

## ZIBALDONE DE FÍSICA

- Suposem que tenim un disc rotatori D amb dues persones: A fa mesures des de la circumferència exterior i B al llarg del radi. Un observador, O, amb un regle des de fora de la plataforma mesura una longitud de la circumferència L i un radi R ( $L=2\pi R$ ). Amb el mateix tipus de regle, A mesura la longitud de la circumferència exterior,  $L_D$ , i B la longitud del radi ( $R_D$ ). D'acord amb la relativitat especial,  $R=R_D$ , però A mesurarà una longitud  $L_D>L$ . En conseqüència,  $L_D/R_D>2\pi$  i la geometria dins del disc no serà euclidiana.
- En el mateix exemple anterior, degut a la dilatació del temps propi, per a un mateix temps de O la contracció del temps a A serà superior a la de B. Entre dos esdeveniments el temps propi transcorre més lentament per a A que per a B quan aquest es mou al llarg del radi. El temps propi disminueix quan ho fa l'acceleració (i la gravitació!).
- L'espai és relacional (Leibnitz, Huygens, Berkeley, Mach). L'espai és absolut (Newton). L'espai i el temps són absoluts (Einstein). Per a Einstein en un univers buit les forces d'inèrcia degudes a l'acceleració existeixen, perquè en un espai i temps un moviment accelerat no té una trajectòria rectilínia : és quelcom absolut ! Per a Newton a l'univers buit hi hauria forces d'inèrcia en existir el referent absolut de l'espai. Altrament, per a Mach, en no haver-hi cap referent material, no s'experimentarien les forces d'inèrcia, que dependrien del contingut total de matèria a l'univers. Si ens situem en el terreny gravitatori de la relativitat general i seguim trajectòries geodèsiques, no sentim la gravetat, *no estem accelerats*, segons Einstein, i la matèria que tingui una acceleració relativa en relació a nosaltres *estarà accelerada*, segons el mateix Einstein, tot estant sotmesa a les forces d'inèrcia. L'espai i el temps corbat torna a ser la referència absoluta per contemplar l'acceleració, causa dels efectes d'inèrcia. L'espai i el temps pla de la relativitat és un cas particular amb curvatura nul·la i les línies rectes en són les seves geodèsiques. La relativitat general contempla alguns aspectes machians (una galleda plena d'aigua i situada dins d'una esfera massiva en rotació i buida per dins experimenta les forces d'inèrcia), però no tots.
- Les lleis de la física no canvien quan nosaltres accelerem, sempre que hi afegim un camp gravitatori.
- El temps només té sentit si les coses canvien.
- La simetria espacial de l'univers fa possible la sincronia de rellotges a diferents llocs, la qual cosa ens permet parlar del temps de l'univers. Aquests rellotges no es mouen dins de l'espai, sinó que només participen en l'expansió universal, però, si ho fan, caldrà incloure les correccions corresponents que marca la relativitat.
- Si prescindim de l'anisotropia real del fons de microones i ens movem amb el flux còsmic, la radiació de fons ens sembla isòtropa. Si ens hi acostem o separem, trobarem freqüències diferents per l'efecte Doppler.

- L'anisotropia de la radiació de fons pot ser causada per tres factors:
  - a) La *gravetat* produeix desplaçament al blau o al vermell (efecte *Sachs-Wolfe*).
  - b) Les variacions de *densitat* produeixen escalfament (compressió) o refredament (expansió) (efecte *Sakharov*).
  - c) Les *velocitats* poden canviar la temperatura dels fotons (efecte Doppler).
- Per a estructures d'una escala superior a l'horitzó a l'època de la recombinació (abans d'aquesta època no podem rebre informació fotònica) quan fotons i matèria es desacoblen (aproximadament  $1^\circ$  per a la nostra observació), l'efecte essencial de l'anisotropia està en les irregularitats prèvies causades per fluctuacions quàntiques, ja que les interaccions *globals* no es podien produir en haver-hi parts no connectades causalment. Les estructures superdenses apareixen fredes ja que el factor a) de disminució tèrmica per desplaçament al roig, en allunyar-se els fotons, supera el b) d'increment tèrmic. En les estructures subdenses passa el contrari: l'augment tèrmic per desplaçament al blau, en travessar els fotons els camps gravitatòris, supera l'efecte de b) i aquelles es veuen més calentes. Globalment, l'anisotropia es petita i no depèn gaire de l'escala d'observació. Tanmateix, quan l'escala s'apropa a la dimensió de l'horitzó l'anisotropia va augmentant ja que la compressió pot començar a esdevenir important en créixer les connexions causals.
 

Per a estructures d'una escala inferior a l'horitzó la causa fonamental de l'anisotropia es troba en les oscil·lacions acústiques produïdes per les influències antagòniques de la matèria (contracció) i de la radiació (expansió). Això dona lloc als efectes de variació de densitat i de les velocitats de contracció i expansió. Quan una estructura entra dins de la zona d'escala inferior a l'horitzó ja hi ha influència causal entre tots els seus punts i la primera compressió continua. Quan s'arriba a la màxima compressió apareix un pic en l'anisotropia. Això ocorre per a una escala d'observació un xic inferior a  $1^\circ$ .
- En l'expansió còsmica l'espai s'infla, però no els objectes, a causa de les forces internes.
- En cosmologia, anàlogament a l'esfera amb  $k > 0$ , trobem variants de  $k \geq 0$  sense vores ni fronteres. Si caminem, finalment tornem al punt inicial. La representació de  $k = 0$  seria una pantalla de TV on un objecte que sortís per una banda pogués aparèixer per l'altra. Amb  $k \leq 0$  la suma dels angles d'un triangle és  $\geq 180^\circ$ .
- L'espai infinit amb  $k \geq 0$  és infinit des del principi i el Big Bang amb la seva gran temperatura ocorre en tots els punts.
- Una partícula de massa  $m$  situada a la superfície d'una bola de radi  $R$  i densitat  $\rho$  verifica l'equació  $m \cdot d^2R/dt^2 = G \cdot (4/3 \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \rho) \cdot m/R^2 \rightarrow 1/R \cdot d^2R/dt^2 = 4\pi G\rho/3$ . Si identifiquem  $R$  amb el radi de l'univers i  $\rho$  amb la seva

densitat, aquesta és l'equació d'Einstein d'evolució de la grandària de l'univers.

- Amb la disminució de temperatura hi ha canvis de fase que trenquen simetries. Ordre i simetria són sovint antagònics, com passa amb el gel que té més ordre i menys simetria que l'aigua líquida. Anàlogament, el plasma, amb la separació dels components dels àtoms, té més simetria i menys ordre que la fase gasosa.
- En l'evolució de l'univers aquest es refreda i disminueix la seva simetria. El camp de Higgs es “congelà” amb pèrdua de simetria i avui és una relíquia del Big Bang. En l'estat del buit els camps normals tenen valors i energies de mitjana nul·la, però el valor mitjà del camp de Higgs és diferent de zero. Es tracta de l'oceà de Higgs. Estem immersos en l'oceà de Higgs. Aquest no afecta la velocitat (no és l'èter!) però sí l'acceleració i dóna valor a la massa inercial, i, pel principi d'equivalència, a la massa gravitatòria. L'origen de la massa no està únicament en la interacció amb el Higgs: en els nuclis la massa no és solament deguda a la que reben els quarks del Higgs, sinó també a l'energia dels gluons que els mantenen units.
- La gravitació depèn de l'energia i de la pressió, a més de la massa i la distància. Així, un cos escalfat o una molla comprimida estan sotmesos a una acció gravitacional més gran que aquella a què ho estarien abans del procés anterior. Quant a la pressió, si aquesta és positiva produeix una gravitació atractiva i el contrari ocorre, si és negativa.
- L'aigua extraordinàriament pura pot romandre líquida a temperatures inferiors al 0°C en no haver-hi les petites impureses entorn de les quals pot créixer el cristall de gel. El camp de Higgs fluctua a temperatures altes, però quan la temperatura baixa ell pot romandre temporalment *sobrefredat* dalt del tossal de l'inflató abans d'anar al fons de la seva vall. L'energia d'aquest camp ompliria tot l'espai i donaria lloc a una pressió negativa i a una gravitació repulsiva. Mentre l'inflató estigués al tossal durant un temps molt petit produiria un efecte semblant al d'una constant cosmològica amb inflació immensa i densitat d'energia constant (de fet, l'univers observable és una engruna de la totalitat de l'univers real). Aquest augment enorme d'energia, compensat pel valor cada cop més negatiu del camp gravitatori, seria seguit d'una fluctuació quàntica fins a la vall amb la seva conversió energètica en el conjunt inicial de partícules de l'univers. Fins i tot aquest procés de descens estaria sotmès a la indeterminació quàntica segons el lloc de l'espai i el temps en què ocorria. Degut a això, irregularitats microscòpiques podien esdevenir llavors apreciables de creixement estel·lar i galàctic gràcies a la inflació. A partir d'aquí l'evolució seguiria el seu camí més conegut. L'anàlisi més acurada de la radiació de fons permetria decidir-nos per un o un altre dels molts models inflacionaris que avui hi ha. El mateix passaria a partir de l'anàlisi de la polarització dels fotons que les ones gravitacionals originarien.

- L'inflació eliminà les irregularitats de l'espai que fou un escenari molt suau on hi havia les llavors de futures agrupacions de matèria. Aquest descens de l'entropia gravitatòria fou compensat per la creació de matèria i radiació altament entròpics. És en aquest sentit que hem d'entendre la baixa entropia inicial: gràcies a la baixa entropia gravitatòria l'entropia inicial total fou molt més petita del que hauria pogut estar amb una gravitació "normal". Més endavant, aquest préstec entròpic de la gravitació permeté l'evolució amb un creixement notable de l'entropia de la gravetat perquè es poguessin formar estructures més complexes.
- Amb la inflació resollem el problema de l'horitzó (segons el model estàndard del Big Bang ens semblaria que punts no connectats causalment ara ho estiguessin encara menys vora del Big Bang, mentre que amb la inflació ocorre el contrari) i de la planitud. Tinguem en compte que amb la gravitació atractiva els desviaments de la densitat en relació a la densitat crítica s'amplifiquen. Amb la gravitació repulsiva ocorre el contrari, la qual cosa fa que l'univers sigui cada vegada més pla.
- Amb l'expansió "normal" de l'univers la matèria i la radiació cedeixen energia a la gravitació. Altrament, l'inflató guanya energia de la gravitació. Per aquesta, raó tot el procés pogué començar amb una energia de l'inflató petita. Com, però, pogué començar el procés?
- Un caos inicial *altament probable* de l'inflató podria haver donat lloc a una fluctuació quàntica perquè a partir d'un *modest inflatí altament improbable situat al tossal* sorgís el nostre univers. Per un procés semblant podrien sorgir altres universos (multivers).
- L'energia fosca pot ser explicada mitjançant la *constant cosmològica* o els camps de *cinquena essència* semblants a l'inflató, però més suaus, donant lloc a una inflació més tranquil·la i duradora. La constant cosmològica donaria lloc amb el temps a un univers desolat, però amb els camps de cinquena essència la inflació podria finalment aturar-se i el nostre futur univers seria més habitable. La mesura dels canvis d'acceleració en l'expansió de l'univers en grans períodes de temps (a partir de les dades de supernoves) ens pot fer decantar per un o un altre model.
- Una massa amb rotació fa rotar l'espai-temps. Això faria que l'eix d'un giròscop que orbités entorn de la Terra anés apuntant a diferents estels, a causa de la rotació pròpia de la Terra (efecte de precessió de *Lense-Thirring*).
- Les ones gravitatòries travessen materials opacs a la llum i produeixen efectes acumulatius en la variació de la longitud dels objectes que troben en el seu pas. El LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory) permetrà observacions acurades gràcies a la gran longitud dels tubs, augmentada considerablement degut al gran nombre de reflexions a què està sotmès el raig làser.
- Suposem que tenim dos avions que s'enlairen conjuntament, giren en sentits oposats i es retroben a la Terra. L'avió que viatja cap a l'est (A)

sumarà la velocitat de rotació de la Terra a la seva velocitat relativa, mentre que l'altre (B) la restarà. Quan tornin a la Terra el rellotge de l'avió A marcarà un temps més petit que el de l'avió B (imaginem-nos el problema dels "tres bessons").

