

# **Cosmología cuántica y creación del Universo**

Benito Marcote

9 de diciembre, 2009

# Contenido

<b>1</b>	<b>Antecedentes</b>	<b>2</b>
1.1	Breve historia de la gravedad . . . . .	2
1.2	Teoría de la Relatividad General . . . . .	3
1.2.1	La expansión del Universo . . . . .	4
1.2.2	Singularidades y Big Bang . . . . .	5
1.3	Mecánica Cuántica . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Problemas fundamentales</b>	<b>9</b>
2.1	Problema del horizonte y homogeneidad . . . . .	9
2.2	Problema de la planaridad . . . . .	10
2.3	Inflación cósmica . . . . .	10
2.4	Incompatibilidades entre la GRT y la MC . . . . .	11
2.4.1	Independencia del fondo . . . . .	12
2.4.2	El problema del observador . . . . .	12
<b>3</b>	<b>En busca de una teoría cuántica de la gravedad</b>	<b>13</b>
3.1	Una nueva interpretación de la MC: multiversos . . . . .	13
3.1.1	La función de onda del Universo . . . . .	14
3.2	Teoría de Cuerdas, Supercuerdas y Teoría M . . . . .	15
3.2.1	Unificando partículas e interacciones . . . . .	15
3.2.2	Las revoluciones . . . . .	16
3.2.3	Cara y cruz . . . . .	17
3.2.4	Conclusiones . . . . .	17
3.3	Gravedad Cuántica de Bucle . . . . .	17
3.3.1	Redes de spin . . . . .	18
3.3.2	Agujeros negros . . . . .	19
3.3.3	Dispersión de la luz . . . . .	20
3.3.4	El gran rebote (Big Bounce) . . . . .	20
3.3.5	Comprobaciones . . . . .	21
<b>4</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>22</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>23</b>

# 1. Antecedentes

*Then God created Bohr,  
And there was the principle,  
And the principle was quantum,  
And all things were quantified,  
But some things were still relative,  
And God saw that it was confusing.*

Tim Joseph

## 1.1. Breve historia de la gravedad

La gravedad es sin duda la fuerza de la Naturaleza más antigua de la que se tiene conocimiento. Y sin embargo es, quizá, la fuerza de la que menos sabemos o entendemos aún hoy en día.

Pero no es la única fuerza que existe, ya que en la Naturaleza hay cuatro fuerzas fundamentales: la *fuerza nuclear fuerte*, que origina la estabilidad de los núcleos atómicos; la *fuerza nuclear débil*, responsable de las desintegraciones beta y la radiactividad; la *electromagnética*, responsable de las corrientes eléctricas e imanes; y la ya mencionada *gravedad*, responsable del movimiento de los planetas, y que es, con diferencia, la más débil de todas.

Sin embargo, dado que tiene un alcance infinito (al igual que la fuerza electromagnética) y que es proporcional a la masa del cuerpo que la crea, a escalas cosmológicas se convierte en la única fuerza relevante, ya que las dos fuerzas nucleares tienen alcances nucleares (en cuanto nos alejamos del núcleo atómico dicha fuerza se hace cero) y en la Naturaleza prácticamente todos los cuerpos “comunes” son eléctricamente neutros, por lo que la fuerza electromagnética no juega ningún papel.

Pero además de esto, la gravedad guarda otra faceta que la hace diferente frente a las otras. A lo largo de la historia, la física ha conseguido explicar, bajo una misma teoría, las otras tres fuerzas fundamentales. Primero, unificando la fuerza nuclear débil con la electromagnética en el *modelo electrodébil* (1960), y años más tarde, consiguiendo conjugar también la nuclear fuerte en lo que se conoce como el *Modelo Estándar* de la física de partículas. Pero a pesar de esto, la gravedad continúa hoy día siendo la única fuerza que no se ha podido unificar junto a las otras bajo una misma teoría, a pesar de todos los esfuerzos invertidos en ello.

Pera antes de ver estos intentos de unificación, comencemos por lo que se puede considerar la primera formulación que intentaba describir la gravedad de una forma formal:

la ley de la Gravitación Universal de Newton.

Quizá, los orígenes de esta teoría se remonten hasta 1543, cuando N. Copérnico publica su *De Revolutionibus Orbium Coelestium*, estableciendo las bases del Modelo Heliocéntrico y rechazando la imagen aristotélica de un Universo que tenía por centro a la Tierra. Y posteriormente en 1609, cuando Galileo realizó sus observaciones a través del telescopio, demostrando la dinamicidad de los cuerpos celestes, que hasta ese momento se concebían como entes perfectos, inmutables.

Una vez se rompió con la imagen divina de la bóveda celeste, el paso siguiente fue conseguir una teoría que pudiera explicar los movimientos observados en ésta. Y esto se consiguió en 1687, cuando I. Newton publicó sus *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, describiendo que la fuerza de la gravedad con que dos cuerpos se atraen es:

$$\vec{F}_2 \equiv m_2 \ddot{\vec{r}} = \frac{G m_1 m_2}{\vec{r}^3} \vec{r}$$

donde  $G$  es la *constante de Gravitación Universal*,  $m_1$  y  $m_2$  son las masas de los cuerpos que interaccionan y  $\vec{r}$  es la distancia entre ellos, siendo  $\vec{r}$  la aceleración (derivada segunda de la posición con respecto al tiempo).

Por lo que comentaremos más adelante, conviene reseñar que esta descripción residía bajo un espacio (Universo) tridimensional euclídeo, inmutable y de longitud, en principio, infinita, sobre el que se encontraba la materia, la cual interaccionaba dinámicamente entre sí por acción de la gravedad. Además, independiente de esto, se encontraba el tiempo, el cual fluía constante e irremediablemente para cualquier observador, desde un pasado remoto (infinito) hasta la eternidad.

Sin embargo, toda esta visión cambiaría con la llegada de Einstein...

## 1.2. Teoría de la Relatividad General

En 1915, diez años después de haber sido publicados sus artículos de la *Relatividad Especial* donde postulaba la constancia de la velocidad de la luz, entre otras cosas, A. Einstein publicó lo que sería uno de los pilares fundamentales en su gran aportación a la física: la *Teoría de la Relatividad General* (GRT).

En ella, Einstein consigue dar una descripción satisfactoria de la gravedad y los sistemas no inerciales, ya que la teoría de Newton había dejado de ser válida como consecuencia de los postulados de la Relatividad Especial.

Esta teoría, como muchas otras anteriormente, representaba un gran salto de pensamiento entre lo que se daba por válido hasta ese momento y lo que describía la nueva teoría. En este caso, la GRT derrumbó la imagen de un Universo enmarcado en un espacio estático e inmutable, de un tiempo independiente del anterior y constante, y de una materia que se limitaba a “estar” en dicho espacio en un tiempo dado, pero que solo interaccionaba con el resto de la materia.

En su lugar, la GRT describía que el Universo estaba “tejido” por un espacio-tiempo (llamado así porque ahora el espacio y el tiempo eran uno solo, estaban completamente relacionados) continuo, que ya no era inmutable y fijo, sino que era dinámico, evolucionaba (se *curvaba*) en función de la materia/energía (ahora ambas pasaban a ser equivalentes

también) que se encontraba en él. Esto producía que la atracción que se ejercían dos cuerpos podía ser explicada como la consecuencia de la curvatura que éstas producían en el espacio-tiempo, en lugar de recurrir a la descripción de una "fuerza a distancia" de difícil explicación.

Debido a esto, y dado que pasamos a estar en un espacio 4-dimensional (3 coordenadas espaciales y una temporal), la interacción viene descrita en forma tensorial por las *ecuaciones de campo*:

$$R_{ik} - \frac{1}{2}g_{ik}R + \Lambda g_{ik} = 8\pi \frac{G}{c^4}T_{ik}$$

donde  $R_{ik}$  es el tensor de curvatura de Ricci,  $\Lambda$  es la constante cosmológica,  $g_{ik}$  es el tensor métrico, que nos proporciona la métrica del espacio-tiempo, y  $T_{ik}$  es el tensor momento-energía. Aquí, el lado izquierdo de la ecuación representa las propiedades geométricas del espacio-tiempo, mientras que el lado derecho indica el flujo de energía y de momento presente en dicha región del espacio-tiempo. Por lo tanto, podemos ver directamente cómo la cantidad de energía y la deformación de la curvatura del espacio-tiempo están íntimamente relacionadas.

