

# EL UNIVERSO EN EXPANSIÓN



# LA GRAVEDAD CUÁNTICA

- Aún no sabemos si tiene sentido una Gran Unificación, pero mientras se aclara esta duda podemos preguntarnos si la gravedad podría entrar en algún esquema de unificación.
- ¿Quizás exista una temperatura de la cual las cuatro interacciones fundamentales de la naturaleza se encuentran unificadas?

# LA GRAVEDAD CUÁNTICA

- Esto, hasta ahora, es una especulación.
- El principal escollo es que no tenemos ninguna idea clara de cómo se comporta la gravedad a nivel cuántico.

# LA GRAVEDAD CUÁNTICA

- Para ubicar el problema veamos cuáles son los límites de la relatividad general.
- Para ello, recordemos que las dos constantes que entran en esta teoría son  $G$ ; la constante de **Newton**, y  $c$ , la velocidad de la luz.

# LA GRAVEDAD CUÁNTICA

- En una teoría cuántica de la gravitación, sea cual fuere su forma, tendría que aparecer también otra constante fundamental para incluir los efectos cuánticos: ésta sería  $h$ , la constante de **Planck**.
- $G$ ,  $c$ , y  $h$  son las tres constantes fundamentales de la naturaleza y sus valores se han determinado experimentalmente.
- El mismo **Planck** se dio cuenta de que es posible combinarlas entre sí para obtener unidades de longitud, tiempo y masa.

# LA GRAVEDAD CUÁNTICA

- En efecto, la combinación:  $\sqrt{\frac{G}{hc^3}}$

tiene unidades de longitud y vale unos  $10^{-33}$  cm

- Del mismo modo, la combinación:  $\sqrt{\frac{G}{hc^5}}$

tiene unidades de tiempo y equivale a unos  $5 \times 10^{-44}$  s

- Por último, la combinación:  $\sqrt{\frac{hc}{G}}$

tiene unidades de masa y equivale a unos  $5 \times 10^{-5}$  g

# LA GRAVEDAD CUÁNTICA

- La longitud y el tiempo de **Planck** son las unidades naturales de un nivel de la realidad aún desconocido, muchísimo más pequeño que el mundo cuántico.
- Para tener una idea sencilla: el tamaño más común de un átomo es de unas  $10^{25}$  longitudes de **Planck**.

# LA GRAVEDAD CUÁNTICA

- En el mundo de **Planck**, la fuerza gravitacional vuelve a ser de fundamental importancia: los fenómenos cuánticos y gravitacionales se relacionan íntimamente entre sí, y ni la mecánica cuántica ni la relatividad general son válidas por sí solas.



# LA GRAVEDAD CUÁNTICA

- La creencia más difundida es que la relatividad general se aplica en distancias e intervalos de tiempo mucho mayores que la longitud y el tiempo de **Planck**, del mismo modo que la mecánica de **Newton** es válida para objetos mucho más grandes que un átomo.

# LA GRAVEDAD CUÁNTICA

- Por otra parte, la masa de **Planck** es muchísimo mayor que la masa de cualquier partícula elemental; se piensa que esta masa esta relacionada con la energía necesaria para "romper" una partícula elemental, energía que queda completamente fuera de todas nuestras posibilidades tecnológicas.

# LA GRAVEDAD CUÁNTICA

- Si el campo gravitacional es, en realidad, una curvatura del espacio-tiempo debemos suponer que en el mundo de **Planck**, donde dominan los efectos cuánticos y gravitacionales, el espacio-tiempo posee fluctuaciones cuánticas como cualquier campo.

# LA GRAVEDAD CUÁNTICA

- Así como los océanos presentan aspecto plano y tranquilo desde el espacio exterior pero poseen olas, turbulencias y tormentas a escala humana, el espacio-tiempo parece liso a gran escala pero es extremadamente turbulento en el nivel de **Planck**.

# LA GRAVEDAD CUÁNTICA

- Las fluctuaciones cuánticas del espacio-tiempo debieron manifestarse en toda su plenitud durante los primeros instantes del Universo.
- Según una hipótesis muy popular en la actualidad, las mismas galaxias tuvieron su origen en esas fluctuaciones cuánticas, cuando la edad del Universo era comparable al tiempo de **Planck**.

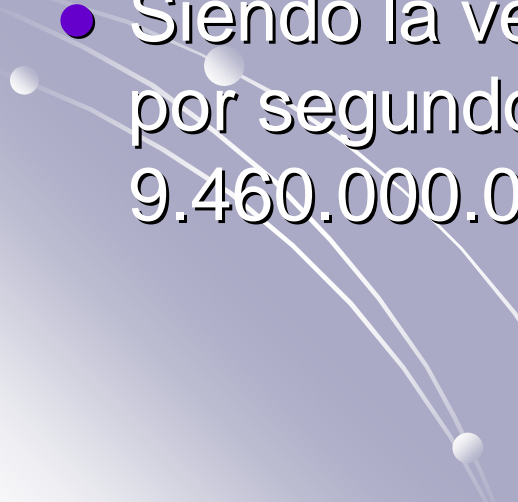
# LA GRAVEDAD CUÁNTICA

- Prácticamente desde que la mecánica cuántica tomó la forma con que se la conoce actualmente muchos físicos intentaron crear una teoría cuántica de la gravitación.
- A pesar de varios intentos interesantes todavía no se tiene una respuesta convincente.
- La gravitación cuántica es el gran hueco en la física de las interacciones fundamentales.

# LA GRAVEDAD CUÁNTICA

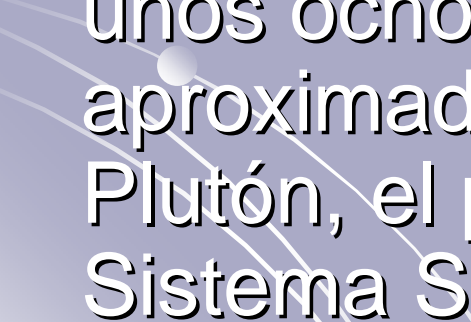
- Incluso algunos se han preguntado si tiene sentido hablar de la gravitación a nivel cuántico: ¿quizás esta fuerza fundamental es incompatible con la mecánica cuántica?, ¿quizás la gravedad es una manifestación de otro fenómeno insospechado...?
- Todas éstas son dudas aún sin resolver.
- Mientras, es justo señalar que ha habido varios intentos por cuantizar la gravedad.
- El más reciente tiene que ver con lo que se conoce como *teoría de las supercuerdas*.

# ESTRELLAS, GALAXIAS Y CÚMULOS DE GALAXIAS

- Antes de iniciar nuestro rápido viaje mental por el Universo definamos una unidad de medida. Para medir las distancias cósmicas utilizaremos el año luz.
  - Esta es la distancia que recorre la luz en un año.
  - Siendo la velocidad de la luz 30.000 kilómetros por segundo, un año luz equivale a unos 9.460.000.000.000 kilómetros.
- 




# ESTRELLAS, GALAXIAS Y CÚMULOS DE GALAXIAS

- A la velocidad de la luz es posible dar siete vueltas y media a la Tierra en solo un segundo, y llegar a la Luna en un segundo y fracción.
  - Un rayo de luz emitido por el Sol tarda unos ocho minutos en llegar a la Tierra y aproximadamente una hora en llegar a Plutón, el planeta más distante en el Sistema Solar.
- 
- A decorative graphic in the bottom-left corner of the slide, consisting of several thin, light-colored lines that curve upwards and to the right, resembling orbital paths or trajectories. Small white circles are placed at various points along these lines, suggesting celestial bodies or specific points in space.

# ESTRELLAS, GALAXIAS Y CÚMULOS DE GALAXIAS

- Pero para las distancias características del Universo, la luz es bastante lenta; la estrella *Alfa Centauri* una de las más cercanas a nosotros, se encuentra a la distancia de cuatro años luz, lo cual quiere decir que la luz emitida por esa estrella tarda cuatro años en llegar hasta nosotros (actualmente la estamos viendo como era hace cuatro años).
- Pero *Alfa Centauri* es nuestra vecina cercana...

# ESTRELLAS, GALAXIAS Y CÚMULOS DE GALAXIAS

- Las estrellas se agrupan en galaxias, que son conjuntos de miles de millones de estrellas.
  - Nuestro Sol es una estrella entre tantas otras y forma parte de una galaxia a la que llamamos Vía Láctea.
- 

# ESTRELLAS, GALAXIAS Y CÚMULOS DE GALAXIAS

- La distancia del Sol al centro de nuestra galaxia es de unos 30.000 años luz, y un rayo de luz tardaría 100.000 años en recorrer la Vía Láctea de un extremo al otro.
- Pero aún estas son distancias mínimas comparadas con la vastedad del Universo.

# ESTRELLAS, GALAXIAS Y CÚMULOS DE GALAXIAS

- La galaxia de Andrómeda es la vecina de la Vía Láctea y se encuentra a una distancia de 2.000.000 años luz.
- Nosotros la vemos hoy tal como era hace 2.000.000 años, cuando todavía no había hombres sobre la Tierra.

# ESTRELLAS, GALAXIAS Y CÚMULOS DE GALAXIAS

- También las galaxias tienden a formar grupos que los astrónomos llaman cúmulos de galaxias: la Vía Láctea, Andrómeda y algunas otras galaxias más están agrupadas en el llamado Grupo Local.
- El cúmulo de Virgo por ejemplo, se encuentra a 30.000.000 años luz.

# ESTRELLAS, GALAXIAS Y CÚMULOS DE GALAXIAS

- Hasta hace algunos años los astrónomos creían que los cúmulos de galaxias están distribuidos más o menos uniformemente por todo el Universo.
- Sin embargo, nuestra imagen del Universo ha cambiado progresivamente.

# ESTRELLAS, GALAXIAS Y CÚMULOS DE GALAXIAS

- Ahora sabemos que los cúmulos de galaxias tienden a agruparse en supercúmulos que llegan a medir unos 100.000.000 años luz.
- Pero lo más sorprendente es que, entre un supercúmulo y otro, existen enormes huecos de más de 200.000.000 años luz sin una sola galaxia visible.
- Muy recientemente se ha descubierto que la estructura del Universo a gran escala recuerda una esponja o una espuma jabonosa.



# EL TAMAÑO DEL UNIVERSO

- Los datos anteriores respecto, a las dimensiones del Universo eran totalmente desconocidos hasta principios del siglo XX.
- Si bien a partir del siglo XVII, los astrónomos habían encontrado diversos métodos para medir la distancia a las estrellas más cercanas, no tenían ninguna idea de la extensión real del Universo.
- Lo que ahora identificamos como galaxias se ven, a través de un telescopio sencillo, como pequeñas manchas luminosas.

# EL TAMAÑO DEL UNIVERSO

- A estas manchas los astrónomos las llamaron nebulosas.
- Ya a fines del siglo XVIII el gran filósofo **Immanuel Kant** había propuesto que algunas de esas nebulosas son conglomerados de millones de estrellas, semejantes a nuestra **Vía Láctea**, y que si se ven extremadamente pequeñas es debido a las enormes distancias a que se encuentran.
- Pero en la época de **Kant** esto no pasaba de ser una especulación.

# EL TAMAÑO DEL UNIVERSO

- En **1908** se inauguró el observatorio astronómico del **Monte Wilson**, en California, que contaba con el telescopio más grande del mundo en esa época.
- Uno de los primeros astrónomos en utilizarlo fue **Edwin Hubble**, quien encontró una manera confiable para medir la distancia a la nebulosa de Andrómeda.
- Existen ciertas estrellas, llamadas **cefeidas**, que varían su brillo con un periodo muy regular que suele ser de unos cuantos días.

# EL TAMAÑO DEL UNIVERSO

- Lo interesante es que existe una relación directa entre el periodo de una cefeida y su brillo intrínseco.
- Este hecho es muy importante porque si se conoce el brillo intrínseco de una estrella (o de cualquier cuerpo luminoso) y se compara con su brillo aparente se puede determinar su distancia.

# EL TAMAÑO DEL UNIVERSO

- La razón es que el brillo disminuye inversamente al cuadrado de la distancia: si un foco se coloca a una cierta distancia y otro, de la misma potencia, a una distancia doble, este segundo se verá cuatro veces menos brillante; y si está tres veces más lejos, se verá nueve veces menos brillante, y así sucesivamente.

# EL TAMAÑO DEL UNIVERSO

- **Hubble** logró detectar estrellas **cefeidas** en la nebulosa de **Andrómeda** y de ahí dedujo sus distancias comparando el brillo aparente con el observado.
- Resultó que esta galaxia se encuentra a **2.000.000 años luz**, y que su verdadero tamaño es comparable a nuestra propia **Vía Láctea**.
- La hipótesis de **Kant** se había confirmado plenamente.

# EL TAMAÑO DEL UNIVERSO

- **Hubble** también pudo medir, con diversas técnicas, la distancia a otras muchas galaxias, cada vez más lejanas.
- Pero, además, estudió la luz emitida por éstas y se encontró con un hecho sorprendente.
- No sólo se revelaba un Universo muchísimo más vasto de lo que se había sospechado hasta ahora mismo, además, **un Universo en plena expansión.**

# LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO

- La luz del Sol está constituida por una mezcla de todos los colores.
- Cuando un rayo solar pasa por un prisma se descompone en los colores del arco iris debido a que el cristal desvía la trayectoria de los rayos luminosos, pero la desviación es generalmente distinta para cada longitud de onda.



# LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO

- Un examen más detallado revela que, sobrepuestas sobre los colores del arco iris, se encuentran una serie de rayas brillantes u oscuras a las que se les denomina *líneas espectrales*.
- Estas líneas se deben a que los átomos a través de los cuales pasó la luz absorben o emiten luz con una longitud de onda muy bien definida; a su vez, esta longitud de onda corresponde a una posición muy precisa en el arco iris.

# LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO

- Cada elemento químico está caracterizado por su *espectro*, que es el conjunto de líneas espectrales que lo caracterizan y permiten determinar la composición del material que emitió la luz.
- El descubrimiento de las líneas espectrales en el siglo XIX fue crucial, pues el estudio de la luz emitida por cualquier objeto, terrestre o celeste, permitió determinar de qué elementos químicos está constituido.

