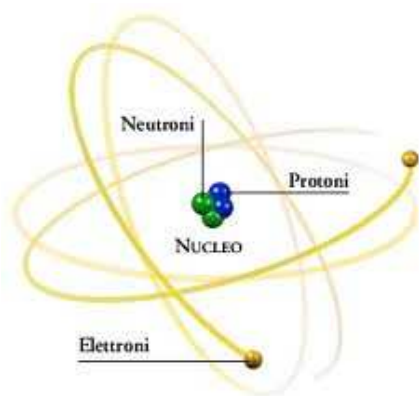


Superstringhe e brane

Oggi giorno gli scienziati si servono di due teorie per descrivere l'universo.

La prima è la teoria generale della relatività, formulata da Albert Einstein, che descrive la forza di gravità, occupandosi dei campi gravitazionali deboli da noi sperimentati abitualmente, e la struttura dell'universo su grandi scale (come stelle e galassie).



La seconda è la meccanica quantistica, fondata da Max Planck, che si occupa del mondo atomico e subatomico (molecole, atomi, elettroni, quark), gli effetti della quale sono considerevoli in campi di grande intensità come quelli delle singolarità, ossia eventi di volume zero e perciò densità e curvatura dello spazio tempo infinite, come Big Bang e i buchi neri. Tuttavia gli scienziati ambiscono a una teoria che le includa entrambe: una teoria quantistica della gravità, che consenta una descrizione unitaria dei fenomeni naturali.

Einstein spese la maggior parte degli anni della maturità nella ricerca di una teoria nota come "l'unificazione della fisica", ma i tempi non erano ancora maturi: esistevano teorie parziali per la gravità e la forza elettromagnetica e si sapeva ben poco sulle forze nucleari. Infatti si conoscevano soltanto tre particelle elementari: l'elettrone, il protone e il fotone.

La difficoltà principale per trovare una teoria che unifichi la gravità con le altre forze, quali la forza nucleare debole, responsabile della radioattività, la forza nucleare forte, che lega tra loro le particelle dell'atomo (protoni e neutroni) e la forza elettromagnetica, che interagisce con particelle di carica elettrica, è che la relatività generale è una teoria "classica". Infatti essa non include il principio di indeterminazione di Heisenberg su cui si fonda meccanica quantistica, che sembra essere un ingrediente fondamentale dell'universo in cui viviamo. Questo principio enuncia l'impossibilità di conoscere con certezza la posizione e la velocità di una particella e introduce un elemento ineliminabile di imprevedibilità della scienza.

Un primo passo necessario per superare l'incompatibilità delle due teorie è perciò quello di combinare la relatività generale con il principio di indeterminazione. Infatti in passato i fisici ricorrevano a l'una o all'altra teoria a secondo della necessità, ma la scoperta delle singolarità ha reso indispensabile far ricorso ad entrambe le teorie simultaneamente.

Al giorno d'oggi esiste una teoria detta delle superstringhe, capace di conciliare la meccanica quantistica e la teoria della relatività.

La teoria delle stringhe

La gran parte dei fisici teorici non è disposta a rinunciare a una visione unitaria e coerente dell'universo. In tale direzione sono state molte le svolte decisive realizzate a partire dal 1968.

La prima ad opera di un fisico teorico torinese, Gabriele Veneziano, il quale scoprì che la funzione beta di Eulero, si accordava con precisione ai risultati degli esperimenti sull'interazioni nucleari forti condotti negli acceleratori di particelle.

Funzione Beta di Eulero

$$\beta(x, y) = \int_0^1 t^{x-1}(1-t)^{y-1} dt$$

L'intuizione di Veneziano venne in seguito ampliata e si scoprì che se le particelle elementari venivano assimilate a fili vibranti invece che ad enti puntiformi, come suggeriva il cosiddetto modello standard, la funzione beta avrebbe descritto con altrettanta coerenza le interazioni fra particelle.

Secondo la teoria delle stringhe odierna vivremo in un universo dove realtà e fantascienza si incontrano, un universo a 10 dimensioni, con mondi paralleli posti uno accanto all'altro.