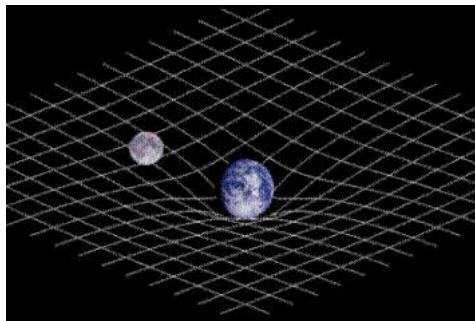


Figura 1.1: Líneas de espacio-tiempo curvadas por la presencia de un objeto masivo. *David Witczak*.

Esta descripción, a su vez, indica que no hay ningún sistema de referencia privilegiado en el Universo, sino que cualquier punto del espacio-tiempo está definido por lo que en él sucede, y no por su localización dentro de un sistema de referencia más general, absoluto, puesto que dicho sistema no existe. Y siguiendo con esto, dado que ahora el tiempo es una componente más del continuo espacio-tiempo, el cual evoluciona en función de la energía que reside en él, deja de existir también un marco de referencia temporal absoluto, pasando éste a ser local a una región del espacio-tiempo. Así, el tiempo que miden dos observadores situados en

regiones diferentes del Universo no es el mismo, sino que uno mide un tiempo mientras que el otro observador mide un tiempo diferente, transcurriendo, en general, más lento el tiempo en las regiones del espacio-tiempo donde se encuentra una concentración de masa mayor, es decir, en las cercanías de un cuerpo masivo.

A pesar del cambio de paradigma tan grande que introdujo, obviamente la GRT converge a la dinámica clásica de Newton cuando los campos gravitatorios presentes eran suficientemente débiles, algo requerido para cualquier teoría de la gravedad, puesto que en dichas condiciones se conocía que la ley de Newton se comportaba bastante bien.

### 1.2.1. La expansión del Universo

Una vez se consiguieron las ecuaciones que rigen los movimientos cosmológicos, se pudo analizar detalladamente cómo evolucionaba un universo al imponerle ciertas condiciones, como puede ser la cantidad de masa que contenía, lo que dio lugar a otro importante avance en el conocimiento de la evolución del Universo.

Primero A. Friedmann, en 1922, llegó a la conclusión, por razonamientos exclusivamente matemáticos (analizando las soluciones a las ecuaciones de campo), que el Universo difícilmente se podría encontrar en un estado estacionario, como por otra parte postulaba Einstein dando un valor conveniente a la *constante cosmológica*, ya que dichas ecuaciones conducían de forma natural (siempre que no fueran forzadas a tener soluciones estáticas) a un Universo dinámico en expansión.

Y unos años después, en 1929, E. Hubble realizó un detallado estudio sobre la velocidad relativa de un gran número de galaxias en función de la distancia a la que se encontraban, para lo cual realizó medidas del redshift de las galaxias (lo cual nos daba directamente la velocidad radial de la galaxia) y paralelamente calculaba la distancia de dicha galaxia a partir del estudio de las cefeidas, unas estrellas variables que tienen la particularidad de que su periodo de oscilación es proporcional a su magnitud absoluta.

Este estudio llevó a la conclusión de que las galaxias se alejaban de nosotros a una velocidad proporcional a su distancia. A la constante de proporcionalidad se la denominó la *constante de Hubble*,  $H_0$ , y este hecho se cumplía con independencia de la dirección en que se mirase (i.e. era una propiedad isótropa en el Universo), obteniendo la *ley de Hubble*:

$$v = H_0 d \quad \Longleftrightarrow \quad z = c^{-1} H_0 d$$

donde  $v$  es la velocidad de recesión de las galaxias,  $d$  es su distancia y  $z$  es el redshift, siendo, en el momento actual,  $H_0 \approx 72 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ .

El razonamiento que consigue explicar esta observación es que todas las galaxias se están alejando entre sí, a pesar de que todas ellas se atraigan como consecuencia de la gravedad. Dado que además podemos asegurar el mismo efecto en épocas anteriores debido a que las medidas efectuadas a las galaxias más lejanas son medidas realizadas a estas galaxias en una época pasada (debido a que la luz que observamos es la que emitieron hace millones de años), implica que debe ser el Universo (entiéndase, el espacio-tiempo) el que está expandiéndose, llevándose consigo a todos los cuerpos que en él residen, como son las galaxias.

Así, se llegó a la demostración definitiva de que el Universo se encontraba en expansión, y no era estático tal y como postuló Einstein en sus conclusiones iniciales. Así fue como se derribó el último rasgo que permanecía estático en la teoría: el Universo en sí; ya que la idea de un espacio-tiempo estático ya había sido refutada dando paso al espacio-tiempo dinámico.

### 1.2.2. Singularidades y Big Bang

Una de las consecuencias que trajo el descubrimiento de la expansión del Universo fue que, remontándonos hacia atrás en el tiempo, se predecía un instante para el cual todo el Universo estuvo comprimido en un único punto, de densidad y temperatura infinitas, al cual podríamos calificar del *principio del Universo*, y al que se denominó el *Big Bang*.

Esta conclusión resultó ser, quizá, un cambio aún más traumático que la de perder la concepción de un Universo estático, ya que con esta idea se rompió una de las últimas secuelas que se arrastraban desde la física clásica (o la última si excluimos la continuidad del espacio-tiempo), es decir, la eternidad del Universo.

Con esto, se pasó de una escala temporal que contemplaba la evolución de un Universo

que había existido siempre, a un Universo que tenía un comienzo, que habría sucedido hace unos, aproximadamente, 13.700 millones de años, de acuerdo a las medidas experimentales realizadas a la velocidad de alejamiento de las galaxias (el cual nos proporciona directamente el tiempo para el cual todas estas galaxias estuvieron juntas, en el supuesto en que la constante de expansión haya sido constante o aproximadamente constante, como parecen indicar las observaciones) y obtenido también a partir de diversas soluciones teóricas de las ecuaciones de campo, en donde se buscan soluciones que describan un universo que evolucione hasta tener las propiedades que observamos en la actualidad.

Estudiando el mismo instante del Big Bang, obtenemos que las ecuaciones de Einstein se tornan infinitas, como consecuencia de que en dicho punto la curvatura del espacio-tiempo se hace infinita, al igual que la densidad de energía. Esto en un principio implica que dicho punto es en donde efectivamente surgió el Universo. Sin embargo, un razonamiento más humilde lleva a la conclusión de que en dicho instante, al tornarse las soluciones infinitas, la propia descripción que nos da la GRT se separa de lo que realmente ocurrió y por tanto carece de sentido. Es decir, la propia GRT deja de ser válida en tal instante.

Esto nos dejaba una teoría muy prometedora, que se ajusta a todas las observaciones efectuadas en el Universo de una forma precisa, pero que tenía como inconveniente que dejaba de ser válida en el mismo principio del Universo. Aunque afortunadamente esto no tenía mayor complicación para que fuera perfectamente válida en el resto de casos.

Sin embargo, pronto se descubrieron otras regiones del Universo donde también se tenía una singularidad (punto donde la curvatura del espacio-tiempo se hacía infinita). Estas regiones eran el interior de los *agujeros negros*.

Estos son objetos que presentan una densidad de energía tan alta que producen una curvatura del espacio-tiempo lo suficientemente grande (es decir, generan una fuerza de gravedad tan grande) como para que ni la luz (que es la partícula que más rápido viaja: a la velocidad de la luz) pueda escapar de ellos. Esto provoca que dichos objetos no radien energía (al menos en un modelo clásico), siendo totalmente oscuros y provocando que cualquier cosa que entre en ellos no pueda salir.

Aunque la idea de estos objetos (con ciertos matices) ya se tenía con las ecuaciones de Newton, la GRT trajo un estudio más detallado de éstos, prediciendo por ejemplo que, dado que la curvatura del espacio-tiempo se hace infinita en ellos, el tiempo dentro de un agujero negro debe detenerse completamente.