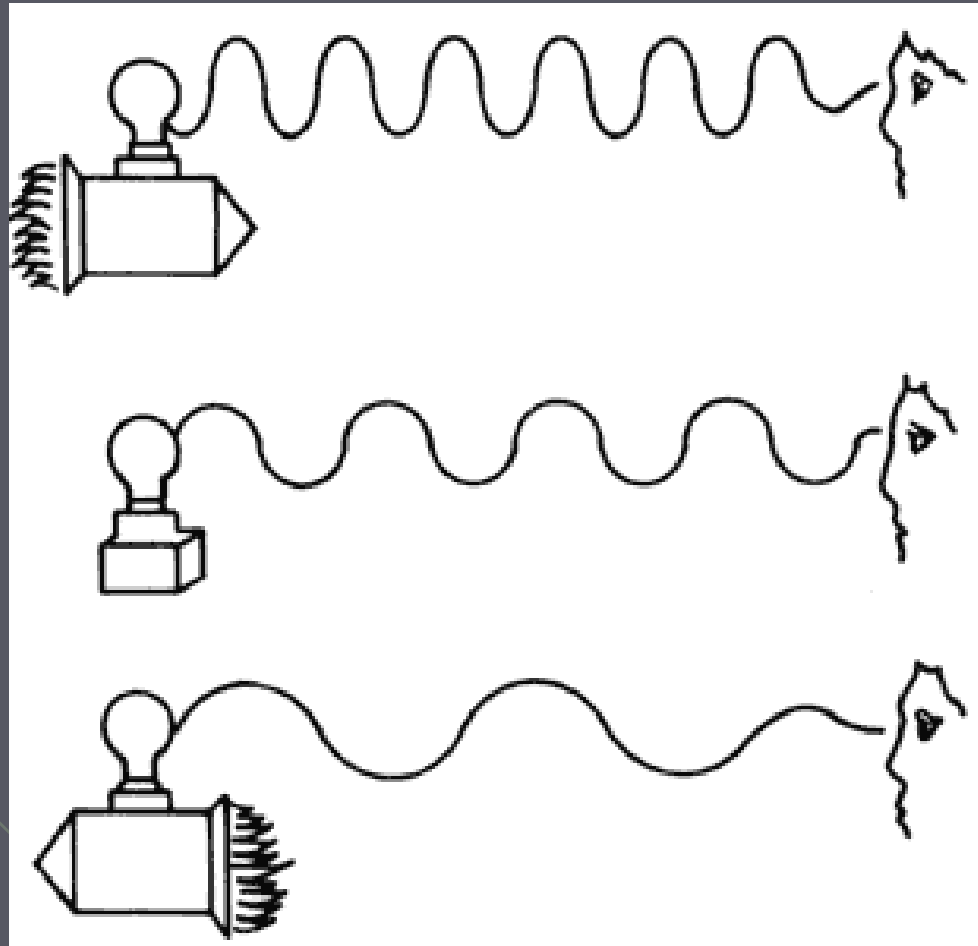
# LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO

- La longitud de onda de una línea espectral cambia si la fuente emisora de la luz está en movimiento.
- Este fenómeno, conocido como *efecto Doppler*; ocurre tanto para una onda sonora como para una onda luminosa.

# LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO

- En el caso del sonido se manifiesta, por ejemplo, con el sonido de la sirena de una ambulancia: cuando esta se acerca, la sirena se oye más aguda y cuando se aleja el mismo sonido se escucha grave.
- Lo que sucede es que la longitud de una onda, tanto sonora como una luminosa, se acorta o se alarga según si su emisor se acerca o se aleja.

# LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO



**El efecto Doppler.**

# LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO

- Volviendo a las galaxias **Hubble** estudió la luz que emiten las estrellas en las galaxias lejanas y descubrió que las líneas espectrales están sistemáticamente **desviaciones hacia el lado rojo del espectro**.
- De acuerdo con el efecto **Doppler** esto implica que todas las galaxias, se alejan de nosotros.
- Pero el descubrimiento más sorprendente fue que esa velocidad de recesión es directamente proporcional a la distancia de la galaxia.

# LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO

- La implicación de este fenómeno es que el *Universo está en expansión.*
- El hecho de que el Universo esté en expansión implica que, desde cualquier galaxia, se ve a las otras alejándose.

# LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO

- Algunas veces se hace la analogía con la superficie de un globo que se está inflando.
- Si se pintan puntos sobre el globo la distancia entre cada punto aumenta, y la velocidad de separación entre dos puntos es mayor cuanto mayor es la distancia entre ellos.



# LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO

- En el caso de las galaxias la velocidad de separación aumenta en proporción en la distancia, lo cual se puede expresar con la sencilla fórmula:

$$V = H \times R$$

donde **V** es la velocidad de una galaxia, **R** su distancia y **H** la **constante de Hubble**.

# LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO

- La **constante de Hubble** es de fundamental importancia en cosmología, aunque es muy difícil de medir con precisión y sólo se conoce su valor aproximado.
- Se ha estimado que es de unos **30 kilómetros por segundo por cada 1.000.000 de años luz de distancia**, aunque algunos astrónomos piensan que el valor correcto podría ser la mitad del mencionado.

# LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO

- La consecuencia más importante de que el Universo esté en expansión es que, alguna vez en el pasado, todo el espacio estaba concentrado prácticamente a una densidad infinita y todo el Universo era ... ¡un punto!
- A partir de la velocidad de expansión medida es fácil determinar que tal situación ocurrió hace unos 15.000.000.000 ó 20.000.000.000 años aproximadamente.

# LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO

- Si tal es el caso entonces el Universo tuvo un principio y "**nació**" con una densidad de energía y una temperatura prácticamente infinitas.
- Esta es la **teoría de la Gran Explosión**.
- El comportamiento del Universo de acuerdo con la teoría de la **Gran Explosión**, el concepto de concentración infinita en un punto, y lo que puede ser antes de ese instante crucial son los temas que veremos a continuación.

# LA CURVATURA DEL ESPACIO

- La relatividad general llegó justo a tiempo para convertirse en el soporte teórico de la cosmología.
- Inicialmente, el mismo **Einstein** propuso un modelo cosmológico para resolver el viejo problema de si el Universo es finito o infinito.

# LA CURVATURA DEL ESPACIO

- **Einstein** postuló que el espacio es, a gran escala, curvo como la superficie de una esfera.
- En ese sentido, nuestro Universo es finito pero sin fronteras, y es posible, en principio, dar la vuelta al Universo viajando siempre en línea recta.

# LA CURVATURA DEL ESPACIO

- De acuerdo con el modelo cosmológico original de **Einstein** el Universo era estático, es decir, sin movimiento.
- Sin embargo todas las estrellas y galaxias se atraen entre sí gravitacionalmente por lo que no es posible mantener inmóvil toda la materia en el universo.

# LA CURVATURA DEL ESPACIO

- Para resolver este problema **Einstein** postuló que existe una especie de repulsión gravitacional a escala cósmica que mantiene en equilibrio al Universo; desde el punto de vista matemático tal repulsión sería la consecuencia de incluir un **término adicional**, la **constante cosmológica**, en las ecuaciones de la relatividad general.



# LA CURVATURA DEL ESPACIO

- Pero, esto parecía más un truco matemático que una propiedad física real, y el mismo **Einstein** estaba insatisfecho de la modificación introducida en su teoría.

# LA CURVATURA DEL ESPACIO

- Pocos años después el físico ruso **Alexander A. Fridman** estudió las ecuaciones de la relatividad general, con y sin el término de la *constante cosmológica*, y encontró soluciones que describen un Universo en expansión: la distancia entre dos galaxias aumenta con el tiempo y la velocidad de separación es proporcional a la distancia entre las galaxias.

# LA CURVATURA DEL ESPACIO

- Al principio **Einstein** no dio importancia al trabajo de **Fridman**.
- Pero cuando **Hubble** anunció en **1929** su descubrimiento de que el Universo está en expansión, quedó manifiesto que los modelos de **Fridman** son los que describen adecuadamente el comportamiento a gran escala del Universo.

# LA CURVATURA DEL ESPACIO

- El estudio de estos modelos fue retomado posteriormente por varios cosmólogos, entre los cuales destaca **George Lemaître**, quien fue uno de los fundadores de la teoría de la **Gran Explosión**.

# LA RADIACIÓN DE FONDO Y EL FUEGO PRIMORDIAL

- Así, si el Universo esta en expansión su densidad de materia debió ser muchísimo mayor en el pasado.
- En los años cuarenta **Georges Gamow** propuso que, además de denso, el Universo también estaba extremadamente caliente en un principio.

# LA RADIACIÓN DE FONDO Y EL FUEGO PRIMORDIAL

- Esto permitiría que se formaran los núcleos atómicos de los elementos químicos por reacciones nucleares tal como sucede en una explosión nuclear, en la que el hidrógeno se transforma en helio.
- La hipótesis de **Gamow** ofrecía una explicación del origen de los elementos químicos que existen en el Universo.

# LA RADIACIÓN DE FONDO Y EL FUEGO PRIMORDIAL

- Aunque tuvo que ser modificada posteriormente, la idea básica de que la temperatura primordial del Universo era altísima es ampliamente aceptada en la actualidad por los partidarios de la **Gran Explosión**.
- Por lo pronto señalemos, para dar una idea de magnitudes implicadas, que la temperatura cósmica debió ser de unos **1.000.000.000 K** apenas un segundo después de la **Gran Explosión**.

# LA RADIACIÓN DE FONDO Y EL FUEGO PRIMORDIAL

- De acuerdo con la teoría de la **Gran Explosión** la temperatura cósmica bajó a cerca de **5.000° K** cuando la edad del Universo era de unos **500.000 años**.
- Esta temperatura es crítica porque el hidrógeno, que es el elemento químico principal en el Universo, forma átomos sólo por debajo de tal temperatura.



# LA RADIACIÓN DE FONDO Y EL FUEGO PRIMORDIAL

- Por arriba de los **5.000° K** los átomos chocan entre sí tan violentamente que los electrones se desprenden de los núcleos atómicos y, como resultado de este proceso, el gas queda formado por núcleos y electrones *libres*; en esa situación se tiene lo que se llama un *gas ionizado*.

# LA RADIACIÓN DE FONDO Y EL FUEGO PRIMORDIAL

- El hecho fundamental es que la luz interactúa levemente con los átomos, pero muy intensamente con los electrones libres.
- En consecuencia, una nube de hidrógeno no ionizado es tan transparente a la luz como el aire pero, por lo contrario, si está ionizado presenta el mismo aspecto que el fuego: brillante pero no transparente.

# LA RADIACIÓN DE FONDO Y EL FUEGO PRIMORDIAL

- En resumen, en el principio era el *fuego primordial*.
- Ese fuego se apagó cuando la temperatura del Universo bajó a unos  $5.000^{\circ}$  K, y a partir de ese momento el espacio cósmico se volvió transparente.

# LA RADIACIÓN DE FONDO Y EL FUEGO PRIMORDIAL

- En el momento en que el hidrógeno dejó de estar ionizado la luz se volvió libre por primera vez y empezó a recorrer todo el Universo prácticamente sin obstáculos.
- Esa luz emitida por el fuego primordial y liberada **500.000 años** después de la **Gran Explosión** es la que vemos actualmente como la radiación de fondo, proveniente de todas las regiones del firmamento.

# LA RADIACIÓN DE FONDO Y EL FUEGO PRIMORDIAL

- El mismo **Gamow** calculó que la temperatura actual del Universo sería de unos cuantos grados sobre el cero absoluto, lo cual debería de observarse en la actualidad en forma de una radiación de microondas proveniente homogéneamente de todas las regiones del Universo.

# LA RADIACIÓN DE FONDO Y EL FUEGO PRIMORDIAL

- En **1965** los radioastrónomos **A. A. Penzias y R. W. Wilson** descubrieron una débil señal de radio, en una longitud de onda correspondiente a las microondas, que tenía todas las características predichas por **Gamow**.
- A partir de sus observaciones, **Penzias y Wilson** dedujeron que la **temperatura actual** del Universo es de unos **3<sup>o</sup> K**.

# LA RADIACIÓN DE FONDO Y EL FUEGO PRIMORDIAL

- La existencia de la radiación de fondo fue reconfirmada de manera espectacular en **1992** por medio de un satélite artificial llamado **COBE**; (*Cosmic Background Explorer*).
- El satélite permitió medir con enorme precisión la forma del espectro de la radiación —que es esencialmente una medida del número de fotones con cada longitud de onda—y el resultado concuerda plenamente con lo que se esperaría de ser correcta la teoría de la **Gran Explosión**.

# LA RADIACIÓN DE FONDO Y EL FUEGO PRIMORDIAL

- Más aún se ha podido fijar la temperatura del Universo en **2,73 K.**
- Lo más sorprendente de esta radiación es su extrema homogeneidad en todas las direcciones en el cielo.



# LA RADIACIÓN DE FONDO Y EL FUEGO PRIMORDIAL

- El Universo presenta, a gran escala, un aspecto homogéneo que no depende de la posición o la dirección en que se mira.
- Esta propiedad es aún más manifiesta para la radiación de fondo.

# LA RADIACIÓN DE FONDO Y EL FUEGO PRIMORDIAL

- Los estudios más recientes de hechos con satélites artificiales revelan que esta radiación es absolutamente homogénea en todas las direcciones observadas con una precisión de hasta una parte en 10.000.

# LA RADIACIÓN DE FONDO Y EL FUEGO PRIMORDIAL

- Por debajo de ese nivel de homogeneidad se han detectado pequeñas variaciones que podrían corresponder a galaxias en proceso de formación durante la época del **fuego primordial**.

# LA DENSIDAD DEL UNIVERSO

- Si el Universo está en expansión es natural preguntarse: ¿se expandirá para siempre o se detendrá en algún momento?
- Esto depende esencialmente de la **densidad de materia** en el Universo.

# LA DENSIDAD DEL UNIVERSO

- Todos los cuerpos se atraen entre sí por medio de la fuerza de gravedad; a gran escala esto implica que la expansión del Universo se frena poco a poco debido a que las galaxias se atraen entre sí.
- ¿Es esa atracción suficiente para frenar totalmente el Universo?

# LA DENSIDAD DEL UNIVERSO

- De acuerdo con los cálculos basados en la teoría de la relatividad el Universo detendrá por completo su expansión y empezará a colapsarse sobre sí mismo si la densidad actual de materia excede de un cierto valor crítico; en caso contrario la velocidad de expansión irá disminuyendo gradualmente con el tiempo, pero sin llegar jamás a anularse.

# LA DENSIDAD DEL UNIVERSO

- De acuerdo con los cálculos basados en la teoría de **Einstein** el valor preciso de esta densidad crítica, correspondiente a la actualidad, está dada por la cantidad  **$3H^2/8\pi G$** , donde  **$H$**  es la constante de **Hubble** y  **$G$**  la constante de la gravitación de Newton, y equivale a unos  $10^{-29}$  g/cm<sup>3</sup>, algo así como **10 átomos de hidrógeno por metro cúbico**.

# LA DENSIDAD DEL UNIVERSO

- La densidad crítica que hemos mencionado parece extremadamente baja (muchísimo menos de la que se obtiene en la mejor cámara de vacío en Tierra), pero no hay que olvidar que estamos hablando de una densidad promedio y que el vacío casi absoluto domina el Universo, siendo las concentraciones de materia como las estrellas y los planetas puntos prácticamente insignificantes.
- Los astrónomos han calculado que la materia visible en el Universo, es decir, aquella que se encuentra en las estrellas y las nubes de gas brillante —la única que se puede observar directamente— contribuye con menos de la centésima parte de la densidad crítica.



# LA DENSIDAD DEL UNIVERSO

- Esto implica que si la mayor parte de la materia del Universo es la visible entonces la expansión cósmica proseguirá eternamente.
- Pero bien podría ser que el Universo esté lleno de alguna materia opaca que sencillamente no sea visible.

# LA DENSIDAD DEL UNIVERSO

- De hecho, se tienen evidencias indirectas de que la masa de las galaxias es mucho mayor que lo inferido únicamente en las estrellas brillantes que las componen.
- La naturaleza de esa masa invisible, si realmente existe, es uno de los problemas más importantes de la cosmología moderna.

# LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL UNIVERSO

- El elemento químico más abundante en el Universo es el hidrógeno, que constituye la mayor parte de la materia, seguido por el helio. Esta afirmación parece sorprendente a primera vista porque en la Tierra existe una gran variedad de elementos químicos. Pero nuestro planeta es muy poco representativo de lo que se encuentra en el Universo.

# LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL UNIVERSO

- En la Tierra se encuentran muchísimos otros elementos químicos, aparte del hidrógeno y helio (el primero se halla mezclado con oxígeno en las moléculas de agua, mientras que el segundo es, un gas muy escaso).
- Los demás elementos químicos terrestres, como el carbono, el hierro, el oxígeno, etc. deben tener un origen posterior al nacimiento de las primeras estrellas.

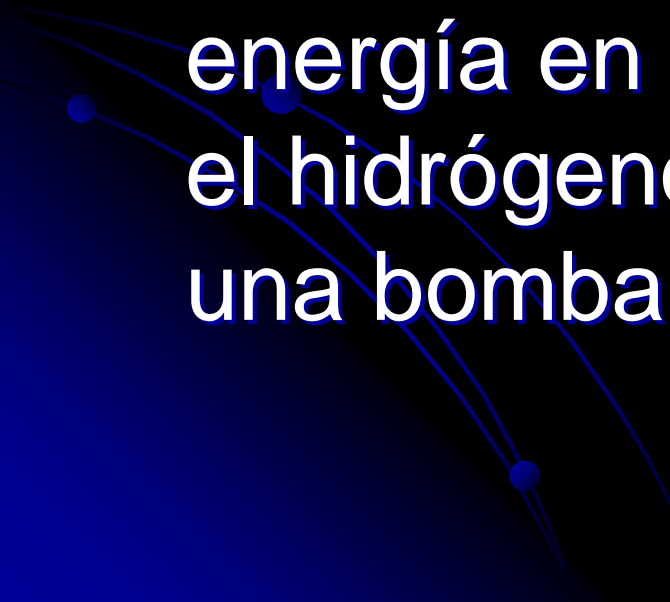
# LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL UNIVERSO

- En la antigüedad los alquimistas trataban de cambiar un elemento en otro en sus hornos y alambiques.
- Soñaban con fabricar oro a partir del plomo y otros metales más comunes.

# LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL UNIVERSO

- Ahora sabemos que éste sueño alquimista es realizable en principio pero no en un modesto laboratorio terrestre.
- Para transmutar un elemento químico en otro se necesitan temperaturas de miles de millones de grados.

# LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL UNIVERSO

- Temperaturas de esa magnitud se dan en los centros de las estrellas.
  - El Sol, por ejemplo brilla porque se producen enormes cantidades de energía en su centro al transformarse el hidrógeno en helio tal como lo hace una bomba de hidrógeno.
- 

# LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL UNIVERSO

- De hecho, todas las estrellas son gigantescas bombas atómicas que funcionan continuamente durante millones o miles de millones de años (como dato tranquilizador, nuestro Sol tiene combustible para brillar unos 5.000.000.000 de años más).



# LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL UNIVERSO

- Cuando se agota el hidrógeno en el centro de una estrella ésta empieza a consumir otros elementos químicos: el helio se transforma en carbono, éste en oxígeno, etcétera.

# LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL UNIVERSO

- Las estrellas más masivas, que no son raras, son las que evolucionan más rápido y, finalmente, acaban en una gigantesca explosión: una *supernova*.

# LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL UNIVERSO

- Cuando esto sucede la explosión desparrama la materia de la estrella por todo el espacio interestelar formando gigantescas nubes que contienen prácticamente todos los elementos químicos.

# LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL UNIVERSO

- De esas nubes se forman, posteriormente, las estrellas con sus planetas, y quizás con sus seres vivos que los habitan.
- Prácticamente todos los elementos químicos, con la excepción del hidrógeno y del helio, se originaron en las estrellas.
- Los átomos de nuestros cuerpos provienen de los restos de estrellas que brillaron hace miles de millones de años.

# LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL UNIVERSO

- Los astrónomos han calculado que la composición química original del Universo era de aproximadamente 75% de hidrógeno, 25% de helio y apenas una traza de otros elementos químicos.


# LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL UNIVERSO

- Justamente la teoría de la **Gran Explosión** predice que el helio primordial se formó en esa proporción a los **tres minutos** de existencia del Universo —a una temperatura de **1.000.000 K.**

# LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL UNIVERSO

- Esta predicción teórica, que concuerda con los datos astronómicos es, junto con la radiación de fondo, uno de los soportes más fuertes de la teoría de la **Gran Explosión**.

# EL UNIVERSO INFLACIONARIO

- Después del paseo por el Universo presentado en el capítulo anterior estamos listos para reconstruir lo que pudo haber sido el principio del Universo.
- 



# EL UNIVERSO INFLACIONARIO

- Antes de aventurarnos en teorías especulativas recordemos que la física actual reconoce explícitamente su ignorancia cuando se implican tiempos comparables al **tiempo de Planck**, que es de unos  $10^{-44}$  segundos.

# EL UNIVERSO INFLACIONARIO

- No podemos, por lo tanto, pretender describir el Universo antes de ese tiempo.
- Sin embargo, esa limitación conceptual y teórica es extremadamente generosa, a tal punto que muchos físicos han resistido la tentación de construir teorías del Universo muy poco después del **tiempo de Planck**.

# LOS PRIMEROS $10^{-34}$ SEGUNDOS DEL UNIVERSO

- Comencemos, pues, no al tiempo cero, que no tiene sentido en una descripción cuántica, sino al **tiempo de Planck**, cuando la temperatura del Universo era la **temperatura de Planck**.

# LOS PRIMEROS $10^{-34}$ SEGUNDOS DEL UNIVERSO

- Esta equivale a unos  **$10^{32}$  K** y es la única temperatura que se puede construir combinando las tres constantes fundamentales de la naturaleza, **G**, **c** y **h**.
- En efecto, la **energía de Planck** es:

$$E = m_p c^2$$

donde  **$m_p$**  es la **masa de Planck**.

# LOS PRIMEROS $10^{-34}$ SEGUNDOS DEL UNIVERSO

- A esta energía le corresponde una temperatura dada por

$$T = E/k$$

que es la **temperatura de Planck**. En esa última fórmula  **$k$**  es la **constante de Boltzman** que relaciona la temperatura de un gas con la energía promedio de las partículas que lo constituyen.

# LOS PRIMEROS $10^{-34}$ SEGUNDOS DEL UNIVERSO

- Pero, ¿temperatura de qué?
- ¿Acaso ya había partículas en el tiempo de **Planck**?
- ¡No había partículas todavía!
- *En el principio era el campo.*
- El campo vibraba y tenía energía, y esa energía era temperatura, y esa era la temperatura de **Planck** (no podía ser otra cosa).
- Más precisamente, había muchos tipos de campos, y sus vibraciones correspondían a partículas.

# LOS PRIMEROS $10^{-34}$ SEGUNDOS DEL UNIVERSO

- La creación del Universo, el tiempo cero, si es que hubo tal, esta escondida en el mundo aun inescrutable de **Planck**, cuando las cuatro interacciones fundamentales de la naturaleza estaban unificadas en una sola.
- Pero dejemos transcurrir un poco el tiempo para situarnos en un terreno ligeramente menos especulativo.
- Por debajo de la temperatura de **Planck** la gravitación se separó de las otras tres interacciones.

# LOS PRIMEROS $10^{-34}$ SEGUNDOS DEL UNIVERSO

- De los  $10^{-44}$  segundos hasta los  $10^{-34}$  segundos el Universo se expandió y su temperatura bajó a unos  $10^{27}$  grados Kelvin.
- Durante ese brevísimo periodo; si uno cree en la teoría de la Gran Unificación las interacciones fuertes, electromagnéticas y débiles no se habían separado aún.
- El campo de **Higgs** todavía no había actuado, por lo que las partículas X, las W y las Z eran partículas sin masa, al igual que los fotones.



# LOS PRIMEROS $10^{-34}$ SEGUNDOS DEL UNIVERSO

- Pero algo muy espectacular ocurrió a los  $10^{-34}$  s.
- Al haberse expandido el Universo, su temperatura bajó a unos  $10^{26}$  K, lo cual propició un cambio de fase.
- A esa temperatura el campo de **Higgs** asociado a las interacciones fuertes empezó a transmitir su energía a las partículas X y éstas adquirieron masa.

# LOS PRIMEROS $10^{-34}$ SEGUNDOS DEL UNIVERSO

- Lo crucial de este cambio de fase es que produjo una verdadera explosión que liberó enormes cantidades de energía a partir del campo existente.

# LOS PRIMEROS $10^{-34}$ SEGUNDOS DEL UNIVERSO

- A su vez, esta violenta explosión aceleró la expansión del Universo, de tal manera que el tamaño real entre dos puntos aumentó por un factor de  $10^{80}$  o más en sólo  $10^{-36}$  segundos; este es el periodo que se designa con el nombre de *inflación*.

# LOS PRIMEROS $10^{-34}$ SEGUNDOS DEL UNIVERSO

- Se debe esencialmente a la existencia de un campo cuántico que produce un cambio de fase y **separa las interacciones fuertes de las electrodébiles.**

# LOS PRIMEROS $10^{-34}$ SEGUNDOS DEL UNIVERSO

- El Universo inflacionario es una consecuencia natural de la teoría de la **Gran Unificación** combinada con la cosmología relativista.
- En su versión más conocida, fue propuesta por **Alan Guth** en un artículo de **1980**.

# LOS PRIMEROS $10^{-34}$ SEGUNDOS DEL UNIVERSO

- El éxito de este modelo consiste en que resuelve de modo natural varios problemas de la cosmología moderna, dos de los cuales son el **problema del horizonte** y el de la **densidad del Universo**.

# LOS PRIMEROS $10^{-34}$ SEGUNDOS DEL UNIVERSO

- Por lo pronto mencionemos que uno de los aspectos más interesantes del Universo inflacionario es la posibilidad de explicar por qué hay materia y no antimateria en el Universo contemporáneo.
- La idea es que las partículas  $X$  se tornaron más masivas durante el periodo de inflación y, después de breves  $10^{-36}$  segundos, decayeron en partículas más estables: leptones y, cuarks.

# LOS PRIMEROS $10^{-34}$ SEGUNDOS DEL UNIVERSO

- En un principio había exactamente el mismo número de partículas  $X$  y antipartículas  $X$ , pues la materia no gozaba de ningún privilegio con respecto a la antimateria.
- Sin embargo, debido a la pequeña asimetría entre materia y antimateria en las interacciones fundamentales (la no invariancia de CP), las partículas y antipartículas  $x$  no decayeron exactamente de la misma manera.



# LOS PRIMEROS $10^{-34}$ SEGUNDOS DEL UNIVERSO

- La teoría de la Gran Unificación predice que los protones se pueden destruir pero también predice un proceso contrario por el que se pudieron formar ligeramente más partículas que antipartículas.

# LOS PRIMEROS $10^{-34}$ SEGUNDOS DEL UNIVERSO

- Éste es un hecho crucial, pues en algún momento posterior la materia y la antimateria en el Universo se aniquilarán y sólo quedará un pequeño excedente de materia.

# LOS PRIMEROS $10^{-34}$ SEGUNDOS DEL UNIVERSO

- De hecho, si algún día se llegara a tener una teoría completa y confiable de la Gran Unificación se podría predecir teóricamente nada menos que la cantidad de materia creada en el Universo.

# LA GRAN EXPLOSIÓN

- Aproximadamente diez años antes del descubrimiento de la expansión del Universo, el físico **Albert Einstein** había desarrollado su teoría general de la relatividad.

# LA GRAN EXPLOSIÓN

- Como parte de las aplicaciones a su teoría, **Einstein** elaboró un modelo matemático del Universo que no aceptaba como solución un Universo estático y exigía que el Universo estuviese en **contracción** o bien en **expansión**.

# LA GRAN EXPLOSIÓN

- **Einstein** encontró este resultado poco satisfactorio y, para evitar confrontarlo, introdujo en sus ecuaciones un término arbitrario, la constante cosmológica, que permitía que el modelo diera como solución un **Universo estático**.

# LA GRAN EXPLOSIÓN

- Años después, cuando **Einstein** se enteró del resultado de las observaciones de **Hubble**, reconoció que sus ecuaciones en la forma original eran más adecuadas para describir el Universo y llamó a la introducción de la **constante cosmológica**, "el más grande error de mi vida".

# LA GRAN EXPLOSIÓN

- Varios de los físicos y matemáticos más destacados de los años treinta como el abate **Georges Lemaître**, dedicaron gran parte de su tiempo a la elaboración de modelos matemáticos que explicaran por qué se expande el Universo.

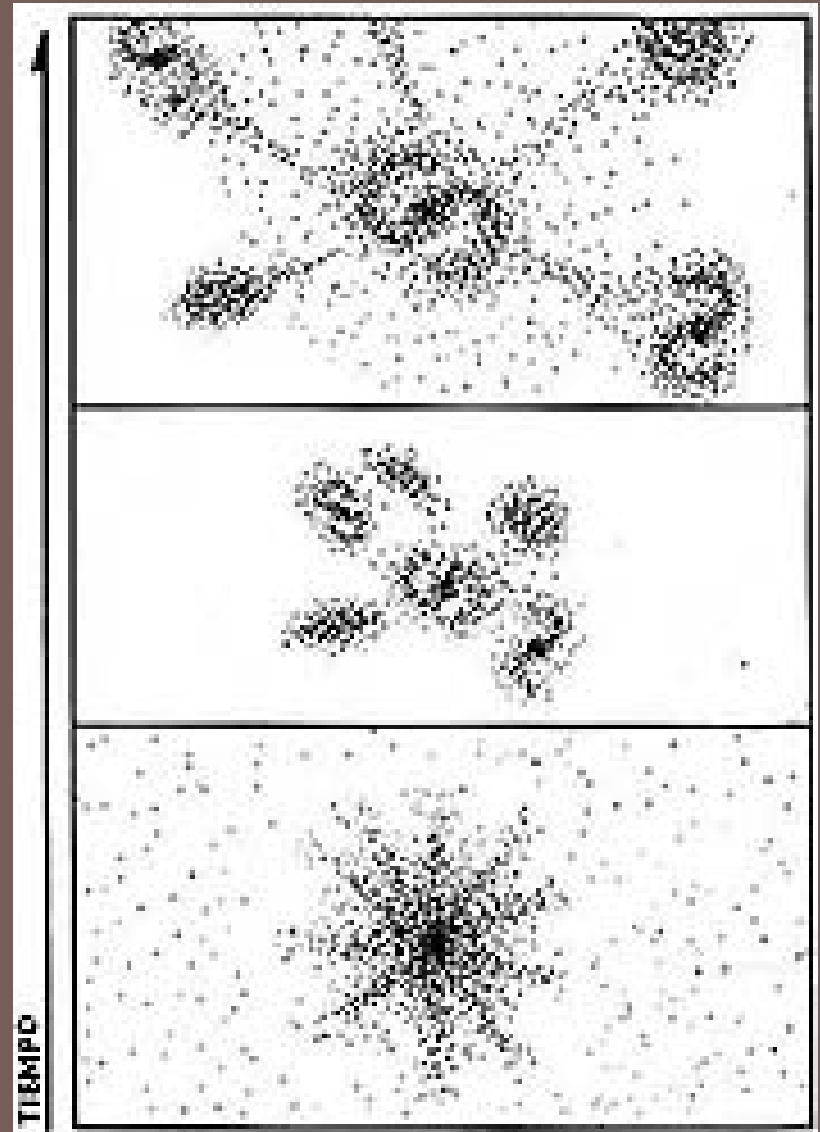


# LA GRAN EXPLOSIÓN

- La mayoría de los modelos coinciden en la necesidad de una explosión en el pasado remoto.
- Llegar a esta conclusión no es difícil.

