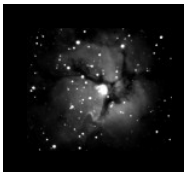


Astrofísica y Cosmología

Materia y Energía

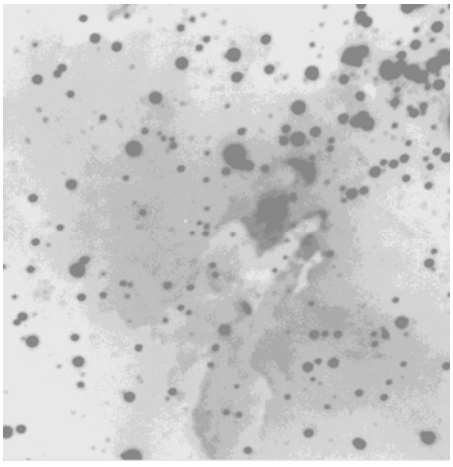
Niveles estructurales de la materia.
Partículas portadoras.
Familias de partículas.
Fuerzas de la naturaleza.
Astronomía y electromagnetismo.
Neutrinos y ondas gravitatorias.
Energía, calor, temperatura.
La materia como emisora.
El átomo como emisor.
Espectros.
Radioenergía.
Energía no térmica.

Materia Difusa

Formas de presentación.
Polvo interestelar.
Gas interestelar.
Nebulosas brillantes.
Dinámica de la materia difusa galáctica y sus efectos.

Las Estrellas

Nociones generales. Tamaños, brillos y masas.
Composición química.
Origen de la energía estelar.
Conversión cruzada materia- energía.
Fusión nuclear. Cadena PP, ciclo CON, reacción. 3 alfa.
Síntesis de los elementos.
Transporte de la energía. La fotosfera.
Estructura interna.
Génesis y evolución estelares.



Enanas blancas y estrellas de neutrones

Enanas blancas. Características generales.
Composición química, estructura.

Evolución.
Estrellas neutrónicas. Características generales.
Estructura, masas, tamaños.
Comportamiento de la materia a nivel subatómico.
Neutrónicas típicas, hiperonicas, híbridas, estrellas extrañas.
Magnetares y destellos de radiación gamma.

Las novas

Caracteres generales. Curvas de brillo. Evolucion y espectros.
Causa y mecanismo físico del estallido.
Novas de rayos x.

Supernovas

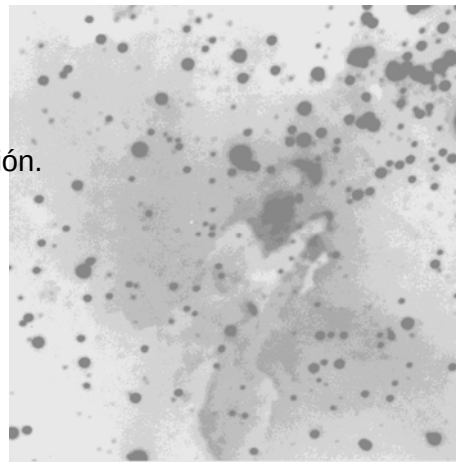
Características generales
Tipo, mecanismos físicos.
Síntesis de elementos pesados
Reacciones alfa y por captura de neutrones
Reacciones r y s
Estratificación
Eliminación de la energía. Mecanismo del estallido
Comportamiento del núcleo denso y papel de los neutrinos
Las ondas sonoras. Flujos energéticas.
Supernovas 1a y cosmología.

Pulsares

Caracteres generales. Emisión de energía.
Flujo magnético. Frenado magnético.
Mecanismos de la generación de la energía y de su colimación.
Modelos físicos para los pulsares.
Pulsares ultrarrápidos.
Evolución general.

Agujeros negros

Gravitación y relatividad. Espacio tiempo curvo.
Curvatura y solución de Schwarschild.
Agujeros de Schwarschild, de Reiner-Nordstron y de Kerr.
Comportamiento y propiedades. Ergósfera.
Análisis cuántico. Emisión de partículas y evolución. Detección.



Galaxias activas

Galaxias en general y emisoras de altas energías. Cuasares.
Radiogalaxias, lacértidos, galaxias Seyfert.
Radiolobulos y chorros de plasmas relativisticas.
Mecanismos físicos generadores de la energía.
Velocidades hiperlumínicas.

Colisiones galacticas

Consideraciones generales.
Trayectorias convergentes y colisión. Sus efectos.
Simulaciones. Galaxias elípticas.
Canibalismo galáctico en la Via Láctea.

Estructura del Universo

Asociaciones galácticas. Grupos, cúmulos, supercúmulos.
Su origen. Modelos físicos.
Registro digital Sloan.

Mecanica cuantica

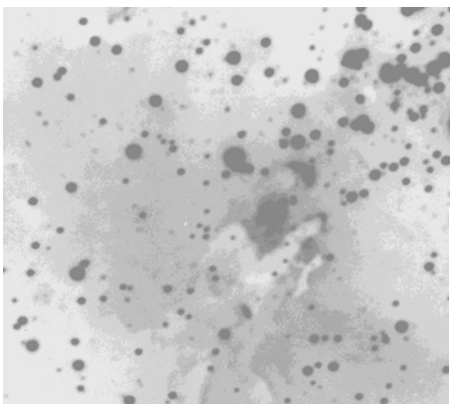
Nociones generales. Principio de incertidumbre.
Asociación partícula-onda.
Interacciones. Dispersión, colisión, absorción, aniquilación.
Partículas virtuales. Cuantos de campo.
Fuerzas de la naturaleza. Teoría cuántico de campos.
El vacío cuántico.
Cuantificación espacio temporal.

Cosmología

Nociones previas.
Paradoja de Olbers. La expansion. Relacion de Hubble
El comienzo explosivo.
Interrogantes primarios.
Problemas cosmológicos del modelo standard.

La materia oscura

Detección y análisis. Distribución.
Geometrías del espacio.
Naturaleza de la materia oscura.
Partículas conocidas e hipotéticas.



Teorías de la supersimetría.

El Universo primigenio

Origen de la materia. Era de Planck.
La expansión, cambios de la estructura de la materia y en el comportamiento de la energía.
La nucleosíntesis.
Constitución de la materia eléctricamente neutra.
La edad oscura, diafanización del universo.
Asimetría, materia - antimateria.

Radiacion isotrópica

Principios cosmológicos.
La radiación primordial. Origen.
Opacidad y equilibrio térmico. Radiación de cuerpo negro.
Isotropía de la radiación. COBE y WMAP.
Interpretación y lectura de sus datos.