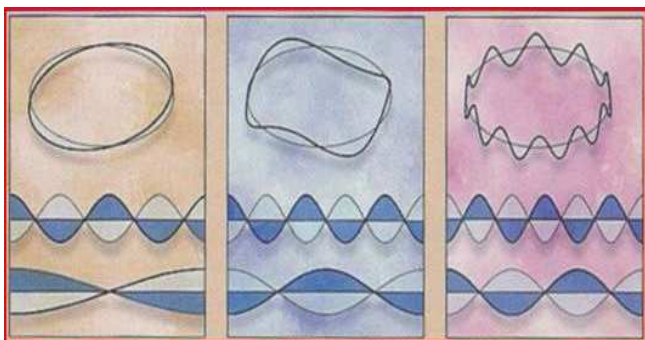
Per quanto possa sembrare ambiziosa, l'idea di base della teoria delle stringhe è sorprendentemente semplice, infatti ogni cosa, dalla particella più piccola alla galassia più grande, è composta unicamente da oggetti basilari che non sono più particelle puntiformi, ma anelli incredibilmente piccoli chiamati stringhe, che hanno una lunghezza ma nessun'altra dimensione, come un filo infinitamente sottile e quindi monodimensionale.

Esse possono avere delle estremità, le cosiddette corde aperte, oppure possono essere congiunte con se stesse in capi o anelli chiusi, formando quindi le corde chiuse.

STRINGHE APERTE



STRINGHE CHIUSE

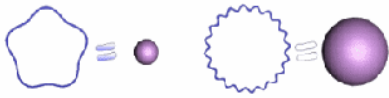


La prima teoria delle stringhe, quella **bosonica** è formulata in termini di azione di Polyakov, una quantità matematica che può essere usata per prevedere come le corde si muovono nello spazio-tempo. Applicando le idee della meccanica quantistica all'azione di Polyakov si deduce che le stringhe hanno modi di vibrazione, o risonanza, differenti, che

variano a seconda del tipo di stringa trattata e che generano tutte le particelle elementari che costituiscono il nostro universo. Nel caso di stringhe aperte le oscillazioni vanno da un capo all'altro e si invertono, invece nel caso di stringhe chiuse l'oscillazione su e giù continua in circolo sempre nella stessa direzione.

La scala dei modi in cui ogni stringa vibra e ad ognuno dei quali corrisponde una particella, è denominata spettro energetico della teoria.

La modalità di vibrazione determina la massa, le cariche associate a forze e spin, che vengono interpretate come particelle fondamentali. Ci saranno, quindi, molte particelle imparentate come carica e spin, ma con massa diversa. In particolare variando la frequenza delle oscillazioni si può passare dalle particelle leggere a quelle pesanti.



Infatti massa ed energia sono legate tra loro dalla nota equazione di Einstein: $E= mc^2$. Pertanto una stringa più energetica, cioè che vibra più freneticamente sarà rilevata in relazione ad una massa maggiore.

Si tratta di strutture le cui dimensioni sono vicine alla cosiddetta lunghezza di Planck, pari a 10^{-33} , la più piccola concepibile in fisica, ma che vengono tese con una forza pari a 10^{39} tonnellate, tensione, chiamata di Planck, che determina la frequenza di vibrazione. Maggiore è tale tensione, più grande risulterà la massa, e di conseguenza maggiore sarà la forza di gravità che viene esercitata dalla particella sulle altre.

Questo sarebbe l'indizio per il quale la teoria delle stringhe collegherebbe la gravità descritta dalla relatività generale con la struttura delle particelle elementari descritta dalla meccanica quantistica.

Rispetto alle teorie della gravità di Newton e di Einstein, quella che scaturisce dalla teoria delle superstringhe è differente: i primi due scienziati spiegano un fenomeno di cui già si aveva un'esperienza diretta mentre invece nella teoria delle stringhe, anche qualora non ci fosse stata alcuna esperienza precedente di questa forza, essa sarebbe emersa come conseguenza della teoria stessa. In altri termini quest'ultima prevede l'esistenza della gravità perché da essa emergono le quattro particelle mediatrici o messaggere delle interazioni fondamentali.