Que la GRT fallase a la hora de explicar lo que ocurría en estos puntos radicaba fundamentalmente en la propia naturaleza de las singularidades y de la GRT.

En estas regiones, se está trabajando con unas distancias (cerca de la singularidad) muy cortas, y con unas curvaturas del espacio-tiempo muy grandes (tendiendo a infinitas, según la GRT). Sin embargo, a estas escalas, microscópicas, se tiene que los efectos cuánticos producidos dejan de ser despreciables y se vuelven predominantes. Y por tanto, una teoría clásica como es la GRT no consigue dar una descripción válida en dichas situaciones, necesitándose una descripción cuántica para ello.

### 1.3. Mecánica Cuántica

Llegados a este punto, es tiempo de saltar a la otra gran teoría que nació a comienzos del siglo XX, mientras la GRT triunfaba en la explicación de todos los sucesos que ocurren a grandes escalas, con la gravedad como principal interacción, aunque esta vez para explicar el reino microscópico: la *Mecánica Cuántica* (MC).

En esta ocasión, la necesidad de dicha teoría vino forzada por varios hechos fundamentales que la física clásica no conseguía explicar, dando resultados imposibles. Uno de ellos, por ejemplo, era la descripción del átomo, de cómo el electrón se mantenía orbitando al núcleo, ya que según la física clásica, el electrón no podría estar orbitando al núcleo de forma estable, sino que debería decaer hacia éste en un tiempo muy breve, lo que causaba que, según ésta, los átomos no podrían existir.

Al igual que la GRT, la MC trajo un gran cambio de paradigma frente a la física clásica. Para comenzar, la evolución de un sistema dejaba de ser determinista como predecía la mecánica clásica, pasando a ser probabilista. Esto implicaba que para cualquier propiedad del sistema, su medición nos proporcionaba un conjunto de soluciones probables, cada una de ellas con una probabilidad dada, en lugar de darnos una única solución posible como ocurría clásicamente.

Además, la MC predecía que la evolución de cualquier sistema se puede describir mediante una *función de onda*,  $\Psi$ , que contiene *toda* la información del sistema. En principio, esta función carecía de significado físico, aunque su módulo cuadrado era la probabilidad de presencia (de que el sistema se encuentre en un estado dado). Esta descripción además, partía de la hipótesis del carácter ondulatorio de todas las partículas, las cuales dejaban de ser puntuales para venir descritas como ondas (mediante dicha función de onda).

Otro de los cambios que trajo la teoría es que todas las propiedades del sistema: la posición, el momento, el campo eléctrico, etc pasaban a ser observables descritos mediante operadores que actuaban sobre dicha función de onda, representando así el proceso de medida de dicho parámetro sobre el sistema. Esto, además del nuevo apartado matemático que introducía, provocaba que cuando se realizaba una medida sobre el sistema, éste (i.e. su función de onda) se modificase, cambiando sus propiedades. Así, se dice que la función de onda se proyecta (o colapsa) cuando se efectúa una observación (i.e. medida) sobre ella. Esta es la interpretación estándar de la MC, también llamada *interpretación de Copenhague*, y de donde la probabilidad de obtener un resultado en la medida del sistema vendrá dado por

$$\mathcal{P}(\alpha) = ||P_\alpha |\Psi(\vec{r}, t)\rangle||^2$$

donde  $P_\alpha$  es el proyector sobre el subespacio generado por el valor  $\alpha$  medido.

A su vez, la descripción del sistema viene dada por el hamiltoniano, de forma que se debe verificar la *ecuación de Schrödinger*:

$$H\Psi(\vec{r}, t) = i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\Psi(\vec{r}, t)$$

donde  $H$  es el hamiltoniano del sistema (que por hipótesis se supone análogo al clásico),  $\Psi(\vec{r}, t)$  es la función de onda que describe al sistema, de cuadrado integrable, y  $\hbar$  es la

constante de Planck.

Una de las consecuencias de la proyección de la función de onda como consecuencia de una medición es que si queremos realizar dos medidas de dos cantidades diferentes (pero no del todo independientes, sino tales que comutan sus operadores asociados), se introducirá una incertidumbre en los resultados de ambas como consecuencia del propio proceso de medida, de tal forma que se verifica el *principio de incertidumbre de Heisenberg*:

$$\Delta A \Delta B \geq \frac{1}{2} |\langle [A, B] \rangle|$$

donde  $A$  y  $B$  son los operadores asociados a las dos cantidades que se miden, y  $\langle [A, B] \rangle$  es el valor medio del comutador de ambos operadores. Esto se cumple, por ejemplo, para la posición y el momento, en donde si realizamos una medida con una gran precisión en la posición, se obtiene que la medida del momento contiene un gran error, y viceversa.

Por último, otra de las conclusiones a las que se llegó con la MC fue la discretización de ciertas magnitudes, como la energía en sistemas estacionarios (p.e. un electrón alrededor del núcleo), dejando de ser continuas como proponía la física clásica.

Y de forma análoga a lo que ocurría en la GRT, la MC recupera el límite clásico cuando se trabaja con sistemas macroscópicos, por lo que resulta ser una generalización de la mecánica clásica, habiéndose probado en innumerables experimentos con una altísima precisión, trayendo siempre una coincidencia perfecta con la observación y deparándonos un gran avance en todo el mundo tecnológico.

## 2. Problemas fundamentales

El hecho de que hubiese regiones (las singularidades) donde la GRT no se verificase ya hacía crecer el pensamiento de que se necesitaba una teoría más general que contemplase estas situaciones. A su vez, hemos dicho que para describir dichas regiones era también necesario la MC, debido a que ya pertenecían al mundo microscópico, pero sin olvidar la GRT, debido a que también contenían grandes curvaturas del espacio-tiempo. Pero esto presentaba un problema infranqueable debido a que, aunque se ha tratado de numerosas formas, estas dos teorías, las dos mejores teorías que tenemos para describir los fenómenos microscópicos y macroscópicos, no son compatibles entre sí y no se pueden combinar de forma que den resultados coherentes, a pesar de los esfuerzos invertidos en ello.

Para comenzar, centrándonos únicamente en el modelo del Universo en expansión originado a partir del Big Bang que se extrae de conjugar las observaciones con la GRT, aparecían ciertos matices que hacían pensar que “faltaba algo más” ya que no se lograba concordar todo lo observado. Los puntos “conflictivos” se reducen principalmente a los siguientes.

### 2.1. Problema del horizonte y homogeneidad

Hemos visto cómo podemos asegurar que el Universo pasó por una época en la que tenía un reducido tamaño y tenía una enorme densidad de energía, dando paso a un crecimiento continuo durante su evolución. Esto hace que a las altas temperaturas y densidades que se encontraban al principio, la materia (protónes y electrones sueltos, fundamentalmente) y la radiación interaccionaban entre sí continuamente, en lo que se suele definir como una “sopa cósmica”, que no era otra cosa que un plasma formado por partículas y fotones, produciendo que el Universo fuera opaco, ya que la luz no se podía propagar sin que tuviera interacciones (dispersión y absorciones) con la materia.

A medida que la temperatura y densidad fue descendiendo (hasta unos 3.000 K, unos 300.000 años después del Big Bang), las partículas pudieron comenzar a agruparse formando así los primeros átomos estables (Hidrógeno en su mayoría). Esto hizo que la luz, de pronto, pudiera viajar sin ser absorbida por la materia, en lo que se denomina *la Era de la recombinação ó el desacople*.

En este punto, el Universo se hizo transparente a la radiación, convirtiéndose en la época más antigua donde podemos observar al Universo mediante ésta. Y dadas las condiciones de temperatura que reinaban en ese momento (de unos 3.000 K), en el momento

del desacople se tenía una emisión análoga al de un cuerpo negro a esa temperatura, lo que produjo un “fondo” por todo el Universo con dicha radiación.