El universo inflacionario

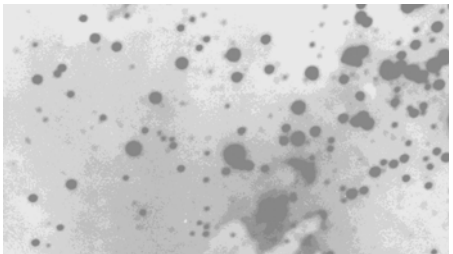
El modelo standard y sus problemas.
Efecto túnel cuántico y falso vació.
Las simetrías.
Campo escalar de Higgs.
Hiperexpansión y sus efectos.
Respuestas a problemas cosmológicos.

Evolucion futura del universo

En un universo elíptico, en uno plano y en uno hiperbólico.
La muerte térmica de la maquina cósmica. La entropía en grado máximo.
La expansión acelerada.
La propuesta del gran desgarro.

Temas opcionales

Nebulosas planetarias. Estrellas primitivas.
Colisiones estelares. Física de los cometas.
Evolución estelar simbiótica. Discos de acresión y flujos relativisticos.
Cuerdas cósmicas.
Teorías de supercuerdas. Multiuniversos.



UNO: El curso se dividirá en 2 partes: Astrofísica y Cosmología.

Todo en el universo está formado por 2 cosas: masa y energía. La masa es experimentable, la energía no... sólo se aprecia por su acción sobre la masa.

MATERIA: Podemos hablar de 5 niveles en la composición de la materia:
a) moléculas b) átomos c) núcleos d) nucleones (protones y neutrones) e) leptones y quarks.

Los leptones son las partículas que intervienen en la fuerza nuclear débil, poseen una cualidad denominada 'spin' que puede asemejarse a cierto tipo de rotación.
Los leptones son partículas elementales no están compuestas por otras partículas, y son:

leptones		neutrinos	
e	(electrón)	μe	(neutrino electrón)
M	(muón Mu)	μM	(neutrino Mu)
T	(muón Tau)	μT	(neutrino Tau)

Los pares de partículas se asocian con los quarks (que forman los nucleones)
Los quarks son:

u	(up, arriba)	d	(down, abajo)
s	(strange, extraño)	c	(charmé, encanto)
t	(top, encima)	b	(bottom, debajo)

Estas partículas, asociadas, forman 3 familias de partículas.
La materia normal está formada por una combinación de las siguientes partículas:
e - μe – u . Las otras 2 familias sólo se localizan donde actúan energías muy elevadas.

En un núcleo, el protón está formado por uud, y el neutrón por ddu.
Toda la materia está formada por electrones (e) quarks u y quarks d.

ENERGIA: (en griego quiere decir fuerza en acción). Actúa de 4 maneras (interacciones o fuerzas):

1) electromagnética
2) gravitación
3) fuerza nuclear fuerte — 10^{-13} cm
4) fuerza nuclear débil — 3 y 4 son de bajo alcance en el espacio. — 10^{-15} cm

3 y 4 existen y actúan sólo dentro del núcleo del átomo.

La luz puede ser interpretada como onda o como partícula (los experimentos de difracción e interferencia llevan a verla como onda, pero el efecto fotoeléctrico, que hace que la luz 'arranque' electrones de la materia, lleva a verla como formada por partículas).
La onda es una onda probabilística, y el fotón que arranca electrones de la materia NO tiene masa (mecánica cuántica).

La materia irradia E, pero nunca de un solo tipo de frecuencia, la emisión nunca es pura (siempre hay emisión en una frecuencia principal pero también en otras frecuencias). Un pulsar o un quasar emiten en todo el espectro electromagnético. Todo cuerpo sobre el 0 absoluto emite en toda la frecuencia del espectro, con diferentes intensidades.
La E se emite en quantos (paquetes de E, Max Plank), no como sale el agua de una canilla sino en paquetes.

Ecuación de Plank: $E = h \cdot \mu$

E, energía. h, constante de Plank μ, mu (frecuencia de la energía que se está considerando).

La constante de Plank es fundamental, no deriva de ningún teorema ni de nada. Existe así, por sí sola, en la naturaleza, al igual que la constante de la velocidad de la luz y la constante gravitatoria.

La ley de Plank informa sobre como se distribuye la E en un cuerpo de acuerdo a su temperatura (teoría del cuerpo negro).
La E emitida por cualquier cuerpo por unidad de superficie es proporcional a la 4° (cuarta) potencia de su temperatura absoluta (en grados Kelvin). El 0 absoluto en grados Kelvin está a 273,15 ° bajo cero. Por debajo de esta temperatura no hay E, no hay radiación, no hay movimiento de partículas (esto visto desde la física normal, no desde la física cuántica).

Todos los cuerpos pueden concebirse como una unión de partículas con movimiento vibratorio (los estados sólido, líquido y gaseoso son expresiones de la velocidad de esta vibración). Si las partículas tienen movimiento vibratorio van a tener entonces E cinética (de movimiento).
El calor es una forma de radiación (electromagnética), la temperatura es la medida del movimiento cinético de las partículas que forma ese cuerpo.

La temperatura del universo es de 2,7 °K. Sin embargo, por él se desplazan energías muy elevadas. Por ejemplo, la Nebulosa de Orión tienen una temperatura de entre 10.000/20.000 °K (debido a la excitación de las partículas que la componen), pero el espacio allí también tiene una temperatura de 2,7 °K.
Puede decirse que la temperatura es a la energía (calor) lo que el gramo es a la masa. La masa y la energía son atributos del universo. La temperatura y el gramo son sólo una forma de medirlos (una arbitrariedad dispuesa por el ser humano).

FOTOCOPIAS:

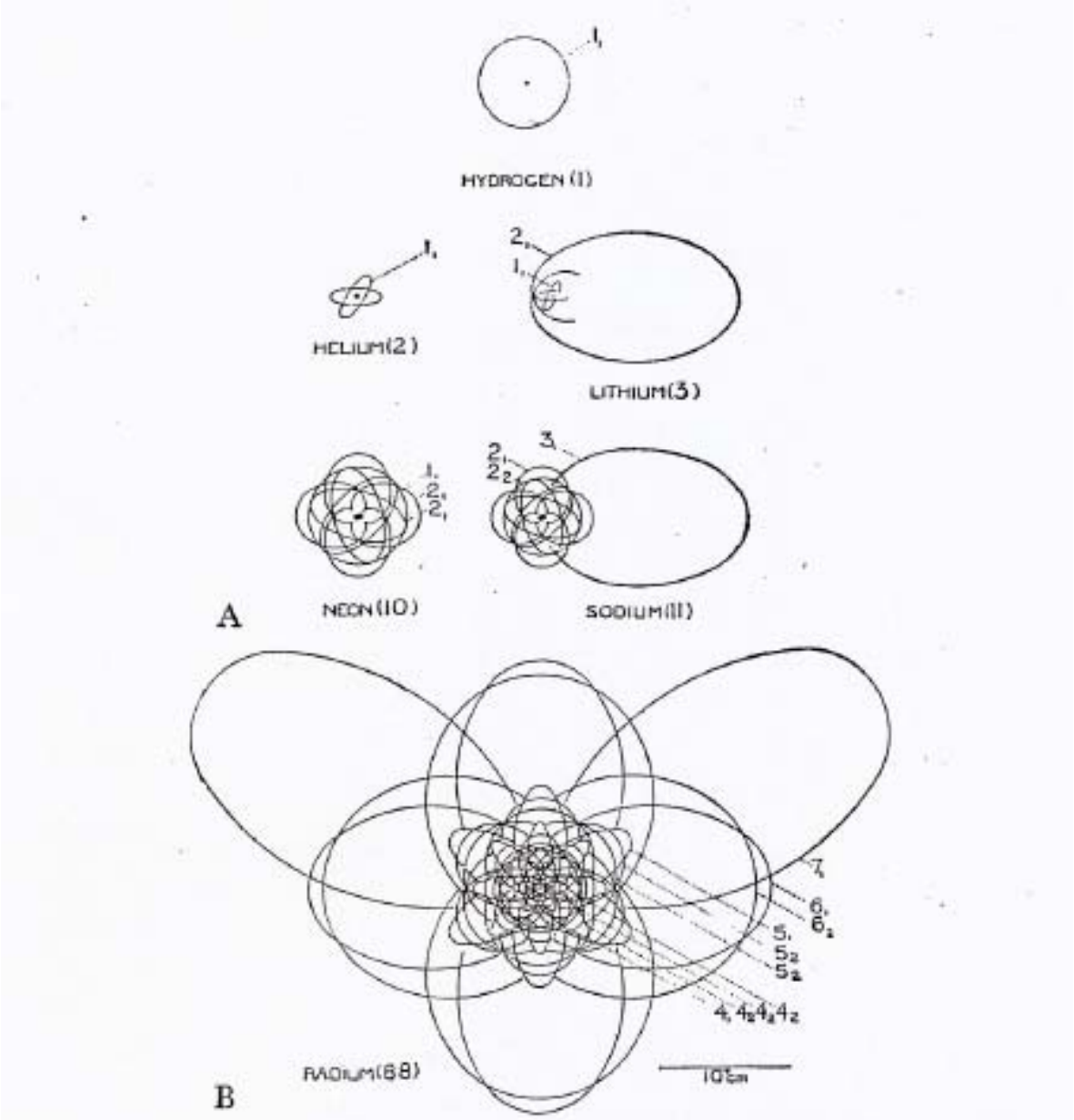


Fig. 36.—(A) Orbit models for several lighter atoms. (B) Radium atom, orbit model.

The numbers symbolize the sizes and shapes of the different interlocking orbits of the 88 electrons. (*Courtesy, Wendt and Smith, "Matter and Energy," The Blakiston Company.*)

ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Ya se sabía que la luz era un movimiento ondulatorio antes de que Maxwell hiciera sus descubrimientos, pero no se había podido establecer de qué tipo era. Maxwell pudo demostrar que las oscilaciones provenían del campo eléctrico y magnético. Las ondas de Hertz tenían una longitud de onda de unos 60 cm, o sea que tenían una longitud de onda mucho más larga que las ondas de luz.

Actualmente reconocemos un espectro de radiación electromagnética que se extiende de 10^{-15} m a 10^{4} m. Se subdivide en franjas más pequeñas que a veces se solapan. La ampliación del campo de la observación astronómica de las longitudes de onda visibles a otras longitudes de onda electromagnéticas ha revolucionado nuestro conocimiento del universo (ver p. 17 y 332-3).

Las ondas de radio tienen una gama amplia de longitudes de onda, desde unos cuantos milímetros hasta varios kilómetros (ver p. 326).

Las microondas son ondas de radio con longitudes de onda más cortas, entre 1 mm y 30 cm. Se utilizan en el radar y en los hornos de microondas.

Las ondas del infrarrojo de diferentes longitudes de onda son irradiadas por cuerpos a determinadas temperaturas. (Cuerpos a temperaturas más altas irradian bien ondas visibles, bien del ultravioleta). La Tierra y su atmósfera irradian ondas del infrarrojo con longitudes de onda medias de unos 10 micrometros (μ m) o 10^{-5} m (1 μ m = 10^{-6} m) a una temperatura media de 250K (-23°C).

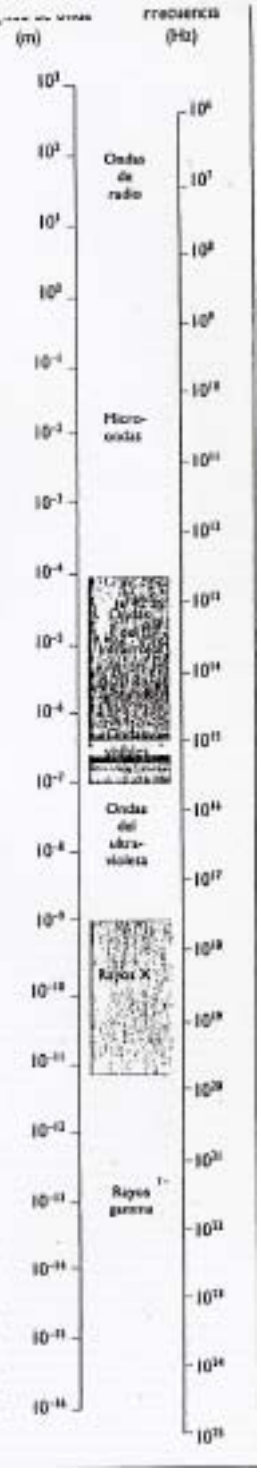
Las ondas visibles tienen longitudes de onda de 400-700 nanómetros (nm; 1 nm = 10^{-9} m). El punto más alto de la radiación solar (con una temperatura de 6000K/6270°C) se alcanza a una longitud de onda de unos 550 nm, que es donde el ojo humano es más sensible.

Las ondas ultravioletas tienen longitudes de onda de entre unos 380 nm hasta 60 nm. La radiación de estrellas más bien calientes (más de 25 000K/25 000°C) se desvía hacia las zonas violetas y ultravioletas del espectro.

Los rayos X tienen longitudes de onda de aprox. 10 nm a 10^{-4} nm.

Los rayos gamma tienen longitudes de onda menores a 10^{-11} m. Los emiten determinados núcleos radioactivos y se desprenden en algunas reacciones nucleares.