Interazione	Mediatore
Interazione forte	gluone
Interazione elettromagnetica	fotone
Interazione debole	Bosoni W e Z
Interazione gravitazionale	gravitone

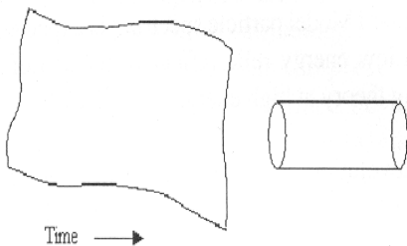
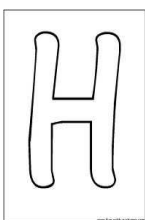
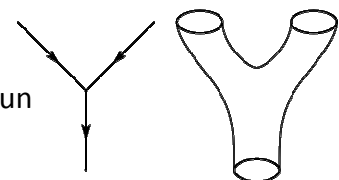


Fig.2 Open and Closed String World Sheet.

Come una particella, anche una corda occupa una linea nello spazio in ogni momento del tempo. Perciò la sua storia nello spazio-tempo è una superficie bidimensionale detta foglio d'universo o world sheet. Il foglio d'universo di una corda aperta è una striscia, i cui margini sono le traiettorie degli estremi della corda attraverso lo spazio-tempo. Invece il world sheet di una corda chiusa è un cilindro o tubo, la cui sezione è un cerchio che rappresenta la posizione di una corda in un tempo preciso.

Due stringhe interagiscono tra loro come due particelle: due corde possono unirsi a formare una corda singola. Nel caso di corde aperte esse si uniscono ad una estremità, mentre nel caso di corde chiuse si ha un tipo di sutura che ricorda un paio di pantaloni.



In questo modello fisico l'emissione o l'assorbimento di una particella corrisponde alla divisione o alla congiunzione delle corde. Ad esempio, nella teoria delle particelle, la forza gravitazionale tra il Sole e la Terra è descritta come causata dall'emissione di un gravitone da parte di una particella nel Sole e dal suo assorbimento da parte di una particella terrestre. Invece nella teoria della stringhe questo processo corrisponde a un tubo a forma di H in cui i tratti verticali corrispondono alle particelle nel Sole e nella Terra e il tratto orizzontale equivale al gravitone che si sposta tra l'uno e l'altro.

La teoria delle superstringhe

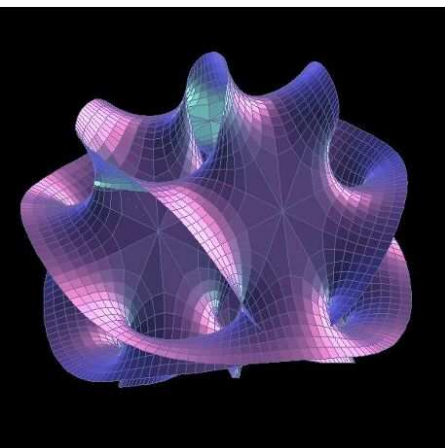
Negli anni '70, i fisici, lavorando sulla teoria bosonica, avevano trovato che le stringhe sembravano dar vita a particelle di spin intero che solo le particelle mediatrici hanno, mentre invece quelle materiali, hanno tutte spin frazionari pari a $\frac{1}{2}$.

Tuttavia di fondamentale importanza furono gli studi compiuti nel 1971 da Pierre Ramond, il quale, modificando parte della teoria, mostrò l'esistenza di un nuovo tipo di simmetria tra i vari modi di vibrazione che producevano gli spin frazionari. Questa nuova relazione fu chiamata supersimmetria e il modello divenne **la teoria delle stringhe supersimmetrica** o **teoria delle superstringhe**.

Nel 1974 Scherk e Schwartz dimostrarono che la teoria delle corde poteva descrivere la forza gravitazionale solo ammettendo una tensione nella corda di circa 10^{39} tonnellate e diminuendo drasticamente la dimensione teorica della stessa. In questo modo, studiando le caratteristiche del messaggero della vibrazione della stringa, trovarono che le loro proprietà combaciavano con i gravitoni, le particelle mediatrici della forza gravitazionale senza massa e con spin 2. Questo significava che questa teoria era in grado di spiegare in modo quantistico la forza gravitazionale. La loro ricerca non fu degnata di molta attenzione anche perché le predizioni della teoria delle stringhe erano identiche a quelle della relatività generale su scale di lunghezze ordinarie ma differivano a distanze molto piccole (meno di un milionesimo di centimetro).