# LA GRAN EXPLOSIÓN

- Como el universo se halla en expansión, se concluye que en el pasado era más compacto.
- Hace quince mil millones de años, todo el Universo se hallaba concentrado en una pequeña región de alta densidad y temperatura.



# LA GRAN EXPLOSIÓN

- Si echamos imaginariamente a andar el tiempo al revés, encontramos que, como las galaxias se alejan entre sí, en el pasado estaban más cercanas.
- Si continuamos echando a andar el tiempo para atrás, alcanzamos un momento en que las galaxias, hoy tan separadas, comenzarían a tocarse.
- Finalmente, llegaríamos a un momento en que toda la masa del Universo se encontraría concentrada en un volumen relativamente pequeño.

# LA GRAN EXPLOSIÓN

- Como conocemos la velocidad con que se separan entre sí las galaxias, es posible estimar cuánto tiempo hace desde que se encontraban tan juntas y comprimidas que no tenían identidad propia, puesto que el Universo era entonces homogéneo y bien mezclado.
- El tiempo transcurrido es de alrededor de 15 mil millones de años.

# LA GRAN EXPLOSIÓN

- Esto suena a mucho, pero hay que recordar que el Sol y el sistema planetario se formaron hace 5 mil millones de años, cuando el Universo tenía ya 10 mil millones de años de formado.
- O sea que el Sol tiene una edad considerable, aproximadamente una tercera parte de la edad del Universo.

# LA GRAN EXPLOSIÓN

- Fue de aquel núcleo primigenio que el Universo se originó hace 15 mil millones de años en una violenta explosión.
- El gas, originalmente muy caliente y homogéneo, fue expandiéndose velozmente.
- Poco a poco fue enfriándose y de él fueron formándose grumos de gigantescas proporciones.
- Debido a la atracción gravitacional, estos grumos de gas fueron contrayéndose para formar las galaxias.

# LA GRAN EXPLOSIÓN

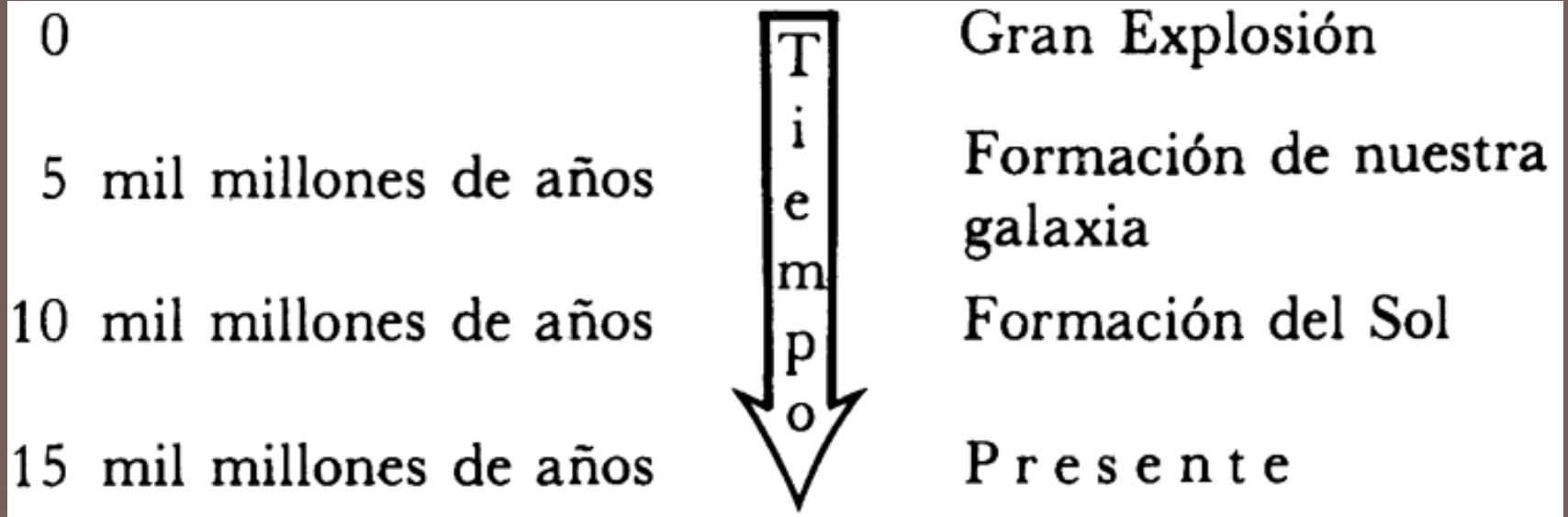
- Este proceso de formación de las galaxias concluyó cinco mil millones de años después de la Gran Explosión.
- Una vez formadas las galaxias, entre ellas la nuestra, se inició en cada una el proceso de subdivisión que lleva a la formación de soles individuales.

# LA GRAN EXPLOSIÓN

- Es conveniente señalar que la historia del Universo incluye cuatro momentos muy importantes para nosotros que están separados entre sí por aproximadamente 5 mil millones de años.
- Estos momentos son:



# LA GRAN EXPLOSIÓN



- El último momento marcado sólo tiene de importancia ser nuestro punto de referencia.

# LA GRAN EXPLOSIÓN

- Pero la prueba de fuego de una buena teoría es hacer una buena predicción.
- Las buenas teorías no sólo deben explicar lo que ya se conoce sino deben predecir fenómenos que nuevos experimentos comprobarán.
- La teoría de la **Gran Explosión** incluía una gran predicción que se pudo comprobar finalmente hace menos de veinte años.

# LA GRAN EXPLOSIÓN

- En 1948 el físico de origen ruso, **George Gamow**, trabajando dentro del marco del modelo de la **Gran Explosión**, hizo notar que el intenso calor de la explosión debió haber producido grandes cantidades de radiación electromagnética que debería estar presente en el Universo.

# LA GRAN EXPLOSIÓN

- **Gamow** también predijo que dicha radiación estaría ahora en la forma de ondas de radio muy débiles.
- En aquel entonces, las técnicas de detección de ondas de radio no eran lo suficientemente sensibles para medir dicha radiación.
- La predicción de **Gamow** cayó en el olvido.

# LA GRAN EXPLOSIÓN

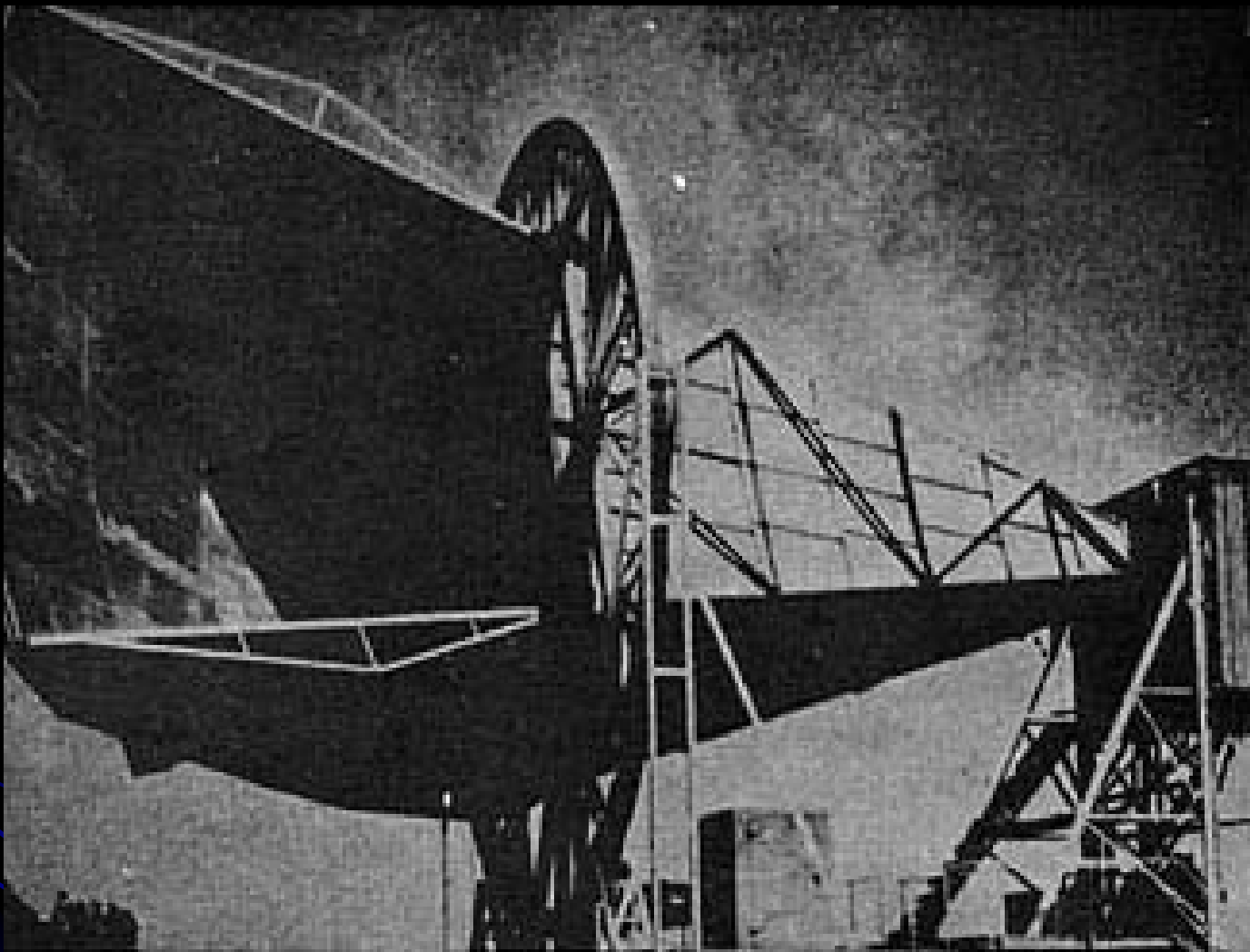
- Afortunadamente, a partir de los años cincuenta se desarrolló vigorosamente la radioastronomía.
- En lugar de captar y medir luz visible, los radioastrónomos estudian las ondas de radio que emiten ciertos objetos en el Universo como los pulsares, los cuásares, y los máseres circunestelares.

# LA GRAN EXPLOSIÓN

- Son muchas las contribuciones que a la ciencia ha hecho la radioastronomía, tales como el descubrimiento de los tres tipos de objetos mencionados.
- Pero la contribución más importante sería la detección accidental de la radiación producida por la **Gran Explosión** y que **Gamow** había predicho se podría medir en la forma de ondas de radio.

# LA GRAN EXPLOSIÓN

- En **1965** los radioastrónomos estadounidenses **Arno Penzias y Robert Wilson** utilizaban un radiotelescopio muy sensible para medir ondas de radio que pudieran entorpecer la telecomunicación vía satélite.



- **El radiotelescopio con el que Penzias y Wilson detectaron la radiación fósil producto de la Gran Explosión.**



# LA GRAN EXPLOSIÓN

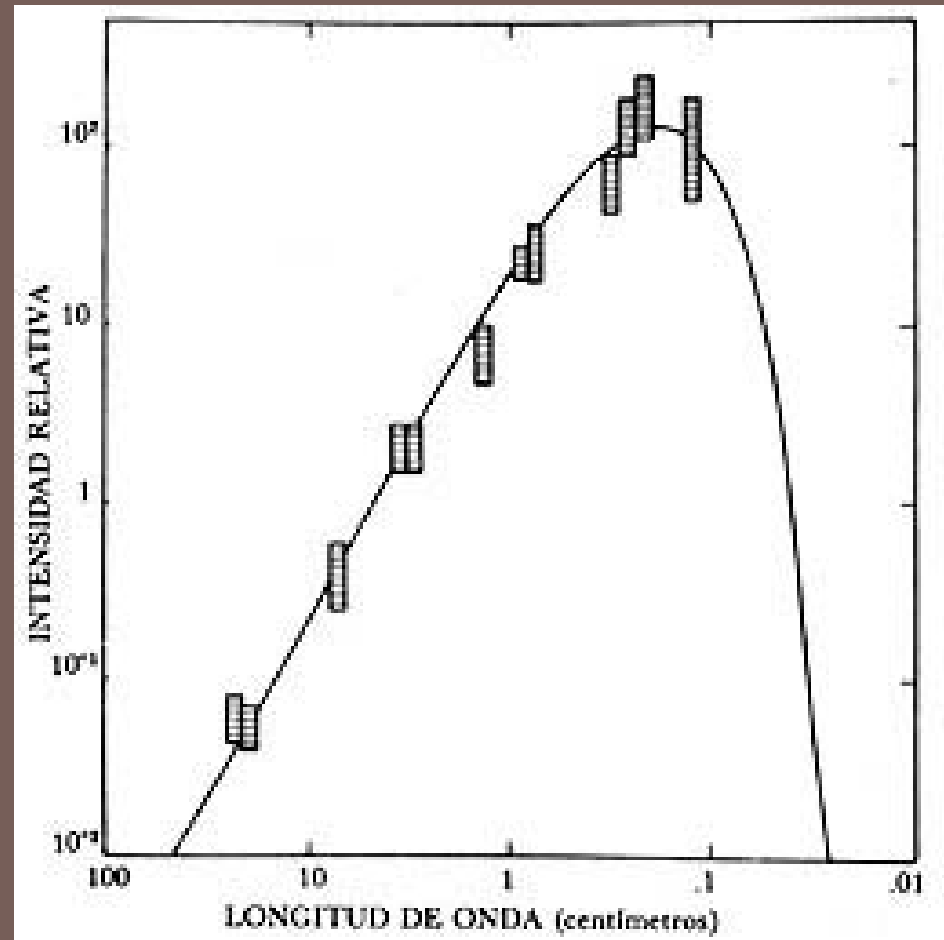
- Para su desconcierto, encontraron que el sensitivo aparato registraba un exceso de ondas de radio que no podían atribuir a algo conocido.
- En una conversación informaron de este descubrimiento a un colega, y éste les dio a conocer la predicción de **Gamow**.

# LA GRAN EXPLOSIÓN

- La radiación que queda como testimonio de la **Gran Explosión** ha sido medida a diferentes frecuencias y su intensidad tiene precisamente la forma predicha por el modelo de la **Gran Explosión**.
- Por su descubrimiento, fortuito pero fundamental, **Penzias y Wilson** compartieron el premio **Nobel de Física de 1978**.

# LA GRAN EXPLOSIÓN

- Como lo predice la teoría, la radiación fósil tiene la dependencia espectral de un cuerpo negro a la temperatura de 3 K.
- Por eso se le conoce también como radiación de fondo de 3 grados.