- En un espai temps bidimensional, amb la latitud com temps imaginari l'univers sorgiria del Pol Sud, s'eixamplaria al màxim a l'equador i retornaria concentrat al Pol Nord (aquests dos punts, però, no serien singularitats, com a la Terra). Amb la longitud com temps imaginari el temps ordinari s'aturaria als pols (com a l'horitzó d'un forat negre). Quan fem l'estudi de l'univers amb el temps imaginari a partir de la suma d'històries de Feynman, considerem moltes històries quadridimensionals del tipus d'una esfera bidimensional lleugerament modificada. Aleshores el conjunt amplíssim de formes semblants a closques de nou en el temps imaginari condicionarien l'evolució en el temps real del nostre univers (amb inflació, etc).
- A través d'un forat de cuc podríem anar a punts molt allunyats en l'espai normal en poc temps o bé arribar-hi abans d'haver sortit. Les paradoxes, com la de matar l'avi, només apareixen si hi ha el lliure albir. Per tenir una màquina del temps cal energia negativa (a l'horitzó dels forats negres hi apareix). Els bucles tancats són possibles, però els universos en què apareixen tenen una probabilitat molt i molt petita en la suma sobre històries de Feynman.
- La reversibilitat implica el coneixement del futur i del *passat* des del present, com en l'evolució unitària quàntica. Aleshores diem que la *informació es conserva*. Per a Hawking no es podia invertir la llei en un forat negre, perquè res pot sortir fora d'ell. 't Hooft considerava el conjunt (atracció cap al forat negre)->(radiació del forat negre) com una col·lisió quàntica amb la seva matriu S i l'evolució unitària i, per tant, amb conservació de la informació.
- Les agitacions tèrmiques causen efectes destructius, però no pas les quàntiques, perquè l'energia *no està disponible*. Només ho està quan apareixen diferències d'energies, com en l'efecte Casimir.
- Elegim unitats de Planck perquè c, h i G (constants universals) valguin 1. La longitud i el temps de Planck són petits, però no pas la massa (amb 10 masses de Planck ( $10^8$  bacteris) podem creuar EEUU en cotxe).
- L'entropia és informació oculta.
- Si tenim un fotó que té una longitud d'ona de l'ordre del radi de Schwarzschild i cau en un forat negre, podem assegurar que la informació del forat s'ha incrementat en 1 bit (està dins i res més). Veuríem que l'àrea del forat ha augmentat en 1 àrea de Planck (una longitud d'ona més petita implicaria una indeterminació menor sobre el punt per on el fotó entra i un augment de informació major, i amb una de més gran el fotó podria passar de llarg i no ser-hi a dins). Aleshores, la informació oculta o entropia seria proporcional a l'àrea de l'horitzó (aproximadament 1 bit/àrea de Planck; en

realitat 4 àrees de Planck contenen un bit). Amb gravitació l'entropia màxima d'un sistema és proporcional a la superfície de la seva frontera, però en la seva absència l'entropia màxima és proporcional al volum que ocupa aquest sistema. En conseqüència, semblaria que la descripció física fos més senzilla amb gravitació que sense i que el nostre món tridimensional no fos altra cosa que una projecció, un somni, del que ocorre realment en una prima frontera molt allunyada. Això aniria en sentit contrari al que es veu en la caverna de Plató on la realitat està a l'exterior de la caverna i el somni en la paret. Si el nostre univers fos una 3-brana, frontera d'una realitat espacial de 4 dimensions, el principi hologràfic podria anar en el sentit de Plató: les nostres percepcions tridimensionals serien ombres de la física quadridimensional que ocorre en una regió envoltada per la nostra brana.

- A partir de la definició de temperatura que *inclou* l'increment d'energia per bit podem calcular la temperatura del forat negre. La temperatura de la radiació de fons de l'univers és molt més gran que la dels forats negres normals, que absorbirien energia. Després de moltíssim temps passaria el contrari.
- Principi de impossibilitat de clonació quàntica per no burlar el principi d'indeterminació de Heisenberg (en una còpia coneixeríem exactament la posició d'un electró i en l'altra la seva velocitat). Si existís la possibilitat de clonació q

$$C|\alpha\rangle = |\alpha\rangle|\alpha\rangle \quad C|\beta\rangle = |\beta\rangle|\beta\rangle \quad :$$

$$C|\alpha + \beta\rangle = C|\alpha\rangle + C|\beta\rangle = |\alpha\rangle|\alpha\rangle + |\beta\rangle|\beta\rangle \neq |\alpha + \beta\rangle|\alpha + \beta\rangle$$

Això ens demostra el teorema de no-clonació quàntica.

- Anem a comprovar el teorema de Bell. Tenim tres eixos (1,2,3) amb propietats objectives d'espín ++-. Hi ha 9 possibilitats d'elecció dels eixos. (1,1), (1,2), (1,3), (2,1), (2,2), (2,3), (3,1), (3,2), (3,3). Tindrem coincidència de resultats en (1,1), (2,2), (3,3), (1,2), (2,1) amb probabilitat 5/9. El mateix trobaríem amb ++-, -+-, --+, -+- i ---. Amb +++ i --- tindríem una probabilitat de coincidència igual a 1. En conseqüència, és molt més probable una coincidència de resultats. Les dades experimentals d'Aspect demostren el contrari i coincideixen amb les previsions de la física quàntica. En efecte, si els tres eixos formen un estel simètric, la mecànica quàntica ens permet raonar com ho fem a continuació:

La probabilitat que amb un valor + de l'espín en un eix trobem un valor + en un altre eix val  $\cos^2(120^\circ/2) = 1/4$ . En conseqüència, la probabilitat de coincidència en dues mesures serà  $1/3 \cdot 1/3 + 2/3 \cdot 1/4 = 1/2$  i tenim la mateixa probabilitat de coincidència o de no coincidència.

- L'estranyesa de la relativitat només apareix quan comparem diferents visions. Amb la física quàntica l'estranyesa ocorre amb una única visió.

- La simetria d'inversió temporal només deixa d'ocórrer en uns *mínims* processos en què la simetria CP és violada. Això és degut a causa de la invariància CPT que sempre es verifica.
- D'acord amb la simetria d'inversió temporal i la llei estadística de creixement entròpic cap al futur, des d'aquest *moment present* en què ens trobem ara hauríem d'admetre que l'entropia del passat també seria més gran. Pensant en l'univers, aleshores seria molt més probable un estat d'alta entropia en el seu origen que mitjançant una fluctuació donés lloc a una evolució amb una disminució d'entropia fins arribar a l'estat actual. Tanmateix, la teoria del Big Bang suposa en un inici l'existència d'un gas uniforme que amb la gravitació suposaria un estat amb un baix contingut entròpic. Fou aquest estat el que marcà, doncs, la fletxa del temps.
- La conversió espontània de l'aigua líquida en gel a temperatures inferiors a 0° o el procés contrari a temperatures superiors són possibles gràcies que l'energia lliure de Gibbs disminueix (o aproximadament la de Helmholtz  $F=U-TS$ , ja que la variació de volum que figura a  $G$  a través de  $PV$  és mínima). En el primer cas, per exemple, es cedeix calor al medi ambient i tant  $U$  com  $S$  disminueixen, però la disminució de  $U$  és superior a l'augment de  $-TS$ .
- Clàssicament, per a definir l'entropia fem el volum de l'espai de fases corresponent als microestats compatibles amb un macroestat determinat, en el supòsit que els microestats siguin equiprobables.
- En física quàntica quin és el passat de  $A$ ? És una mitjana de totes les històries que ens porten a  $A$ .
- La llum d'un quàsar *molt llunyà*, que pot seguir dues trajectòries envoltant una galàxia, pot donar lloc a interferències o no, segons que hi hagi l'absència o presència d'un detector a la Terra. Aquesta *elecció diferida* no influeix en el passat, l'esporga.
- Si marquem els electrons en l'experiment de les dues esclatxes (actuant sobre l'espín) i abans de la pantalla esborrem aquesta marca (*fins i tot milers d'anys després*) tornem a tenir la coherència. No estem influïent en el passat, l'esporguem.
- Quan hi ha moltes històries, a partir del que passa *ara* podem interpretar el passat. Si *molt més tard* rebem informació nova, això ens pot obligar a tornar a llegir l'*ara* previ i reinterpretar el passat, no a canviar-lo.
- El problema de la mesura pot ser explicat a través de la decoherència *macroscòpica* que *sempre* ocorre per la interacció *microscòpica* de l'entorn (consciència, el sistema quàntic que volem mesurar, etc). Aquí el col·lapse de la funció d'ona del sistema quàntic que mesurem no cal i aquella està sotmesa només a la seva evolució quàntica conjunta amb el medi ambient.
- La teoria de *Ghirardi, Rimini i Weber* introdueix una modificació en l'equació de Schrödinger que pràcticament no afecta les partícules individuals, però sí els sistemes macroscòpics. En aquests hi ha una

elevada probabilitat que *alguna* de les seves *moltes* partícules col·lapsi, tot produint una reacció en cadena que originarà la decoherència.

- És possible que el col·lapse de la funció d'ona no sigui real, sinó únicament una aparença a causa del col·lapse de l'aparell de mesura?
- Per tal de mantenir un forat de cuc estable caldria introduir-li energia negativa que actués antigravitacionalment. A l'experiment de Casimir es demostra que la minva de les fluctuacions quàntiques entre les plaques en relació a les de l'espai buit normal implica una mitjana d'energia i pressió negatives. El que realment actua no és l'energia del buit, sinó la seva diferència, per això no sentim l'energia del buit, pròpiament dita (semblantment al potencial elèctric, podem variar el seu valor, però no les seves diferències).
- Per veure objectes microscòpics cal una petita longitud d'ona i una freqüència elevada. Això implica molta massa en un espai reduït, que pot donar lloc a la formació d'un forat negre, on l'horitzó ocultarà el que volem veure. Si la massa creix, ho fa l'horitzó i la radiació de Hawking tindrà una freqüència més petita i una longitud d'ona més gran que farà que la grandària de l'objecte que contemplem augmenti amb l'energia. Al principi la grandària contemplada disminueix amb l'energia emprada i més enllà de la massa de Planck ocorre el contrari.
- El principi hologràfic afirma que un sistema físic pot descriure's per bits d'informació de la seva frontera.
- Les cordes poden tenir moltes freqüències de vibració que les pot fer arribar fins a l'infinit, on es podria trobar la superfície informativa de l'univers.
- El fet que la descripció d'un sistema es pugui fer a través de la informació de la frontera no vol dir que aquesta no pugui ser present en tot l'univers de forma no tan densa.
- Hadrons: a) Quarks units per cordes formats per gluons. b) Glueboles o cordes tancades formades per gluons.
- Els gluons tenen color, però no pas sabor.
- La teoria de cordes explica la complementarietat d'un forat negre (observadors diferents poden veure coses *aparentment* contradictòries), l'entropia d'un forat negre i el principi hologràfic. Ens trobem amb un canvi radicalment nou de paradigma.
- Vibracions de les cordes. D'una corda es pot desprendre un trocet (gravitó, ...).
- Segons l'observador un objecte pot ser microscòpic o dispersar-se sobre l'horitzó d'un forat negre (complementarietat). Això es degut a les diferents freqüències de vibració d'una corda. Des de lluny aquestes freqüències disminueixen i això permet contemplar molts més aspectes a mesura que aquell s'apropa a la frontera del forat negre, però un observador que cau amb l'objecte només pot visualitzar l'estructura



corresponent a la freqüència més petita (és el que passa quan contemplem l'hèlix d'un avió). En la teoria quàntica de camps els objectes no creixen, sinó que es descomponen en objectes cada vegada més petits; això no ocorre, com hem vist, quan arribem a grandàries de l'ordre de la longitud de Planck, com les cordes.

- L'espectre de les partícules: fotó, gravitó,...,les partícules conegudes,..., supercompanys,..., partícules de gran unificació,...,massa de Planck,...,forats negres microscòpics. A partir d'extensions del Model Estàndard apareixen l'axió i el neutralí, candidats a la matèria fosca de l'univers. El *neutralí* és una mescla quàntica dels supercompanys de Z, fotó i Higgs, que tenen els mateixos nombres quàntics, i fenomenològicament es comporten com els neutrins.
- Un forat negre és una corda llarga comprimida per la gravitació. Abans d'això la seva entropia serà proporcional a la seva longitud i, per tant, a la seva massa  $m$ . Si ara fem que el camp gravitatori la comprimeixi adiabàticament, no hi haurà variació entròpica, la massa efectiva  $M$  del forat que inclou l'energia gravitacional negativa serà més petita que  $m$  i l'entropia no serà proporcional a  $M$ . Aleshores, es comprova que ho és a  $M^2$ .
- Les fluctuacions de la corda permeten que petits fragments fora de l'horitzó es deslliguin. Amb aquests fragments, el forat negre « té pèl ». A l'horitzó el forat negre és un fluid molt calent.
- En la radiació d'un forat negre mitjançant la teoria quàntica de cordes no es perd la informació.
- Un termòmetre vora de l'horitzó d'un forat negre marca una temperatura molt més gran que la de la radiació de Hawking a causa de l'elevat frenat gravitatori que disminueix la freqüència dels fotons. Una capa microscòpica just en la frontera del forat negre (*horitzó ampliat*) és contemplada a partir de les fluctuacions quàntiques de trocets de corda que ultrapassen l'horitzó. Aquesta capa absorbeix i posteriorment emet cada bit d'informació que cau en el forat. Quan aquests trocets de corda es desprenen les fluctuacions quàntiques es transformen molt lentament en *elevades* fluctuacions tèrmiques que a través del frenat gravitatori donaran lloc a la radiació de Hawking. Un observador que travessi el forat no experimentarà les fluctuacions quàntiques, però un de llunyà interpretarà a través de la radiació de Hawking que el primer serà destruït a causa de la gran temperatura de l'horitzó ampliat (complementarietat).
- Un univers accelerat té per a un observador un horitzó còsmic amb velocitat de recessió  $c$  amb temperatura molt elevada marcada per un termòmetre col·locat allà. Els qui es troben a l'horitzó, però, no senten aquesta temperatura (complementarietat).
- Un espai anti De Sitter (ADS) és matemàticament semblant a un espai De Sitter, però amb curvatura oposada. A partir de la teoria de cordes, *Juan Maldacena* troba que un univers  $n+1$  sense gravitació és equivalent a un

ADS  $(n+1)+1$ . El primer espai seria un holograma de l'ADS. També es comprova que l'equivalent d'un forat negre és un fluid calent en la frontera. En aquest estudi quàntic no hi ha pèrdua d'informació! No s'ha fet encara l'estudi matemàtic rigorós del principi hologràfic en el nostre univers.