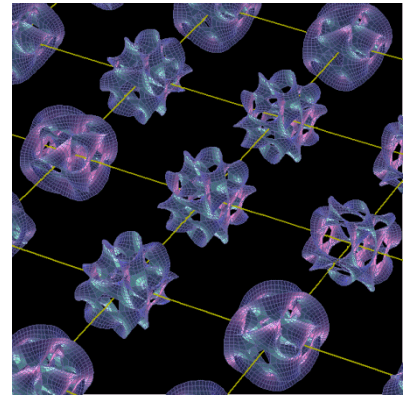
Alla fine degli anni '70 Schwartz, in collaborazione con Mike Green, dimostrò che la teoria delle superstringhe poteva spiegare l'esistenza di particelle con una chiralità sinistrorsa incorporata, come alcune particelle che osserviamo nella realtà. Le loro ricerche segnarono l'inizio di un riavvicinamento alla teoria, alla quale cominciarono a lavorare moltissimi ricercatori.

Vi erano alcuni problemi da risolvere per dimostrare la validità di tale teoria: prima di tutto i modi di vibrazione possibile sono infiniti, mentre le particelle previste dal modello standard sono in numero finito; secondariamente se si analizzano le energie e dunque le masse non si trova alcuna corrispondenza tra i risultati dei calcoli teorici e i valori relativi al modello Standard della fisica delle particelle. Inoltre anche i modi vibrazionali che danno vita a particelle prive di massa come il gravitone sono molto più numerosi di quelli previsti dal modello standard ossia gravitone, fotone e gluone.



Inoltre si presentava anche un altro problema: la teoria sembrava consistente, anche da un punto di vista matematico, solo in uno spazio-tempo che ha dieci dimensioni, nove spaziali e una temporale, in luogo delle solite quattro. Non venne determinato soltanto il numero delle dimensioni extra (sei) ma anche le loro forme dette spazi di Calabi-Yau in onore dei due matematici che ne studiarono le proprietà matematiche. Si pensa inoltre che le dimensioni extra siano arrotolate in uno spazio di dimensioni piccolissime impossibile da percepire.

Il motivo per cui solo tre dimensioni spaziali e una temporale si siano "spianate" mentre le altre rimangono compattamente arrotolate, trova una possibile spiegazione nel principio antropico. Infatti due dimensioni spaziali non sono sufficienti per consentire lo sviluppo di esseri complicati come noi. Inoltre la teoria delle superstringhe determina il numero preciso di dimensioni dello spazio. Affinché la condizione richiesta dall'equazione sia esattamente soddisfatta in modo tale che la teoria sia verificata, si deve ammettere che lo spazio-tempo abbia dieci dimensioni, non una di più e non una di meno.

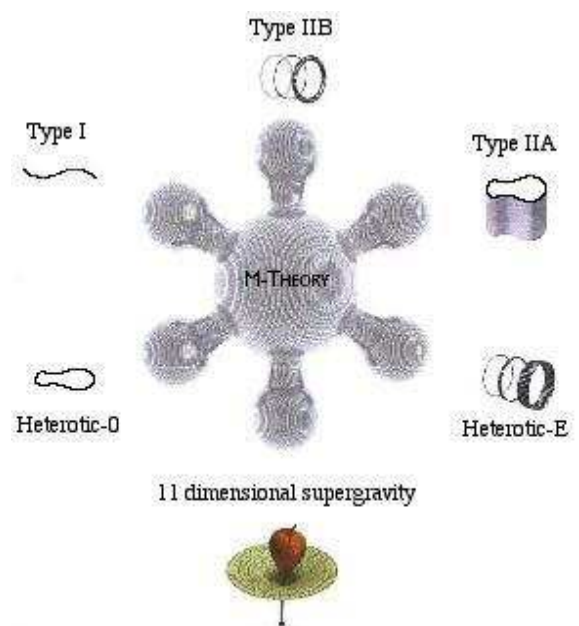


Bisogna poi tener presente che la forma dello spazio compatto di Calabi-Yau influisce sui modi di vibrazione delle corde: una sua alterazione avrebbe ripercussioni anche sui modi di vibrazione da cui dipendono la massa e la carica della particelle a cui danno vita. È evidente quindi come la geometria delle dimensioni extra determini le proprietà fisiche della materia e delle forze. Sono stati trovati alcuni spazi di Calabi-Yau con tre buchi che danno origine alle famiglie di particelle mediatrici, oltre a quelle materiali, con le proprietà previste dal modello standard.