# LA GRAN EXPLOSIÓN

- ¿Se expandirá el Universo por siempre?
- Su expansión depende de la cantidad de masa que contiene.
- La fuerza de atracción gravitacional entre las galaxias produce una desaceleración de la expansión.

# LA GRAN EXPLOSIÓN

- Sin embargo, si la masa del Universo está formada sólo por las galaxias, la fuerza de atracción gravitacional nunca logrará detener la expansión y evolucionaremos hacia un Universo cada vez más vacío.

# LA GRAN EXPLOSIÓN

- Por otra parte, si existiera una gran cantidad de materia invisible en el Universo, la atracción gravitacional ganaría la batalla y en el futuro lejano la expansión se detendría y de hecho comenzaría el Universo a contraerse.

# LA GRAN EXPLOSIÓN

- ¿Existen estas grandes cantidades de materia invisible?
- Hasta hace muy poco se creía que no, lo cual parecía condenar al Universo a expandirse por siempre.
- Pero ahora se especula sobre una posible nueva fuente de masa.

# LA GRAN EXPLOSIÓN

- Durante la Gran Explosión se produjeron grandes cantidades de partículas físicas llamadas neutrinos.
- Se creía que éstos, como los fotones, no tenían masa.
- Pero ciertos experimentos sugieren que el neutrino sí podría tener masa, con lo que estaría contribuyendo a detener la expansión del Universo.



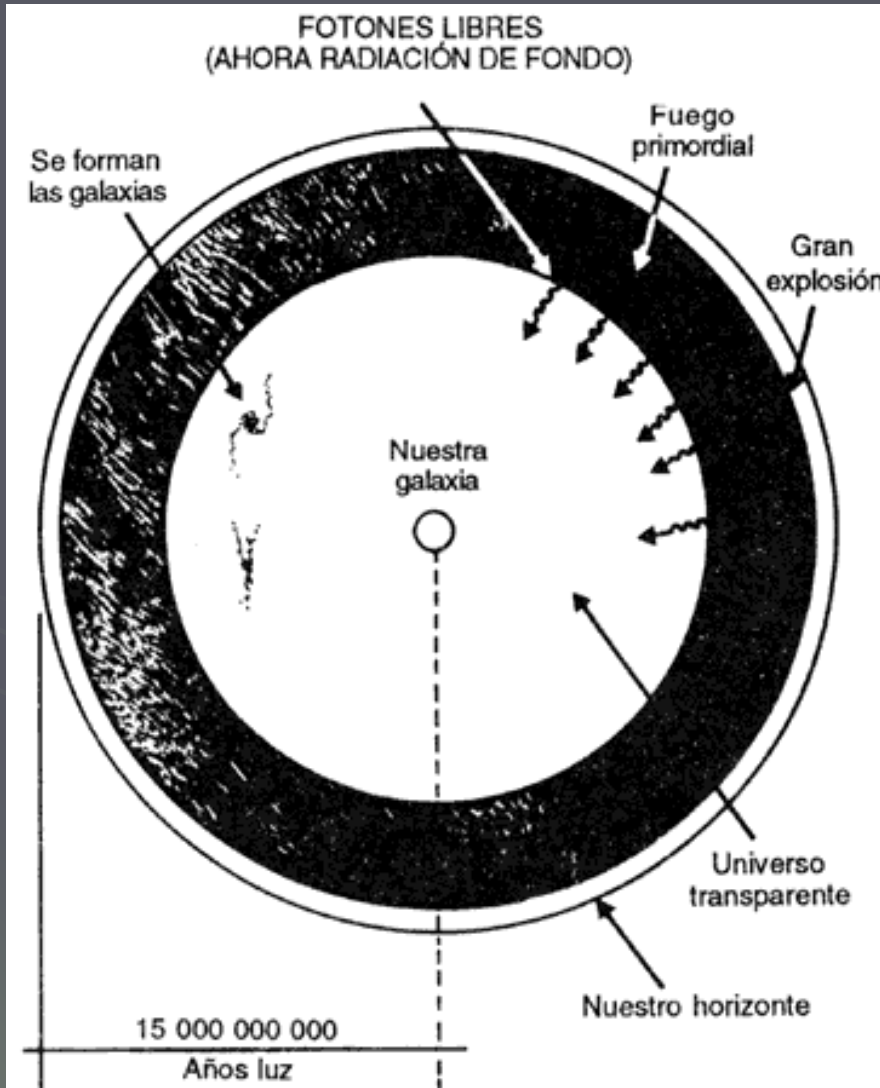
# EL HORIZONTE INFLACIONARIO

- Uno de los principios fundamentales de la naturaleza es que ningún cuerpo o señal puede moverse a mayor velocidad que la luz.
- La energía para alcanzar tal velocidad es infinita, y sólo una partícula sin masa —como el fotón y posiblemente el neutrino— puede viajar a la velocidad de la luz.
- Debido a esta limitación el Universo posee para nosotros un *horizonte* más allá del cual no podemos ver ni recibir influencia.

# EL HORIZONTE INFLACIONARIO

- En efecto, si el Universo se originó hace 15.000.000.000 de años luz, hoy en día veríamos la Gran Explosión a una distancia de 15.000.000.000 de años luz, distribuida homogéneamente en el cielo —aunque en realidad, la Gran Explosión estaría escondida detrás del fuego primordial.
- *Nuestro Universo visible* es una esfera centrada en nosotros y con un radio de 15.000.000.000 de años luz.

# EL HORIZONTE INFLACIONARIO



- La gran explosión y el fuego primordial con respecto a nuestra posición en el Universo.

# EL HORIZONTE INFLACIONARIO

- Los límites de esta esfera marcan nuestro horizonte, más allá del cual ninguna región del Universo nos es accesible porque la luz que emitió todavía no nos llega.
- Además, cada posición en el Universo tiene su propio horizonte, que engloba desde allí a la observación.

# EL HORIZONTE INFLACIONARIO

- Si nos esperamos un tiempo suficiente podemos ver regiones cada vez más lejanas del Universo.
- Dentro de 10.000.000.000 de años nuestro horizonte será unos 10.000.000.000 de años luz más grande y se nos revelarán regiones del Universo de las que, por ahora, todavía no recibimos su luz.

# EL HORIZONTE INFLACIONARIO

- Del mismo modo, el horizonte del Universo era más estrecho en el pasado remoto.
- Por ejemplo, mil años después de la Gran Explosión, el tamaño del horizonte era de unos 1.000 años luz.

# EL HORIZONTE INFLACIONARIO

- Y **un segundo después** el horizonte medía apenas unos **300.000 km**; esto implica que en esa época una partícula no podía influir en otra que estuviera a más de 300.000 km de distancia, ya que nada puede viajar más rápido que la luz.

# EL HORIZONTE INFLACIONARIO

- La existencia de un horizonte plantea un problema muy serio.
- El Universo es extremadamente homogéneo a gran escala, ya que dos regiones muy alejadas del Universo presentan aspectos muy parecidos: **la misma densidad de materia, la misma distribución de galaxias etc.**



# EL HORIZONTE INFLACIONARIO

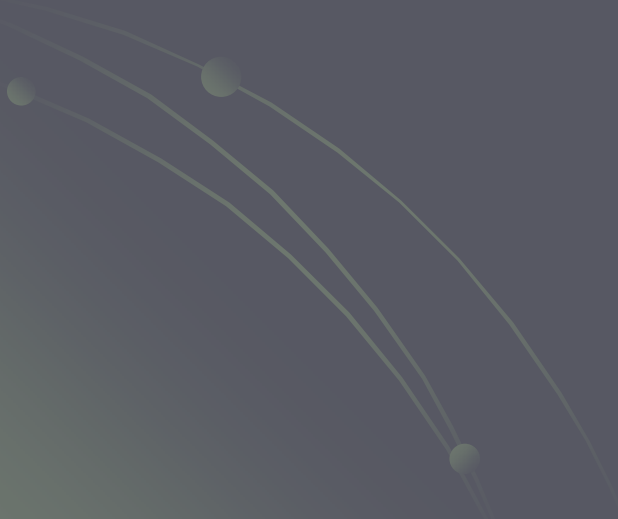
- Esta homogeneidad se aplica a todas las regiones dentro de nuestro Universo sumamente alejadas y en dos direcciones diametralmente opuestas, la separación actual entre ellas es de unos 30.000.000.000 años luz.

# EL HORIZONTE INFLACIONARIO

- Esto implica que esas dos regiones nunca tuvieron tiempo de interactuar entre sí.
- Pero entonces ¿cómo pudieron "ponerse de acuerdo" para presentar la misma distribución de materia?
- Es cierto que en el pasado esas regiones estaban más cerca entre sí, pero también el horizonte era más estrecho y, de todos modos, no tuvieron tiempo de interactuar.

# EL HORIZONTE INFLACIONARIO

- Para describir el problema de manera más precisa veamos qué predice la teoría de la relatividad general para la expansión del Universo y su horizonte.



# EL HORIZONTE INFLACIONARIO

- De acuerdo con las ecuaciones de esta teoría la distancia entre dos puntos en el Universo (pensemos, por ejemplo, en dos galaxias muy alejadas) aumenta con el tiempo en proporción a la edad del Universo elevado a la potencia  $2/3$ .

# EL HORIZONTE INFLACIONARIO

- Más precisamente, si la distancia actual de entre dos galaxias vale  $L_0$  y la edad actual del Universo es  $t_0$ , entonces la separación  $L$  entre esas mismas galaxias cuando la edad del Universo era  $t$  está dada por la fórmula:

$$L = L_0 \left( t/t_0 \right)^{2/3}$$

# EL HORIZONTE INFLACIONARIO

- Esta última fórmula es válida para épocas posteriores al fuego primordial.
- La expansión del Universo era un poco más lenta en el pasado, cuando ardía el fuego primordial.

# EL HORIZONTE INFLACIONARIO

- En aquel entonces la distancia aumentaba más bien en proporción a la raíz cuadrada de la edad del Universo, es decir,

$$L = L_0 (t/t_0)^{1/2}$$

# EL HORIZONTE INFLACIONARIO

- Por lo que respecta al horizonte, se puede demostrar que el radio del horizonte  $R_H$  aumenta en proporción directa al tiempo transcurrido  $t$ .
- Más precisamente,  $R_h = 3 c t$   
en la actualidad mientras que en la época del fuego primordial la relación era:

$$R_H = 2 c t$$



# EL HORIZONTE INFLACIONARIO

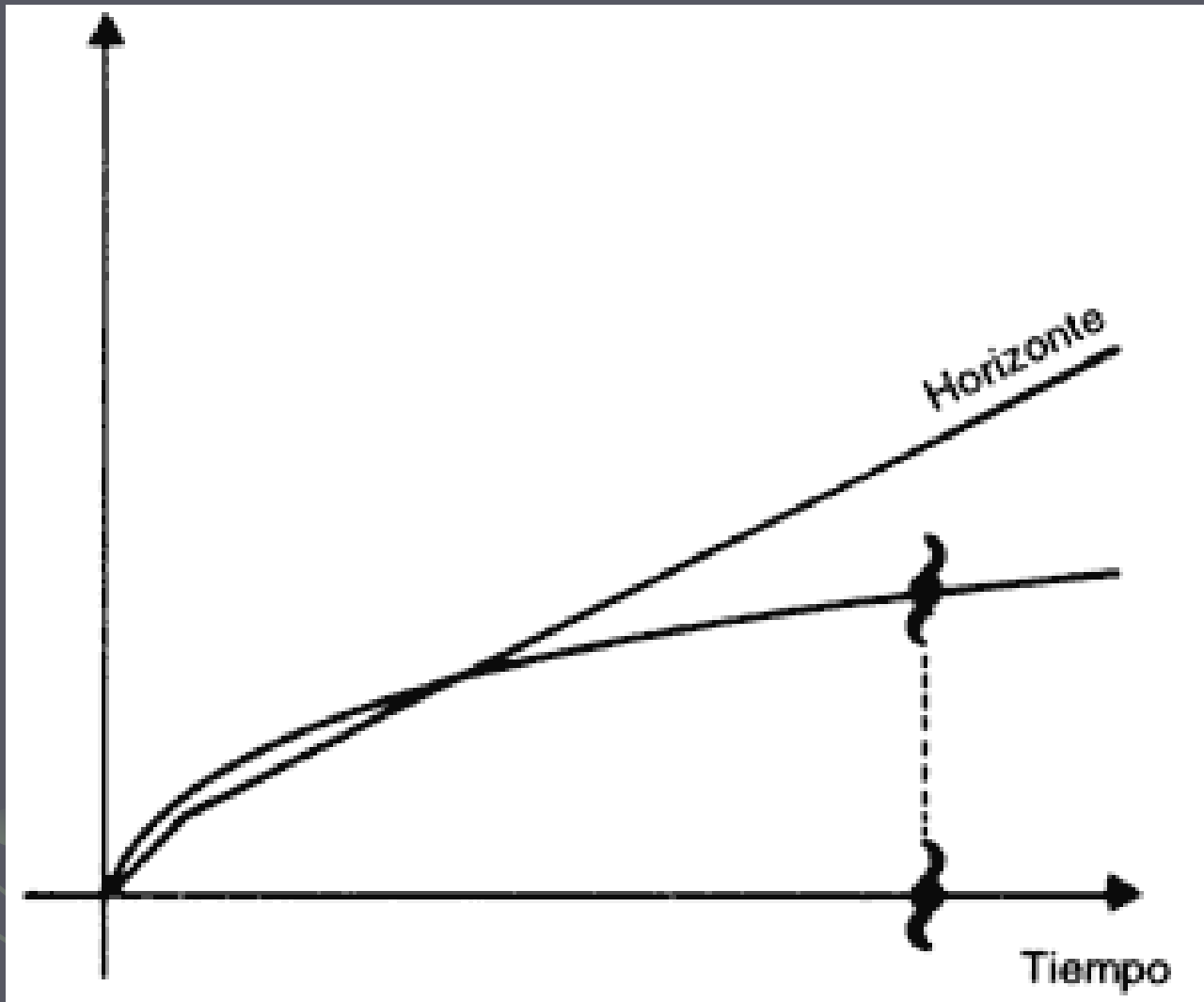
- Los factores **3** y **2** en estas fórmulas se deben a que la curvatura y expansión del Universo alteran las distancias reales; el radio del horizonte resulta ser mayor que  **$ct$**  (que sería la distancia recorrida por la luz en un tiempo  **$t$**  en un universo sin expansión).

# EL HORIZONTE INFLACIONARIO

- Lo importante de todo el asunto es que la distancia real entre dos galaxias aumenta como  $t^{2/3}$  (o  $t^{1/2}$  durante la época del **fuego primordial**), mientras que el radio del horizonte aumenta en proporción directa a  $t$ .

# EL HORIZONTE INFLACIONARIO

- Es decir, el horizonte aumenta más rápidamente que la distancia entre galaxias.
- Esto, a su vez, implica que el horizonte era más pequeño en el pasado, en comparación con la distancia real.



- La evolución del horizonte y la distancia a una galaxia lejana según los modelos cosmológicos tradicionales.

# EL HORIZONTE INFLACIONARIO

- Para dar un ejemplo, supongamos que una galaxia se encuentra en la actualidad a una distancia de **2.000.000.000 de años luz** de nuestra galaxia.
- En el pasado, esa misma galaxia se encontraba a una distancia de **3,9 millones de años luz**, cuando la edad del Universo era de **1,3 millones de años**.

