

Oltre la quarta dimensione

Gravità quantistica, superstringhe ed extra dimensioni per raccontare l'universo dell'infinitamente piccolo.

di Leonardo Castellani

La forza di gravità è di gran lunga la più debole delle quattro interazioni fondamentali: a distanze atomiche o molecolari risulta quindi del tutto trascurabile rispetto alle forze nucleari ed elettromagnetiche. Tuttavia, a distanze macroscopiche la gravità diventa la forza dominante, determinando il nostro peso, la forma e la struttura del sistema solare, delle galassie e, più in grande ancora, del nostro Universo.

Su dimensioni che vanno dalla scala cosmica al decimo di millimetro, tutti i fenomeni gravitazionali noti sono magnificamente descritti dalla teoria della relatività generale di Einstein, che si riduce alla teoria classica di Newton (le leggi della meccanica a cui facciamo normalmente riferimento) per velocità molto minori di quella della luce e campi gravitazionali deboli. La stessa teoria, però, non ci dice che cosa succede a scale estremamente piccole o, il che è equivalente, a energie estremamente alte: per questo è necessario costruire una teoria quantistica del campo gravitazionale. Lo stesso percorso ha guidato la quantizzazione delle altre interazioni fondamentali (elettromagnetica, debole e forte) fino alla costruzione del cosiddetto Modello Standard delle particelle elementari, che descrive con successo tutti i “mattoni

fondamentali” della materia e i mediatori dell'interazione nucleare forte ed elettrodebole.

Ma perché ci interessa la gravità su scala ultramicroscopica? La risposta è proprio nella teoria della relatività generale, che prevede situazioni in cui l'Universo stesso è racchiuso in dimensioni microscopiche con un'elevatissima densità di energia. Una condizione simile, ad esempio, è quella del nostro Universo subito dopo il Big Bang, circa 13,5 miliardi di anni fa, e gli effetti di gravità quantistica sono essenziali per spiegarne l'evoluzione. In tutte le teorie quantistiche, i processi che descrivono le interazioni tra particelle sono di tipo probabilistico e le probabilità, per avere significato fisico, devono assumere valori finiti, al massimo pari a uno (la teoria, cioè, deve essere *normalizzata*). Tuttavia, il carattere puntiforme delle interazioni tra particelle elementari porta a delle divergenze, ossia probabilità di valore infinito, che per il Modello Standard è possibile eliminare con la cosiddetta procedura di *rinormalizzazione*. Nel caso della teoria quantistica del campo gravitazionale, però, le divergenze sono ineliminabili. Come già proposto da Gabriele Veneziano, fisico italiano al Cern di Ginevra, buona parte dei fisici teorici ritiene che il

problema delle divergenze possa superarsi con la teoria delle stringhe: oggetti unidimensionali, come laccetti chiusi o aperti, di estensione molto piccola, le cui interazioni non sono puntiformi e non provocano quindi la comparsa di infiniti. Le stringhe possono vibrare (fig. b a p. 42) come le corde di un violino e a ogni “nota” vibrata corrisponde una particella elementare: un singolo modo vibrazionale di un unico oggetto fondamentale, la stringa. Il passaggio da particella puntiforme a stringa implica quindi l'*unificazione di tutte le particelle elementari*. Tra i diversi modi di vibrazione compare anche il gravitone, il quanto del campo gravitazionale, che risulta così compreso in una teoria quantistica che unifica la gravitazione alle altre forze fondamentali.

Avendo un'estensione estremamente ridotta (dell'ordine della lunghezza di Planck, pari a 10^{-36} m), le stringhe appaiono come particelle puntiformi anche ai nostri microscopi più potenti, cioè i grandi acceleratori capaci di sondare distanze fino a un milionesimo di milionesimo di metro. Che cosa prevede la teoria delle stringhe a questa scala? Le stringhe, che appaiono puntiformi, riescono a riprodurre correttamente l'insieme di particelle e di interazioni del Modello Standard?

Su questo problema stanno lavorando molti gruppi di ricerca, e i risultati ottenuti, seppure incoraggianti, non permettono ancora una risposta definitiva.