Negli ultimi trent'anni i ricercatori hanno lavorato a cinque varianti della medesima teoria: *tipo I*, *tipo IIA*, *tipo IIB*, *eterotica-O*, *eterotica-E*.

Sono tutte teorie molto simili fra loro ma non identiche: condividono la caratteristica di base cioè che la materia sia costituita da stringhe in vibrazione e prevedono tutte nove dimensioni spaziali. I cinque sottotipi della teoria delle superstringhe mostrano però anche alcune differenze sostanziali: differiscono per il modo in cui incorporano la supersimmetria, per i diversi tipi di modi di vibrazione, per i diversi modi di interazione tra le stringhe e per la forma delle stringhe. Ad esempio solo secondo il *tipo I* esistono anche stringhe aperte oltre che stringhe chiuse ad anello.

Il fatto che la teoria delle superstringhe si presentasse in cinque versioni non soddisfaceva la pretesa di teoria unificata. Tuttavia, nel 1995 il fisico teorico Edward Witten scoprì che le cinque teorie di superstringa erano intimamente connesse tra loro tanto da poter essere raggruppate in un'unica teoria unificante alla quale fu assegnato il nome di **M-teoria**, che potrebbe portare alla tanto ambita "Teoria del Tutto". L'unificazione delle teorie delle stringhe fu ottenuta associandole in una specie di trama di rapporti reciproci, detta dualità (S- dualità, T- dualità ed U- dualità), ciascuna delle quali fornisce un metodo per convertire una teoria delle stringhe in un'altra. Questa teoria esibisce alcune caratteristiche aggiuntive: postula undici dimensioni anziché dieci. Infatti se ne aggiunge una spaziale che consente di portare a termine calcoli esatti e non solo approssimati. Inoltre la M-teoria prevede non solo strutture unidimensionali, ma anche elementi che si possono estendere in più dimensioni detti brane.



La teoria delle brane

Le brane o membrane sono costituenti fondamentali, caratterizzati da più dimensioni, quindi stringhe non più monodimensionali, la cui esistenza fu mostrata dalle ricerche di Witten riguardanti la M-teoria.

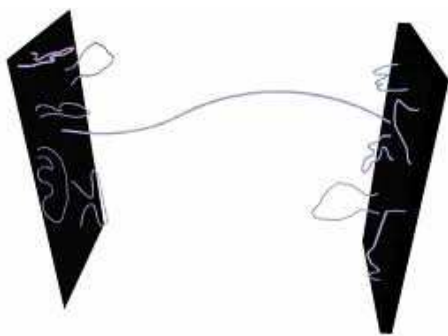
Alla luce di tale scoperta fu riformulata la teoria delle stringhe, le quali divennero solo una tipologia di brane, ossia le brane monodimensionali. Le altre tipologie di brane sono:

- * Le zero-brane, in cui la dimensione è zero corrispondente alle particelle puntiformi a zero dimensioni;
- * Le 1-brane, ossia le stringhe, che si estendono in una sola dimensione;
- * Le 2-brane, chiamate anche membrane, caratterizzate da un'estensione bidimensionale;
- * Le 3-brane, ossia brane a tre dimensioni;
- * Le P-brane, in cui p è un numero intero, positivo che può descrivere un totale di dimensioni pari a quello ammesso dalla teoria delle superstringhe. Tali brane risultano più pesanti delle altre, di conseguenza necessitano anche di una maggiore quantità di energia per essere create.