# EL HORIZONTE INFLACIONARIO

- Antes de esa misma época nuestro horizonte medía menos de **3,9 millones de años luz** y, por lo tanto la galaxia estaba fuera del horizonte de la nuestra.

# EL HORIZONTE INFLACIONARIO

- Podemos decir que la galaxia en consideración *entró al horizonte* de nuestra galaxia al tiempo  $t = 1,3$  millones de años.
- Antes, esa galaxia y la nuestra se encontraban en regiones del Universo que no pudieron influir una sobre la otra.

# EL HORIZONTE INFLACIONARIO

- Ahora debe quedar claro por qué es tan extraño que el Universo sea homogéneo a gran escala.
- El modelo del **Universo inflacionario** proporciona una solución directa a este problema.



# EL HORIZONTE INFLACIONARIO

- La clave es que durante el periodo de inflación la distancia real entre dos puntos del Universo no aumentó como  $t^{1/2}$  o  $t^{2/3}$ , como en el modelo clásico, sino *exponencialmente* como  $e^{HT}$  donde **H** es la constante de Hubble *durante el periodo de inflación*.

# EL HORIZONTE INFLACIONARIO

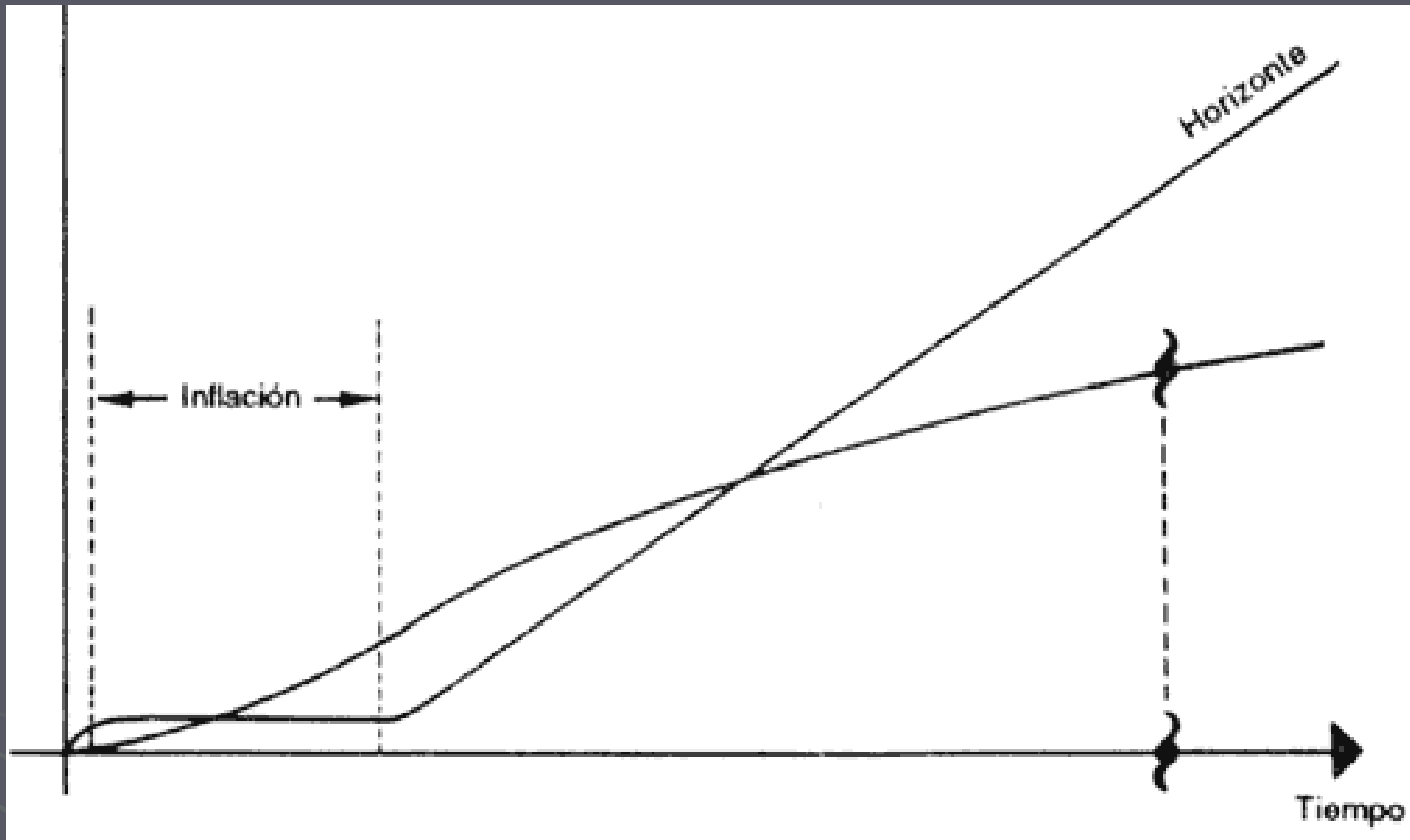
- Esa constante mide la velocidad de expansión del Universo y debió ser enorme durante la inflación: la teoría predice que valía algo así como  $M_x c^2/h$ , donde  $M_x$  es la masa de una partícula  $X$ .

# EL HORIZONTE INFLACIONARIO

- Como consecuencia, todas las distancias aumentaron por un factor de  $10^{80}$  en sólo  $10^{-36}$  s.
- Además durante el mismo **periodo de inflación** el horizonte del Universo se mantuvo **constante**.

# EL HORIZONTE INFLACIONARIO

- De acuerdo con el modelo del Universo inflacionario la evolución de la distancia y del radio del horizonte no es como la vimos anteriormente en la figura anterior, sino que tiene la forma mostrada en la figura siguiente.



- **Evolución del horizonte y de la distancia a una galaxia lejana según el modelo del Universo inflacionario.**

# EL HORIZONTE INFLACIONARIO

- Un vistazo a esta última muestra cómo el problema del horizonte queda resuelto.
- Todo lo que vemos dentro de nuestro horizonte en la actualidad estaba perfectamente contenido dentro del horizonte correspondiente a la época anterior a la inflación.

# EL HORIZONTE INFLACIONARIO

- De hecho todo nuestro Universo actualmente visible estaba contenido originalmente en una región de sólo 10 centímetros justo antes de la inflación.
- Las regiones del Universo que se encuentran dentro de nuestro horizonte actual tuvieron tiempo de sobra para interactuar entre sí *antes* de la inflación.
- Es durante la inflación y un cierto tiempo posterior que ya no pudieron interactuar.

# EL HORIZONTE INFLACIONARIO

- El modelo del Universo inflacionario implica que la estructura actual del Universo tuvo sus orígenes en las épocas anteriores a la inflación, muy cerca del **tiempo de Planck**.
- Este hecho tiene importantes consecuencias para la formación de galaxias.



# LA DENSIDAD DEL UNIVERSO

- Otro de los problemas a los que se enfrenta la teoría de la Gran Explosión en su versión tradicional es el de la densidad del Universo.
- Al expandirse el Universo su densidad disminuye.

# LA DENSIDAD DEL UNIVERSO

- Dependiendo de si esa densidad es menor o mayor que una densidad crítica, el Universo seguirá expandiéndose indefinidamente o no, y la densidad medida por los astrónomos parece ser de un décimo o un centésimo de la densidad crítica correspondiente a la época actual (es importante notar que el valor de la densidad crítica disminuye con el tiempo, por lo que era mayor en el pasado).

# LA DENSIDAD DEL UNIVERSO

- En principio, la densidad del Universo en sus primeros segundos de existencia pudo tener cualquier valor.
- Los cálculos predicen que si la densidad en esas épocas remotas hubiera sido un poco mayor que la crítica correspondiente a esa época, el Universo se habría expandido durante algunos segundos para luego volverse a colapsar.

# LA DENSIDAD DEL UNIVERSO

- Del mismo modo, si la densidad inicial hubiera sido ligeramente menor que la crítica, la expansión del Universo habría seguido eternamente, pero en la época actual la materia en el Universo estaría diluida a una densidad billones o trillones de veces más baja que la que observamos en la actualidad.

# LA DENSIDAD DEL UNIVERSO

- En otras palabras para que la densidad actual del Universo sea de un décimo o un centésimo de la densidad crítica actual se necesita que la densidad algunos segundos después de la Gran Explosión haya sido la crítica de aquella época con una exactitud increíble; cuando mucho un error de una parte en  $10^{40}$ .
- Cualquier desviación mayor que esa con respecto al valor crítico habría originado un Universo radicalmente distinto al que observamos.

# LA DENSIDAD DEL UNIVERSO

- Lo anterior se debe a que el Universo que tenga precisamente la densidad crítica es un Universo inestable.
- Un ejemplo muy sencillo de un sistema mecánico estable es una canica que rueda sobre una cuerda.
- Para mantener la canica un buen trecho sobre la cuerda se debe ajustar su posición y velocidad iniciales con una precisión extrema.

# LA DENSIDAD DEL UNIVERSO

- Cualquier ligera desviación inicial repercute en que la canica se caiga de la cuerda.
- El Universo es semejante a la canica: cualquier pequeña diferencia inicial de su densidad con respecto a la crítica hubiera cambiado drásticamente su evolución posterior.

# LA DENSIDAD DEL UNIVERSO

- El problema consiste, entonces, en explicar por qué el Universo poseía la densidad crítica en el pasado con una precisión de una parte en  $10^{40}$ .
- Hasta antes de que apareciera el modelo del Universo inflacionario sencillamente no se tenía una explicación.



# LA DENSIDAD DEL UNIVERSO

- La inflación, sin embargo, resuelve este problema de manera natural.
- Resulta que como consecuencia de la expansión tan violenta producida por la inflación, el Universo adquiere una densidad que es prácticamente la crítica correspondiente a esa época, independientemente de cualquier densidad que haya tenido antes de la inflación.
- Así, si realmente ocurrió la inflación, la densidad actual del Universo debería ser justamente la crítica.

# LA DENSIDAD DEL UNIVERSO

- La materia luminosa observada implica apenas una centésima de la cantidad de materia que debería de haber en un Universo con densidad crítica.
- Por otra parte, hay evidencias de que existe más masa que la visible.

# LA DENSIDAD DEL UNIVERSO

- Si la hipótesis de la inflación es correcta debemos deducir que vemos apenas una centésima parte de la masa que existe en el Universo.
- ¿De qué está hecha la masa invisible?
- Este es uno de los grandes problemas de la cosmología actual; hasta ahora se conocen dos posibles respuestas.

# LA DENSIDAD DEL UNIVERSO

- La primera posibilidad es que la masa invisible se deba a materia común, hecha de protones y neutrones —es decir, **materia bariónica**.
- El Universo podría estar hecho de meteoritos, asteroides, pequeños planetas, estrellas aplanadas (incluyendo agujeros negros), todos ellos objetos que no emiten ninguna luz y que, por lo tanto, son imposibles de descubrir desde nuestro planeta.
- Hasta ahora no se tiene ninguna idea de qué tan abundantes podrían ser esos cuerpos en el espacio cósmico.

# LA DENSIDAD DEL UNIVERSO

- La segunda posibilidad que es más atrevida, es que la masa faltante se deba a **partículas fantasma** que no interactúan normalmente con la materia común.
- Ya tuvimos ocasión de conocer una partícula así: **el neutrino**, que, por no interactuar electromagnéticamente, es invisible y prácticamente intangible.

# LA DENSIDAD DEL UNIVERSO

- En principio podrían existir partículas masivas que sólo interactuarán con la materia mediante la fuerza gravitacional.
- Tales partículas serían absolutamente imposibles de detectar en un laboratorio terrestre, pero se manifestarían a escala cósmica por su influencia gravitacional.
- La masa faltante podría encontrarse en grandes concentraciones de estas partículas fantasmas, unidas gravitacionalmente a las galaxias.

# LA DENSIDAD DEL UNIVERSO

- De hecho, uno de los primeros candidatos para la materia invisible fue el neutrino si bien se cree que la masa de los neutrinos es cero, los experimentos sólo imponen un límite superior a esa posible masa.
- Ese límite es del orden de unos  $10^{-33}$  gramos, que es apenas una cienmilésima parte de la masa de un electrón.
- Por otra parte, el Universo se encuentra repleto de neutrinos al igual que de fotones provenientes del fuego. primordial.

# LA DENSIDAD DEL UNIVERSO

- Si estos neutrinos tuvieran masa, podrían explicar una fracción de la materia invisible, pero no toda.
- Si bien parece una posición muy especulativa, la existencia de partículas fantasmas masivas ha sido considerada seriamente por los cosmólogos.
- Tales partículas podrían desempeñar un papel fundamental en la formación de las galaxias, como veremos en el siguiente capítulo.



# CONSECUENCIAS DE LA INFLACIÓN:

## La sopa de cuarks

- Después de la inflación ya no había partículas **X** en libertad, pues éstas se habían transformado en **leptones** y **cuarks**.
- El Universo era una sopa homogénea de **cuarks**, **gluones**, **leptones**, partículas **W** y **Z**, y **fotones**, todos chocando entre sí a enormes velocidades transformándose continuamente unas en otras.
- En esas épocas remotas, cuando la temperatura todavía estaba por encima de unos  **$10^{16}$  K**, las interacciones electromagnéticas y débiles aún no se separaban.

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACCIÓN:

## La sopa de cuarks

- Pero a  $10^{15}$  K el campo de Higgs asociado a las partículas W y Z transmitió su energía y estas partículas adquirieron masa.
- En ese momento, las interacciones electromagnéticas se separaron para siempre de las débiles.
- Eso ocurrió a los  $10^{-12}$  segundos y correspondió también a un cambio de fase tal como en la inflación.
- Pero la liberación de energía fue muchísimo menos espectacular y no tuvo una influencia tan drástica en la evolución del Universo.

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACCIÓN:

## La sopa de cuarks

- Después de unos  $10^{-8}$  segundos la temperatura del Universo había bajado a  $10^{13}$  K y los cuarks se unieron entre sí para formar los primeros bariones y antibariones, que eran principalmente protones, neutrones y sus antipartículas.
- En esa época el Universo era una sopa de partículas elementales, principalmente fotones, así como protones, electrones, muones, tauones, neutrinos y sus respectivas antipartículas.

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACCIÓN:

## La sopa de cuarks

- A medida que descendía la temperatura la antimateria iba desapareciendo.
- Al formarse los protones y neutrones la temperatura había bajado lo suficiente para que estas partículas se aniquilaran con sus correspondientes antipartículas.

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACCIÓN:

## La sopa de cuarks

- Los protones y los antiprotones pueden coexistir a temperaturas superiores a los  $10^{13}$  K, creándose y aniquilándose continuamente con los fotones.
- Así, en algún momento que podemos situar en unas **100 millonésimas de segundo** después de la Gran Explosión, todos los antiprotones se aniquilaron con los protones que encontraron, produciendo una enorme cantidad de luz (o fotones).

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACCIÓN: La sopa de cuarks

- Afortunadamente había un ligerísimo exceso de protones sobre antiprotones, como consecuencia probable de la **asimetría CP** que propició la creación de **más cuarks** que **anticuarks**.