Nótese que los *rayos cósmicos* que continuamente bombardean la Tierra desde el espacio exterior no son ondas electromagnéticas, sino protones y partículas x (es decir, núcleos de átomos de hidrógeno y helio; ver p. 38-9) de alta velocidad, además de algunos núcleos más pesados.



DOS: Para explicar el funcionamiento del átomo se recurre normalmente al modelo mecánico de Niels-Bhor, que asimila el átomo a un sistema planetario.

El centro (núcleo) tiene una carga positiva, y está rodeado de electrones con carga negativa. En el núcleo reside la masa del átomo, y su tamaño es la mil millonésima parte del átomo. En el núcleo hay tantos protones (+) como electrones lo orbitan (-), por lo que el átomo es electricamente neutro (en el núcleo del átomo aparte de los protones hay neutrones (uno por cada protón) que aglutinan a los protones entre sí, los neutrones son de carga neutra).
Los electrones orbitan a distintas distancias del núcleo, de acuerdo a los distintos elementos, pero no a cualquier distancia (órbita). Cuantos electrones debe haber en cada órbita lo específican las leyes de la física cuántica (principio de exclusión de Pauli). Así, las órbitas están pre-determinadas y también lo está el número de electrones que puede haber en cada una de ellas.
Estos conceptos dan cuenta de la existencia de los diferentes elementos. Los electrones tienden siempre a estar en el nivel mas bajo de energía, pero además pueden abandonar la órbita que están recorriendo (si ganan o pierden energía).

Los números cuánticos describen la distancia al núcleo, la energía y las propiedades direccionales de los electrones.
La energía para que el electrón salte a una órbita superior proviene de una perturbación externa y debe ser la cantidad justa (regida por la ecuación $E = h \cdot \upsilon$, donde h es la constante de Plank, υ es la frecuencia). Cuando los electrones saltan entre los niveles cuánticos (órbitas) al átomo se lo llama 'excitado'. Un ev (electrón-voltio) es la energía que adquiere un electrón sometido a un campo con una diferencia de potencial de 1 v (voltio).

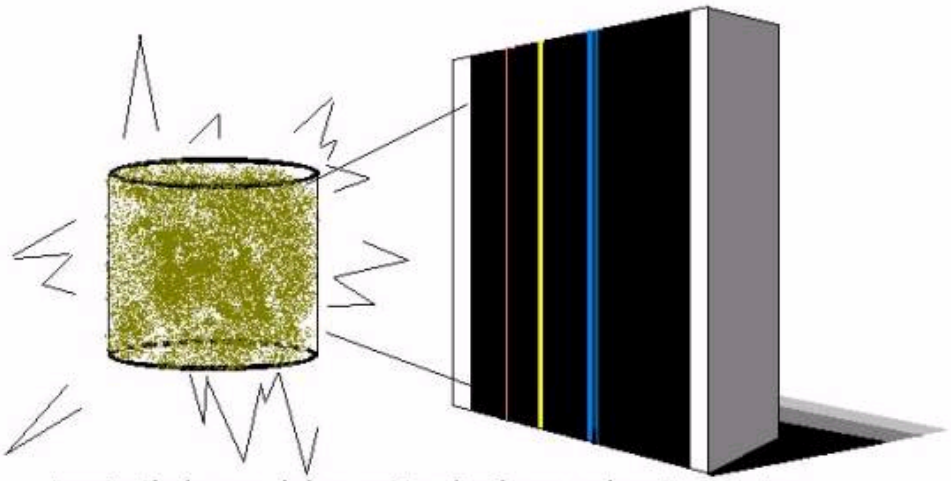
Una vez que el electrón ascendió de órbita vuelve a caer a su órbita anterior (esto sucede en 10 a la –9 segundos), devolviendo al entorno igual cantidad dd energía que había absorbido. Pero la emite en forma de un fotón (ley de la conservación de la energía), un pulso de luz.
Si el electrón absorbe mas energía de la necesaria para saltar a la última órbita puede escaparse de la acción electrostática del núcleo, abandonando así el átomo. El átomo adquiere entonces carga positiva (está ionizado) y se transforma en un ión (una partícula con carga). El electrón se convierte también en un ión (con carga negativa) (el 'potencial de ionización' es la cantidad de energía necesaria para que el electrón abandone el átomo). La cantidad de energía absorbida por el electrón, que supere el potencial de ionización, es la energía con la que se va a mover el electrón una vez que abandonó el átomo. El electrón viajará hasta que se acerque a un ión positivo (átomo que ha perdido uno o mas electrones), volviendo a caer entonces en órbita alrededor de él.

Mientras el electrón está en el átomo está bajo la influencia de las leyes cuánticas, cuando se transforma en un ión no.
Para estudiar la energía se la fracciona en sus distintas frecuencias con un espectrógrafo. Cada átomo posee su propio espectro, por lo que estudiando la luz que nos llega desde un objeto a través de un espectrógrafo podemos saber los elementos que lo componen, su temperatura, la existencia o no de campos electro-magnéticos, etc. La longitud de onda puede servir para ver si el objeto se acerca o se aleja de nosotros (en una dirección radial) (efecto doppler, la frecuencia aumenta si el objeto se aleja y disminuye si el objeto se acerca).

Si un átomo pierde un electrón comienza a irradiar como el elemento que lo precede en la tabla periódica, pero el espectro estará corrido hacia una mayor longitud de onda.
Si la densidad electrónica (d-e) es grande va a haber pocos átomos ionizados. Si la temperatura es alta va a haber pocos átomos neutros, porque la mayoría se ioniza.

$$\frac{A\,i}{A\,n} = \frac{K\ (\text{constante})}{d\,e}$$

Hay 3 clases de espectros:
ESPECTRO DE EMISION: Está formado por líneas brillantes. Es característico de la emisión de los gases incandescentes a baja densidad.