immagine di una D-brana

Una classe particolare delle brane sono le D-brane, dal nome del matematico Johann Dirichlet, le quali sono brane su cui sono poste le estremità delle stringhe aperte, che di conseguenza sono obbligate a stare all'interno di una regione dimensionale dello spazio, senza però perdere la



propria natura ondulatoria. La D-brana determina inoltre il tipo di movimento che hanno le stringhe ad essa connessa, infatti esse possono muoversi o secondo il contorno di Neumann, quindi descrivendo un moto parallelo alla brana, oppure secondo le condizioni del contorno di Dirichlet, ossia attraverso movimenti perpendicolari alla brana stessa. Inoltre le D-brane possono essere collegate tra di loro attraverso stringhe aperte, le quali hanno un'estremità connessa ad una

brana e l'altra alla seconda D-brana.

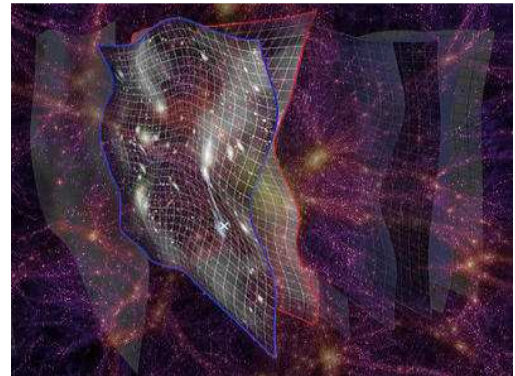
Le conseguenze della elaborazione della teoria della brane furono molteplici, infatti grazie ad essa si scoprirono nei primi anni Novanta, le teorie duali, ossia coppie di teorie che presentano le medesime conseguenze, sebbene siano apparentemente molto differenti l'una dall'altra, inoltre l'introduzione delle brane portò a diversi chiarimenti nella teoria delle superstringhe, ad esempio riguardo alla presenza di alcune particelle che tale teoria prevedeva senza però trovarne una spiegazione sulla loro origine. La teoria delle brane ha inoltre condotto gli studiosi alla

elaborazione di una nuova struttura che possa descrivere il mondo in cui viviamo, tale ipotesi prende il nome di braneworld o mondo-brana.

Il mondo-brana

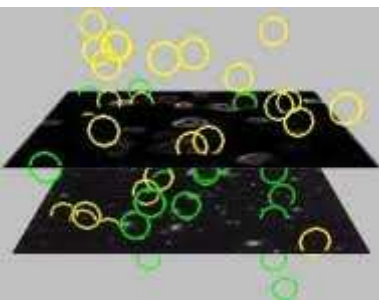
La teoria del mondo-brana ipotizza che l'universo sia una brana tridimensionale. Secondo questa teoria la materia presente nell'universo non può uscire da esso poiché la maggior parte delle stringhe sono collegate alle D-brane, che ne impediscono quindi il movimento.

Molti fisici e matematici si sono interrogati sul perché non ci accorgiamo di vivere su di un mondo-brana, e soprattutto perché non riusciamo ad osservare tale brana. Nella teoria delle superstringhe i fotoni sono composti da stringhe aperte e vibranti, le quali, come già detto in precedenza, sono collegate alla brana tridimensionale che costituisce il nostro mondo. Alcuni studi teorici hanno confermato che i fotoni possono muoversi all'interno della brana secondo le tre dimensioni, senza però uscirne. Ciò ci fa comprendere il



perché la brana risulti invisibile ai nostri occhi, in quanto la forza elettromagnetica, e di conseguenza la luce, è intrappolata nel nostro mondo. Inoltre risulta impossibile accorgersi delle altre dimensioni adiacenti alla nostra, indipendentemente dalla loro dimensione.