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACCIÓN:

## La sopa de cuarks

- También se aniquilaron los **tauones** con sus **antitauones**, y poco después les tocó su turno a los **muones** y **antimuones**.
- Un **décimo de segundo** después de la Gran Explosión quedaron como constituyentes principales del Universo: **protones**, **neutrones**, **electrones** y **positrones**, **neutrinos** y **antineutrinos** (de las tres especies), y **fotones**.

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACCIÓN: La sopa de cuarks

- Un segundo después de la Gran Explosión, la temperatura había bajado a unos **5.000.000.000 K.**
- Por debajo de esa temperatura tampoco es posible que coexistan **positrones** con **electrones.**



# CONSECUENCIAS DE LA INFLACCIÓN:

## La sopa de cuarks

- Así, cuando la edad del Universo era de un segundo, todos los positrones se aniquilaron con los electrones produciendo más luz.
- Después ya no hubo antimateria.
- Pero si quedó un pequeño excedente de materia, gracias a la ligera asimetría entre materia y antimateria, que mencionamos más arriba.

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACCIÓN:

## La sopa de cuarks

- Todo lo que vemos en el Universo en la actualidad incluyendo nosotros mismos, está hecho de ese excedente.
- Se calcula que por cada partícula de materia que sobrevivió hasta ahora se tuvieron que aniquilar unos 100.000.000 de partículas y antipartículas.

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACCIÓN:

## La sopa de cuarks

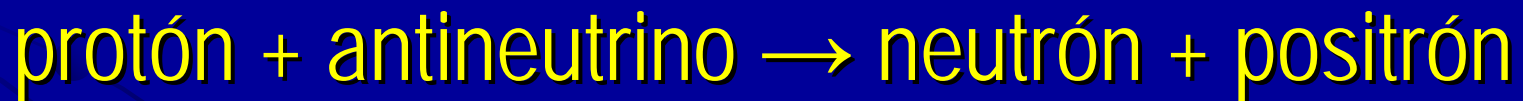
- Eso sucedió antes de un segundo de existencia.
- Después, los constituyentes principales del Universo fueron: protones, neutrones, electrones, neutrinos, antineutrinos y fotones.

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACCIÓN:

## Formación de helio primordial

- Los protones pueden transformarse en neutrones con la intermediación de los neutrinos.

- La reacción más común es:



# CONSECUENCIAS DE LA INFLACCIÓN: Formación de helio primordial

- Gracias a la abundancia de neutrinos y antineutrinos en esas épocas remotas del Universo los protones se transformaban en neutrones, los cuales se volvían a transformar en protones después de cierto tiempo.

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACCIÓN:

## Formación de helio primordial

- Por otra parte, los protones y neutrones chocaban entre sí y, ocasionalmente podían quedar "**pegadas**", para así formar un núcleo de **deuterio**, también conocido como hidrógeno pesado.

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACCIÓN:

## Formación de helio primordial

- El núcleo de deuterio que consta de un protón y un neutrón puede a su vez, chocar con otros protones y neutrones y formar después de varias reacciones nucleares, núcleos de helio.
- Lo crucial de este proceso es que ocurre a una temperatura de unos 100.000.000 K.

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACCIÓN:

## Formación de helio primordial

- Por encima de esa temperatura los protones y neutrones tienen demasiada energía y destruyen, al chocar, los núcleos de deuterio y helio que hayan podido formarse.



# CONSECUENCIAS DE LA INFLACIÓN:

## Formación de helio primordial

- A temperaturas menores los núcleos de deuterio, que tienen carga eléctrica positiva, no poseen suficiente energía para vencer su repulsión eléctrica por lo que le es imposible unirse y formar núcleos más pesados.
- Y a los tres minutos de existencia del Universo, la temperatura era justamente de 100.000.000 K.

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACCIÓN:

## Formación de helio primordial

- Los núcleos atómicos que lograron formarse a los tres minutos de existencia del Universo no volvieron a destruirse y fijaron, por lo tanto, la composición química posterior del Universo quedó compuesta de aproximadamente de 75 % de hidrógeno, 25 % de helio y apenas una traza de otros elementos.
- Esa era la composición química del Universo en aquellas épocas remotas, muchísimo antes de que nacieran las primeras estrellas.

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACCIÓN:

## Formación de helio primordial

- Los otros elementos químicos fueron fabricados en el interior de las estrellas y diseminados posteriormente por el espacio cósmico.
- La abundancia del helio primordial se ha calculado a partir de observaciones astronómicas y el resultado concuerda muy bien con las predicciones teóricas: ésta es una de las pruebas más sólidas a favor de la **Teoría de la Gran Explosión**.

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACCIÓN:

## Formación de átomos y la radiación de fondo

- Tres minutos después la Gran Explosión del Universo contenía principalmente núcleos de hidrógeno (sencillos protones), núcleos de helio, electrones, neutrinos, antineutrinos y fotones.
- Los neutrinos y antineutrinos dejaron por esas épocas de interactuar con las demás partículas, pues ya no poseían suficiente energía.

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACCIÓN:

## Formación de átomos y la radiación de fondo

- Las otras partículas formaban lo que se llama gas ionizado, un gas en el que los electrones andan sueltos y no están amarrados a los núcleos atómicos.
- Esa época del Universo corresponde al fuego primordial.

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACCIÓN:

## Formación de átomos y la radiación de fondo

- Esa era la condición física del Universo tres minutos después de la **Gran Explosión**, y así siguió durante varios cientos de miles de años más sin que volviera a suceder algo excepcional, salvo que la temperatura bajaba progresivamente a medida que el Universo proseguía con su expansión.

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACCIÓN:

## Formación de átomos y la radiación de fondo

- Unos **500.000 años** después de la Gran Explosión algo decisivo volvió a ocurrir.
- La temperatura había bajado a unos **5.000 K** y fue entonces cuando los electrones, que andaban libres, pudieron combinarse por primera vez con los núcleos atómicos y formar los primeros átomos en la historia del Universo.

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACCIÓN:

## Formación de átomos y la radiación de fondo

- La materia dejó de ser un gas ionizado, y como no quedaban electrones libres, los fotones dejaron de interactuar con la materia.
- A partir de ese momento el fuego primordial se apagó y el Universo se volvió transparente.
- La luz se desacopló de la materia y siguió su evolución por separado.



# CONSECUENCIAS DE LA INFLACCIÓN:

## Formación de átomos y la radiación de fondo

- Ahora, unos **15.000.000.000 de años** después de la Gran Explosión los **fotones** que quedaron libres luego de la formación de los primeros átomos deben estar presentes todavía, llenando todo el espacio cósmico.
- Esos fotones fueron emitidos por la materia a una temperatura de **5.000 K**.
- Un gas a esa temperatura irradia principalmente luz visible e infrarroja.


# CONSECUENCIAS DE LA INFLACCIÓN:

## Formación de átomos y la radiación de fondo

- Pero, como el Universo está en expansión, esa luz sufrió un **corrimiento Doppler** y ha perdido una buena parte de su energía antes de llegar a nosotros.
- Esa luz se observa hoy en día ya no como luz visible sino como ondas de radio: es **la radiación de fondo**.

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACCIÓN:

## Formación de Galaxias

- A pesar de los descubrimientos tan importantes de los últimos años y los avances teóricos en cosmología y astrofísica uno de los problemas más fundamentales que no se ha resuelto es el de la formación de las galaxias.
- 

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACCIÓN:

## Formación de Galaxias

- La teoría más aceptada en la actualidad es que, las galaxias se formaron por la contracción gravitacional de regiones del Universo que estaban más densas que el promedio.
- Para entender esta idea imaginemos al Universo en algún momento temprano de su historia.

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACCIÓN:

## Formación de Galaxias

- La materia estaba distribuida de manera homogénea, aunque algunas regiones pudieron estar ligeramente más densas que el promedio, y otras ligeramente menos densas.
- Las regiones más densas serían como grumos en el Universo primordial estos grumos por tener más masa, se contraen debido a su propia fuerza gravitacional.

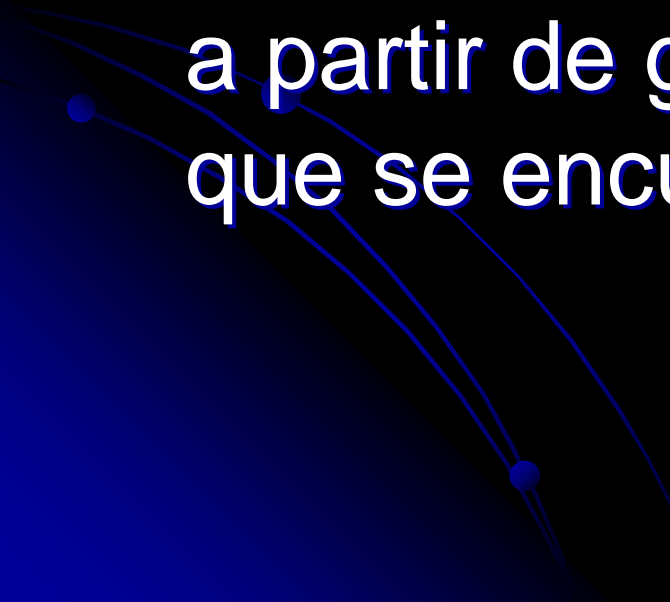
# CONSECUENCIAS DE LA INFLACIÓN:

## Formación de Galaxias

- Una vez que esta contracción empieza no hay modo de que se detenga, y se formará, finalmente, una gran condensación de materia **¡es decir una galaxia!**
- Esta es, a grandes rasgos, la hipótesis más aceptada de la formación de galaxia sin embargo hay dos problemas fundamentales:  
**¿cuándo empezaron a formarse estos grumos?,**  
**y ¿qué tan rápido se contrae la materia por su fuerza gravitacional?**

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACIÓN:

## Formación de Galaxias

- El proceso de la formación de galaxias tiene similitudes con la formación de estrellas.
  - Se piensa que las estrellas se forman a partir de gigantescas nubes de gas que se encuentran en las galaxias.
- 

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACIÓN:

## Formación de Galaxias

- El gas se encuentra relativamente caliente y ejerce, por lo tanto, una presión que tiende a dilatarlo; por otra parte, la propia atracción gravitacional del gas tiende a contraerlo.
- Si la distribución del gas fuera perfectamente homogénea, la presión y la gravedad mantendrían el equilibrio por tiempo indefinido.
- Pero, una parte de la nube puede ser ligeramente más densa que otra y romper, así, el delicado equilibrio entre presión y gravedad.



# CONSECUENCIAS DE LA INFLACCIÓN:

## Formación de Galaxias

- Esto sucede si la masa de un pedazo de nube se excede de cierto valor crítico, de tal modo que la fuerza gravitacional domina definitivamente y el pedazo empieza a contraerse.
- Y no importa que tan pequeña haya sido la perturbación inicial de la densidad pues la contracción procederá inevitablemente.

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACCIÓN:

## Formación de Galaxias

- En principio, un proceso similar pudo coincidir a la formación de una galaxia.
- La mayoría de los astrofísicos piensan que las galaxias se formaron porque la materia cósmica, en los primeros instantes del Universo, no era perfectamente homogénea sino que había grumos de materia.
- Estos grumos empezaron a contraerse por su propia gravedad y dieron lugar a condensaciones gaseosas, a partir de las cuales se formaron posteriormente las estrellas.

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACCIÓN:

## Formación de Galaxias

- Sin embargo, la expansión del Universo retarda seriamente la contracción gravitacional.
- Los cálculos indican que si una inhomogeneidad se formó un segundo después de la Gran Explosión, en la actualidad no se habría transformado todavía en algo parecido a una galaxia.

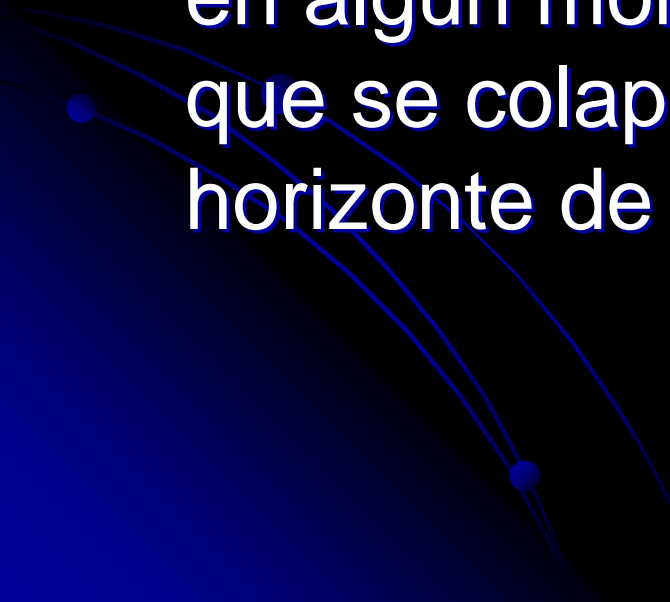
# CONSECUENCIAS DE LA INFLACIÓN:

## Formación de Galaxias

- Si uno quiere explicar la formación de las galaxias con el mecanismo descrito tiene que fijar el inicio de la contracción a épocas mucho más remotas.
- Aquí es donde surge una vez más el problema del horizonte.
- Imaginemos una cierta región del espacio que, al contraerse, dio origen a nuestra galaxia.