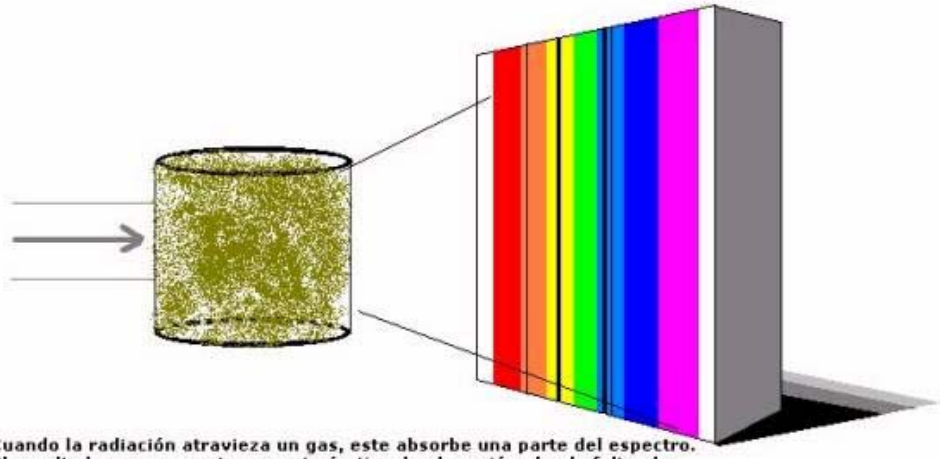


La exitación de un gas le hace emitir radiación, pero solo emite en ciertas longitudes de onda. Es su espectro de emisión, característico de cada sustancia

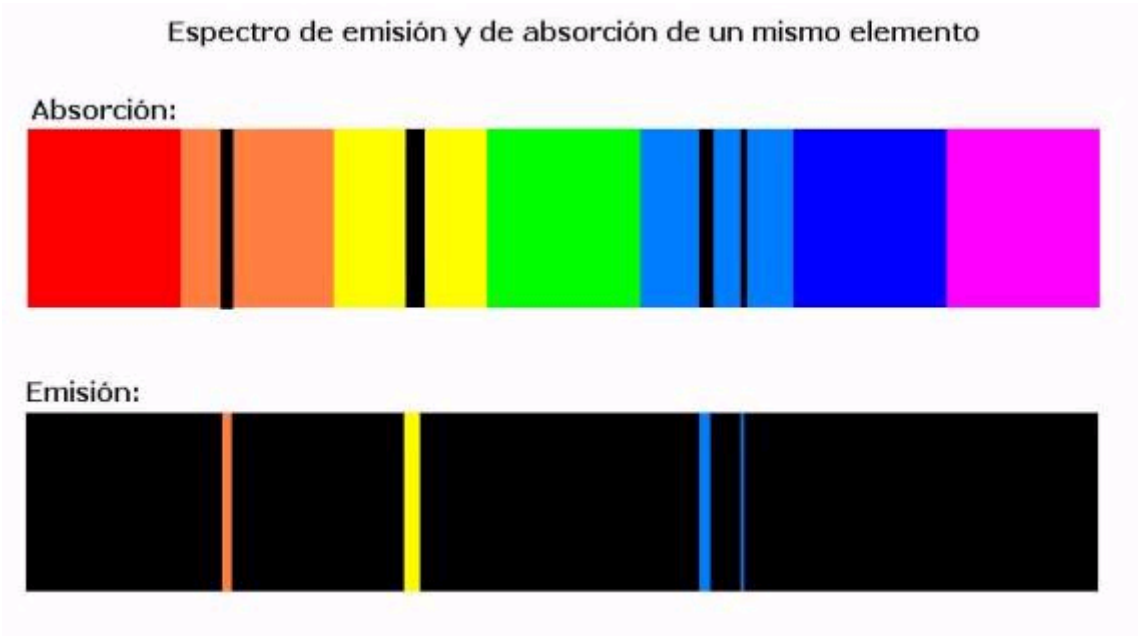
ESPECTRO CONTÍNUO: Formado por todas las frecuencias (de la menor, violeta, a la mayor, rojo). Como no hay frecuencias puras (ya que todo objeto emite en toda la gama de frecuencia) las mismas se solapan (como en el arco iris). A mayor frecuencia menor longitud de onda. Este espectro es característico de los sólidos, los líquidos y los gases incandescentes a gran presión.

ESPECTRO DE ABSORCIÓN: Es un espectro contínuo característico de sólidos, líquidos y gases a gran presión cuya luz emitida pasa a través de una masa gaseosa a baja densidad.

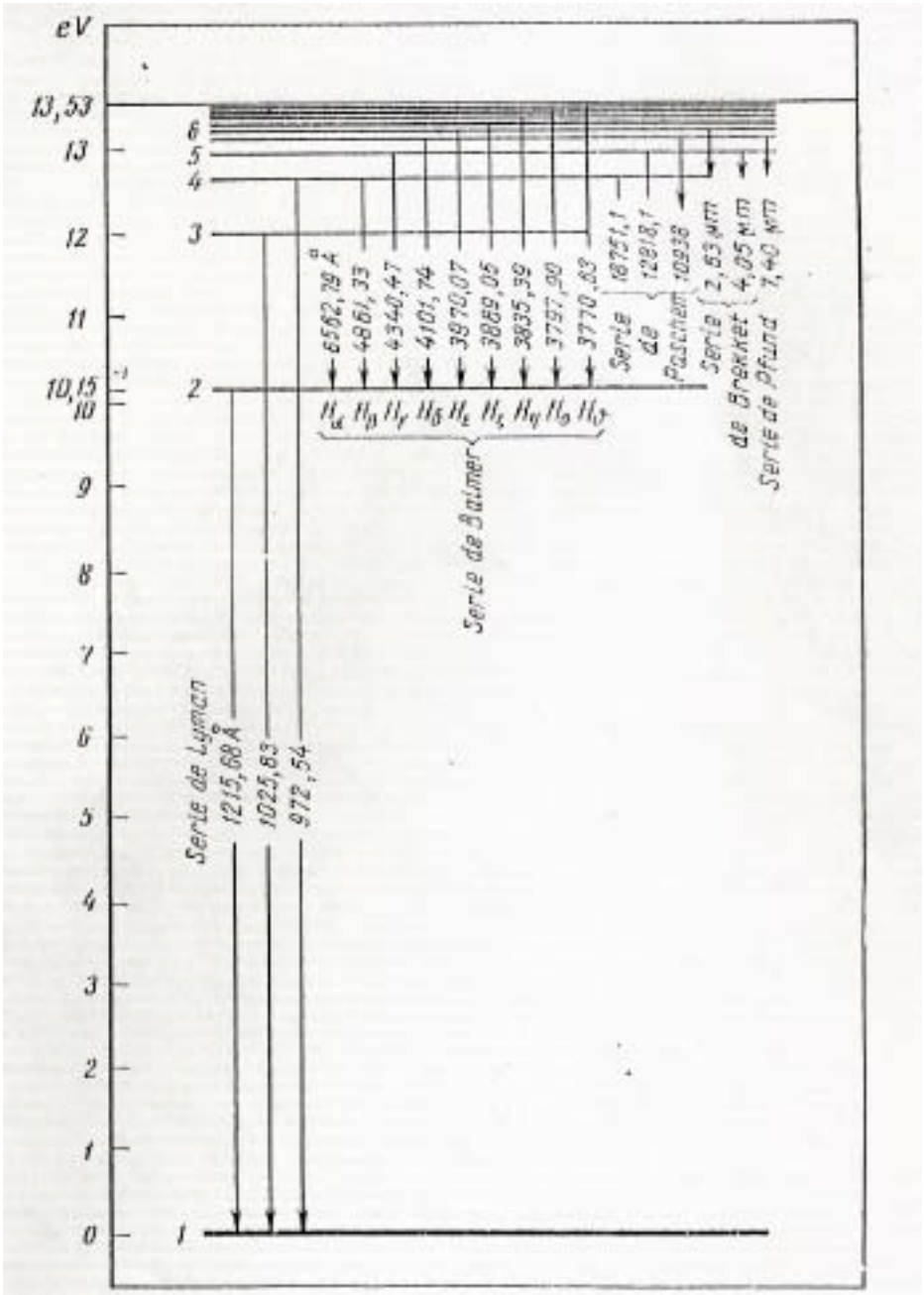
Está surcado, entonces, por rayas obscuras (que varían en su negrura y anchura), lo que muestra la absorción. Es el espectro del 99 % de las estrellas (y también de las galaxias, ya que ellos son la suma de los espectros de las estrellas que las componen).