Un'eccezione è rappresentata dal comportamento della gravità, come ipotizza il fisico Lisa Randall, la quale afferma che le particelle responsabili della gravità, chiamate gravitoni, non sarebbero composte da stringhe aperte ma da anelli chiusi, che quindi non presentano alcuna estremità connessa alla D-brana. I gravitoni sono quindi liberi di muoversi all'interno dello spazio-tempo e verso altre dimensioni, a differenza delle altre particelle. Questa teoria trova una giustificazione



alla diversità di potenza che gli studiosi hanno riscontrato tra le quattro forze fondamentali, di cui la gravità è la più debole, in quanto le particelle che la compongono sono libere di spostarsi in altre dimensioni, mentre le altre particelle, composte da stringhe aperte, non hanno libertà di movimento. Questa ipotesi apre una prospettiva affascinante perché se è vero che il nostro cosmo giace su una brana e se esistono universi paralleli su altre brane accanto

alla nostra forse non li vedremo mai, ma potremo un giorno percepirli per mezzo della gravità, che diviene quindi l'unico strumento per esplorare un universo composto da mondi-brane.

L'obiettivo principale di molti ricercatori contemporanei è l'elaborazione di un modello cosmologico che possa essere compatibile con la M-teoria. Esistono due diversi approcci a tale ricerca, il primo tenta di rendere più chiara l'origine dell'universo, nei suoi primissimi momenti di vita, allontanandosi dal concetto di Big Bang come un punto infinitamente caldo, denso ed energetico, in quanto la teoria delle stringhe pone un limite dimensionale oltre il quale lo spazio e il tempo perdono di significato. La seconda via che i ricercatori hanno intrapreso è quella che fa

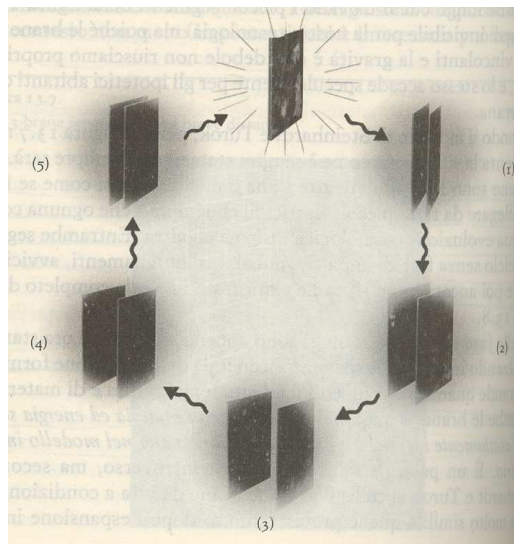
uso del mondo-brana nella sua versione più radicale, che porta quindi ad una cosmologia completamente innovativa rispetto alla teoria dell'inflazione. Questa nuova cosmologia prende il nome di "cosmologia ciclica".

La cosmologia ciclica

Sin dall'antichità l'uomo si è sempre interrogato sull'origine e la natura dell'Universo. La teoria scientifica più accreditata per descrivere il momento in cui tutto ha avuto origine è la teoria dell'universo inflazionario, secondo la quale l'Universo, nei primi attimi della sua esistenza, era caratterizzato da un'espansione nulla e da una temperatura e densità infinite. L'origine dell'universo però non può essere analizzata in termini matematici e fisici poiché gli studiosi non dispongono di mezzi adatti per raggiungere tale scopo, infatti per il raggiungimento di tale obiettivo è necessario che prima venga completata la teoria quantistica della gravità. Quindi si è costretti a descrivere l'origine dell'universo a partire da una particella elementare di dimensioni minime presente al tempo di Planck, pari a 10^{-43} secondi, in quanto risulta impossibile ricostruire cosa accadde nell'intervallo di tempo tra il Big Bang e il tempo di Planck. Ma è proprio grazie alla teoria delle superstringhe che sembra possibile dare una risposta più precisa agli interrogativi riguardanti l'origine dell'universo, presentandosi come valida sostituta alla teoria dell'universo inflazionario.

L'innovazione più significativa che le superstringhe apporterebbero alla teoria sull'origine dell'universo riguarda le dimensioni di esso, in quanto non avrebbe potuto ridursi al di sotto di un valore minimo di estensione, poiché la teoria delle superstringhe non prevede l'esistenza delle singolarità, e quindi sarebbe impossibile che l'universo abbia assunto un'estensione nulla in qualsiasi punto della sua esistenza.