- A partir de la supersimetria, a l'estat fonamental les energies fermiòniques negatives es cancel·len amb les bosòniques positives dels seus companys supersimètriques i el problema de les divergències disminueix. Si la supersimetria no fos exacta, hi hauria un remanent d'energia del buit que explicaria l'actual expansió accelerada de l'univers.
- En la teoria M d'11 dimensions les cinc teories de cordes de 10 dimensions i la supergravetat d'11 dimensions estan connectades a través de les dualitats. Elles són equivalents i segons el context unes són més útils que les altres.
- Per a un observador situat fora d'un forat negre la funció d'ona dins d'ell és desconeguda i no podria calcular la funció d'ona exterior a través de l'evolució quàntica. És, però, això cert? Amb la teoria de les p-branes es pot construir un model representatiu d'un forat negre, on la informació sobre el que cau més enllà de l'horitzó quedaria emmagatzemada en la funció d'ona de les p-branes i, en conseqüència, a partir d'ella es podria calcular la funció d'ona en instants posteriors.
- Amb la teoria M, encara en construcció, coneixem part del "paisatge" on alguna magnitud es fa petita, però no el "paisatge" complet. L'espai temps contemplat té 10 o 11 dimensions. Fins fa poc es creia que les 6 o 7 dimensions extraordinàries estarien enrotllades a escales molt petites i, aleshores, caldria construir acceleradors enormes, més grans que el sistema solar, per explorar aquestes distàncies. Sembla, però, que això no seria necessari, si la longitud de Planck fos més gran del que semblava i amb els futurs acceleradors aquelles distàncies estiguessin dins dels límits observables. Les dimensions extremes implicarien que a petites distàncies la gravitació seria molt més gran del que creïem i això permetria més fàcilment la creació de forats negres microscòpics al començ de l'univers o ara. La gran energia dels raigs còsmics permetria la creació d'aquests forats negres a l'atmosfera que es desintegrarien ràpidament en una sèrie de productes que serien la seva firma (aquesta possibilitat és ara estudiada amb els detectors de raigs còsmics a l'Argentina). Tindríem també una prova de la fugida de gravitons per les dimensions extremes, si es trobés una evidència de la violació de la conservació de l'energia en els acceleradors de partícules. Tinguem en compte, però, que amb un espai temps dinàmic la noció d'energia d'un camp gravitatori és molt difícil d'explicitar en relativitat general i la conservació global de l'energia és conflictiva. Sobre distàncies i escales de temps relativament curtes (com les que tenim en un accelerador) la conservació local de l'energia és vàlida.

- En aquesta nova visió l'univers seria una 3-brana situada en un espai superior. Amb l'excepció de la gravetat, les altres interaccions estarien restringides a la 3-brana. Amb una 3-brana "ombra" o amb una curvatura especial de les dimensions extraordinàries com en una "sella de cavall" (model de *Randall-Sundrum*), la gravitació a grans distàncies es comportaria de la forma convencional i les òrbites planetàries serien estables, mentre que a petites distàncies la gravitació augmentaria més ràpidament del que pensàvem amb les distàncies cada vegada menors. Això donaria lloc a una longitud de Planck superior al valor conegut. La matèria fosca podria ser deguda a partícules molt lleugeres, com per exemple axions o neutrinos, a partícules pesants i amb feble interacció (les WIMP, com el neutralino), ..., o a la massa de la 3-brana "ombra". Amb el model de la brana "ombra" les ones gravitacionals es reflectirien, però en el model Randall-Sundrum s'escaparien i s'endurien energia. La radiació per les dimensions addicionals d'ones gravitatòries d'un forat negre convencional seria petita en un començament, però a mesura que el forat disminuís creixeria i nosaltres ho interpretariem com una radiació *fosca* deduïda per la pèrdua de la massa del forat. El principi d'incertesa permetria la creació de múltiples 3-branes dins del buit de més dimensions (multivers).
- Tant a l'origen de l'univers com a la singularitat d'un forat negre trobem en un petit espai molta matèria comprimida. Això fa necessari resoldre el conflicte entre física quàntica i relativitat general (per exemple, la presència de probabilitats de valor infinit).
- L'equació de l'univers de Wheeler-De Witt apareix quan apliquem a la relativitat general el procediment emprat a quantificar teories no gravitatòries clàssiques. En aquesta equació no apareix el temps i l'evolució temporal és substituïda per l'originada a través d'una característica física de l'univers (com la seva densitat) que esperem que canviï d'una manera regular. No sabem si aquesta absència d'una variable temporal explícita està ocultant quelcom profund (el temps com un concepte emergent?) o no. Dins de l'horitzó d'un forat negre el temps i l'espai s'intercanvien i podríem fer-nos preguntes semblants.
- Les elevades fluctuacions de l'espai ocasionades per la incertesa quàntica dels gravitons *puntuals* és la causa fonamental del divorci entre la relativitat general i la física quàntica. Amb la teoria de cordes els gravitons no són puntuals i no cal anar més enllà de la longitud de Planck en les incerteses quàntiques, amb la qual cosa les fluctuacions espacials disminueixen i poden incorporar-se raonablement a la relativitat general. Aleshores, l'espai i el temps tindrien límits en les seves divisions i més enllà de les escales de Planck hi hauria quelcom més fonamental on ells tindrien el seu origen.
- Com pot donar lloc la vibració d'una corda a una massa zero, com la del gravitó? La raó està en les vibracions quàntiques ocasionades pel principi

d'incertesa que s'hi superposen amb una energia negativa a l'energia positiva de vibració "normal" de la corda i, en conseqüència, la massa final pot esdevenir nul·la.

- Les dimensions addicionals en la teoria de cordes apareixen perquè es verifiqui una equació de lligam entre les pautes vibracionals de les cordes, mentre que les estructures de Calabi-Yau de les dimensions extres són necessàries per donar lloc a les vibracions específiques de les partícules conegudes, les famílies, etc. Les masses de la primera generació deixarien de ser nul·les a través de les interaccions amb el Higgs, que també seria una corda.
- La teoria M, la segona revolució de les supercordes amb Witten, ve a indicar que les cinc versions de cordes són com cinc traduccions d'un text mestre *encara per descobrir*.
- Cinc dimensions de Kaluza-Klein=unificació de gravitació i electromagnetisme. Deu dimensions de teoria de cordes=unificació de gravitació general i física quàntica. Onze dimensions de teoria M=unificació de les cinc teories de cordes.
- Les cinc teories de cordes resultaren ser aproximacions que ignoraren més dimensions i objectes més enllà de les cordes. D'aquí sorgeixen la teoria M i les branques.
- La intensitat de la interacció del gravitó creix amb la longitud de la seva corda tancada. La corda del gravitó hauria de tenir, doncs, una longitud molt petita de l'ordre d'algunes longituds de Planck. Aquesta limitació no existeix en les cordes, en general, que podrien ser enormes. En un començament si augmentem l'energia d'una corda creixeran les seves vibracions, però després ho farà la seva longitud: en el període molt energètic immediatament després del Big Bang podrien haver sorgit així les cordes còsmiques. Aquest creixement de la longitud de la corda amb la seva energia fa que no es tinguin en compte distàncies més i més petites indefinidament, la qual cosa ens allunya d'aquelles distàncies que fan incompatibles la relativitat general i la física quàntica.
- Les cordes obertes tenen els seus extrems amb una mobilitat restringida al llarg de branques. Poden estar en una sola branca o en dues, amb dimensions iguals o no. *Segons el comportament de les cordes podem arribar a la comprensió de les seves branques*.
- Amb l'excepció del gravitó, la resta de partícules són cordes obertes que només es poden moure al llarg de la 3-branca del nostre univers. No "veuríem", doncs, la resta de dimensions addicionals i, per tant, no "caldria" que aquestes fossin "tan" petites. Tanmateix, el fet que a molt llargues distàncies hi hagi la dependència de  $1/r^2$ , fa que les dimensions addicionals hagin d'estar molt enrotllades i no puguin tenir grandàries massa grans ( $\approx 1$  mm). Totes les dimensions, però, afectarien l'acció gravitacional (d'acord amb el pensament d'Einstein) i les cordes tancades del gravitons podrien moure's al llarg de totes elles. Aleshores, la

interacció gravitatòria podria ser molt forta i només ens semblaria feble perquè es dispersaria en les altres dimensions. Per aquesta raó la longitud de les cordes podria ser molt més gran del que pensàvem. Amb cordes més grans disminuiria la seva rigidesa, podrien vibrar més fàcilment i la seva energia seria menor. Aleshores, les noves partícules associades podrien crear-se en un futur no tan llunyà com pensàvem. El creixement de la interacció gravitatòria a curtes distàncies facilitaria també la creació de miniforats negres en el futur, detectables a través de les partícules que apareixerien per la seva desintegració. Una hipotètica no conservació de l'energia permetria trobar una explicació a través de la fugida de gravitons per les dimensions addicionals.

- En la teoria cíclica, (*Big Splat*) de *Steinhardt* i *Turok*, de les 7 dimensions addicionals una no està enrotllada, sinó que és lineal i separa els dos universos 3-brana paral·lels que successivament xoquen, s'allunyen (durant un bilió d'anys), s'apropen, xoquen novament i repeteixen el cicle. Hi apareixen moltes de les característiques del model inflacionari. Les diferències en la producció d'ones gravitatòries primordials entre els models inflacionari i cíclic (el model cíclic, degut al temps extraordinàriament llarg de tot el procés que suavitza l'evolució, no en té i en certes realitzacions inflacionàries tampoc n'hi ha) podrien en un futur fer-nos decantar per un o altre model. Cap dels dos models, però, dona explicacions sobre les condicions a l'origen.
- El problema d'un univers etern està que el temps de vida de cada cicle és més gran que el de l'anterior. Això és degut que la relació (energia de radiació)/massa va augmentant a causa de la radiació estelar (amb l'augment entròpic de l'univers) i la teoria de la relativitat general prediu que amb predomini de la radiació creixent també augmenta el temps del cicle. Degut a la llei de creixement entròpic, si anem cap enrere tindrem valors inicials entròpics i vida cíclica cada cop més petits, la qual cosa implicaria l'existència d'un començament.
- Una constant d'acoblament,  $g$ , és un nombre que determina la força d'una interacció. En la interacció electromagnètica la càrrega d'una partícula és una constant d'acoblament. En la teoria de cordes la constant d'acoblament determina la importància de les fluctuacions quàntiques en la sèrie dels diagrames pertorbatius. Si  $g < 1$  els successius elements pertorbatius no són *essencialment* significatius. Amb  $g \geq 1$  ocorre el contrari. En les cinc versions de la teoria de supercordes (amb diferents constants d'acoblament i formes i grandàries de les dimensions addicionals) es treballà inicialment amb acoblament feble, *la qual cosa amagà una dimensió addicional i les branques més enllà de les cordes*. A hores d'ara no se sap el valor que pren  $g$  en les diferents teories de cordes.
- En cadascuna de les cinc versions apareixen aspectes també diferents (dues treballen amb corbes obertes i tres amb cordes tancades). Tanmateix, els estats BPS (amb les sigles en honor dels seus descobridors) estan fixats per

la supersimetria i són els mateixos en totes les versions independentment de la constant d'acoblament (els estats BPS tenen una massa mínima per una càrrega càrrega elèctrica concreta). Per aquesta raó, diem que els estats BPS tenen massa i càrrega elèctrica no pertorbatives.

- A baixes energies es comprovà que diferents teories de supercordes coincidien amb altres dins de la supergravetat de 11 dimensions. On estava la dimensió addicional que faltava en les cordes ? Havia estat oculta en les aproximacions utilitzades!
- A partir dels estats “no pertorbatius” BPS Witten trobà diferents dualitats entre algunes de les cinc versions de cordes. Això el portà a una persuasiva evidència (i més tard a la comprovació amb Polchinsky) de l'equivalència *total* entre el comportament de la teoria Tipus I amb acoblament fort i l'Heteròtica O amb acoblament feble, i a l'inrevés. La teoria Tipus IIB era dual d'ella mateixa. Més endavant es comprovà que la teoria Tipus IIA amb una dimensió circular de radi R era equivalent a la tipus IIB amb radi 1/R. El mateix podem dir entre les teories Heteròtica O i Heteròtica E.
- A través de les propietats dels estats BPS hom troba que poden existir una dimensió de més i això ens porta raonablement a fer *extensiu* aquest descobriment dins de la teoria M.
- La teoria M, no descoberta encara, abraçaria les cinc teories de cordes més la supergravetat. Ella, potser, podria donar una explicació de la fletxa del temps en preveure el baix contingut entròpic a l'inici de l'univers.
- En la teoria de cordes trobem solucions aproximades d'equacions *aproximades*. A hores d'ara hi ha només tímids indicis que les cordes no siguin entitats fonamentals.
- Totes les partícules sorgeixen a partir de modes específics de vibració d'una mateixa corda i estan representades, a partir de la quantificació corresponent, pels vectors d'un espai de Hilbert amb valors propis concrets dels diferents operadors. Així, per exemple, apareix una partícula d'spin 2 : el gravitó. A hores d'ara no s'ha pogut trobar tot l'espectre de partícules conegudes, però a priori sembla que seríem capaços de fer-ho.
- A partir de la feble interacció gravitatòria hom dedueix que la tensió de la corda corresponent ha de ser elevadíssima i la seva longitud molt petita. Una corda molt tensa necessita molta energia per poder vibrar. Finalment, l'energia d'un mode de vibració d'una corda creix amb l'amplitud, la freqüència i la tensió. Amb una tensió tan gran les partícules conegudes tindrien masses enormes. Tanmateix, l'energia negativa de les fluctuacions quàntiques de la corda compensarien aquesta energia. En el cas del gravitó la compensació seria total. Els modes de vibració superiors donarien lloc a partícules de gran massa que ultrapassarien la massa de Planck; en el Big Bang es trobaria l'elevada energia necessària per produir-les i a hores d'ara podria haver-hi algunes relíquies observables.
- Amb la supersimetria hi ha la invariància sota les transformacions internes i d'una extensió del grup de Lorentz-Poincaré. A més dels generadors

convencionals hi trobem  $N$  generadors  $Q_N$  i els seus operadors adjunts  $Q_N^+$  (les càrregues supersimètriques amb característiques espinorials). Entre tots els generadors trobem les relacions de commutació de L-P i, a més, les relacions de commutació-anticommutació noves (les expressions d'anticommutació permeten trobar les propietats d'una àlgebra graduada de Grassman). Els  $Q_N$  i els  $Q_N^+$  transformen entre si els diferents fermions  $\leftrightarrow$  bosons i guarden un lligam amb els generadors de Lorentz-Poincaré: així si transformem successivament un fermió en un bosó i aquest bosó en un fermió tenim finalment un fermió que es *trasllada* al llarg de l'*espai-temps*. Tot això facilita la introducció quàntica del gravitó després de transformar una invariància gauge global en local. Amb la supersimetria s'afegeix una simetria davant del canvi de les coordenades internes de l'espín i dins de cada multiplet hi ha bosons i fermions amb la mateixa massa. A hores d'ara no s'han trobat els companys supersimètrics (selectró, fotí,...) la qual cosa sembla indicar que tindrien una massa enorme després del trencament de la supersimetria.

