebbe per raggiungere ogni punto dell'universo. Ma anche la vecchia regione si sta espandendo, e questa espansione può benissimo essere più veloce di quella della nuova bolla. Non ci sono sconfitti: sia la vecchia sia la nuova regione aumentano la propria grandezza, e la nuova non cancella mai completamente la vecchia.

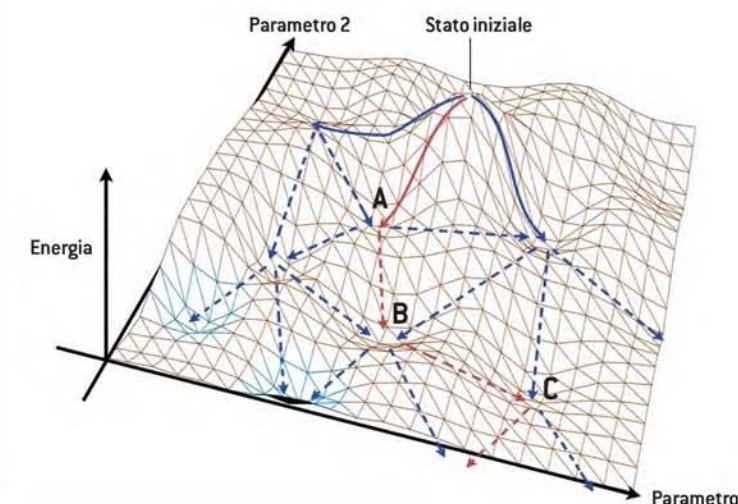
A rendere possibile questo risultato è la geometria dinamica di Einstein. La relatività generale non deve far quadrare i conti: l'allungamento della struttura dello spazio consente di creare nuovo volume sia per il vecchio vuoto sia per quello nuovo. Il trucco continua a funzionare anche quando il nuovo vuoto invecchia: quando esso comincia a decadere, non scompare completamente, ma fa «germogliare» una nuova bolla, occupata da un vuoto di energia ancora inferiore.

La topografia dell'energia

Un paesaggio si manifesta quando l'energia di ciascuna possibile soluzione delle stringhe è riportata in grafico in funzione dei parametri che definiscono la varietà esadimensionale a essa associata. Facendo variare solo un parametro – per esempio la grandezza complessiva di quella varietà – il paesaggio forma un grafico lineare. Qui tre particolari valori di grandezza (tutti vicini alla scala di Planck) hanno energie che cadono nei ventri, o minimi, della curva. La varietà tenderà a regolare la propria grandezza in modo da collocarsi in uno dei minimi, come una palla che rotola su un pendio (nell'esempio potrebbe anche rotolare verso l'infinito, all'estremità destra).



Il vero paesaggio della teoria delle stringhe rispecchia tutti i parametri, e quindi forma una topografia con un numero enorme di dimensioni. Rappresentiamo questo fatto con un paesaggio che mostra la variazione dell'energia contenuta nello spazio vuoto quando solo due proprietà si modificano. La varietà di dimensioni aggiuntive tende a portarsi sul fondo di una valle, che è una soluzione stabile o vuoto stabile: ciò significa che una varietà che si trova in una valle tende a rimanere in quello stato per lungo tempo. Le regioni in blu hanno energia inferiore a zero.



Gli effetti quantistici, tuttavia, permettono a una varietà di cambiare bruscamente stato: di attraversare con una galleria la catena interposta raggiungendo una valle vicina a livello più basso. Le frecce in rosso mostrano come potrebbe evolvere una regione dell'universo: partendo dalla vetta di un'alta montagna, rotola giù in una valle vicina (vuoto A); poi, attraverso una galleria, passa in un'altra valle più bassa (vuoto B) e così via. Regioni differenti dell'universo seguiranno casualmente cammini diversi. È come se vi fosse un numero infinito di esploratori che percorrono il paesaggio, passando attraverso tutte le possibili valli (frecce in blu).

Poiché la configurazione iniziale continua a crescere, prima o poi decadrà di nuovo in un'altra posizione, verso un altro minimo vicino nel paesaggio. Questo processo continuerà un numero infinito di volte, e i decadimenti avverranno in tutti i modi possibili, con regioni separate da grandi distanze che perdono flussi da manici differenti. In questo modo, ogni bolla ospiterà molte nuove soluzioni. Anziché una singola sequenza di decadimento di flussi, l'universo sperimenta quindi tutte le sequenze possibili, generando una gerarchia di bolle, o sottouniversi, che sono contenute l'una dentro l'altra. Questo risultato è molto simile allo scenario dell'inflazione perpetua proposto da Alan Guth del Massachusetts Institute of Technology, da Alexander Vilenkin della Tufts University e da Andrei Linde.