Este es el *fondo cósmico de microondas* (CMB) que actualmente vemos a una temperatura de  $\approx 2.7$  K como consecuencia de la expansión del Universo, y que es isótropo hasta una parte en  $10^5$ , es decir, solo hay diferencias de temperatura respecto a ese valor medio en el orden de  $\sim 10 \mu\text{K}$ .

Sin embargo, esta gran isotropía causaba un gran problema. Puesto que en esa época el Universo ya tenía un tamaño considerable, hay diferentes regiones del Universo que no han podido estar conectadas causalmente. Esto se debe al hecho de que la radiación (u otra señal) viaja a la velocidad de la luz, necesitando un tiempo dado en llegar a otro punto del Universo, el cual, a su vez, se está alejando del emisor debido a la expansión. Así, tenemos zonas que no están conectadas causalmente porque la luz no ha podido llegar a ellas, pero que, sin embargo, tienen la misma temperatura con una precisión altísima, lo cual es prácticamente imposible que ocurra por evolución independiente, ya que con gran probabilidad habrían acabado evolucionando acabando con unas condiciones diferentes entre sí.

Y por último, dado que el Universo se ha estado expandiendo desde esa época hasta hoy, las pequeñas fluctuaciones que hubiera durante el desacople se habrían tenido que ir magnificando, por lo que en ningún caso se podría obtener una homogeneidad tan alta.

## 2.2. Problema de la planaridad

A través de observaciones recientes se ha podido determinar que el Universo a grandes escalas es prácticamente plano (*véase* [2]), algo que desde la GRT no estaba fijado, ya que la geometría del Universo podía ser tanto abierta, cerrada como plana.

Sin embargo, con la expansión del Universo y los modelos presentes, se tiene que su geometría debería alejarse de la planaridad conforme avanza el tiempo. Así que combinando esto con la planaridad observada, se tiene que en los instantes iniciales el Universo debía ser plano con una precisión de una parte en  $10^{60}$ . Lo cual, para la mayor parte de los cosmólogos, no es aceptable debido a lo altamente improbable de una condición inicial tan restrictiva.

## 2.3. Inflación cósmica

Para resolver estos problemas, Alan Guth en 1980 enunció una hipótesis para el Universo primigenio: en sus primeras etapas, éste experimentó un periodo de expansión exponencial (y no lineal como el actual) en el que en un breve instante de tiempo (del orden de  $10^{-30}$  s) se expandió de una forma alarmantemente rápida, multiplicando su tamaño en un factor  $e^{70} \approx 10^{30}$  (pasó de tener unos  $10^{-30}$  m a 1 m).

Esta hipótesis, que debía introducirse en la historia del Universo como un añadido más, sin ningún argumento que lo apoyara, propiciaba que los problemas anteriormente descritos se subsanaran.

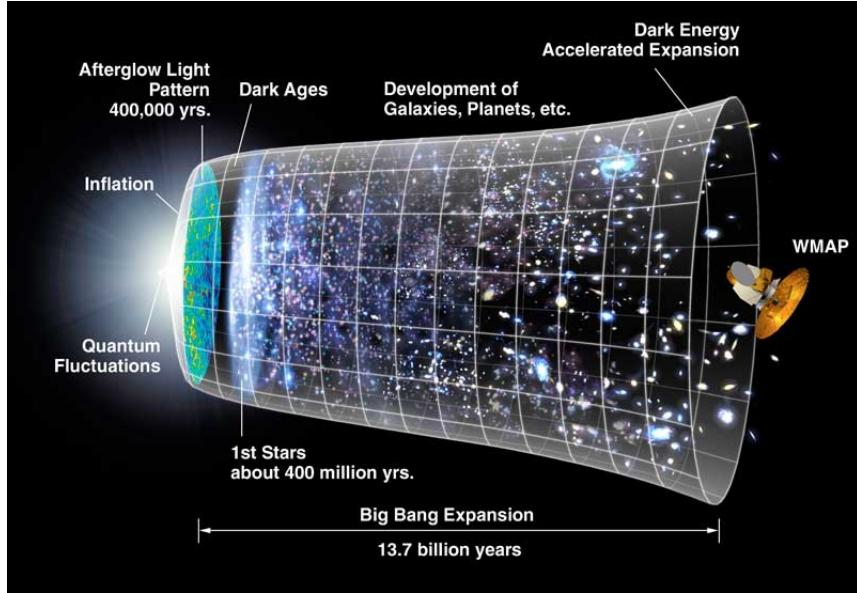


Figura 2.1: Evolución del Universo desde el Big Bang, en donde se observa el momento en que se produjo el CMB y la posterior evolución de estructuras como galaxias y cúmulos.

En concreto, el problema de la causalidad se resolvía debido a que antes del periodo inflacionario, el Universo tenía un tamaño tan pequeño que todas sus partes pudieron estar conectadas causalmente, por lo que una vez se produjo la inflación adquiriendo un tamaño considerable, las diferentes regiones del Universo ya se habían homogeneizado. A su vez, como consecuencia de la inflación las fluctuaciones que hubiera en el Universo primigenio se diluirían haciéndose menos predominantes. Una forma de entender esto fácilmente es realizando la comparación con el proceso de inflar un globo, aunque no sea muy rigurosa: si éste tiene una imperfección en su estado inicial, pongamos un punto dibujado a rotulador, al inflarle dicha imperfección se atenúa ya que ésta ahora se expande en una área más grande.

Y por otro lado, la inflación también explica la geometría plana observada para el Universo, ya que aunque inicialmente tuviera una curvatura distinta de cero con una precisión mucho menor que la requerida, de una parte en  $10^{60}$ , el periodo inflacionario provocó que esta geometría inicial se aplanase en un factor enorme, dando como resultado que después de esta etapa inflacionaria ésta fuera plana con una precisión mayor de 1 parte en  $10^{-60}$ , por lo que aunque durante la posterior expansión diverge de la planaridad, los resultados están de acuerdo con lo observado.

## 2.4. Incompatibilidades entre la GRT y la MC

Por otro lado, los intentos de obtener una teoría unificadora de la gravedad con la cuántica, una *teoría cuántica de la gravedad* ó *gravedad cuántica*, comenzaron por dos planteamientos: intentar cuantificar la GRT ó extender la MC para que incluyese la gravedad.

En la primera propuesta, la GRT planteaba serios problemas desde sus fundamentos

que hacía imposible cuantificarla y obtener una gravedad cuántica, lo que requería cuantizar el espacio-tiempo. Uno de estos problemas era que desde la base de la GRT se trataba al espacio-tiempo como un continuo, y toda la base matemática que tiene (como puede ser el uso del tensor de Ricci, que involucra una variedad continua) se hace en base a dicho continuo, por lo que no es posible partir de esta teoría y se hace necesario elaborar la teoría desde cero.

Como contrapartida, tampoco se conseguía una generalización de la mecánica cuántica que incluyese la gravedad, fundamentalmente debido a varios problemas que residen en la base de la propia teoría.

#### 2.4.1. Independencia del fondo

El primero de ellos radica en la *independencia del fondo*, i.e. a diferencia de la GRT, la MC establece que hay un “fondo” (es decir, un espacio y un tiempo) fijo, igual para todos los observadores y sistemas y constante en el tiempo. Es decir, el tiempo evoluciona de igual forma para todos los sistemas y el espacio es el mismo y está fijado en todos los puntos del espacio. Esto, que para el caso microscópico no incluye ningún error debido a que en una región tan pequeña el espacio siempre se puede considerar plano y constante y el tiempo igual para todos los observadores, no es así cuando incluimos la gravedad, ya que desde la GRT conocemos que el espacio-tiempo es dinámico, y por tanto se tienen geometrías cambiantes en el tiempo, el cual tampoco es igual para todos los observadores.

Por lo tanto, cualquier cambio en este apartado exige una reformulación de la MC desde sus principios, ya que no se puede pasar a una teoría independiente del fondo (i.e. que no considera un fondo fijo si no que éste puede evolucionar) con la MC tal cual está formulada actualmente.

#### 2.4.2. El problema del observador

A su vez, la MC alberga otro problema crucial: el *problema del observador*.