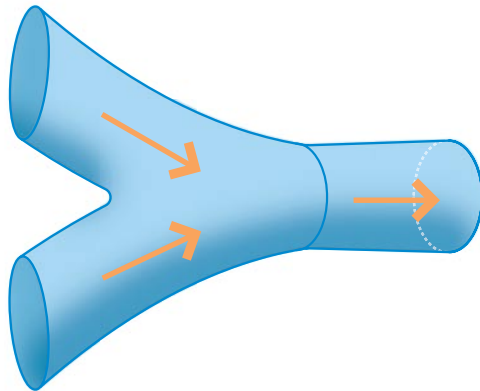
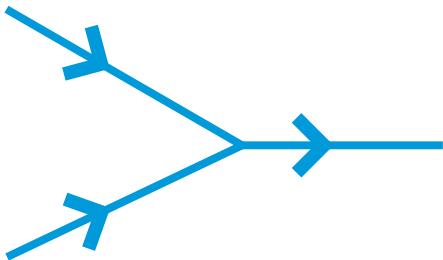
A bassissime energie, nel *limite classico* in cui spariscono gli effetti quantistici, la teoria delle stringhe contiene effettivamente il campo elettromagnetico (con le sue generalizzazioni, previste dal Modello Standard) e il campo gravitazionale della relatività generale. In questo limite, la teoria ha ispirato la costruzione di nuovi e interessanti modelli cosmologici. In quanto teoria quantistica, essa soffre del fatto (comune anche al Modello Standard) che le sue predizioni possono essere calcolate solo in modo approssimato, tramite la cosiddetta *teoria delle perturbazioni*. Pur con queste difficoltà, tuttavia, la teoria delle stringhe ha potuto dare una prima spiegazione microscopica della termodinamica dei buchi neri. Essa, inoltre, prevede fenomeni nuovi, i cui effetti potrebbero essere rilevati con il nuovo acceleratore di particelle Lhc (*Large*

Hadron Collider) che entrerà in funzione al Cern di Ginevra nel 2008. Le previsioni della teoria delle stringhe includono:

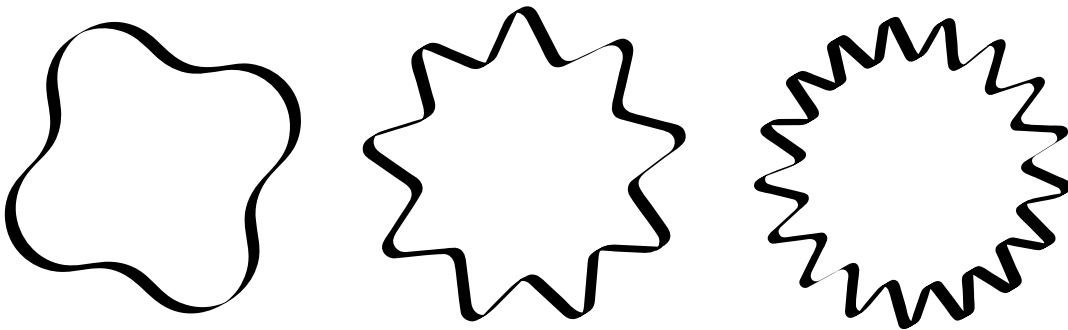
1. Una nuova simmetria della natura, chiamata *supersimmetria*. Essa agisce tra *bosoni* (ad esempio i fotoni e i gluoni, mediatori rispettivamente dell'interazione elettromagnetica e forte) e *fermioni* (come quark e leptoni, i mattoni fondamentali di tutta la materia) scambiando gli uni con gli altri: se la simmetria fosse esatta, per ogni bosone dovrebbe esistere un fermione di uguale massa. Tuttavia, questo non si verifica per le particelle elementari descritte dal Modello Standard e osservate negli esperimenti, il che implica una rottura della supersimmetria, come succede già per altre simmetrie del Modello Standard. Il meccanismo di questa rottura rappresenta una delle principali difficoltà nel confronto con i dati sperimentali. Pur non verificata sperimentalmente, la supersimmetria è un ingrediente matematico

a.
A sinistra: interazione puntiforme di tre particelle.
A destra: la zona d'interazione di tre stringhe è estesa e non puntiforme.

b.
Modi di vibrazione di stringhe chiuse.