Il nostro scenario si può visualizzare immaginando un numero infinito di esploratori che si mettono in marcia su tutti i possibili sentieri attraverso ogni minimo del paesaggio. Ciascun esploratore rappresenta una posizione nell'universo, molto distanziata da tutte le altre. Il percorso seguito da quell'esploratore è la sequenza di vuoti sperimentata dalla sua posizione nell'universo. Se il punto di partenza nel paesaggio degli esploratori è veramente ad alta quota, nella zona dei ghiacciai, verranno visitati quasi tutti i minimi; anzi, ciascuno di essi sarà raggiunto un numero infinito di volte da ogni possibile sentiero in discesa proveniente dai minimi a quota più alta. Questa successione si ferma solo quando scende al di sotto del livello del mare, nella zona di energia negativa. La geometria caratteristica associata all'energia negativa del

lato all'energia del vuoto. Per Einstein, quella che oggi chiamiamo energia del vuoto era un termine matematico arbitrario – una «costante cosmologica» – che poteva essere aggiunto all'equazione della relatività generale per renderla coerente con la convinzione dello scienziato che l'universo fosse statico (si veda l'articolo *Rompicapo cosmico* di Lawrence M. Krauss e Michael S. Turner a p. 88). Per ottenere un universo statico, Einstein propose che questa costante avesse un valore positivo, ma abbandonò l'idea quando le osservazioni dimostrarono che l'universo è in espansione.

Con l'avvento della teoria quantistica dei campi, lo spazio privo di materia – il vuoto – divenne un luogo affollato, pieno di particelle e di campi virtuali che compaiono e scompaiono. Ciascuna particella e ciascun campo trasportano energia positiva o negativa. Secondo i calcoli più semplici basati su questa teoria, le energie dovrebbero sommarsi fino a un valore di densità enorme, pari a circa 10^{94} grammi per centimetro cubo, ovvero una massa di Planck per una lunghezza di Planck al cubo. Indichiamo questo valore con Λ_P . Questo risultato è stato definito come la più famosa previsione errata della fisica, perché gli esperimenti hanno ormai dimostrato da tempo che l'energia del vuoto certamente non è maggiore di $10^{-120} \Lambda_P$. La fisica teorica è piombata così in una crisi profonda.

Comprendere da dove nasca questa enorme discrepanza è uno degli obiettivi principali dei fisici teorici da oltre 30 anni, ma nessuna delle numerose proposte di soluzione ha ottenuto ampio consenso. Spesso si è ipotizzato che l'energia del vuoto

Il paesaggio della teoria delle stringhe è come una catena montuosa multidimensionale, con centinaia di direzioni indipendenti

vuoto non permette il proseguimento del gioco di espansione perpetua e di formazione di bolle. Al contrario, si verifica un *big crunch* localizzato, più o meno come accade all'interno di un buco nero.

Dentro ogni bolla, un osservatore che conduca esperimenti a bassa energia (come facciamo noi) vedrà uno specifico universo quadridimensionale con le sue leggi fisiche caratteristiche. L'informazione proveniente dall'esterno della nostra bolla non può raggiungerci, poiché lo spazio interposto si sta espandendo troppo rapidamente perché la luce riesca a valicarlo. Noi vediamo un solo insieme di leggi fisiche, quelle corrispondenti al nostro vuoto locale, perché non riusciamo a spingere lo sguardo molto lontano.

In questo scenario, quello che per noi è il big bang che ha dato inizio al nostro universo non è stato altro che il balzo più recente a una nuova configurazione delle stringhe in questa posizione, configurazione che ormai si è estesa su molti miliardi di anni luce. Un giorno (probabilmente troppo remoto per preoccuparsene) questa parte del mondo potrebbe andare incontro a un'altra transizione analoga.

La crisi dell'energia del vuoto

Il quadro che abbiamo descritto spiega in che modo tutti i diversi vuoti stabili del paesaggio delle stringhe vengano a esistere in varie posizioni dell'universo, generando così innumerevoli sottouniversi. Questo risultato potrebbe risolvere uno dei più importanti e annosi problemi della fisica teorica, corre-

spondendo esattamente a un'ipotesi ragionevole per un numero che si sa avere almeno 120 zeri dopo la virgola. Perciò, in apparenza, si trattava di spiegare in che modo avesse origine questo valore nullo. Molti tentativi si sono basati sull'idea che l'energia del vuoto sia in grado di annullarsi da sola, ma nessuno ha spiegato in maniera convincente come ciò possa avvenire, né perché il risultato finale debba essere un numero così vicino allo zero.