- En la primera formulació de la teoria de cordes només hi havia bosons i, a més, contemplava takions amb massa imaginària. Amb la introducció de la supersimetria tots aquests problemes desaparegueren. La supersimetria ajuda també a una unificació més fina de les tres interaccions no gravitatòries per a altes energies. En la supersimetria trobem, apart dels operadors associats a les coordenades convencionals o les invariàncies gauge altres operadors ( $Q_N$  i  $Q_N^+$ ) relacionats amb coordenades internes, com l'espín. La supersimetria, però, pot introduir-se de cinc maneres diferents i dona lloc a cinc versions de la teoria de cordes: tipus I, IIA i IIB, i Heteròtica tipus O i E.
- En la teoria de cordes l'operador espín apareix a través de la invariància sota transformacions relacionades amb les coordenades d'espín que figuren a l'acció.
- La unió de la relativitat general i la física quàntica portava a càlculs de probabilitat amb valors infinits. Amb la teoria de cordes això canvià, però apareixien valors negatius de les probabilitats. Finalment, amb les dimensions addicionals es pogueren cancel·lar aquests problemes, a causa de l'increment de les direccions de vibració de les cordes.
- La teoria de cordes pot ajudar, a partir d'elements no observables, a deduir i comprovar d'altres coneguts per nosaltres (*postdicció*). En aquest sentit la topologia de l'espai de Calabi-Yau pot explicar les masses de les diferents partícules (fermions i bosons) a partir de les pautes vibracionals permeses i també l'existència de les tres famílies fermiòniques. El nombre de famílies que apareixen en la zona de baixes energies depèn del nombre d'Euler de l'espai de Calabi-Yau, relacionat amb el nombre de 'forats' que apareixen en aquestes dimensions addicionals. Tanmateix, poden haver-hi molts tipus d'espais de Calabi-Yau i cal anar sortint de les solucions aproximades o bé

anar temptejant. En tots els casos hi apareix la partícula d'espín 2 i massa nul·la (el gravitó).

- Entre les *prediccions* de la teoria de cordes hi trobem la presència de partícules amb el caràcter quiral intrínsec (com els neutrins i antineutrins), els companys supersimètrics (comprovaríem la supersimetria) i les partícules amb càrregues elèctriques fraccionàries ( $1/5$ ,  $1/11$ ,...) que ocorren en certes configuracions de l'espai de Calabi-Yau. Ambdues podrien no haver estat trobades a causa de la seva gran massa. Aquests descobriments representarien un gran avenç: les cordes còsmiques, certs processos prohibits en el Model Estàndar, com la desintegració del protó; nous tipus d'interaccions amb nous tipus de càrregues; candidats a la matèria fosca; i la solució del problema cosmològic d'una constant cosmològica molt més petita que la predita per les fluctuacions quàntiques del buit. De la mateixa manera que les prediccions dels àtoms, dels neutrins i dels forats negres foren més tard confirmades, també ho podrien ser més endavant les estranyes previsions de la teoria de cordes.
- La geometria riemanniana no té limitació per fer que les distàncies siguin més i més petites, però amb la teoria de cordes això no és cert i cal tenir en compte la *geometria quàntica*. Suposem ara que tenim un espai cilíndric de radi  $R$  amb cordes enrotllades. L'energia fonamental d'una corda enrotllada  $k$  vegades serà proporcional a  $kR$ , mentre que l'energia vibracional *que no faci variar la seva forma* ho serà, d'acord amb el principi d'incertesa, a  $h/R$ , on  $h$  és el nombre vibracional. Per altra banda es comprova que l'energia vibracional *normal* que varia la forma de la corda no depèn del radi  $R$ . És fàcil veure, doncs, que l'energia total per a dos radis  $R_E$  i  $1/R_E$  és la mateixa intercanviant entre si els nombres vibracional i d'enrotllaments. Si tot això es generalitzable podríem tenir propietats físiques idèntiques en marges molt diferents de distàncies. A partir d'aquí es comprova que el que sembla una contracció de l'univers amb un radi inferior al radi de Plank és en realitat un univers en expansió amb un radi superior al radi de Planck i que el que ocorre certament és que l'univers en contracció "rebota" entorn del radi de Planck, tot evitant la singularitat i començant una nova expansió. Quelcom de semblant esdevindria en el Big Bang.
- En la teoria de cordes trobem una simetria, que anomenem "especular, segons la qual la física amb un espai de Calabi-Yau concret és en tot equivalent a la que tenim amb un espai de Calabi-Yau simètric o "especular". Degut a això, càlculs complicats amb un espai de Calabi-Yau poden esdevenir més senzills dins del seu espai simètric. Tot això, en definitiva, ens fa intuir que l'espai temps no és una propietat fonamental del món, sinó quelcom emergent des d'una realitat més profunda.
- L'estudi de l'evolució possible d'un espai de Calabi-Yau que és especular d'un altre amb *trencaments* que es reparen a ells mateixos ens porta raonablement a la conclusió que la teoria de cordes permet aquest tipus



traumàtic d'evolució en qualsevol de les dimensions espacials. Això podia haver ocorregut en el passat, on les masses de les partícules canviaven i eren molt diferents de les actuals, i podria estar ocorrent ara. Tanmateix, la relativa estabilitat de les masses observades ens faria pensar que aquesta evolució actual seria molt i molt suau.

- En el límit d'un forat negre amb masses cada cop més petites trobem, quan estudiem l'evolució corresponent de l'espai de Calabi-Yau, una partícula. En aquest sentit, un forat negre microscòpic caracteritzat per la massa, la càrrega i el seu moment angular seria una partícula concreta amb aquestes propietats. Això ens permet relacionar aspectes aparentment tan diferents com una partícula i un forat negre.
- De la mateixa manera que una “pell” bidimensional pot cobrir una esfera bidimensional, podem tenir una brana tridimensional que sigui la “pell” d'una esfera tridimensional. Aquesta brana té un comportament gravitatori igual al d'un forat negre *extremal*. Els forats negres extremals tenen, com els estats BPS, una massa mínima per a una càrrega elèctrica concreta.
- Es poden formar forats negres a partir d'una col·lecció de branques BPS, que tinguin un cert nombre de dimensions i que es vagin concentrant de forma adient, la qual cosa permet el càlcul del nombre de microestats compatibles amb una configuració macroscòpica concreta i, en conseqüència, de l'entropia del forat.
- En un principi l'univers era com una petita llavor amb totes les seves dimensions de l'ordre de la longitud de Planck simètricament corbades. Després d'un temps de l'ordre del temps de Planck tres dimensions s'expandiren, mentre les altres sis continuaren corbades (*compactificació*). Per què? Quan una dimensió està corbada les cordes poden estar enrotllades tot impedit la seva expansió. Quan una corda enrotllada en un sentit xoca amb la seva anticorda enrotllada en sentit contrari es produeix una corda no enrotllada, la qual cosa permet l'expansió d'aquella dimensió. Amb un espai-temps de 4 o menys dimensions espaciotemporals dues cordes de 2 dimensions espaciotemporals ( $2+2=4$ ) poden trobar-se fàcilment (amb 5 o més dimensions la probabilitat de xoc és molt minsa) [pensem, per exemple, que dues partícules puntuals d'1 dimensió espaciotemporal es poden trobar fàcilment en un espai de 2 dimensions espaciotemporals ( $1+1=2$ )]. Les fluctuacions quàntiques al començ de l'univers feren que tres dimensions espacials tinguessin un creixement superior al de les altres sis que va permetre molts dels xocs esmentats i la seva expansió creixent. Les altres dimensions no pogueren seguir després aquest ritme tan alt d'expansió perquè l'energia de les cordes enrotllades creixeria molt amb l'elevada longitud de la seva dimensió corbada.
- Els grans reptes del futur: a) Trobar el principi que fonamenti la teoria de cordes. b) Trobar quelcom previ a l'espai-temps del qual aquest pugui emergir. c) Trobar una reformulació de la física quàntica que eviti la quantificació d'un model clàssic. d) Tenim amb la teoria de cordes moltes

questions resoltes o *postdites* com la unió entre la física quàntica i la relativitat general; el model estàndard; i l'absència de paràmetres ajustables; e) la supersimetria amb les característiques precises dels companys supersimètrics seria la gran *predicció* que caldria confirmar; f) és la natura essencialment gödeliana o no?

- Tot sembla indicar que l'espai-temps no és una realitat fonamental, sinó derivada: podria ser una mitjana quàntica suavitzada; les equivalències físiques de teories de cordes amb geometries molt diferents ens indicaria que aquestes no serien essencials; el valor de l'entropia d'un forat negre implicaria una quantificació de la seva superfície.
- D'acord amb el valor de la informació d'un forat negre, la informació de tot conjunt d'esdeveniments podria emmagatzemar-se a la seva frontera immediata o, *també*, a la frontera de qualsevol conjunt d'esdeveniments més ampli. L'anterior implicaria, *potser*, que la informació de tot l'univers es trobés emmagatzemada a tot l'espai i, anàlogament al que passaria amb l'evaporació d'un forat negre, aquesta informació podria actuar sobre els esdeveniments posteriors. Aleshores, l'evolució seria contemplada a través de l'holomoviment entre el nostre món i el contingut informatiu hologràfic. La teoria M ens porta a la possible existència d'un univers hologràfic (Maldacena).
- Una fotografia convencional es veu plana perquè només registra la intensitat de la llum. La figura d'interferència d'un holograma depèn de les intensitats de la llum, però també de les fases que codifiquen la tridimensionalitat.
- La teoria de cordes parteix de l'espai-temps on les cordes vibren i, per tant, no té *independència de fons*. Una formulació amb independència de fons, *potser*, podria partir de les 0-branes, que es comporten de forma diferent a les partícules puntuals, i d'aquí es podrien derivar la resta de p-branes i d'elles l'espai-temps.
- La teoria de llaços és una teoria amb independència de fons en la qual l'espai-temps de la relativitat general és una realitat derivada, però que apareix amb més dificultats que en la teoria de cordes.
- En una formulació amb independència de fons en un principi només importarien les relacions (Leibnitz, Mach), però a mesura que els ingredients de la teoria (cordes, branes llaços, ...) donessin lloc a l'espai-temps aquest seria "quelcom" (Newton, Einstein).
- Abans del desacoblament de la matèria i la radiació l'univers ja tenia una grandària considerable, fonamentalment deguda a la inflació. No rebrem mai la llum existent abans d'aquest moment de fa uns 13.400 milions d'anys (només podem obtenir la informació neutrínica i de les ones gravitacionals primordials). Des d'aleshores ella ha recorregut uns 40.000 milions d'anys-llum, a causa de l'expansió de l'univers. Avui, doncs, observem el fons de radiació primordial aproximadament isòtropa emesa des de llocs que avui estan a una distància d'uns 80.000 milions d'anys

llum, superior a l'horitzó. Amb un tipus d'expansió retardada la possibilitat de comunicació entre aquestes zones augmenta cap al futur, però *disminueix cap al passat!* Amb la inflació ocorre el contrari: la possibilitat de comunicació entre les zones disminueix cap al futur, però *augmenta cap al passat*.

- La presència d'una constant cosmològica adient es manifesta com un buit amb energia i tensió. La pressió convencional actua gravitacionalment i la tensió actua com una pressió negativa antigravitacionalment. Aquest efecte, aparentment paradoxal, es dedueix de les equacions de la relativitat general. Les energies dels buits corresponents a la unificació electrofeble ( $10^{19}$  tones/cm<sup>3</sup>) i, més encara, a la Gran Unificació ( $10^{48}$  tones/cm<sup>3</sup>) són enormes. Anàlogament, l'energia del fals buit inflacionari, sorgit d'una minsa llavor energètica, pogué esdevenir immensa i donar lloc més tard a la matèria-energia del nostre univers. Comparativament, l'energia que conté el nostre buit actual és molt petita (la massa de tres protons /m<sup>3</sup>  $\approx 10^{-29}$  g/cm<sup>3</sup>).
- La forma de l'inflató amb un descens suau inicial permet el temps necessari perquè l'inflació es pugui desenvolupar plenament (en les teories més senzilles de la interacció electrofeble o de Gran Unificació el descens és més brusc, però en algunes de les supersimètriques, com a les supercordes, es pot obtenir-ne un descens molt més gradual). Per altra banda, això fa possible que la conversió final del fals buit en el buit vertader sigui suficientment ràpida perquè les bombolles d'aquest s'uneixin i provoquin la conversió energètica *global* en la matèria. El descens del camp no ocorre al mateix temps en tot l'espai, a causa de les fluctuacions quàntiques. Aleshores, hi haurà llocs en què les bombolles del buit normal s'hauran format abans i, a causa de l'expansió, tindran una densitat material més petita que la d'altres regions en què la inflació hagi durat més temps abans del descens final amb l'aparició de la matèria. Aquestes irregularitats actuaran com a llavors d'estructures més grans i en la formació de les hipotètiques cordes còsmiques.
- El fals buit podria abraçar un únic univers o aparèixer limitat dins d'un espai infinit. En aquest darrer cas, si les seves dimensions són inferiors a un valor crític el buit col·lapsarà. En cas contrari, l'inflació serà possible i es crearà un univers al si de l'espai infinit.
- Per una banda hi ha el procés de conversió del buit fals en el buit vertader amb el resultat final d'un univers material (Big Bang) i per l'altra el creixement del buit fals a causa de la inflació. Si aquest darrer procés és superior a l'altre, continuament apareixerà nou espai buit fals que podrà donar lloc a altres universos-illa totalment desconnectats en un procés que anomenarem la *inflació eterna*. L'univers d'universos-illa tindria un aspecte semblant al d'un fractal.
- En la *inflació caòtica* de Linde no és necessari que l'estat inicial estigui dalt del tossal del buit fals. El procés pot començar en qualsevol punt del

pendent suficientment elevat perquè durant el descens hi hagi el temps suficient per a la inflació. Aleshores, l'aparició contínua de nou espai buit fals en situació inicial caòtica a causa de les fluctuacions quàntiques produeix també la inflació eterna. La part visible del nostre món és una petita part de l'univers-illa immers a l'espai inflacionari del fals buit. Les fronteres del nostre univers-illa avancen contínuament cap al fons del fals buit mitjançant nous Big Bang amb la descomposició del fals buit en contacte amb la seva frontera. En la part central de l'univers-illa els estels van morint, mentre als seus extrems neixen estels de nova fornada a partir de nous Big Bang que hi apareixen. Tots aquests Big Bang successius estan separats per intervals espacials i, per tant, podrien ser simultanis per a observadors concrets. Des de fora l'oceà de fals buit està poblat per universos-illa finits que creixen i que neixen contínuament al llarg d'un temps infinit, però des de dins el nostre univers-illa seria infinit des del principi i evolucionaria amb el temps des d'un Big Bang únic.