En MC se hace una distinción clave entre el sistema y el observador, ya que se trata al observador como un operador que actúa siempre sobre el sistema (no es parte de él) y que hace proyectar (o colapsar) a éste al observarlo. Sin embargo, cuando se intenta aplicar esta misma interpretación al Universo obtenemos un grave problema, ya que aquí tanto el observador como el sistema pertenecen al mismo, por lo que no puede hacerse una distinción entre ambos.

A su vez, hemos visto cómo la observación provoca un colapso de la función de onda. Pero al aplicarlo al Universo, resulta cuestionable que la propia función de onda del Universo colapse al realizar una observación.

Y por último, se tiene que los resultados que debería dar la función de onda del Universo deberían presentar una ausencia del carácter probabilista habitual en MC, ya que aquí solo se suele realizar una observación de un fenómeno (y no un gran número de ellas como ocurre en el mundo microscópico), por lo que esta aleatoriedad debería de desaparecer para ser compatible con los resultados deterministas observados.

# 3. En busca de una teoría cuántica de la gravedad

Con todo lo dicho hasta ahora, se seguía haciendo obligatorio la búsqueda de una *teoría cuántica de la gravedad* que unificase la física actual y por lo encontrado hasta este momento, se veía necesario que esta nueva teoría surgiese desde cero, y no desde los desarrollos de alguna de las dos teorías existentes.

Si además esta teoría traía la ansiada unificación entre las cuatro fuerzas fundamentales, algo en un principio posible ya que en las condiciones que reinaron durante el Big Bang se espera que éstas estuviesen unificadas, sería una *teoría del todo*, ya que explicaría todas las fuerzas e interacciones presentes en la Naturaleza.

Pero a pesar de que ya se lleva más de 50 años intentando encontrarla, todavía no se ha obtenido ninguna teoría definitiva, aunque sí varios avances importantes con respecto a lo que nos podemos encontrar en la teoría unificadora final.

## 3.1. Una nueva interpretación de la MC: multiversos

Para resolver el problema que existía en la MC para entender tanto el colapso de la función de onda como el problema del observador, H. Everett propuso en 1957 una nueva interpretación de la mecánica cuántica. En ésta, se reemplazaba la interpretación de Copenhague por una nueva en la cual se afirmaba que había una función de onda universal, que describía todo el Universo, tanto a los observadores como a los sistemas, sin establecer ninguna diferencia entre ellos. Con esto, el proceso de medida se reducía a una interacción entre ambos, ya que los dos estaban introducidos en la función de onda, dando una predicción sobre lo que ve una parte del sistema al ser observada por el observador que, también está en el propio sistema.

Esto causaba que dicha función no colapsase durante el proceso de medida, sino que simplemente evoluciona de una forma continua. Y a su vez, los resultados que da dicha función de onda al realizar una medida son deterministas, lo cual encaja con lo esperado para una función de onda del Universo.

Sin embargo, una de las consecuencias que traía esta interpretación es que cuando se analizaba lo que ocurría con la función de onda durante el proceso de medida, se observa que ésta se "desdobra" en otras funciones de onda que describen al mismo Universo pero donde en cada una se ha obtenido uno de los posibles resultados que se podía obtener durante la medida. Es decir, al medir, desdoblamos el Universo en un número de historias tal que cubren todos los posibles resultados para dicha observación. Así, en cada una de

ellas se obtiene un único resultado concreto.

Para la interpretación de esto, se han debatido diversas vías, aunque una de las más coherentes es la que trata a estas soluciones como posibles historias del Universo, cada una de ellas con una probabilidad dada de ocurrir, pero de las que realmente solamente una de ellas es la que tiene lugar en la realidad [1], aunque también está la interpretación de que dichos universos desdoblados existen, siendo el nuestro uno de ellos, por lo que se estaría hablando de *multiversos* (i.e. no existe un único Universo).

### 3.1.1. La función de onda del Universo

Fuera aparte del problema de la interpretación, se debe encontrar cuál es la función de onda que describe al Universo. En este punto, los mayores éxitos pertenecen a los trabajos realizados por J. Hartle y S. Hawking.

En el trabajos del segundo<sup>[6]</sup>, se postula que la probabilidad que debe dar dicha función de ondas (i.e. su módulo cuadrado) debe ser proporcional a la métrica  $g_{\mu\nu}$  del espacio-tiempo y a la distribución de materia  $\phi$  de la forma

$$||\Psi||^2 \propto \exp(-I(g_{\mu\nu}, \phi))$$

donde  $I$  es la acción euclídea, y de donde la probabilidad para un observable dado se reduce a integrar a todos los demás observables. La idea subyacente de utilizar una acción euclídea es que, aunque parten de una métrica de Minkowski (legado de la GRT), ésta se transforma en una 4-euclídea ("rotando" la coordenada temporal: de  $-ct$  a  $ct$ ). Con esto, Hartle-Hawking consiguieron unos resultados prometedores, como que en el límite clásico y en función de  $\Psi$ , ésta se puede interpretar bien en términos de una geometría 4-euclídea ó en términos de una geometría 4-lorentziana, ambas compatibles con los límites requeridos y, sobre todo, no singulares en ningún punto. A su vez,  $\Psi$  debe verificar la ecuación de Wheeler-DeWitt (la análoga a la ecuación de Schrödinger en MC):

$$H|\Psi>=0$$

donde  $H$  es la restricción hamiltoniana del sistema. Además, también se postuló que dicha función debe de dar la condición inicial del Universo, además de suponer la *condición de no-frontera*, i.e. el Universo admite todas las configuraciones posibles de funciones de onda, no hay que establecer ninguna condición frontera que deba cumplir.

Por último, una vía diferente que recientemente está teniendo cierta relevancia es el *principio holográfico*, que postula que los observables de la teoría cuántica de la gravedad en  $d$  dimensiones espacio-temporales, se pueden evaluar en términos de superficies  $d-1$  dimensionales. Es decir, a diferencia de la interpretación de Hartle-Hawking, se postula que con la frontera es posible extraer la información del Universo. Aunque todavía no se tiene una teoría elaborada, la ventaja que podría traer de ser válida es que se puede reducir toda la dinámica a una superficie de una dimensión menor, reduciendo así el número de ecuaciones y por tanto, la complejidad.

## 3.2. Teoría de Cuerdas, Supercuerdas y Teoría M

Quizá la Teoría de Cuerdas (TC) sea una de las teorías más novedosas que hay actualmente para intentar unificar la gravedad con la cuántica. Aunque antes de pasar a exponer la teoría, es necesario hacer dos matices: primero, que ésta no es una única teoría como tal, sino que se puede describir como un conjunto de teorías, cada una de ellas con una bifurcación diferentes, que mantienen una idea conjunta pero que cada una da una explicación diferente a un mismo hecho. Y segundo, que no parte de una base (o formulación inicial) bien establecida como otras teorías, sino que se va avanzando en dicha teoría con unos postulados difusos, que se espera se definan cuando se consiga la elaboración final de la teoría.

### 3.2.1. Unificando partículas e interacciones

Entrando en detalle, la TC cabe enmarcarla como una teoría cuántica en la que se describe la propagación y la interacción de unos objetos extensos, en principio unidimensionales, aunque después se generaliza en varias teorías a otras dimensiones, a los que por similitud se les denomina *cuerdas* (o *branas* para objetos de dimensión mayor a 1). Esto sería la generalización de las partículas puntuales con que se ha trabajado hasta hoy en día, pasando a una descripción donde se las dota de una cierta dimensión. Además, desde el inicio se intentó mantener la compatibilidad con la relatividad especial y la MC.

Estas cuerdas están dotadas de una cierta longitud, aunque al ganar energía se expanden y al perder energía se encogen, además de poder vibrar. Es decir, resultan análogas a cualquier goma elástica, y pueden ser abiertas o cerradas.

Las vibraciones que experimentan estas cuerdas se interpretan como las partículas sin masa, como el fotón, y en el caso concreto de cuerdas cerradas, son los gravitones (la partícula responsable de la gravedad, predicha por la Teoría Cuántica de Campos). A su vez, los extremos de las cuerdas se pueden interpretar como partículas cargadas: uno de los extremos puede ser una cierta partícula, como el electrón, y el otro extremo se correspondería con su antipartícula, el positrón.