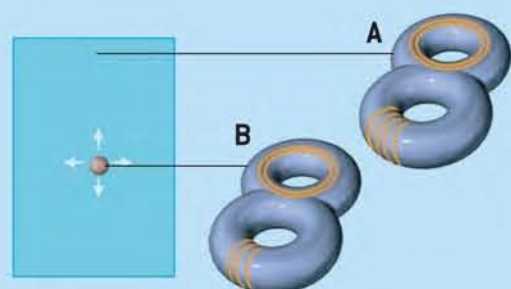
Nel nostro lavoro del 2000, abbiamo combinato la ricchezza di soluzioni della teoria delle stringhe e la loro dinamica cosmologica con un'intuizione, risalente al 1987, di Steven Weinberg dell'Università del Texas ad Austin, per arrivare a un come e a un perché.

Consideriamo dapprima la ricchezza di soluzioni. L'energia del vuoto non è altro che l'elevazione verticale di un punto del paesaggio. Questa elevazione varia da circa $+\Lambda_P$ in corrispondenza delle vette coperte da ghiacci fino a $-\Lambda_P$ sul fondo dell'oceano. Se supponiamo che vi siano 10^{500} minimi, le loro elevazioni avranno valori casuali intermedi fra questi due estremi. Riportiamo tutte queste elevazioni sull'asse delle ordinate: la separazione media fra esse sarà pari a $10^{-500} \Lambda_P$. Molte, per quanto siano una frazione minuscola del totale, avranno perciò valori compresi fra 0 e $10^{-120} \Lambda_P$. Questo risultato spiega in che modo abbiano origine valori così piccoli.

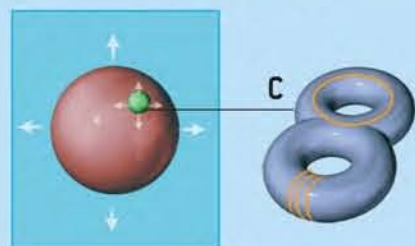
Nella sua forma generale, questa idea non è nuova. Già nel 1984 Andrei Sakharov aveva proposto che le complesse geometrie delle dimensioni nascoste possano produrre uno

Bolle di realtà

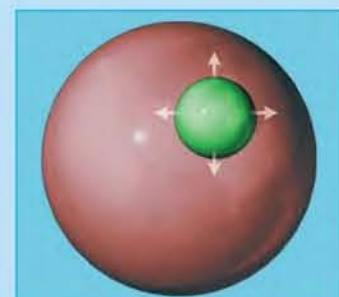
La possibilità del decadimento da un vuoto stabile a un altro ispira una visione radicalmente nuova del nostro universo alle scale più grandi.



Il passaggio da un vuoto stabile a un altro non avviene simultaneamente in ogni luogo dell'universo, ma si verifica in posizione casuale generando una bolla di spazio in espansione (freccie) che possiede il nuovo vuoto. Nell'esempio, la regione blu di spazio ha il vuoto A, la cui varietà di piccole dimensioni aggiuntive consiste in una ciambella a due manici con gruppi di due e quattro linee di flusso avvolte intorno ai manici. La regione rossa, con il vuoto B, emerge quando una delle quattro linee di flusso decade. In corrispondenza delle differenti varietà, le due regioni avranno tipi diversi di particelle e di forze, e quindi anche di leggi fisiche.