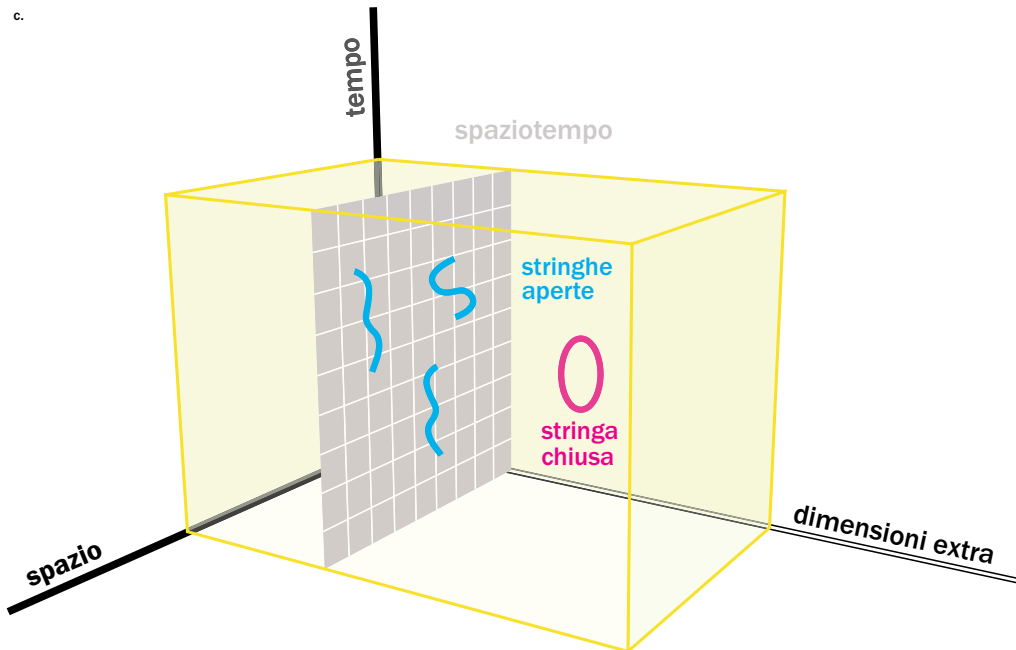


a.



b.

c.



necessario nella teoria delle stringhe (da qui il termine “superstringhe”): essa prevede l’esistenza di nuove particelle, *compagne supersimmetriche* di quelle descritte nel Modello Standard, che potremo forse rivelare alle energie accessibili a Lhc. A basse energie le superstringhe riproducono la *supergravità*, che generalizza la gravità di Einstein con l’aggiunta del *gravitino*, il fermione partner supersimmetrico del gravitone.

2. Dimensioni “nascoste” dello spaziotempo. Per essere matematicamente *consistente*, la teoria quantistica delle superstringhe deve avere 6 dimensioni spaziali “extra” oltre alle 4 dello spaziotempo usuale. Queste dimensioni extra sono compatte, cioè arrotolate su se stesse: per esempio possono descrivere dei piccolissimi cerchi o sfere, ma anche infiniti altri spazi compatti, osservabili solo a energie molto elevate o a distanze infinitesime.

A tutte queste “compattificazioni” corrispondono particolari proprietà per le particelle a basse energie, ed è possibile trovare particolari spazi 6-dimensionali a cui corrispondono proprietà molto simili a quelle del Modello Standard. È però ancora del tutto ignoto il meccanismo con il quale la teoria “sceglie” un particolare spazio 6-dimensionale.

3. Modifiche alla legge di Newton. La teoria delle stringhe include anche altri oggetti estesi multidimensionali, le cosiddette p-brane (membrane p-dimensionali), e recentemente è stata avanzata l’ipotesi che lo spaziotempo usuale sia proprio una 4-brana fluttuante in uno spazio a 10 dimensioni, nel quale le 6 dimensioni extra siano “permeabili” solo alla forza gravitazionale. In questo caso, si prevedono deviazioni dalla legge di Newton su scala submillimetrica, che sono attualmente sotto investigazione da parte di numerosi gruppi sperimentali.

c.

Spaziotempo, stringhe aperte e stringhe chiuse. Solo i gravitoni (stringhe chiuse) possono propagarsi nelle dimensioni extra.

Biografia

Leonardo Castellani è professore di fisica teorica presso l’Università di Torino e presso la facoltà di scienze dell’Università del Piemonte Orientale, di cui è preside dal 2004. Ha conseguito il Ph.D. in fisica teorica presso l’Institute for Theoretical Physics dell’Università di Stony Brook (New York) e ha lavorato al Lauritsen Lab del Caltech e al Cern di Ginevra.

Link sul web

<http://scienzapertutti.inf.infn.it/string/percorso/isola.swf>

<http://superstringtheory.com/>