Cuando la radiación atravieza un gas, este absorbe una parte del espectro. El resultado es su espectro caracteríostico de absorción, donde faltan las bandas absorbidas, apareciendo en su lugar lineas negras.



FOTOCOPIAS:



Niveles energéticos del átomo de hidrógeno (n) y pasos entre éstos, que dan el espectro del átomo de hidrógeno.

TRES: En 1930 nace la radioastronomía. Las ondas de radio tienen una longitud de onda grande (o sea que son de baja frecuencia), es por esto por lo que pueden atravesar la atmósfera. Para generar este tipo de energía quedan excluídos los movimientos caóticos, se necesitan movimientos ordenados. Las ondas de radio se generan en la naturaleza por dos cosas: flujo de plasma y campos magnéticos.
En 1945 se calcula que la diferencia de energía necesaria para producir energía radial es de 10^{-11} ergios (10 a la menos 11), diferencia de energía que se da en el átomo de Hidrógeno neutro (un protón y un electrón).
El átomo de H tiene 3 niveles fundamentales: a) el nivel K (órbita K, órbita común del electrón, la mas cercana posible al núcleo, se le asigna valor 0) – b) el segundo nivel está dado por una cupla magnética entre el núcleo y el electrón – c) el tercer nivel es puramente nuclear.

Segundo nivel: Tanto el electrón como el núcleo poseen espin. El electrón tiene dos formas de espin, el intrínseco (propiedad interna del electrón, gira sobre sí mismo) y el espin orbital (giro alrededor del núcleo). El movimiento de rotación se describe con la 'magnitud vectorial', la que posee tres parámetros a tener en cuenta: a) velocidad de rotación – b) dirección del eje de rotación – c) sentido de la rotación alrededor del eje de rotación.
Las reglas cuánticas imponen ciertas restricciones a estos valores. El núcleo y el electrón pueden tener igual orientación del eje rotación (espín paralelo) o no (espín anti-paralelo). Si el átomo tiene espín paralelo tiene un poco mas de energía que si lo tiene anti-paralelo.
Si el espín del átomo se invierte se produce un desnivel energético, por lo que se emite energía (siempre en forma de un fotón), cuya longitud de onda es de 21 cm. y su frecuencia es de 1480 kilohertz, esto es del orden de las ondas de radio.
Esto permite estudiar los niveles de H que hay en el espacio.
La intensidad total de la energía emitida por el H neutro que llega a la tierra es de 2 vatios, los radiotelescopios amplican señales de 10^{-18} vatios (10 a la –18).
Pero el H también puede estar sometido a condiciones de alta energía (alta temperatura). Cuando el electrón absorbe energía puede emitirla (ionización). El átomo ionizado también emite energía (el H ionizado se llama H caliente en oposición al H neutro que se llama H frío).
Cuando una nube de materia difusa es sometida a la acción de estrellas muy calientes (con alta emisión de energía en el ultravioleta) se ioniza. Esto causa que aumente la frecuencia de emisión de fotones (ya sea porque un núcleo, ión positivo, capta un electrón, ión negativo, o porque un átomo pierde su electrón y se ioniza).

Si un electrón se desvía de su línea de viaje por la atracción electromagnética de un protón (ya que pasa muy cerca suyo) pierde energía, siempre en forma de un fotón, para compensar la pérdida de momento de energía.
Si el desvío del electrón es muy grande puede emitir un fotón de luz.
Si el desvío del electrón es menor emitirá menos energía, el fotón será de menor energía y mayor frecuencia, será entonces un radio-fotón.
Este mecanismo se llama 'radiación de frenado' y opera también en la corona solar y en la alta atmósfera terrestre.

Las moléculas también generan radio-frecuencia a raíz de desniveles energéticos. Las moléculas tienen un nivel fundamental (en el que emiten una baja cantidad de energía) que depende de: a) la actividad de los electrones de los átomos que forman la molécula – b) la vibración de los átomos a lo largo del eje de las moléculas (número cuántico molecular 'V') – c) el movimiento de rotación de la molécula alrededor de un eje que es perpendicular al eje de la molécula (número cuántico molecular 'J').

Al recibir energía la molécula asciende de su nivel básico, girando más rápido. Tanto cuando asciende como cuando desciende de nivel cambia el nivel energético, emitiendo así fotones con longitud de onda que va desde los milimétricos hasta los de algunos centímetros (molécula de agua = long. de onda de 1,35 cm. - molécula de óxido de carbono, CO, long. de onda de 2,64 mm. - molécula de hidroxílo, HO, long. de onda de 18 cm.).
Esto depende de la energía que esté actuando sobre la nube.

Así, por radiotelescopio puede deducirse la densidad de la nube y la intensidad de su temperatura.

Hasta aquí, la energía siempre es emitida por la interacción entre partículas. Pero también puede ser emitida por la alteración en alguna de las condiciones de una partícula solitaria.

Si se acelera un electrón hasta que se acerque a la velocidad de la luz aumentará su masa, por lo que es cada vez más difícil acelerarlo. Así, se va frenando por lo que se produce un desnivel energético emitiendo fotones (de diferente longitud de onda, desde la luz hasta la radio).
¿Es posible que esto ocurra en la naturaleza? Para causar este efecto la naturaleza precisa sólo dos cosas: flujo de plasma y campos magnéticos. Los campos magnéticos abundan en el espacio, pero generalmente son débiles. Sin embargo, pueden ser amplificados, bajo ciertas condiciones, millones de veces.
Si una nube de gas se contrae (sea por auto-gravitación o por aplastamiento causado por, por ej., la explosión de una supernova) contrae consigo las líneas de campo magnético con ella, concentrándolo y aumentando así su intensidad millones de veces.
El espacio está poblado de partículas (en su mayor parte, electrones) , cuando caen en un campo magnético intenso quedan enganchas en sus líneas (viajando en espiral a lo largo de ellas) aumentando así su energía y su velocidad, cada vez mas llegar a velocidades cercanas a la de la luz (se las llama partículas relativísticas), emitiendo energía a la que se llama 'energía no-térmica por radiación sincrotón'.