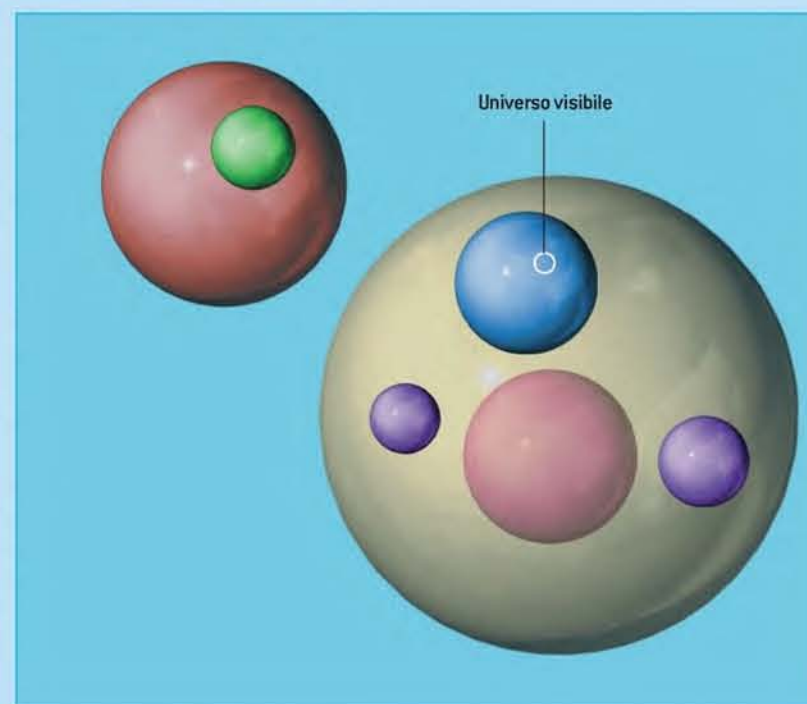
La regione rossa cresce con grande rapidità, potenzialmente fino a raggiungere un diametro di miliardi di anni luce. Prima o poi nel suo interno avviene un'altra transizione: il decadimento di una delle due linee di flusso. Il decadimento genera la regione verde, che ha il vuoto C e un insieme ancora diverso di particelle e forze.



Anche la regione verde cresce rapidamente, ma non abbastanza da raggiungere la regione rossa. Così pure, la regione rossa non rimpiazza mai il vuoto blu iniziale.

Poiché il passaggio quantistico da un vuoto a un altro è un processo casuale, posizioni ampiamente distanziate nell'universo decadranno attraverso sequenze differenti di vuoti. In questo modo viene esplorato l'intero paesaggio; ciascun vuoto stabile si manifesta in molti punti differenti dell'universo.

L'intero universo è perciò una schiuma di bolle in espansione all'interno di altre bolle, ognuna dotata delle proprie leggi fisiche. Pochissime bolle sono adatte alla formazione di strutture complesse come le galassie e la vita. Il nostro intero universo visibile (che ha un diametro di oltre 20 miliardi di anni luce) è una regione relativamente piccola situata nell'interno di una di queste bolle.



Don Foley

spettro dell'energia del vuoto che comprenda valori nella finestra sperimentale. Altri autori hanno avanzato proposte alternative che non sembrano tuttavia trovare spazio nella teoria delle stringhe.

Una bolla più ospitale delle altre

Abbiamo spiegato come la cosmologia popoli gran parte dei minimi, dando origine a un universo complicato che contiene bolle dotate di ogni valore immaginabile di energia del vuoto. In quale di queste bolle ci troviamo? Perché la nostra energia del vuoto deve essere così vicina allo zero? È qui che entra in gioco l'intuizione di Weinberg. Certamente vi è un elemento di imponderabilità, ma molti luoghi sono così inospitali che non ci meravigliamo di non abitarvi. Su piccola scala, questa logica è familiare: non siete nati in Antartide, sul fondo della Fossa delle Marianne o nelle lande prive di atmosfera della Luna. Vi trovate invece in quella minuscola frazione del sistema solare che è adatta alla vita. Così pure, solo una piccola frazione dei vuoti stabili può ospitare la vita. Le regioni dell'universo con valori molto grandi di energia del vuoto sono soggette a espansioni così violente che al confronto un'esplosione di supernova sembra poca cosa. Le regioni con valori molto grandi di energia negativa scompaiono rapidamente in un collasso cosmico. Se l'energia del vuoto della nostra bolla fosse stata superiore a $+10^{-118} \Lambda_P$ o inferiore a $-10^{-120} \Lambda_P$, non avremmo potuto viverci, esattamente come non ci troviamo ad arrostiti su Venere o a farci schiacciare dalla gravità di Giove. Questo tipo di ragionamento è chiamato antropico.

affermazione. Le leggi soggiacenti alla teoria delle stringhe, benché non ancora totalmente note, sembrano essere fisse e inevitabili: la matematica non lascia scelta. Ma le leggi che osserviamo direttamente non sono quelle soggiacenti; dipendono invece dalla forma delle dimensioni nascoste, e per questo aspetto le scelte sono molteplici. I dettagli di ciò che vediamo in natura non sono inevitabili, ma sono una conseguenza della specifica bolla nella quale ci troviamo.

Vedremo le stringhe?