Así, con este modelo se consigue reproducir todas las partículas junto con sus interacciones (recordemos que el fotón es la partícula de interacción electromagnética, que sería lo que viésemos en dicha cuerda con un electrón-positrón en sus extremos). Y además, la aniquilación partícula-antipartícula queda rápidamente explicada, ya que cuando se juntan los dos extremos, únicamente queda la cuerda, ahora cerrada, vibrando, que sería el fotón que observamos.

De esta forma, quedan unificadas las partículas y sus interacciones (ya que son distintos rasgos de una misma cuerda) de una forma elegante y natural en la teoría, algo que ninguna otra había hecho hasta la fecha, además de introducir a la gravedad (cuerdas cerradas) como una parte más de la unificación de fuerzas, y no un añadido costoso de explicar. Además, las fuerzas pasan a constituir la misma entidad que el movimiento, por lo que la descripción del movimiento de las cuerdas (sus vibraciones, rupturas, uniones, etc) es una descripción de las interacciones existentes.

Las cuerdas, como tales, contienen dos constantes fundamentales: la *tensión de la cuerda*, que describe la densidad de energía en la cuerda, y la *constante de acoplamiento de la cuerda*, que informa de la probabilidad de ruptura de la cuerda, para separarse en dos y dando como resultado una interacción, con lo que solo queda definir el movimiento que deben seguir estas cuerdas. Sin embargo, aquí se obtiene una ley simple: las cuerdas tienen una longitud, y dado que se mueven en el tiempo, se puede obtener el área que cubren dichas cuerdas en su movimiento (aprox. longitud por tiempo). Entonces, *el movimiento de dichas cuerdas es tal que minimiza este área*. Así, con una ley tan simple, quedan unificadas las diversas fuerzas, formuladas de una forma mucho más complejas hasta ahora.

### 3.2.2. Las revoluciones

La TC se caracteriza por haber pasado por dos revoluciones en los últimos 20 años, que hicieron aumentar drásticamente las expectativas en dicha teoría, aunque con el paso del tiempo se ha visto que aún faltaba algo más para ser la teoría definitiva.

La primera de ellas ocurrió en 1984, cuando, después de incluir la teoría de supersimetría en la TC, de una forma elegante y sencilla (al contrario de lo que le ocurría a la supersimetría al incluirla en teorías cuánticas), en lo que se pasó a llamar *supercuerdas*, se demostró que ciertas *anomalías* comunes a todos los intentos de describir una teoría unificada, no se presentaban en TC. A su vez, con la incorporación de la supersimetría se evitó varios problemas que tenía la TC original, como la existencia del *taquión*, una partícula que viajaría a mayor velocidad que la luz.

A continuación se descubrió que no solamente existía una única teoría, sino que existían numerosas teorías de supercuerdas coherentes en un espacio-tiempo de 10 dimensiones (número mínimo exigido). Y para explicar estas 6 dimensiones que no vemos, hacía falta forzar la geometría de éstas para que permanecieran invisibles (por ejemplo, enrollándolas en "volúmenes" muy pequeños). Sin embargo, para cada geometría posible se tenía una descripción completamente diferente de las interacciones y partículas (es decir, se podría decir que se tenía otra teoría de cuerdas distinta). Esto provocaba además que apareciesen numerosas constantes a determinar y que los grados de libertad de la teoría creciesen proporcionalmente, imposibilitando la realización de cualquier mínima predicción.

Unos años después, en 1995, se produjo la 2<sup>a</sup> revolución de cuerdas: se detectaron las *dualidades*. Éstas son equivalencias que se encontraron entre las distintas teorías, de forma que se deducía que éstas simplemente eran distintas formas de observar el mismo fenómeno. En general, diferentes teorías explicaban el mismo fenómeno pero de formas distintas (incluso se producía que una teoría que predecía interacciones débiles daba los mismos resultados que las teorías que predecían interacciones fuertes), aunque en otras ocasiones, estas dualidades solo eran aproximadas.

Por esta razón, se conjeturó que todas estas teorías formaban parte de una única teoría, de 10+1 dimensiones (10 espaciales y 1 temporal), a la que se la llamó *Teoría M*. Además de la necesidad de agregar una dimensión más, se vio que la teoría debía describir, además de las cuerdas, otros objetos de más dimensiones, las *membranas* (para dos dimensiones), y las *p-branas* (para *p* dimensiones).

### 3.2.3. Cara y cruz

Desde este último gran salto que ha tenido la TC hasta nuestros días, se han producido algunos logros, como la concordancia en las predicciones sobre agujeros negros “extremos” (los que contienen la máxima carga eléctrica y magnética que pueden sopor tar) frente a nuestros modelos actuales de estos cuerpos.

Pero como contrapartida, el descubrimiento de la existencia de la *energía oscura* (la cual se puede explicar como una constante cosmológica positiva) produjo un gran problema en la TC, ya que resultó muy complicado introducir el valor observado para ésta (y sus efectos sobre el Universo) en la teoría, debido a que hasta la fecha ninguna TC, o la Teoría M, había podido describir un Universo con una constante positiva.

Este hecho pudo llegar a ser explicado en algunas TC al “enrollar” diferentes antibranas (el equivalente a las branadas las antipartículas a las partículas), pero esto trajo un alto precio: se consiguió obtener un número aún más grande de diferentes teorías de cuerdas concordantes con estos datos. Así pues, cada vez el número de teorías *aceptables* (en el sentido de coherentes con la realidad) era mayor, y no se tenía ningún método que pudiera discernir por qué una valdría y otra no. Aún más, cada una de ellas tenía un gran número de constantes a ajustar que, convenientemente, podían llegar a explicar un gran rango de universos radicalmente opuestos, lo cual hace imposible que la teoría pueda realizar cualquier predicción sobre la realidad.

### 3.2.4. Conclusiones

Recapitulando, aunque dicha teoría (la Teoría M) pretende ser la unificación, a día de hoy todavía no se ha logrado una independencia del fondo, sino que las TC se establecen bajo un marco de una geometría fija, i.e. no evoluciona en el tiempo. Y esto, en cierta forma, se intenta acomodar con el espacio-tiempo de la GRT a través del gran número de dimensiones con que cuenta la teoría.

Y dado que la Teoría M únicamente está conjeturada, sin tener aún ninguna formulación real, siendo lo único que induce a pensar en su existencia la existencia de las dualidades entre TC diferentes, no deja de ser algo evanescente, que no se puede utilizar, por lo que se hace obligatorio una descripción concreta para poder tratarla como una teoría como tal. Aunque esto podría dar un paso más en poco tiempo, ya que recientemente se están teniendo de nuevo progresos trabajando con tipos concretos de branadas, lo que podría conducir a una 3º revolución de cuerdas. Quien sabe.

## 3.3. Gravedad Cuántica de Bucles

La Gravedad Cuántica de Bucles (LQG) surgió como una búsqueda de una teoría que pudiera unificar la GRT con la MC pero sin introducir ningún postulado adicional a los considerados en ambas. Tan solo se partió con la idea de que el espacio debía ser discreto. Además, a diferencia de las cuerdas, se mantuvo uno de los principios básicos de la GRT: la independencia del fondo, i.e. la geometría del espacio-tiempo no está fijada.

Uno de los primeros pasos de los que surgió la teoría fue una reformulación de la GRT

realizada por A. Ashtekar en 1986, sin ninguna hipótesis adicional, en donde se pasa a describir el campo espacio-temporal según sus líneas de campo (análogas a las eléctricas o magnéticas). Pero aquí, en ausencia de materia dichas líneas se podían cerrar sobre sí mismas, formando un bucle (de donde surgió el nombre de la teoría).

### 3.3.1. Redes de spin

Combinando las hipótesis de la GRT con los de la MC y la reformulación de la GRT, se llegó a un resultado que desvelaba que, ciertamente, el espacio estaba cuantizado: existen unidades (*átomos*) indivisibles del espacio-tiempo. Como consecuencia de esto, se establece unos límites para el volumen y superficie que puede tener cualquier curva cerrada descrita en el espacio-tiempo, de forma análoga a lo que ocurría con las energías que puede tomar un electrón dentro del átomo.