Así, átomos, átomos ionizados, moléculas y partículas sueltas pueden producir energía.

CUATRO: La suma total de la masa de las mas de 200.000 millones de estrellas que componen la galaxia es sólo la mil millónesima parte del volúmen de la misma. Las estrellas están separadas, término medio, por 100.000 veces su tamaño.

MATERIA DIFUSA: Todo el espacio está ocupado... donde no hay nada hay radiación y átomos sueltos (mayormente de hidrógeno). La materia difusa se presenta de 4 maneras:

a) materia difusa propiamente dicha, invisible. De escasa densidad, está formada por gas y partículas sólidas.
b) nebulosas obscuras, formadas por gas mas denso y partículas sólidas que bloquean la luz de las estrellas que están dentro o detrás de ella.
c) nebulosas brillantes, masas gaseosas luminosas que, sin excepción, se encuentran cerca de estrellas con alta temperatura superficial (y, por tanto, alta emisión en el ultravioleta)
d) nebulosas planetarias, masas gaseosas luminosas formadas por materia expulsada por estrellas gigantes y supergigantes rojas.

La materia difusa está formada por un 90 % de H, cerca del 10 % de He (helio) y un resto de elementos que van desde el litio hasta el uranio. El 1 % es polvo, el resto es gas. En la Vía Láctea se agrupa en el plano ecuatorial como un disco de 300 parsecs de altura, la mitad del espesor del disco formado por las estrellas.

POLVO INTERESTELAR: Partículas sólidas, gránulos de materia con una densidad de 1 por 1.000.000 cm3 (cm.cúbico), con una masa promedio de 10 –30 (10 a la menos 30) gramos por partícula.
La cantidad de polvo necesaria para bloquear las diferentes frecuencias de la luz se representa mediante una 'curva de extinción'. Así se determina que hay 3 tipos de partículas:

a) las partículas bloqueadoras de la luz visible, son de 4/10000 mm por 3/10000 mm. Están formadas por un núcleo de silicatos (núcleo rocoso) envueltos en un manto de monóxido de carbono, dióxido de carbono, formol, agua y otros elementos. Su temperatura es de 5° K, por esto se congelan los gases alrededor del núcleo. Estas partículas conforman el 80 % del polvo de toda la galaxia.
b) Bloqueadoras de la luz ultravioleta, granos de 5/10000 mm, formados por compuestos carbonados amorfos (no cristalizados) con algún compuesto o átomo de H. Conforman el 10 % del polvo de toda la galaxia.
c) Bloqueadoras de la luz en el ultravioleta lejano, partículas de 2/10000 mm. Formadas por conglomerados de moléculas gigantes y por hidrocarburos. Conforman el 10 % restante del polvo de toda la galaxia.

El polvo produce 3 efectos:

a) bloquea la luz, el grado en que lo hace depende de la densidad del polvo, del tamaño de sus partículas y de su composición química.
b) enrojece la luz de las estrellas que pasa por él.
c) polariza la luz.

Pareciera ser que las partículas se alínean perpendicularmente a las líneas de fuerza de los campos magnéticos de los brazos espirales de la galaxia.

GAS INTERESTELAR: Tiene una densidad de 1,5 x 10 –24 (10 a la menos 24) gramos por cm 3 (cm cúbico). Así, en un cubo de espacio que tenga una arista de 1 parsec hay 2 centésimas de masa solar en gas. El gas puede tomar varias formas de acuerdo a la energía (temperatura) a que esté sometido.
Puede ser H neutro (HI) cuando la temperatura es baja, si la temperatura asciende puede perder el electrón, quedando como H ionizado, o puede ser H molecular.
La gran mayoría del gas es detectable mediante el radiotelescopio.
Se encuentran nubes de HI o de H ionizado, jamás una nube mixta.
Si el H forma moléculas es mas difícil de detectar. Las nubes moleculares conforman el 50 % de toda la materia gaseosa de la galaxia (complejos moleculares gigantes).

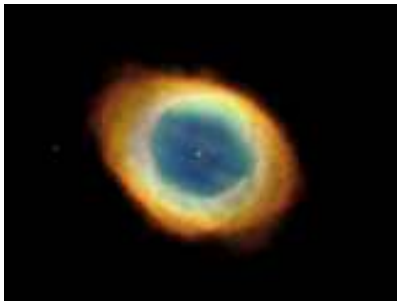
Adonde se encuentra HI se le llama regiones H1, dónde hay H ionizado regiones H2.

Las moléculas sólo existen con bajas temperaturas (entre 5 y 25 K), con temperaturas altas se disocian en los átomos que las componen. Por esto no puede haber nubes mixtas.
Las nubes de gas frío se comprimen (por auto-gravedad) y el núcleo comienza a calentarse, pero tan poco que la radiación que emite no puede parar la caída del gas. De esta manera se forman las estrellas. Por el contrario, las nubes de gas caliente están en proceso de expansión (por la radiación emitida desde su centro).
Sin embargo, en el 80 % de los casos las nubes de gas frío se asocian a las de gas caliente.
En el espacio se encuetran todo tipo de moléculas, incluyendo los elementos básicos de la química orgánica (C – H – N – O).

NEBULOSAS BRILLANTES: Masas de materia luminosa cerca de estrellas con altas temperaturas superficiales. Sus elementos mas comunes son He, H y O. Poseen un espectro de emisión (gases calientes a baja densidad), formado por líneas brillantes. Este gas está a unos 2,7 ° K, y tiene una energía correspondiente a 10000/20000 K. Esto es lo que hace que sus átomos se exciten y emitan radiación (al caer sus electrones a la órbita habitual desde las órbitas mas lejanas dónde se movieron al captar energía).

La nebulosa brillante tendrá el tamaño que corresponda según la emisión de energía de la estrella que la ilumina. Así, estimando el diámetro de una nebulosa brillante puede determinarse la cantidad de energía que recibe. Las que tienen mucho polvo presentan un espectro de absorción, ya que reflejan la luz de las estrellas que las iluminan.

NEBULOSAS PLANETARIAS: Responden a una disminución del potencial gravitatorio de las gigantes y supergigantes rojas, las que entonces expulsan gas en forma sostenida y contínua, quedando un núcleo que será luego una enana blanca (de gran temperatura) que ilumina el gas que ha sido expulsado, haciéndolo brillar por excitación (espectro de emisión).