- El caràcter infinit de l'univers-illa des d'un punt de vista intern fa que aquest es pugui dividir en infinites regions amb un radi de 40.000 milions d'anys llum amb la mateixa grandària d'allò que nosaltres considerem observable. Aquestes regions essencialment incomunicades contindrien diferents històries a causa de les fluctuacions quàntiques ocorregudes quan eren molt més petites durant la seva formació després del Big Bang. A partir de la *informació finita* continguda en cada regió, d'acord amb la fórmula termodinàmica de Bekenstein, i de l'*aleatorietat* en la formació de cada regió s'arriba fàcilment a la conclusió que totes les històries possibles succeeixen en algun lloc i es repeteixen infinites vegades al llarg de l'univers illa. En general, el valor total de la densitat de l'energia de buit (el que determina la constant cosmològica) dependrà de la densitat d'energia dels camps escalars, com l'inflató o d'altres que pugui haver-hi, i de les densitats d'energia del buit de fermions i bosons sorgides a causa del principi d'incertesa. Les fluctuacions quàntiques del camp escalar permetria trobar regions on el principi antròpic pogués manifestar-se. En les equacions de la teoria de cordes no hi figuren paràmetres regulables, però sí en les seves solucions: el principi antròpic ressuscita a través dels múltiples buits i solucions que la teoria contempla.
- La teoria dels molts mons d'Everett no té res a veure amb l'anterior. En el nostre cas els molts mons d'Everett seria un *conjunt* d'universos paral·lels eternament inflacionaris amb infinites regions que contindrien un nombre finit d'històries repetides infinites vegades. Les esmentades regions amb les seves històries serien *reals*, pertanyerien al *mateix espai i temps* i amb suficient temps potser serien *accessibles*. Amb l'excepció, potser, de la primera afirmació, la resta de tot l'anterior és absent en els molts mons d'Everett.
- Tenim diferents opcions per al multivers : a) una multitud de regions que pertanyen al mateix univers ; b) Un conjunt d'universos separats sense cap

relació; c) Una combinació de a) i b) amb molts universos que continguin diferents regions.

- Té l'univers un començ o ha existit des de sempre? Vilenkin s'imagina un viatger que es mou per inèrcia al llarg de l'univers i va trobant diferents observadors sincronitzats a les galàxies d'un univers en expansió. Les velocitats successives,  $v_i, v_{i+1}, \dots$  del viatger mesurades pels observadors  $O_i, O_{i+1}, \dots$  verificaran  $v_i > v_{i+1} > \dots$  a causa de la velocitat d'expansió de  $O_{i+1}$  observada per  $O_i$ . En conseqüència, anant cap al passat els observadors trobaran unes velocitats del viatger cada cop més grans. En el supòsit d'un univers sense principi aquestes velocitats s'anirien acostant en el límit a la velocitat de la llum. Podria ocórrer que el temps viscut pel viatger fos també infinit. Tanmateix, es *demostra* que el rellotge del viatger marcarà un temps finit a causa que en apropar-se a la velocitat de la llum el pas del seu temps es va alentint. En no arribar el viatger a assolir plenament la velocitat de la llum, es *comprova* que el temps de l'univers mesurat pels observadors  $O_k$  no pot ser infinit. En conseqüència, un univers amb una expansió mínima, com és el cas de l'univers inflacionari, té una edat finita. En el cas de l'univers cíclic de *Steinhardt* i *Turok* aquell augmenta de volum en cada cicle, té globalment una expansió i s'arriba a la mateixa conclusió anterior.
- Vilenkin estudia la possibilitat que un petit univers eviti el col·lapse i pugui arribar a la inflació. El col·lapse ans esmentat ocorreria obligatòriament només en un context clàssic, però la física quàntica permet per efecte túnel passar d'aquell univers abans del col·lapse a un univers De Sitter inflacionari. Vilenkin demostrà que la probabilitat de l'efecte túnel no dependria de les dimensions de l'univers inicial i en el límit quan aquestes dimensions fossin zero apareixeria l'univers De Sitter des del no-res. No caldria el buit primordial que donés lloc a un univers a partir d'una fluctuació quàntica i hi hauria una autèntica creació que no necessitaria de res previ. De res? Caldrien les lleis que el fessin possible!
- La força gravitacional és un efecte de la curvatura espaciotemporal *local*. El canvi de curvatura local degut als moviments de les masses no és instantani, sinó que es propaga amb la velocitat de la llum.
- Els col·lapses atòmics i gravitacionals s'eviten amb l'aparició quàntica de forces *antagonistes*. Així, un electró que orbita dins d'un àtom rep, degut a la indeterminació quàntica de la seva posició, forces *simultànies* oposades en els diferents llocs de la seva òrbita que eviten el col·lapse que la radiació clàssica electromagnètica provocaria.
- L'*estranya* formulació quàntica fou possible gràcies a la gran quantitat de dades experimentals prèvies (espectres atòmics). Amb la relativitat general, tret d'aspectes com l'òrbita de Mercuri, passa en certa mesura el contrari: la teoria fa les previsions experimentals que caldrà comprovar més tard.

- Les funcions d'ona semiclassicals descriuen objectes macroscòpics, però sense ser perceptibles els estranys fenòmens quàntics. Variant la forma de la funció d'ona podem a través de l'equació de Schrödinger introduir els canvis en les equacions clàssiques corresponents. Aleshores podem trobar l'evolució del màxim de l'ona representatiu del sistema clàssic. Es tracta de les equacions *efectives* on apareixen forces *efectives* que expliquen l'evolució del màxim de l'ona (si  $\hbar \rightarrow 0$ , la força efectiva desapareix).
- Els canvis de la forma de la funció d'ona expliquen l'aparició de noves partícules. L'estructura de l'espai-temps origina aquests canvis de la funció d'ona. Així, l'acceleració de l'univers inflacionari o el camp gravitatòri a l'horitzó d'un forat negre poden donar lloc a la creació de matèria.
- Amb la radiació del cos negre la quantificació de l'energia evita una radiació energètica infinita a causa de les freqüències elevades. A altes freqüències, longituds d'ona petites o petites distàncies l'energia, i per tant la massa, es comporta d'una forma nova. El comportament diferent de la massa a petites distàncies donaria lloc a un espai-temps distint i a una gravitació, no únicament atractiva, que originaria forces antagonistes que evitarien la singularitat.
- La densitat de Planck corresponent a una massa de Planck continguda en un cub d'una aresta amb la longitud de Planck és enorme. Una densitat de l'univers de l'ordre de la densitat de Planck necessitaria probablement d'una teoria de la gravitació quàntica, ja que en aquesta densitat estan implicats  $c$ ,  $\hbar$  i  $G$ .
- Amb la teoria de Wheeler-De Witt es quantifica la relativitat general i el temps, que ja havia perdut la seva importància en la relativitat general, desapareix en l'evolució de l'univers. En realitat el temps no és necessari en la nostra vida i només sorgeix quan comparem aspectes diferents. Ell provindria d'un fons no temporal i únicament apareixeria per comoditat. En nosaltres, doncs, el temps naixeria en separar-nos de la resta del món.
- La funció d'ona de l'univers conté en el seu si tota la gamma de possibles manifestacions futures. Un *mínim* col·lapse d'una d'aquestes possibilitats en la ment d'algú aportaria un *coneixement* que permetria modelar el futur encara *obert*.
- En la teoria quàntica de bucles aquests configuren l'espai i el nombre de bucles dóna lloc a una quantificació espacial. En l'evolució de l'univers per a cada volum hi ha dos estats diferents corresponents a la distinta orientació de l'espai, semblantment a la superfície d'un globus que es pogués inflar per dos costats oposats. Si desapareixen els bucles obtenim un sol estat corresponent a un buit total molt superior al buit convencional: és el mateix espai el que desapareix. En l'evolució apareixen forces antagonistes i des d'abans del Big Bang un univers previ dóna lloc després a un altre amb una orientació espacial oposada, tot evitant la singularitat. Les magnituds fluctuants impedeixen la singularitat, però l'evolució posterior és independent d'elles. Es tracta de la *manca de memòria*

*còsmica*, afavorida per la relativitat general en la qual no hi ha evolució caòtica.

- Sembla que l'espai és pla, però no ho és pas l'espai-temps, perquè del contrari no hi hauria gravitació. L'espai és pla a grans escales, però no pas localment.
- Amb una constant cosmològica diferent de zero no tenim una relació exacta entre la geometria de l'univers i la seva evolució: podrien haver-hi universos espacialment infinits amb un Big Crunch o models finits que s'expandessin indefinidament.
- En un començament no es podien formar galàxies a causa de la pressió de la radiació que destruiria les estructures.
- En les supernoves la coneixem la seva energia radiada que depèn únicament de la distribució dels colors que conté la llum que rebem. A partir d'aquest coneixement i de la seva brillantor aparent podem calcular la seva distància a la Terra.
- La fluctuació quàntica d'energia  $+i -$  pot no anar seguida de la seva recombinació a causa de la presència de camps gravitacionals intensos a l'horitzó d'un forat negre, de l'expansió del propi espai inflacionari o de la presència d'un camp elèctric elevat.
- La gravitació quàntica dóna lloc a forces de repulsió a petites distàncies. L'expansió accelerada, probablement, respon a causes diferents.
- En la teoria quàntica de bucles l'estructura cristal·lina de l'espai dóna lloc a una velocitat variable de la llum, segons la seva freqüència, com ocorre en la transmissió de la llum dins de la matèria.
- A la vora de l'horitzó d'un forat negre no s'aplica la gravitació quàntica, sinó la semiquàntica (física quàntica amb una mètrica gravitacional). Només en les etapes finals de vida d'un forat gairebé evaporat caldrà la gravitació quàntica degut a la poca grandària de l'horitzó.
- En un forat negre no podem captar la seva radiació perquè la radiació còsmica de fons és molt superior. Només amb forats negres petits o en etapes posteriors de l'univers la radiació còsmica de fons seria inferior a la de radiació del forat i podríem contemplar la seva evaporació.
- En els planetes la seva estabilitat és possible gràcies a les forces antagonistes elèctriques front la gravitació. Dins del marc de la relativitat general, però, a partir d'un límit de la pressió interior les forces antagonistes no poden impedir el col·lapse final.
- Els forats negres amb rotació poden anar disminuint la seva energia de rotació i comunicar-la a partícules properes amb un rendiment energètic en relació a la massa del forat molt superior al que s'obtindria per fissió nuclear.
- Una singularitat nua d'un forat negre permetria enviar informació completament desconeguda a l'exterior (en ella les lleis físiques s'esfondren) i perdríem tota possibilitat de predicció.

- En la representació conforme de Penrose de l'espai-temps d'un forat negre podem reflectir un espai-temps infinit en un domini finit [en un forat simètric de Schwarzschild les dues coordenades (radi i temps) es poden substituir per les de Kruskal i aleshores tenim una representació conforme de Kruskal]. En la representació de Penrose la singularitat no és una línia temporal (amb l'espai fix i el temps variable) sinó espacial (amb el temps fix i l'espai variable).
- Els efectes gravitacionals d'un forat negre haurien d'ésser causats per l'emissió de gravitons. Com podrien, però, sortir del forat? Potser degut a un procés vora de l'horitzó anàleg al de Hawking?
- En la teoria quàntica de bucles la singularitat pot ser la porta d'entrada per crear un nou univers. El nostre univers podria haver sorgit així i d'ell apareixerien també nous universos. Si les característiques dels nous universos fossin lleugerament diferents hi podria haver una mena d'evolució on només s'anirien reproduint aquells que tinguessin més probabilitats de produir forats negres.  
Una altra possibilitat seria que la matèria d'un forat a través de la singularitat aparegués sobtadament en un altre lloc sense pèrdua d'informació.
- La reversibilitat evolutiva microscòpica no implica l'evolució reversible macroscòpica. Ens caldria reconstruir l'estructura microscòpica (elegida entre l'enorme conjunt de microestats corresponents a un macroestat) amb una precisió gairebé inabastable i evitar així una evolució caòtica, la qual cosa donaria lloc a una reversibilitat macroscòpica real. Només d'aquesta manera, podríem tornar a reconstruir un gerro trencat a partir d'unes propietats molt precises de les seves parts i de l'energia calorífica radiada, la qual cosa és a la pràctica impossible. Des del punt de vista manifest tenim a l'espai de les fases el conjunt de punts representants d'un mateix macroestat. Aquesta forma de dividir l'espai de les fases s'anomena de *grainy* o "*coarse graining*". En l'evolució termodinàmica el volum a l'espai de les fases es conserva a cada instant (teorema de Liouville), però el volum dels punts representatius dels successius macroestats que apareixen augmenta de forma molt desmesurada en els processos irreversibles.
- Segons Penrose, la gravitació portaria incorporada en el seu si la irreversibilitat temporal (vegeu-ne les reflexions al capítol 6, entorn del tensor de Weyl) que podria explicar, entre altres coses, la irreversibilitat quàntica que apareix entre dos col·lapses, allunyats de l'evolució unitària quàntica reversible. L'evolució unitària quàntica i el col·lapse quàntic podrien formar part d'un mateix procés gràcies a la no-linealitat gravitatòria que, per sobre d'un cert llindar en els canvis de la curvatura espaciotemporal, donaria lloc a una bifurcació corresponent al col·lapse de la funció d'ona.
- En el que segueix tindrem en compte, en general, les opinions de Joao Magueijo.