Los valores que pueden tomar el volumen y el área son múltiplos de la longitud de Planck,  $\ell_P \approx 1.6 \cdot 10^{-35}$  m, siendo el mínimo área posible el cuadrado de  $\ell_P$  y el volumen mínimo el cubo de dicha cantidad.

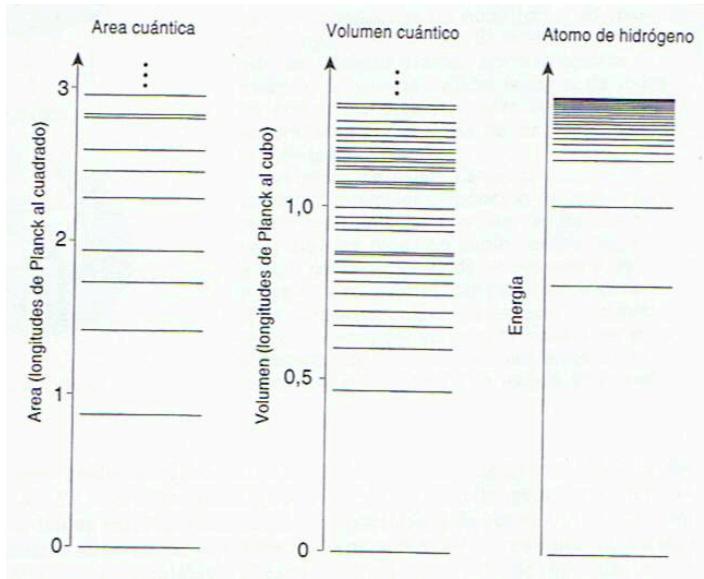


Figura 3.1: Cuantización del volumen y del área del espacio-tiempo, resultando análogo a la cuantización de los niveles de energía del átomo de Hidrógeno.<sup>[9]</sup>

Para representar los estados cuánticos que toman dichas cantidades, se recurre a las llamadas *redes de spin*. En ellas, cada elemento cúbico del espacio se representa como un punto, al que se le asocia un número: el volumen del elemento, del cual surgen 6 aristas (una por cada cara del elemento, en este caso un cubo, aunque se puede tener cualquier forma), a las que se las asocia el área correspondiente a su cara. De esta forma, se prescinde de los poliedros, obteniendo una generalización necesaria ya que en el caso de geometrías no planas, los poliedros no posibilitarían una representación de esta red, pero con los grafos no se obtendrá ningún obstáculo.

Así, se va extendiendo una red en la que los diferentes nodos y líneas están entrelazados, formando un grafo. De esta forma, cada estado cuántico vendrá dado por un grafo diferente, y éstos tampoco son arbitrarios, sino que vienen regidos a partir de toda la formulación matemática subyacente.

Una vez se tiene el grafo, a partir de éste se puede obtener la curvatura que presenta el espacio, ya que éste estará distorsionado influyendo en la forma en que se ordenan los diferentes puntos.

Extendiendo esta idea de grafos, se obtiene que las partículas vendrían dadas por otros nodos adicionales que se localizan sobre la red y los campos (como el electromagnético, nuclear, etc) vendrían dados por valores adicionales asociados a las líneas. Y generalizándolo para incluir la dimensión temporal, se obtiene que las diferentes líneas se convierten en planos y que los nodos son ahora líneas (se extiende una dimensión más), pasando de tener una red a, lo que se denomina, una “espuma” de spin. A su vez, la evolución temporal de las partículas o campos se obtiene de forma análoga a lo que ocurre en MC: existen diferentes probabilidades para la evolución de los diferentes procesos. Pero ahora hay una discrepancia. La red de spin no va evolucionando de una forma continua en el tiempo, sino que ésta va avanzando en unidades discretas. Es decir, el tiempo está cuantizado también, en intervalos del orden del tiempo de Planck:  $t_P \sim 10^{-44}$  s.

### 3.3.2. Agujeros negros

Los trabajos de S. Hawking y de J. Bekenstein en la segunda mitad del siglo XX nos trajeron la primera “unión” satisfactoria entre la GRT y la MC (realmente no es una unión como tal, pero al menos se trabajó con ambas teorías de forma conjunta): la explicación de lo que ocurre con el horizonte de sucesos y la materia de un agujero negro (AN).

El trabajo de Bekenstein apuntó a que el área del horizonte de sucesos actúa de forma análoga a la entropía en un sistema termodinámico: dicho área es proporcional a la entropía del AN, y éste, si se juntan dos agujeros negros, es mayor o igual que la suma de las áreas de ambos AN por separado (lo que expresa básicamente el *Segundo Principio de la Termodinámica*).

A su vez, Hawking dedujo que un AN debe emitir radiación, como consecuencia de efectos cuánticos, especialmente los pequeños. Esto hace que la vida de un AN no sea eterna, sino que poco a poco va emitiendo materia hasta que explota al hacerse suficientemente pequeño e inestable.

Con estos hechos de partida (que aunque no están comprobados experimentalmente se consideran igualmente correctos), se intentó ver qué se obtenía a partir de la LQG, deduciendo la entropía de los AN al tomar como contorno el propio horizonte de sucesos. De aquí, se obtienen los mismos resultados que obtuvieron tanto Bekenstein y Hawking, además de nuevos resultados referentes a la estructura fina que debería tener la radiación de Hawking del AN.

### 3.3.3. Dispersión de la luz

Uno de los efectos que sí se han podido proponer con dicha teoría es que la luz, como consecuencia de la propagación por un espacio-tiempo de estas características, debería presentar dispersión con respecto a la velocidad de la luz en función de su frecuencia. Es decir, el vacío también pasaría a ser un medio dispersivo, al igual que el resto de medios de la Naturaleza.

Esta desviación es muy pequeña, del orden del cociente entre la longitud de Planck y la longitud de onda, lo cual lo hace inapreciable para cualquier experimento. Sin embargo, en los GRB (explosiones de rayos gamma), que son las explosiones más energéticas que se conocen en la Naturaleza y que duran (los de corta duración) un breve intervalo de tiempo, entre milisegundos y 2 segundos, y se suelen observar a enormes distancias de la Tierra (del orden de miles de millones de años-luz), emiten en ese espacio de tiempo fotones de un rango enorme de energías, desde luz visible hasta rayos gamma ultra energéticos.

Así, una observación de un GRB en el cual se hayan emitido fotones de muy alta energía debería servir para comprobar estas predicciones, ya que debido a su distancia, estas pequeñas diferencias de velocidad que presentasen estos fotones deberían hacerse notables, con diferencias de hasta horas o días, algo plausible de detectar ya que este tipo de eventos se suelen registrar con telescopios trabajando en todas las longitudes de onda.

### 3.3.4. El gran rebote (Big Bounce)

Hemos visto que la GRT predice una singularidad en el Big Bang, que se corresponde con el punto donde dicha teoría deja de describir la realidad. Justo en este instante es donde se esperaba que la LQG se desviase de las predicciones de la GRT dando resultados finitos, pero además de verificar esto, trajo unas predicciones inesperadas.

Cuando nos encontramos con densidades muy altas de energías, la LQG predice que la estructura "atómica" del espacio-tiempo se modifica de tal forma que ahora se ejerce una fuerza de la gravedad repulsiva, en lugar de atractiva. Es decir, a partir de una densidad de energía dada, el espacio-tiempo ya no puede "soportar" un aumento de ésta y comienza a repelerla, de una forma análoga a cómo el principio de exclusión de Pauli provoca que no se puedan tener más de dos electrones en el estado fundamental.

Debido a esto, se eliminan automáticamente las singularidades. Concretamente, en el Big Bang, en donde se tenía una densidad del orden del equivalente de comprimir cerca de un billón de soles en el tamaño de un protón, esta repulsión provocó la expansión del espacio a un ritmo acelerado hasta que esta densidad descendió lo suficiente. Así, el postulado que se debe de introducir en el Modelo Estándar sobre la inflación, surge de forma natural en esta teoría, ya que dicho periodo es debido a esta naturaleza particular de la gravedad cuando se trabaja a tales densidades.