Il quadro concettuale del paesaggio delle stringhe consente altre previsioni, oltre a quella del valore piccolo ma non nullo dell'energia del vuoto? Per rispondere a questa domanda occorrerà capire in maniera molto più approfondita lo spettro dei vuoti: è questo l'obiettivo di intense ricerche condotte su vari fronti. In particolare, non abbiamo ancora localizzato uno specifico vuoto stabile che riproduca le leggi note della fisica nel nostro spazio-tempo quadridimensionale. Il paesaggio delle stringhe è in gran parte territorio inesplorato, anche se gli esperimenti potrebbero esserci di aiuto. Grazie agli acceleratori, forse un giorno potremmo osservare direttamente le leggi fisiche di ulteriori dimensioni attraverso le stringhe, i buchi neri o le particelle di Kaluza-Klein. O forse potremmo addirittura effettuare osservazioni astronomiche dirette di stringhe di grandezza cosmica, che potrebbero essere state generate nel big bang e aver partecipato all'espansione di tutto l'universo.

L'ipotesi che abbiamo presentato è ben lontana dall'essere certa. Ancora non conosciamo la precisa formulazione della

Un osservatore vedrà dentro ogni bolla un universo a quattro dimensioni con le sue caratteristiche leggi fisiche

Vi è una moltitudine di minimi nel «posto giusto», appena al di sopra o al di sotto del pelo dell'acqua. Noi viviamo dove è possibile farlo, sicché non dobbiamo sorprenderci se l'energia del vuoto della nostra bolla è molto piccola. Ma non dobbiamo nemmeno concludere che sia esattamente nulla! Vi sono circa 10^{380} vuoti nella regione privilegiata, ma non più di una frazione minuscola di essi avrà valore esattamente nullo. Se i vuoti sono distribuiti in maniera totalmente casuale, il 90 per cento di essi si troverà nell'intervallo fra 0,1 e $1,0 \times 10^{-118} \Lambda_P$. Perciò, se l'ipotesi del paesaggio è corretta, si dovrebbe osservare un'energia del vuoto non nulla, e con tutta probabilità non molto inferiore a $10^{-118} \Lambda_P$.

Recenti osservazioni di supernove lontane hanno dato luogo a uno dei più stupefacenti colpi di scena nella storia della fisica sperimentale, dimostrando che l'espansione dell'universo visibile sta subendo un'accelerazione: è un indizio inequivocabile di un'energia del vuoto con valore positivo. Dall'accelerazione misurata, si è calcolato che il valore dell'energia debba essere di circa $10^{-120} \Lambda_P$, ossia abbastanza piccolo per essere sfuggito all'individuazione in altri esperimenti e abbastanza grande per rendere plausibile la spiegazione antropica.

L'ipotesi del paesaggio sembra risolvere la crisi dell'energia del vuoto, ma alcune delle sue conseguenze sono inquietanti. Einstein si chiese se Dio avesse una possibilità di scelta nella costituzione dell'universo, oppure se le leggi di quest'ultimo fossero completamente fissate da qualche principio fondamentale. Come fisici, possiamo sperare che sia vera la seconda

teoria delle stringhe: al contrario della relatività generale, dove abbiamo un'equazione definita che si basa su un principio fisico soggiacente ben noto, le equazioni esatte della teoria delle stringhe non sono chiare, e probabilmente restano da scoprire concetti fisici importanti. Tali scoperte potrebbero alterare radicalmente, o eliminare, il paesaggio di vuoti oppure le cascate di bolle che lo popolano. Dal punto di vista sperimentale, l'esistenza di un'energia del vuoto non nulla sembra ormai una conclusione quasi inevitabile, ma i dati cosmologici sono notoriamente capricciosi, e le sorprese sempre possibili.

È davvero troppo presto per smettere di cercare spiegazioni alternative dell'esistenza dell'energia del vuoto e del suo valore molto piccolo. Ma sarebbe ugualmente sciocco respingere la possibilità che ci troviamo a esistere in uno dei luoghi più miti di un universo assai più vario di tutti i paesaggi del pianeta Terra.

PER APPROFONDIRE

GREENE BRIAN, *L'universo elegante*, Einaudi, 2003.
ZWIEBACH BARTON, *A First Course in String Theory*, Cambridge University Press, 2004.
BANKS THOMAS, *The Cosmological Constant Problem*, in «Physics Today», Vol. 57, n. 3, pp. 46-51, marzo 2004.
Il sito ufficiale della teoria delle stringhe è:
www.superstringtheory.com/