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACIÓN:

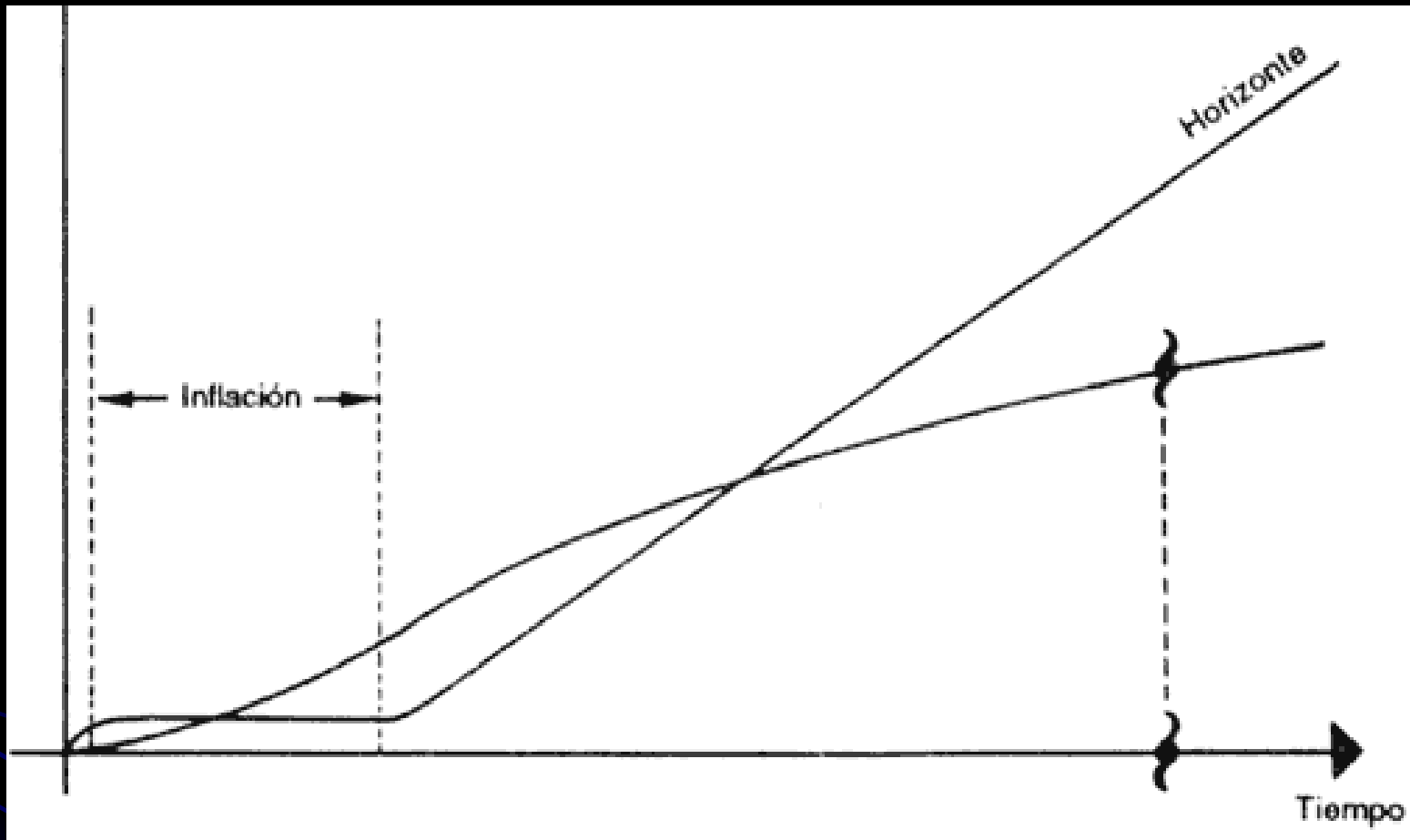
## Formación de Galaxias

- Esa región en la actualidad podría ser, digamos, 100 veces más grande que nuestra galaxia.
  - Ahora vayamos hacia atrás en el tiempo: en algún momento en el pasado, la región que se colapsó era tan grande como el horizonte de esa época.
- 

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACIÓN:

## Formación de Galaxias

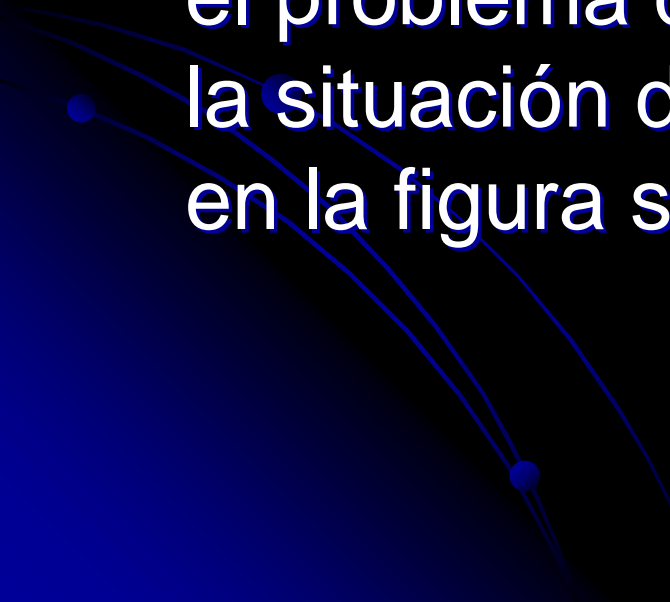
- Y si uno se va aún más atrás en el tiempo resulta que la materia que posteriormente formó nuestra galaxia estaba distribuida en una región muchísimo más grande que el horizonte.
- Por lo tanto, no pudo haber interacción entre sus partes para iniciar la contracción gravitacional.



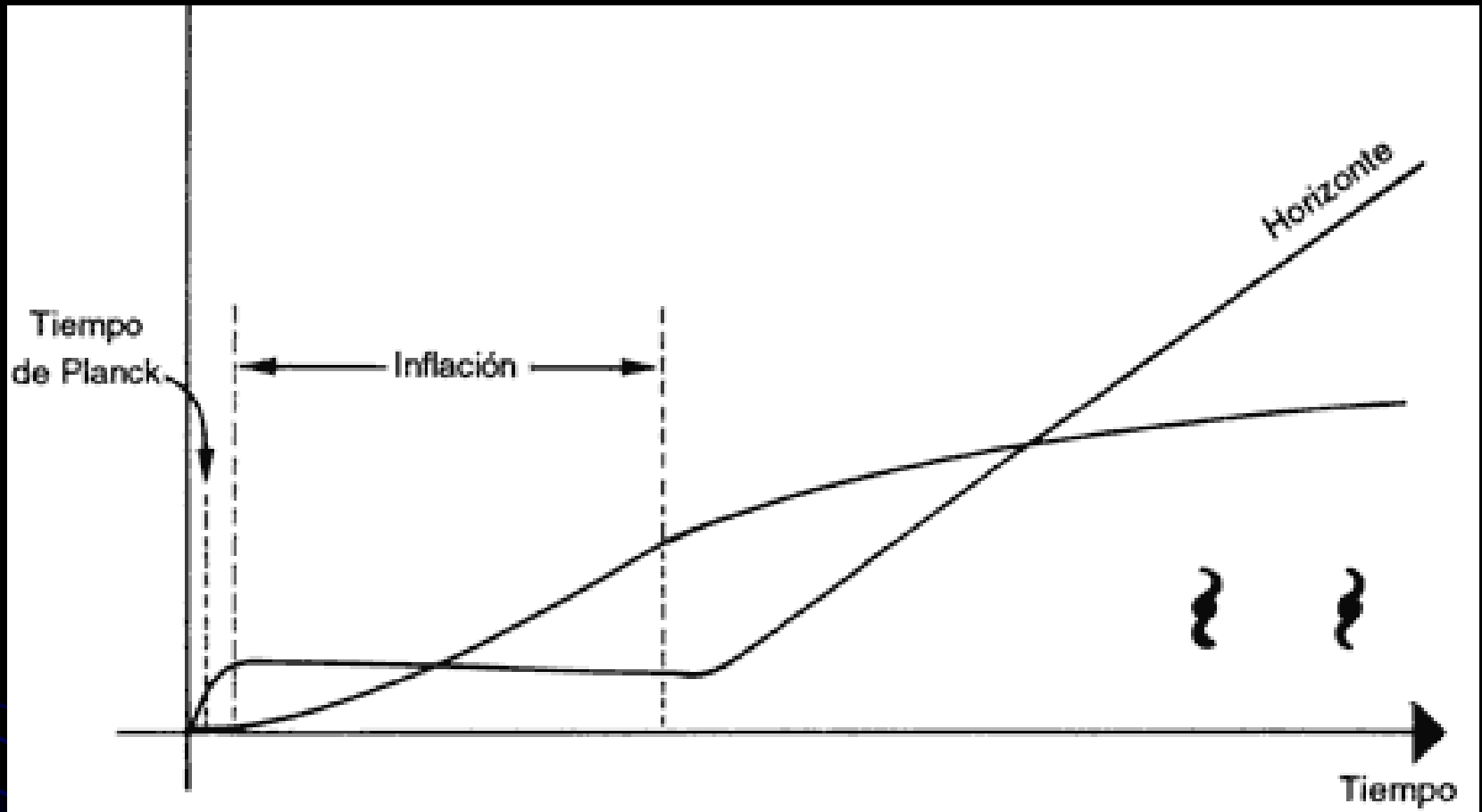
- **Evolución del horizonte y de la distancia a una galaxia lejana según el modelo del Universo inflacionario.**

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACIÓN:

## Formación de Galaxias

- Este era un problema básico de la cosmología hasta que apareció la idea de la inflación.
  - Si analizamos la figura anterior vemos que el problema desaparece, ya que tenemos la situación descrita más detalladamente en la figura siguiente.
- 





- **Esquema de la formación de una galaxia a partir de una fluctuación cuántica.**


# CONSECUENCIAS DE LA INFLACIÓN:

## Formación de Galaxias

- Podemos tener un grumo inicial en el Universo antes de la inflación, quizás justo en el **tiempo de Planck**.
- Ese grumo esta contenido dentro de su horizonte en esa época.
- Después sobreviene la inflación.

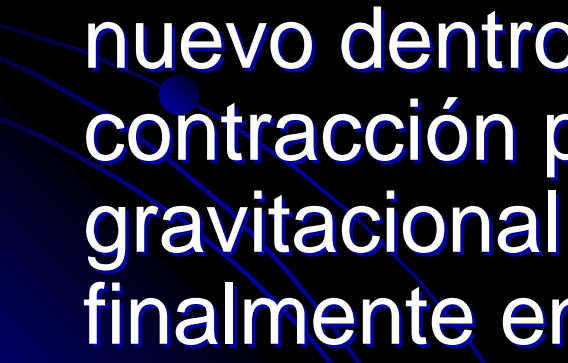
# CONSECUENCIAS DE LA INFLACCIÓN:

## Formación de Galaxias

- El horizonte permanece constante.
  - El grumo deja de contraerse y se expande de manera violenta con todo el resto de la materia en el Universo; a partir de algún momento es más grande que el horizonte.
- 

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACCIÓN:

## Formación de Galaxias

- Cuando termina la inflación el grumo sigue expandiéndose con el Universo, pero ahora también el horizonte crece y lo alcanza.
  - A partir de ese momento el grumo está de nuevo dentro del horizonte y reanuda su contracción por su propia fuerza gravitacional para transformarse finalmente en algo parecido a una galaxia.
- 

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACCIÓN:

## Formación de Galaxias

- En principio, es perfectamente posible que las galaxias, o más bien las pequeñas fluctuaciones de densidad que después dieron origen a ellas, aparecieran durante el tiempo de **Planck**.

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACCIÓN:

## Formación de Galaxias

- En esa época tan remota el mismo espacio-tiempo estaba en plena turbulencia y, tal como un gas turbulento en el que algunas regiones son más densas que otras, había fluctuaciones cuánticas del vacío que pudieron ser la semilla de las galaxias.
- ¡Una fluctuación cuántica que origina algo tan grande como una galaxia!

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACIÓN:

## Formación de Galaxias

- Este es, a grandes rasgos, el escenario para la formación de galaxias de acuerdo con el modelo de la inflación.
- Lo interesante es que lleva a predicciones teóricas muy concretas.
- En el escenario de la inflación los cálculos predicen correctamente las propiedades estadísticas de las fluctuaciones tal como debieron ser para reproducir las condiciones actuales (por estadística nos estamos refiriendo a cuántos grumos se formaron con un tamaño dado).

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACIÓN:

## Formación de Galaxias

- En lo que falla el modelo es en el tamaño de las fluctuaciones propuestas.
- Todos los cálculos indican que las fluctuaciones habrían sido tan intensas que, en lugar de formar galaxias, formarían condensaciones muchísimo más densas, como agujeros negros.



# CONSECUENCIAS DE LA INFLACIÓN:

## Formación de Galaxias

- La única manera de evitar tal catástrofe sería ajustar de manera extremadamente fina y *ad hoc* los parámetros del campo que debió existir antes de la inflación.
- Ésta es probablemente la principal falla del modelo inflacionario; los partidarios de este modelo piensan que con el tiempo se podrá corregir este defecto con un modelo más apropiado, lo cual todavía está por verse ...

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACIÓN:

## Formación de Galaxias

- Otra posibilidad, aún sin explorar; es que efectivamente se hayan formado agujeros negros en un principio y que luego estos hayan propiciado la formación de galaxias a su alrededor debido a la fuerza gravitacional que ejercían sobre la materia en sus entornos.
- Después de todo, hay evidencias de que agujeros negros gigantes se encuentran en los núcleos de muchas galaxias.

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACIÓN:

## Formación de Galaxias

- Independientemente de todo lo anterior la hipótesis de que las galaxias se hayan formado por la contracción gravitacional de la materia cósmica se enfrenta a un problema muy serio.
- La radiación de fondo, que fue emitida cuando se apagó el fuego primordial, es extremadamente homogénea y sólo muestra irregularidades espaciales del orden de una parte en 10.000.

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACCIÓN:

## Formación de Galaxias

- Si tales irregularidades corresponden a los grumos que dieron origen a las galaxias, los cálculos indican que definitivamente no tuvieron tiempo suficiente para contraerse.
- La única salida consiste en proponer que existe masa invisible en forma de partículas fantasmas, tal como explicamos en el capítulo anterior.

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACIÓN:

## Formación de Galaxias

- Las galaxias, entonces, empezarían a formarse por la contracción gravitacional de grumos de materia fantasma, que sólo interactúa gravitacionalmente.

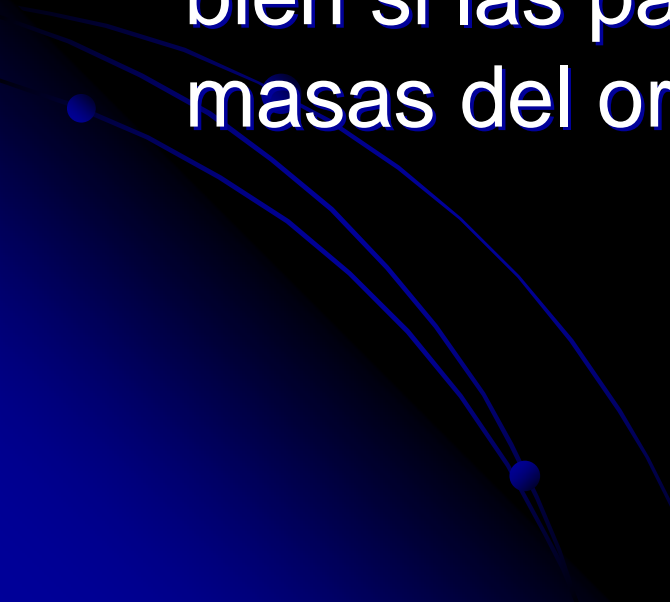
# CONSECUENCIAS DE LA INFLACCIÓN:

## Formación de Galaxias

- Estos grumos podrían estar bastante condensados cuando se liberó la radiación de fondo, pero no tuvieron absolutamente ninguna influencia en ella porque no interactúan con la luz.
- Posteriormente esas grandes condensaciones invisibles e impalpables atraerían la materia común con la que se formarían las galaxias con sus estrellas.

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACIÓN:

## Formación de Galaxias

- Este es de modo general, un posible mecanismo para la formación de galaxias.
  - Los cálculos de los cosmólogos muestran que el proceso funciona razonablemente bien si las partículas fantasmas tienen masas del orden de la masa del protón.
- 

# CONSECUENCIAS DE LA INFLACCIÓN:

## Formación de Galaxias

- A pesar de algunos fallos serios y de que no explica todo lo que uno quisiera que se explicara, el modelo del Universo inflacionario es lo suficientemente interesante y complejo para confiar en que con algún ingrediente desconocido hasta ahora, se llegue a un escenario más plausible para la Gran Explosión, la creación de la materia y la estructura del Universo tal como las observamos en la actualidad.





**-¿Qué quieres decir con eso de una “fluctuación cuántica”?**  
**-Pues que no podemos establecer una relación causa-efecto.**