- En una teoria unificada seria desitjable que l'estat inicial de l'univers es pogués deduir de la mateixa teoria, en lloc d'incorporar-se arbitràriament.
- La teoria de l'univers inflacionari és especulativa i sense base experimental a hores d'ara.
- Les teories de velocitat variable de la llum en el buit (VSL) tenen cada vegada més adeptes. La VSL és una alternativa a la relativitat i la inflació. VSL és potser allò que falta per arribar a la gravitació quàntica. Al principi de l'univers  $c$  era molt més gran que ara. La VSL pot aportar idees a la gravitació quàntica, però la inflació no ho fa pas.
- L'astronomia estudia els arbres i la cosmologia el bosc. La primera descripció és molt més complicada.
- En relativitat existeix la conversió entre espai i temps, segons l'observador elegit.
- Einstein introduí l'any 1911 la velocitat de la llum variable. Hi desistí ben aviat, perquè el seu plantejament era erroni.
- Quan estirem una goma elàstica augmenta la seva energia i la seva massa, i hi apareix una tensió o pressió negativa. En la relativitat general si assignem una energia al buit cal que hi hagi una tensió elevada.
- L'energia del buit creix en l'expansió (com una goma), però es dilueix en augmentar el volum. La conclusió és que la seva densitat d'energia no varia.
- A distàncies petites la gravitació atractiva supera la repulsió de l'energia del buit, però a grans distàncies pot ocórrer el contrari.
- Una pressió positiva (negativa) produeix repulsió (atracció), però *gravitacionalment* l'efecte és oposat.
- Una velocitat elevada de la llum a l'origen de l'univers solucionaria el problema de l'horitzó.
- L'efecte horitzó es produeix a la Terra a causa de la seva curvatura. A l'univers hi apareix a causa de la finitud de  $c$  i de l'edat finita de l'univers en cada instant.
- En el coneixement de l'univers hi hagué aquesta història: relativitat general, univers estàtic d'Einstein, univers evolutiu de Friedman i descobriment posterior de Hubble.
- En l'expansió de l'univers pot haver-hi una velocitat de recessió aparent de les galàxies superior a la de la llum (és l'espai el que s'expandeix). La velocitat de les galàxies que se n'allunyen és, però, zero (tret de moviments aliens a l'expansió).
- La matèria curva l'espai i el temps, però podem tenir un espai tridimensional pla. En aquest cas és la forma del factor d'escala el que origina la curvatura espaciotemporal.
- En l'espai pla la desacceleració no desapareix, però en l'univers obert sí i l'expansió obté un ritme estable com si no hi hagués gravetat. L'univers

obert arriba a la mort buida de matèria i l'univers tancat a la mort del Big Crunch.

- Els tres problemes del Big Bang: l'horitzó, planitud i evolució de l'energia del buit. El descobriment de Hubble no exclou l'energia del buit.
- La major part de la matèria convencional d'una galàxia està en el gas calent que hi ha en el seu si.
- L'antimatèria es va trobar en els raigs còsmics abans que no es generés a la Terra.
- Guth explicà inicialment la inflació gràcies a l'existència primitiva d'un univers superfred (podem tenir, per exemple, aigua superfreda molt pura per sota de  $0^\circ$ , però altament inestable). Així apareixien menys monopols i una gravitació repulsiva accelerada, i desapareixien els problemes de l'horitzó i de la planitud. Amb la inflació quan anem cap enrera en el temps els horitzons s'amplien, al contrari del que passa en una expansió convencional amb gravitació atractiva. A més, amb la inflació la curvatura plana actuà com un atractor. La petita regió inicial es transformà en una regió immensament més gran que la corresponent als 45.000 anys-llum que podem veure avui. Aquesta concepció inicial de la inflació fou substituïda per la del camp inflatò, sense els errors que aquella contenia. No hi ha a hores d'ara comprovació experimental de la inflació ni de l'inflató.
- En els models més senzills Kaluza-Klein només existeix la gravetat. Les altres forces apareixen quan la gravetat s'endinsa en les dimensions addicionals.
- Podriem tenir en un espai Kaluza-Klein una velocitat de la llum constant, que es projectés sobre les tres dimensions espacials convencionals de forma quantificada i originés una VSL. Per al salt entre una velocitat quantificada i una altra caldria una gran energia. Per aquest camí, però, amb una velocitat de l'espai K-K paral·lela a l'eix del cilindre obtindríem la projecció més gran possible i, aleshores, la  $c$  creixeria quan l'energia fos més petita, altrament al que hauria d'ocórrer al començ de l'univers.
- En la relativitat general amb una velocitat de la llum variable les lleis físiques variarien amb el temps i l'energia no es conservaria: la matèria podria crear-se i destruir-se. Això es deduiria de l'equació d'Einstein, on a través de les identitats de Bianchi (que són completament universals, independentment de la relativitat general) s'arribaria a una expressió de l'energia depenent de la velocitat de la llum. Una energia del buit gran dóna lloc a una velocitat de la llum elevada (es resol el problema de l'horitzó) i en l'expansió d'un univers obert (tancat) la massa augmenta (disminueix) i la matèria es crea (destrueix) fins arribar a un univers pla, on no es crea ni destrueix matèria (es resol el problema de la planitud). Així es podria partir d'un univers obert amb massa nul·la que donaria lloc a la creació d'un univers pla a partir de l'energia del buit (es resoldria el problema de la constant cosmològica que desapareixeria pràcticament). En

disminuir la constant cosmològica i l'energia del buit la velocitat de la llum disminuiria fins al valor actual.

- Resoldre el problema de l'horitzó no vol dir resoldre el de la homogeneïtat. A partir d'un univers homogeni es poden fer càlculs pertorbatius molt pesats per veure com evoluciona la seva densitat en cada punt. Si repetim el raonament esmentat anteriorment, degut que en la relativitat general les equacions són locals una desviació de la densitat crítica en una zona es corregiria adequadament.
- La detecció observada d'una variació de la constant d'estructura fina (que depèn de  $c$ ,  $h$  i  $e$ ), pels canvis de l'estructura dels espectres rebuts des d'un indret llunyà, podria confirmar la VSL (els canvis de  $h$  i  $e$  resulten molt més complexos teòricament).
- La distinció entre gravitons i partícules amb massa en repòs nul·la (fotons,...) permetria una velocitat constant dels gravitons i una velocitat variable de la llum que no violés la relativitat.
- La velocitat de la llum podria dependre, a més del temps, del punt de l'espai. Aleshores, podria haver-hi passadissos còsmics amb una velocitat de la llum molt elevada i nosaltres podríem viatjar a una enorme velocitat (però allunyada encara de la de la llum) per l'espai en un temps petit i tornariem a la nostra època de la forma convencional sense els efectes de la dilatació del temps ni la paradoxa dels bessons.
- Quan  $c$  disminueix abruptament l'energia del buit es converteix en matèria (Big Bang),  $c$  s'estabilitza i l'univers segueix el seu curs. Hi quedarà un remanent d'energia del buit i l'univers seguirà l'expansió desaccelerada. Quan l'efecte de la constant cosmològica sigui predominant pot haver-hi una expansió accelerada, com ara.
- Segons la relativitat restringida el temps de Planck, la longitud de Planck i l'energia de Planck no tindrien un significat absolut per a tots els observadors. Podria haver-hi temps i longituds inferiors als de Planck i seria possible ultrapassar l'energia de Planck, amb la qual cosa la necessitat d'aplicar la gravitació quàntica dependria absurdament de l'observador. Amb la VSL la relativitat restringida no seria aplicable i la velocitat de la llum dependria de la seva energia i, per tant, del seu color i de la seva freqüència. Les longituds (els temps) superiors a la longitud (el temps) de Planck no podrien en cap cas arribar a ser inferiors o iguals a la longitud (el temps) de Planck per a cap observador. Quant a l'energia, aquesta valdria  $E = mc^2 / (1 + mc^2/E_p)$ , on  $m$  és la massa d'una partícula per a un observador,  $E_p$  l'energia de Planck i  $c$  la velocitat de la llum per a energies baixes. És fàcil veure que  $E/E_p = mc^2 / (E_p + mc^2) < 1$ . Per a un observador no hi ha cap límit en el creixement de la massa  $m$ , però sí en el de l'energia  $E$ .
- Cicles de Milankovitch. Aquests dos cicles conjuntament amb els de precessió i nutació de l'eix de la Terra influeixen en la seva climatologia.

1er cicle de  $\approx 100.000$  anys de variació de l'excentricitat de l'òrbita de la Terra entre aproximadament 0 i 0.06 (valor actual 0.0017).

2on cicle de  $\approx 41.000$  anys de variació de la inclinació de l'eix de rotació pròpia de la Terra. L'angle entre el pla de l'equador terrestre i el de l'eclíptica varia entre aproximadament  $21.5^\circ$  i  $24.5^\circ$  (valor actual  $23.5^\circ$ ).

- A continuació donem un recull de comentaris a partir de reflexions de Lisa Randall.
- Les teories permeten construir models des de dalt (des del que és general al que és particular) mentre que els models van a l'inrevés. En el que segueix no es deriva cap model de la teoria de cordes, però aquesta teoria conté alguns elements que poden servir per desenvolupar models extradimensionals.
- És important trobar les simetries subjacents a una aparent manca de simetria.
- Les simetries internes eliminen la polarització longitudinal del fotó i dels bosons febles a altes energies, mentre que amb la ruptura de simetria a baixes energies apareix la polarització longitudinal dels bosons febles amb massa. D'aquesta manera tenim la polarització longitudinal observada i eliminem els problemes a altes energies que en les teories *inicials* implicaven càlculs de probabilitat més grans que 1, causats per la tercera polarització. El fotó sempre viatja amb velocitat  $c$  mentre que un bosó amb massa pot estar en repòs. Això implica que en el primer, en tenir una direcció privilegiada (la del moviment), apareguin només dues polaritzacions transversals, mentre que en el segon no passi això en no tenir cap direcció privilegiada en el repòs.
- Amb el mecanisme de Higgs, el camp de Higgs té quatre components que donen lloc a la partícula de Higgs i a les tres polaritzacions longitudinals corresponents als tres bosons gauge, respectivament.
- A llargues distàncies la càrrega feble del buit corresponent al Higgs impedeix l'acció dels bosons gauge febles.
- La simetria electrofeble es trenca a una energia d'uns  $250\text{GeV}$  només si la partícula de Higgs té aproximadament aquesta massa. Si fos més gran, els bosons febles serien més pesants del que trobem experimentalment. Aquest valor del Higgs *hauria* d'entrar en contradicció amb els càlculs corresponents a les teories de simetries tipus  $SU_5$  (problema de la jerarquia). El problema de la jerarquia apareix a partir de valors molts grans (com l'energia de la unificació) que es compensen donant valors molt més petits (de l'ordre de l'energia de trencament de simetria electrofeble). El problema de la jerarquia podria ser resolt amb nous principis. Els companys supersimètrics, que eliminessin les problemàtiques correccions quàntiques a la massa del Higgs, o les partícules que viatgessin

a les dimensions extremes serien possibles camins per solucionar-lo. A través dels companys supersimètrics podríem apropar-nos a la solució de l'enigma de la matèria fosca. Els supercompanys tindrien en relació als companys les mateixes càrregues i masses de l'ordre de l'escala feble que sorgirien pel trencament de la supersimetria. Si amb el nou accelerador del CERN no es trobessin, serien massa pesants per resoldre el problema de jerarquia i descartaríem la supersimetria.

- En el Tevatró del Fermilab (Illinois) es produeixen col·lisions entre protons i antiprotons. En ell es manifestà el quark top i el neutrí tauònic. En el LEP (Gran accelerador d'electrons i positrons entre Suïssa i França) del CERN (Suïssa) es manifestaren els bosons gauge febles. Ara amb el LHC (gran col·lisionador d'hadrons) del CERN amb energies set vegades superiors a les del tevatró s'esperen confirmar o no la veritat de diferents hipòtesis físiques (el Higgs, supersimetria,...).
- Escales d'energia:  $10^2$  GeV  $\gg 10^{15}$  GeV (gran unificació)  $> 10^{19}$  GeV (energia de Planck).
- Donat que la constant gravitatòria petita és conseqüència d'una massa de Planck gran, el problema de la jerarquia es pot reduir a la feblesa relativa de la interacció gravitatòria.
- Si coneixem la teoria més precisa a distàncies curtes (energies grans) podem saber les diferents teories efectives a distàncies més grans (energies petites) i la relació entre elles a través del *grup de renormalització*.
- Les partícules virtuals de vida petita i gran dispersió energètica poden tenir valors energètics molts diferents de les partícules reals (un fotó virtual no tindria l'energia corresponent al seu impuls,...).
- Quan estudiem la relació de les intensitats de les interaccions electromagnètica, feble i forta amb la distància, en el model estàndard trobem que aproximadament tenen un punt en comú. En la seva generalització supersimètrica més senzilla aquesta aproximació de les tres intensitats és molt més precisa, la qual cosa ens porta al camí de la unificació a distàncies molt petites, o, el que és equivalent, a energies molt elevades. La supersimetria permetria avançar cap el camí de la unificació.
- Amb la supersimetria existeix el problema que en els vèrtexs dels diagrames interactius pot haver-hi un canvi de sabor directe (per exemple, convertir-se un electró en un muó i una partícula gauge feble). El canvi indirecte a través de diferents passes sí que és possible amb l'emissió de neutrins. Els canvis directes implicarien un canvi de sabor no observat. L'ingredient que cal incorporar-hi per evitar el problema anterior són les dimensions extremes. A la natura hi ha una certa barreja dels sabors dels quarks, però menys del que es preveu en la ruptura de la supersimetria.
- L'energia necessària per explorar l'escala de Planck és enorme i aleshores ja no podem menystenir la gravetat. Tanmateix, en aquesta escala la unió de la física quàntica i la relativitat general dóna lloc a càlculs de

probabilitat més grans que 1. La teoria de supercordes amb 10 dimensions elimina els modes de vibració que originen probabilitats problemàtiques.