Un altro aspetto che rivoluziona il concetto di origine e di evoluzione dell'universo è l'introduzione di non più quattro dimensioni, ma bensì undici. Nell'analizzare i primi momenti dell'esistenza dell'universo bisogna seguire l'evoluzione di tutte le dimensioni, e ciò ha portato i fisici a scoprire la natura ciclica dell'universo. Infatti nel seguire lo sviluppo di tutte le dimensioni hanno notato che, quando queste scendono al di sotto della lunghezza di Planck, non continuano a diminuire, come prevedeva la teoria inflazionaria, ma riprendono a crescere, comportamento osservato anche nella variazione della temperatura, la quale, dopo aver raggiunto un valore massimo, iniziava a diminuire, eliminando la possibilità di una temperatura infinita. La teoria ciclica dell'universo prevede quindi un universo senza inizio né fine, il quale continua ad espandersi e contrarsi senza giungere alle singolarità. Secondo questo modello, l'universo sarebbe confinato tra due D-brane, la cui evoluzione avviene nel corso del tempo, ossia della quarta dimensione, e che si pensano fluttuanti nella quinta dimensione. Per quanto riguarda le altre sei dimensioni, esse sarebbero composte da stringhe di piccole dimensioni incapaci di uscire dallo spazio.



Il ciclo evolutivo delle brane viene descritto in cinque fasi. Nella prima fase si ha l'allontanamento delle due 3-brane in seguito ad un impatto, il quale genera una tale quantità di energia che fornisce radiazioni ad alta temperatura e materia ad entrambe le membrane. Nella seconda fase prosegue l'allontanamento, al quale segue il raffreddamento della materia che porta alla creazione di grandi strutture come le galassie e i corpi celesti principali. Dopo sette miliardi di anni si ha la terza fase, quella in cui l'energia e la radiazione raggiungono un livello che genera una pressione negativa, la quale porta all'inizio di un'era di espansione accelerata. Tale espansione continua finché la densità all'interno dell'universo non è nulla, entrando quindi nella quarta fase. Successivamente, nella quinta fase dell'evoluzione del sistema, le due membrane tendono ad avvicinarsi di nuovo, colmando lo spazio di piccole disomogeneità, le quali sono determinate dalle stringhe collegate alle 3-brane. In seguito la velocità di avvicinamento aumenta sempre di più, tale processo porterà alla condizione della prima fase, quindi un urto tra membrane che porterà ad un successivo allontanamento. Le particelle avrebbero un'evoluzione indipendente rispetto a quelle dell'altra membrana, sebbene vi sia la possibilità di interagire attraverso i gravitoni, che quindi diventano particelle mediatrici. Le particelle di una delle due membrane diventano per le altre come materia oscura ed energia oscura, ossia materia ignota, che nel modello inflazionario non trova alcuna giustificazione teorica. Inoltre nella concezione inflazionaria dell'universo le galassie, le stelle ed i corpi minori sono disposti in alcune regioni limitate dello spazio, intorno alle quali vi è soltanto il vuoto. Differente è la disposizione dei corpi in un universo ciclico, in quanto all'interno di esso i corpi sono disposti in maniera uniforme, uniformità che viene disturbata da salti quantici occasionali o da altri eventi, come i buchi neri. Tuttavia l'espansione regolare delle brane assicura che i buchi neri rimangano isolati e che non interferiscano sui processi che hanno luogo in tutte le altre regioni dello spazio.

Il problema che rimane irrisolto è quello di verificare se il modello ciclico descriva veramente la realtà, anche se ciò sembra possibile solo in futuro, poiché tale modello prende le mosse da teorie che a loro volta necessitano di verifiche sperimentali. Per procedere nello studio delle superstringhe e delle brane è necessario disporre di energie molto elevate, le quali non sono state raggiunte nemmeno nei laboratori più moderni ed avanzati.

Fonti:

- * www.fmboschetto.it
- * www.cosediscienza.it
- * www.lescienze.it
- * www.gruppoeratostene.it
- * www.matematicamente.it
- * www.amadeux.net

Bibliografia

- * "dal Big Bang ai buchi neri. Breve storia del tempo." di Stephen Hawking
- * "Passaggi curvi. I misteri delle dimensioni nascoste dell'universo." di Lisa Randall
- * "universo senza fine. Oltre il Big Bang" di Paul J. Steinhardt e Neil Turok