Una vez la singularidad ha sido eliminada, surge un nuevo campo de investigación: *¿qué ocurrió antes del Big Bang?*

Una posible respuesta es que el estado anterior del Universo estuviera colapsando como consecuencia de una gravedad que dominase frente a una posible expansión en dicho universo (i.e. ocurrió un *Big Crunch*, lo opuesto a un Big Bang). En este caso, lo que se habría producido sería más bien un *rebote*.

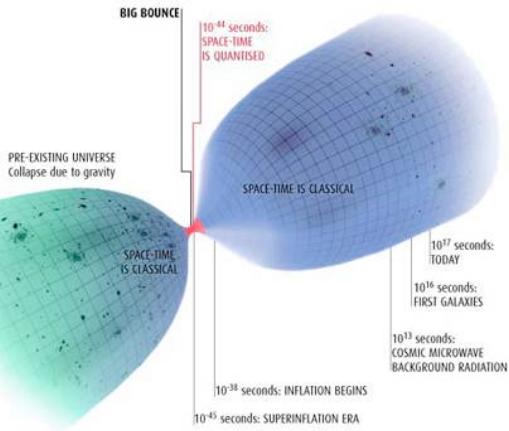


Figura 3.2: Recreación del rebote producido durante el Big Bang.

estructuras como las estrellas o galaxias. Pero en realidad no resulta tal, como consecuencia de que la LQG establece que el número de átomos del espacio-tiempo puede cambiar durante dicho proceso, lo que provoca que se tenga un grado más de libertad a la evolución del sistema que en la mecánica clásica, provocando que dicho estado pudiera comenzar con un desorden independiente al del estado anterior al rebote (i.e. la reducción de entropía está permitida ahí).

Con esto, no se evita que no se pueda extraer ningún dato del rebote o del estado anterior, ya que partículas como los neutrinos o las ondas gravitatorias, que no interactúan apenas con la materia, podrían proveer información de dichos instantes del rebote o incluso anteriores.

### 3.3.5. Comprobaciones

Una vez se tiene el "tramo de fondo" de la teoría, es necesario ver si al pasar a escalas macroscópicas se recupera el límite clásico de la GRT. Sin embargo, debido a la complejidad de los cálculos, de momento esto sólo se ha podido confirmar para espacio-tiempos de 1+1 y 2+1 dimensiones, pero no para 3+1 dimensiones.

Por otro lado, anteriormente se hizo referencia a uno de las predicciones más relevantes que daba la LQG: la dispersión de la luz en el vacío. En lo referente a esto, en marzo de este mismo año se realizó una observación de un GRB de alta energía, llegándose a registrar un fotón de  $\approx 31$  GeV. Éste, además, se registró dentro del primer segundo de la explosión.

Si bien los fenómenos por los que se producen este tipo de eventos no son muy conocidos, se cree que la emisión se produce aproximadamente a la vez para todas las longitudes de onda, por lo que (aunque se trata prácticamente de un único fotón y por lo tanto está sujeto a grandes errores estadísticos o de otro tipo) induce a pensar que dicha dispersión de la luz puede no ocurrir realmente, invalidando dicha predicción y, por tanto, la LQG. Los resultados y conclusiones de dicho evento se puede ver en [12].

Aunque aún se requiere otras observaciones y explosiones para poder contrastar los resultados.

Durante dicho instante, el Universo sufre de enormes fluctuaciones que hacen que cualquier recuerdo que pudiera permanecer de la condición anterior al rebote se pierda, como si comenzase de cero de nuevo.

Pero en este punto, resulta obligatorio introducir la *Segunda Ley de la Termodinámica*, que establece el crecimiento de Entropía para cualquier sistema, por lo que en un principio, este nuevo inicio del Universo debería conservar un alto grado de entropía (desorden), el cual seguramente imposibilitase la formación de

## 4. Conclusiones

Actualmente y tras una larga búsqueda de una gravedad cuántica, se tienen varios avances dispersos en diferentes teorías que abordan propuestas opuestas para atacar el problema, aunque en general, todas ellas aún están en pañales y o bien todavía están comenzando a lanzar sus primeras predicciones, o todavía les queda muchos pasos para tener una teoría medianamente terminada (después de lo cual vendrá ver si encaja con la realidad).

Esto hace que actualmente, cada teoría sea útil para describir diferentes fenómenos, aunque ninguna de ellas esté probada ni se espere que esto ocurra en un corto espacio de tiempo. Por ejemplo, en el caso de la TC, ésta resulta muy útil para tener una visión unificada entre partículas e interacciones, pero para situaciones con gravedad intensa, como en el Big Bang, parece más adecuada la descripción que da la LQG.

A su vez, los éxitos que han tenido estas teorías provoca que es muy posible que deban ser tenidas en cuenta como diversas contribuciones a la teoría final, la cual podría reunir los éxitos que han tenido cada una de las teorías por separado (p.e. unificación de partículas-interacciones, átomos del espacio-tiempo, ...). Aunque esto a día de hoy resulta imposible de predecir por la disparidad en los fundamentos de cada teoría.

Y aquí es necesario comentar una hipótesis que es común a casi todas las teorías cuánticas de la gravedad: la supersimetría. Una teoría que, si bien es puramente matemática y aunque se supone que se cumple a grandes distancias en el Universo, todas las observaciones actuales muestran que hasta donde podemos observar no se cumple. Además de tener la “desventaja” de que introduce numerosas partículas (el doble que las actuales) que aún no han sido observadas.

Por último, cabe destacar que si bien actualmente este campo tiene una contribución fundamentalmente teórica, ya que los experimentos u observaciones son más bien escasos, y en los años próximos esto no tiene indicios de cambiar mucho, es muy posible que los primeros resultados que puedan apoyar uno u otro razonamiento provengan tanto de observaciones lejanas (como las de GRB o quásares) o del CMB, como por los experimentos que se lleven a cabo en el LHC, con colisiones de altas energías donde se pueda recrear situaciones en donde la materia se asemeja a etapas recientes del Universo.

A su vez, aunque aquí se han recogido tres de las teorías que más importancia han adquirido, cabe puntualizar la existencia de varios planteamientos más que también intentan conseguir una teoría cuántica de la gravedad, como pueden ser la teoría de *twistores* (enunciada por R. Penrose aunque algo abandonada desde hace varios años), a la *Gravedad Cuántica Euclídea, Geometría no-conmutativa, teorías fractales ó Teoría Cuántica de Campos en espacios curvados*, todas ellas con ciertos progresos.

# Bibliografía

- [1] Jonathan J. Halliwell, *Cosmología cuántica y creación del universo*, Investigación y Ciencia, feb. 1992, 12.
- [2] Komatsu et al., *Five-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP1) observations: cosmological interpretation*, 2008. arXiv:0803.0547
- [3] Pilar Lapuente Fuentes, *Inflación*, Pontificia Universidad Católica de Chile.  
<http://www.astro.puc.cl/~npadilla/fia3009/proyectos/Inflacion.pdf>
- [4] J. Hartle, *Generalizing Quantum Mechanics for Quantum Gravity*, 2005.  
arXiv:gr-qc/0510126v1
- [5] J. Hartle, *The State of the Universe*, 2002. arXiv:gr-qc/0209046v1
- [6] S. Hawking, *The Quantum State of the Universe*, Nucl. Phys. B, **239**, 257 (1984).
- [7] R. Penrose, *El camino a la realidad*, Ed. Debate, 2006.
- [8] Lee Smolin, *Las dudas de la física en el siglo XXI, ¿es la teoría de cuerdas un callejón sin salida?*, Ed. Crítica, 2007. págs. 155-360.
- [9] Lee Smolin, *Átomos del espacio y del tiempo*, Investigación y Ciencia, mar. 2004, 58.
- [10] Martin Bojowald, *Rebote del Universo*, Investigación y Ciencia, dic. 2008, 14.
- [11] Lee Smolin, *How far we are from the quantum theory of gravity?*, 2003.  
arXiv:hep-th/0303185v2
- [12] A. A. Abdo et al. *A limit on the variation of the speed of light arising from quantum gravity effects*, Nature, **462**, 331-334 (October 28, 2009).