- La teoria de cordes trobaria aplicació dins de l'escala de Planck o en l'estudi dels camps gravitatoris intensos vora d'un forat negre.
- Com s'emmagatzema la informació dels objectes que cauen en un forat negre?
- Les branes han ajudat a comprendre l'origen de partícules misterioses en la teoria de cordes que no podien procedir de les cordes.
- Entre les dualitats es troba l'equivalència entre teories de supercordes de 10 dimensions i la supergravetat de dimensió 11 en la qual hi ha 2-branes, però no cordes.
- Les branes poden portar càrregues (no necessàriament les conegudes) i interaccionar mitjançant forces. Són objectes reals. Les branes són dinàmiques i tenen una tensió finita .
- Les branes poden allotjar partícules que es moguin només al llarg d'elles.
- En la teoria de cordes inicialment es trobaren branes D (la D de Dirichlet) en les quals acabaven les cordes obertes.
- Les branes p són solucions de les equacions d'Einstein que s'extenen fins a l'infinit en algunes direccions i que a la resta de direccions actuen com forats negres. Les branes p poden donar lloc a partícules d'origen no cordístic.
- Les branes D i p no són completament diferents. A les energies en què la teoria de cordes fa les mateixes prediccions que la relativitat general les branes D es transformen en branes p.
- Les dualitats entre les cinc versions de la teoria de cordes i la supergravetat d'11 dimensions fa entreveure l'existència d'una teoria superior : la teoria M d'11 dimensions.
- Com és possible, però, una equivalència entre un sistema de 10 dimensions i un d'11? Això seria possible, si en la teoria de supercordes calgués un *nombre* addicional a les 10 dimensions per descriure els objectes puntuals. Les sòcies de les partícules de la teoria de la supergravetat de dimensió 11 resulten ser les branes  $D_0$ , branes amb *càrrega* de dimensió 0 i aquestà càrrega és el *nombre* que augmenta en 1 les 10 dimensions convencionals.
- Les branes poden atrapar partícules i forces i seria possible que constituïssin mons propis, els *mons brana*. Veurem més endavant diferents models dels possibles universos que podríem construir. Les cordes obertes tenen els seus extrems en una brana i es poden moure al llarg d'ella. Si tenim més d'una brana els extrems de les cordes obertes poden estar en diferents branes i representaran partícules amb una massa creixent amb la distància de separació entre les branes. Moltes branes diferents poden coincidir i s'en derivaran noves partícules i noves forces.
- Les partícules confinades en branes separades poden comunicar-se entre elles a través d'altres que es poden moure a través de les dimensions

externes a les branes, com la corda tancada que constitueix el gravitó. Aquest moviment del gravitó en totes les dimensions és el que explica la feblesa de la intensitat de la gravetat que observem. L'existència dels mons brana ens allunya de l'encontre d'una teoria única, però obre possibilitats encara més fascinants en la diversitat dels mons immersos en quelcom superior. Més endavant veurem uns quants models de mons brana, on podem segregrar partícules diferents en entorns diferents. En el primer veurem com sortejar el principi d'anarquia que afirma que tot allò que no estat prohibit per les simetries ocorrerà. El segon mostrarà que les dimensions addicionals poden ser més grans del que es pensava en un principi. El tercer mostrarà que l'espai-temps pot corbar-se de manera que els objectes mostrin grandàries i masses molt diferents. Els dos darrers mostraran que quan l'espai-temps es corba podem tenir dimensions extres infinites que siguin invisibles, i fins i tot que l'espai-temps sembli tenir diferents dimensions en llocs diferents.

- El primer món brana conegut fou el HW (Horawa-Witten). És un món d'11 dimensions format per dues branes "paral·leles" de 10 dimensions espaciotemporals (amb sis dimensions espacials enrotllades) separades per una dimensió espacial. En una brana es troben les partícules i forces conegudes, i en la segona altres partícules i altres forces.

- **MÓN BRANA 1.**

Amb només tres dimensions espacials no pot haver-hi segregrat ja que, pel que sabem, totes les direccions i tots els punts de l'espai tridimensional són iguals. Aquí considerem dues branes tetradimensionals separades per una dimensió espacial finita. En una brana estan segregrades les partícules del model estàndard i en l'altra les partícules de trencament de la supersimetria. Els segregrat de partícules diferents en branes diferents explicaria les propietats característiques que les distingeixen, com les que hi ha entre les partícules del model estàndard i les que trenquen la supersimetria. Malgrat que les simetries impedeixen moltes interaccions i el principi d'anarquia, el segregrat és una manera alternativa d'aconseguir-ho. Aquí també es suavitzaria tot l'anterior, ja que en estar separades les partícules per dimensions extres es dificultaria la seva interacció. El trencament de la supersimetria en quatre dimensions introdueix interaccions no desitjades que el segregrat podria evitar. Si les partícules responsables del trencament supersimètric estan en una altra brana tot seria menys problemàtic. La supersimetria ajuda en la resolució del problema de la jerarquia, però s'ha de trencar per donar una explicació dels supercompanys no detectats actualment a causa de la seva massa més gran, de l'ordre corresponent a l'energia de trencament feble d'uns 250 GeV. Els efectes del trencament supersimètric es comunicarien a través de partícules intermèdies que viatgessin al llarg de la dimensió extra, les interaccions del model estàndard serien les mateixes i no es canviarien els sabors. El gravitó seria una partícula intermèdia que donaria origen a l'anterior, fins i

tot amb una dimensió extra molt petita de l'ordre de cent vegades la longitud de Planck.

El model de trencament de la supersimetria segrestada prediu proporcions característiques de les masses del gaugins, els socis dels bosons gauge. La raó seria 1:2:8, on la massa més petita correspon als socis dels bosons febles, després venen els fotins i més enllà els gluïns. Si es descobrissin els supercompanys, podríem comprovar el resultat anterior, conseqüència del segrest esmentat.

En el nostre model s'impedeix l'intercanvi de sabors. Per què, però, hi ha els sabors amb masses tan diferents? Una possibilitat és que hi hagués unes partícules responsables del trencament de la simetria de sabors en diferents branques. Aleshores, la ruptura de simetria de sabors transmesa des de branques llunyades induïria masses més petites que la induïda desde branques més properes. Aquesta idea s'anomena *brillantor*, per analogia amb la brillantor d'un objecte que disminueix amb la distància en què es troba.

- **MODEL SENSE BRANES AMB DIMENSIONS EXTRES.**

Les partícules de Kaluza-Klein tenen el seu origen en les dimensions extremes i apareixen com partícules extremes de l'espai-temps tetradimensional. Per cada partícula que coneixem i que es mou també en les dimensions extremes hauria d'haver moltes partícules KK amb la mateixa càrrega, però cadascuna amb una massa diferent. Aquestes masses venen determinades pel seu moment extradimensional, que depèn de la forma de les dimensions extremes. A mesura que la longitud d'aquestes creix les masses disminueixen (com les freqüències sonores d'una corda de violí). Si les KK no han estat detectades això implica que les seves masses són grans i que les longituds de les dimensions addicionals han de ser petites. Les limitacions experimentals actuals ens diuen que les dimensions extremes no poden ser més grans que uns  $10^{-17}$  cm, de l'ordre de la longitud d'escala associada a la interacció feble de aproximadament 1 TeV, que és explorada actualment. Aquest valor és  $10^{16}$  vegades més gran que la longitud de Planck que és  $10^{-33}$  cm. Això vol dir que les dimensions extremes podrien ser molt més grans que l'escala de Planck i haver escapat a la nostra detecció. Quan introduïm les branques veurem que les dimensions extremes poden ser molt més grans que  $10^{-17}$  cm i seguir evitant la seva detecció. Alguns models poden tenir dimensions molt grans, aparentment visibles i, tanmateix, resultar invisibles. Fins i tot podem tenir una dimensió extra infinitament gran que donaria lloc a infinites partícules KK lleugeres i, tanmateix, no observables.

- **MÓN BRANA 2.**

Aquí tenim una brana tetradimensional del món segrestat, més una o més dimensions extremes "grans" enrotllades (model ADD –Arkani, Dimopoulos, Dvali-). Els problemes experimentals entorn de les partícules KK, que hem trobat abans, aquí no apareixeran, perquè les partícules convencionals en estar confinades i no tenir moment tetradimensional no tenen tampoc



aparellades partícules KK i, en conseqüència, no hi ha el límit de  $10^{-17}$  cm per a la longitud de les dimensions extres. Només el gravitó no segregat tindria partícules KK. Tanmateix, aquestes partícules interactuen tan feblement com el gravitó, ja que no ho fan mitjançant les interaccions electrofeble i forta, sinó únicament mitjançant la interacció gravitatòria, com el propi gravitó, no detectat. Aleshores, les partícules KK del gravitó no entrarien en contradicció amb els resultats experimentals.

El model preveu una longitud de les dimensions extres que potser arribi a 0.1 mm, molt més gran que els  $10^{-17}$  cm anteriors. Avui se sap que a distàncies superiors a aproximadament 0.1 mm la llei de Newton és certa. El problema de la jerarquia apareix per la gran diferència que hi ha entre l'escala de Planck i la de trencament electrofeble. La intensitat gravitatòria observada en tres dimensions espacials és feble, perquè la massa de Planck és gran. El problema de la jerarquia es pot plantejar, doncs, de manera diferent: per què la gravetat tridimensional és feble? La qüestió es resol dient que la gravitació seria forta en un context de dimensió superior i que en un àmbit tridimensional aquella es diluïria. En efecte: amb tres dimensions espacials la força gravitatòria és proporcional a  $(1/M_{\text{Planck}}^2) \cdot (1/r^2)$  i amb n dimensions addicionals a  $(1/M^2) \cdot (1/r^{n+2})$ , on M fixa la intensitat de la gravetat amb dimensions extres. Amb un volum extradimensional finit i n dimensions extres de longitud R tindrem, a partir de la condició de frontera per a  $r=R$ , que amb tres dimensions la llei de la força seria  $(1/M^2) \cdot (1/R^n) \cdot (1/r^2)$ . D'aquí es veu que la intensitat de la gravetat tridimensional disminueix quan creix el volum de les dimensions extres.

En el model ADD l'energia que fixa la intensitat gravitatòria de dimensió superior és només al voltant d'1 TeV, en un entorn del trencament electrofeble, i el problema de jerarquia desapareix. També per a aquesta energia les quatre interaccions tindrien una intensitat comparable. A partir de la validesa de la llei de Newton a 0.1 mm, la longitud de les dimensions grans dependrà del seu nombre (les dimensions extres petites no influiran significativament). Si només hi hagués una dimensió extra gran, aquesta seria de l'ordre de la distància de la Terra al Sol, la qual cosa és impossible, perquè per a distàncies més petites no podríem aplicar la llei de Newton. Amb dues dimensions, tindríem una longitud d'1 mm superior de 0.1 mm. Aleshores potser caldrien més dimensions grans per obtenir una longitud més petita que 0.1 mm...

Comprovacions experimentals al LHC. A l'entorn d'1 TeV la gravetat de dimensió superior es fa forta. Això portaria aparellat que les partícules KK del gravitó es creessin en gran nombre i que, malgrat la seva feble interacció, es poguessin detectar a partir de la pèrdua d'energia que s'anés per les dimensions extres. També es podrien formar petits forats negres que amb la seva ràpida evaporació donessin lloc a l'aparició de partícules que serien la seva firma.

- MÓN BRANA 3.

Aquí tenim la brana de la gravetat i la brana feble, on tenim el model estàndard, separades per una cinquena dimensió amb una curvatura especial: *la geometria arquejada* (model  $RS_1$  de Randall i Sundrum), creada per l'energia de tot l'espai (branes+espai extra). Altrament al que passa amb la teoria de camps quàntics tetradimensional, on les partícules apareixen amb masses "semblants", aquí tenim naturalment masses molt diferents i els efectes quàntics estan sota control. En aquest model no tenim la supersimetria del món brana 1 anterior. Les energies de les branes i de l'espai extra produeixen un espaitemps anti De Sitter amb curvatura negativa i apareixen diferències enormes en el camp gravitatori al llarg de la cinquena dimensió, a causa del fort decreixement exponencial quan anem des de la brana gravitatòria (amb un camp gravitatri gran) a la brana feble (amb un camp gravitatori petit). Aquí ja no cal una dimensió extra gran, com en el model ADD, perquè la gravetat sigui petita en el nostre món brana. Amb una longitud una mica més gran que la longitud de Planck és suficient. En el model ADD podríem dir que la funció de probabilitat del gravitó és constant i, a causa del gran volum extradimensional, en quatre dimensions serà molt poc probable trobar el gravitó. Aquí no ocorre això i en no ser la funció de probabilitat del gravitó constant no cal un gran volum extradimensional. En una brana hi ha partícules de l'ordre de l'escala de Planck i en l'altra de l'ordre de l'escala feble, i no hi ha el problema de la jerarquia. En la cinquena dimensió les masses i les energies es contrauen i les distàncies i els temps s'expandeixen en allunyar-nos de la brana de la gravetat. Entre ambdues branes apareix un factor de variació de  $10^{16} = E_{\text{Planck}} : E_{\text{Feble}} = 10^{19} \text{ GeV} : 10^3 \text{ GeV} = 1 \text{ TeV}$ . Les cordes de la brana feble serien de l'ordre de  $10^{-17} \text{ cm}$  en lloc dels  $10^{-33} \text{ cm} = L_{\text{Planck}}$ . Les partícules amb poca massa de les dimensions extres podrien estar aviat al nostre abast. La distància entre les branes es podria estabilitzar a partir d'una partícula extradimensional que actuaria com una molla entre elles.

Una alternativa a la unificació la dóna la geometria arquejada que planteja Àlex Pomarol de la Universitat de Barcelona. Contràriament al gravitó que és sempre una corda tancada, els fermions, els bosons febles i el fotó poden ser cordes obertes, lliures, o tancades i estar segregades. Aquí els bosons febles, el gluó i el fotó, com el gravitó, no estan retinguts en la brana tetradimensional. En el context de les dimensions extra grans, si els bosons no gravitacionals haguéssin estat lliures, totes les interaccions haurien estat molt afeblides en les quatre dimensions, la qual cosa és experimentalment falsa. Tanmateix, aquí on les dimensions addicionals són petites això no ocorre pas. Totes les partícules, fins i tot les que estiguessin en les dimensions addicionals, podrien sentir les quatre interaccions. Tots els bosons interactius podrien tenir un ventall ampli d'energies (els bosons febles tindrien les masses correctes a la brana feble)

i hi hauria una energia gran que unifiqués les quatre interaccions. El resultat sorprenent era que la unificació es produïa com si la teoria fos realment quadridimensional! A més, Pomarol va suposar que la supersimetria s'encarregava del problema de la jerarquia. Només calia que el Higgs estigués a la brana feble, mentre que les partícules gauge ocupessin la cinquena dimensió.

Experimentalment, les signatures de l'espai-temps de dimensió 5 podrien incloure partícules KK, forats negres de l'espai anti De Sitter i cordes amb 1 TeV de massa. Les KK sòcies dels gravitons, al contrari del que passa amb les dimensions llargues, poden interactuar més fortament que la gravetat i, en lloc de la fugida, deixarien la seva signatura (espín 2 i 1 TeV aproximadament). Si les partícules del model estàndard ocupen la cinquena dimensió, les seves KK carregades i més pesants deixarien també la seva firma. Si la cinquena dimensió anés infinitament més enllà de la brana feble, les KK serien diferents en massa i interaccions i es podrien escapar amb la seva firma de pèrdua d'energia.

- **MÓN BRANA 4.**

Aquí tenim només la brana gravitacional (el nostre món) més una cinquena dimensió addicional infinita arquejada, on la gravetat esà *localitzada* gairebé de forma exclusiva vora la brana, sense perdre's pràcticament a la cinquena dimensió, que, malgrat la seva infinitud, roman oculta. Aquest model és quelcom semblant al model de Kaluza-Klein, però amb la dimensió extra no compactada. Amb la funció d'ona del gravitó es veu que aquest està molt localitzat vora la brana i molt poc fora. La resta de dimensions ocultes estan molt enrotllades i no afecten la localització. Aquest model és el RS<sub>2</sub> (el subíndex de RS no indica el nombre de branes, sinó l'ordre en què varen aparèixer els models 3 i 4!) i no és relevant per a la solució del problema de la jerarquia, sinó per veure que una dimensió addicional infinita pot romandre oculta i tenir un espai-temps quadridimensional aparent. Tanmateix, en qualsevol lloc de la cinquena dimensió la gravetat, malgrat la seva feblesa, es comportaria també quadridimensionalment.

Les KK del gravitó podrien modificar substancialment la gravetat. En augmentar la longitud de la dimensió extra l'energia de la primera KK, que s'identifica amb el gravitó, i l'interval energètic entre les successives KK disminueix. Per tant, per a l'entorn de qualsevol energia hi hauria un nombre molt elevat de KK que podrien modificar sensiblement la gravetat. Tanmateix, a mesura que ens allunyem de la brana les funcions de probabilitat de les KK successives al gravitó són significatives només lluny de la brana (la seva localització depèn de les seves masses), mentre que per al gravitó ocorre el contrari i el problema que havíem plantejat desapareix. La gravetat localitzada fa que l'univers de dimensió cinc es comporti com si la gravetat fos quadridimensional. Podria haver-hi regions diferents ?

Què passaria si la brana de gravetat no fos completament plana? Podria ser que el nostre món fos com una vall profunda aïllada de quatre dimensions espaciotemporals dins de l'espai-temps de dimensió superior amb propietats molt diferents? Tot això ho contemplarem en el model següent.

- **MÓN BRANA 5.**

Aquest nou model és el de la gravetat *localitzada localment* (model KR de Karch i Randall). S'anomena així, perquè la gravitació localitzada tetradimensional pot ser un fenomen local: la gravetat semblaria molt diferent a distàncies llunyades i nosaltres seríem una illa tetradimensional. Ara tenim una brana i una dimensió extra infinita, però el conjunt d'energies de la brana i de l'espai extradimensional continuen tenint a més de la geometria arquejada extradimensional una brana lleugerament corbada. La conseqüència final és que la gravetat sembla tetradimensional on ho podem verificar, però no diu que ho sigui al llarg de tot l'espai multidimensional. Els gravitons localitzats no s'estenen obligatòriament per tot l'espai, sinó que en aquest poden existir gravitons de característiques diferents en zones molt allunyades entre si.

- Sobre les dualitats. Sembla que el que ocorre a l'espai anti De Sitter de dimensió 5 es pugui descriure usant un marc dual de dimensió 4. Juan Maldacena va fer quelcom semblant en teoria de cordes, com hem vist més amunt.

Un objecte que es mou al llarg de la cinquena dimensió apareix en la teoria dual en quatre dimensions com un objecte que creix o s'encongeix.

Un espai anti De Sitter de dimensió cinc i sense branes és equivalent a un espai tetradimensional sense gravetat. Tanmateix, si introduïm una brana a la teoria de dimensió 5, la teoria tetradimensional equivalent conté sobtadament la gravetat.

En la T-dualitat pot haver-hi intercanvi dual de dimensions enrotllades grans i petites.

La simetria especular contempla l'intercanvi entre dues varietats de Calabi-Yau molt diferents.

En la teoria de matrius una formulació aparentment de 10 dimensions actua com si en tingués 11.

*Tot l'anterior suggereix que l'espai-temps no fos essencial, sinó que sorgís de quelcom més fonamental...*

- A continuació donem un recull de comentaris a partir de reflexions de S. Hawking.
- Sobre el principi d'equivalència. La relativitat general preveu que el temps s'hauria d'alentir en les proximitats dels cossos massius. Anem a aplicar el principi d'equivalència per veure-ho. Suposem que estem en un ascensor amb observadors en el sostre (A) i en el sòl (B). Des del sostre s'envien cap al sòl dos senyals de llum separats un temps  $x$ . Si l'ascensor es mou sense acceleració, els dos senyals arribaran a B en uns temps  $y$  i  $x+y$ . L'observador B veurà, doncs, que els dos senyals estan separats en  $x+y$ .

$y=x$ , que és el mateix que A observa. Un camp gravitatori en la direcció A->B serà equivalent que l'ascensor estigui accelerat en la direcció B->A. Si l'ascensor està accelerat i amb el mateix experiment anterior els dos senyals arribaran a B en uns temps  $y'$  ( $y' < y$ ) i  $x+y''$  ( $y'' < y'$ ). B observarà un interval  $x+y''-y'$ , que serà més petit que  $x$ !

- En el model d'univers de Friedmann finit l'espai no té cap límit. És quelcom semblant a la superfície de la Terra, que és finita, però no té límits i, si viatgéssim sempre en la mateixa direcció, no trobaríem cap limitació, tot tornant al punt de partida. En el model de Friedmann tenim tres dimensions espacials, però no podem fer el viatge anterior, perquè l'univers és tan gran que es pot demostrar que l'univers hauria col·lapsat abans de tornar-hi. Per fer la circumval·lació esmentada caldria viatjar a una velocitat més gran que la de la llum i això no és permès.
- Com més gran és la quantitat de matèria que es fusiona en un estel, menys triga a exhaurir-lo. Això és degut al fet que com més gran és la massa d'un estel, més calenta ha d'estar per contrarestar amb la seva pressió l'atracció gravitatòria, i, en augmentar la temperatura, més ràpida és la reacció de fusió.
- En la suma sobre històries de Richard Feynmann, per a cada camí des d'A a B hi ha associats l'amplitud i la fase d'una ona. La probabilitat d'anar des d'A a B s'obté fent la suma de totes les històries. En estudiar l'àtom d'hidrogen, per exemple, moltes ones es cancel·laran entre elles. Molt camins contigus, però, interferiran constructivament. Aquests camins donen lloc a les òrbites permeses.
- Una teoria quàntica de la gravetat hauria d'incloure la suma sobre històries de Feynmann i la representació gravitatòria d'Einstein mitjançant un espai-temps amb curvatura. Aleshores, l'equivalent a una història d'una partícula seria un espai-temps corbat que representaria la història de tot l'univers.
- Experimentalment es conclou que l'univers no ha existit sempre. En la gravitació clàssica això implica una singularitat inicial. Tanmateix, en la gravitació quàntica sembla, en paraules de S. Hawking, que podríem tenir un espai-temps finit sense singularitats que donessin lloc a una frontera. Tindríem un espai-temps semblant a la superfície de la Terra, però amb dues dimensions més. *La condició de frontera*, que ens permetria calcular el desenvolupament de l'univers, *seria que no hi ha frontera*.
- Sabem que l'univers de Gödel es giratori, que admet línies temporals tancades i que no està en expansió. En relació a què gira l'univers de Gödel, si no hi ha un punt estacionari de referència? La resposta està que la matèria distant giraria en relació a les direccions marcades per giroscopis situats a l'univers. L'univers de Gödel, però, no és el nostre, perquè les observacions mostren que de forma apreciable no gira i, a més, està en expansió.

- Com l'univers de Gödel, les equacions d'Einstein permeten altres universos amb viatges en el temps. Tanmateix, les dades observacionals indiquen que l'univers primitiu no tenia el tipus de curvatura que aquests models necessiten per permetre els viatges en el temps. S. Hawking arriba a la mateixa conclusió a partir de raonaments teòrics basats en l'absència de fronteres. Seria, però, possible que posteriorment poguéssim deformar regions espaciotemporals, perquè l'anterior esdevingués possible?
- Suposem que fem el viatge A->B->C->B. Si el viatge B->C el fem enrere en el temps, podríem aconseguir que anéssim des d'A a C en un temps inferior al que la llum necessitaria. En conseqüència, viatjar en el temps implica poder viatjar a una velocitat superior a la de la llum. Vejam el recíproc. Si tenim dos esdeveniments espaciotemporals connectats amb una velocitat  $v > c$ , la cronologia depèn de l'observador. D'aquesta manera, un observador comprovaria que arribem a B abans d'haver sortit d'A. *Viatjar en el temps i viatjar més ràpid que la llum va units!* Tanmateix, hi ha un problema en assolir viatjar a  $v > c$ , ja que a mesura que accelerem i ens apropem a la velocitat  $c$  necessitem una energia cada cop més i més gran (potencialment infinita). Podem evitar això mitjançant els forats de cuc, que és una forma indirecta de viatjar entre esdeveniments espaciotemporals separats espacialment a una velocitat més gran que la de la llum.
- La relativitat general permet els ponts d'Einstein-Rosen, avui anomenats forats de cuc. Els ponts no durarien prou perquè una nau espacial els pogués recórrer. El forat de cuc es podria mantenir obert si existís una regió amb curvatura negativa, la qual cosa implicaria la presència de matèria amb densitat d'energia negativa. Això és impossible en física clàssica. Tanmateix, la física quàntica permet que la densitat d'energia sigui negativa en alguns llocs, sempre que hi hagi d'altres amb densitat positiva, de manera que l'energia total sigui positiva.
- En els diagrames de Feynmann una partícula que es mou cap enrere en el temps és equivalent a una antipartícula que es mou cap endavant en el temps. Així, el diagrama amb la creació d'un parell partícula-antipartícula en A i la posterior destrucció en B, seria equivalent a un bucle en el qual una partícula es crea en A, viatja fins a B i en B retrocedeix en el temps fins arribar a A. Pot el viatge al passat ser possible macroscòpicament? Segons Hawking, res impediria que la suma sobre històries es pogués aplicar a totes les històries i, en particular, a les històries en què l'espai-temps estigués tan deformat que fos possible el viatge al passat (aquesta deformació no és possible ara, però podria ser-ho en un futur no prefixat... el viatge en el temps quedaria limitat al futur!). Les lleis físiques sembla que no ho impedeixen. Malgrat això, podríem dubtar dels viatges en el temps? El viatge al passat hauria d'incloure la consistència i no donar lloc a situacions absurdes, com que nosaltres poguéssim matar el nostre pare abans de poder néixer. No podríem canviar la història viscuda! Això

podria ser resolt, si amb el viatge al passat entréssim en una història alternativa que no canviaria l'anterior viscuda (en la formulació de suma sobre històries de Feynman no tenim històries alternatives, perquè sempre estem en el mateix espai-temps, sinó històries consistents, únicament). Tanmateix, els càlculs demostrarien, segons Hawking, que si l'espai-temps es deformés per permetre els viatges al passat, els efectes quàntics podrien contrarestar l'anterior deformació, de manera que els cossos macroscòpics no poguessin portar informació al passat (conjectura de protecció de la cronologia). Res, però, és segur.

-