La asociación entre H1 y H2 responde a que la estrella excita el gas que la rodea (región H2) pero la nebulosa es mucho mas grande. Así, hay gas no ionizado (región H1) que rodea a la región H2.

Hasta hace poco se pensaba que la materia difusa era inerte. Pero ahora se la llama 'atmósfera galáctica', ya que se ha descubierto que el gas está en movimiento. Por ejemplo, la explosión de una supernova expulsa materia a grandes distancias, incluso superando el halo de la galaxia, y esta materia expulsada barre con todo a su paso. Esta matera expulsada volverá a caer luego (ya perdida su energía de movimiento) y por gravitación hacia el interior de la galaxia. El gas barrido se comprime creando así una zona de formación de gran cantidad de estrellas. Así hay un reciclaje contínuo de materia.

FOTOCOPIAS:

Moléculas interestelares.

Radical cianógeno CN
Metilidina CH
Ión metilidina $[CH]^+$
Hidrógeno H
Radical hidroxilo HO
Monóxido de carbono CO
Monosulfuro de carbono CS
Monóxido de silicio SiO
Monóxido de azufre SO
Monosulfuro de silicio SSi
Monosulfuro de nitrógeno SN
Carbono diatómico CC
Óxido nítrico NO
Ión monóxido de carbono $[CO]^+$
Agua H_2O
Cianuro de hidrógeno CHN
Ión formilo $[COH]^+$
Isocianuro de hidrógeno CHN
Sulfuro de carbonilo CSO
Sulfuro de hidrógeno SH_2
Dióxido de azufre SO_2
Radical etinilo C_2H
Ión imidilo N_2H
Radical formilo COH
Ión tioformilo $[CHS]^+$
Nitroxilo NOH
Amoniaco NH_3
Formaldehído COH_2
Tioformaldehído CH_2S
Ácido hidrociánico CHON
Radical cianoetinilo C_3N
Dióxido de carbono protonizado CO_2H^+
Cianoacetileno C_3HN
Ácido fórmico CO_2H_2
Metilenimina CH_3N
Cianoamida CH_2N_2
Ceteno C_2H_2O
Radical butadienilo C_4H
Metano CH_4
Cianuro de metilo CH_3S
Formamida CH_3ON
Metanol CH_4O
Metilmercaptano CH_4S
Acetaldehído C_2H_4O
Metilamina CH_5N
Cianuro de vinilo C_3H_3N
Metilacetileno C_3H_4
Cianodiacetileno C_5HN
Formiato de metilo $C_2H_4O_2$
Etanol C_2OH_6
Éter dimetílico C_2OH_6
Cianuro de etilo C_3NH_5
Cianotriacetileno C_7HN
Cianotetraacetileno C_9HN
Cianopentaacetileno $C_{11}HN$
Ácido isotiocianico CHNS
Acetiluro C_2O_2

Materia y energía

Moléculas
Atomos
Núcleos
Nucleones
Leptones y quark

Materia

Partículas portadoras de masa

- leptones: e, μ, τ / ν_e, ν_μ, ν_τ / 1ª, 2ª, 3ª
- quark: u, c, t / d, s, b

Leptones

	Masa (Gev)	Carga	Spin
e	0,0005	-1	1/2
μ	0,16	-1	1/2
τ	1,8	-1	1/2
ν_e	0/<3ev	0	1/2
ν_μ	0/<0,0002eu	0	1/2
ν_τ	0/<0,018	0	1/2

Quark

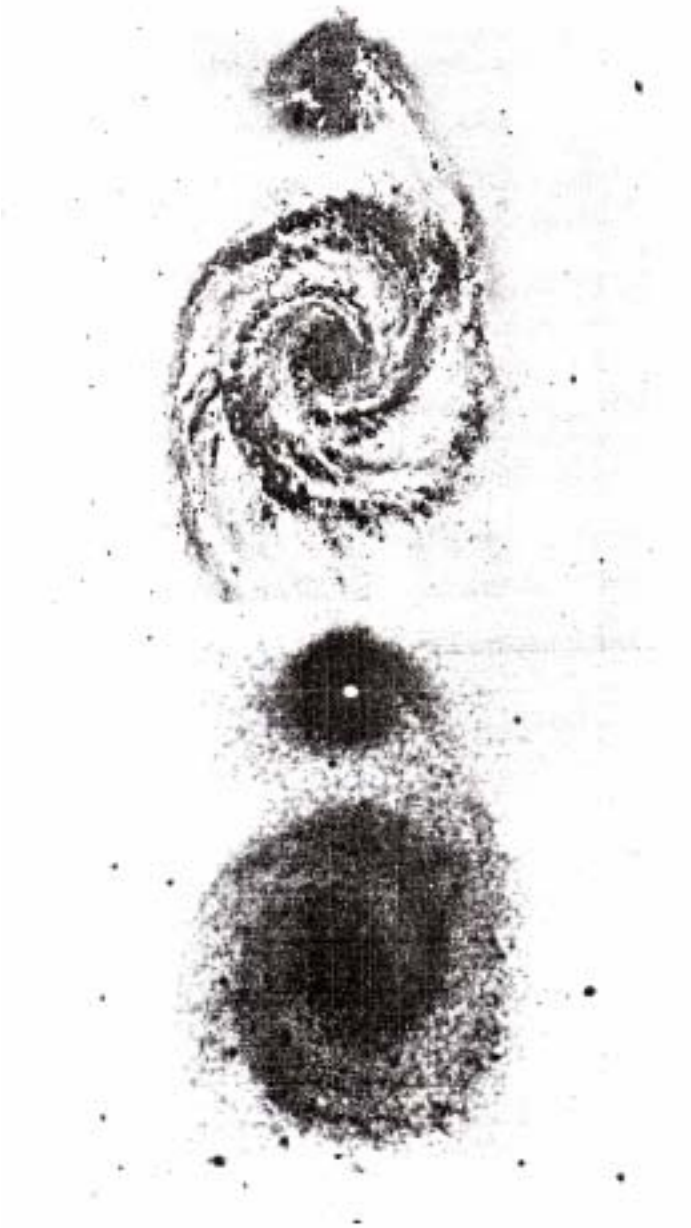
	Masa (Gev)	Carga	Spin
u	~ 0,004	+2/3	1/2
d	~ 0,007	+2/3	1/2
c	~ 1,3	+2/3	1/2
s	~ 0,15	-1/3	1/2
t	~ 174	-1/3	1/2
b	~ 4,2	-1/3	1/2

Partículas portadoras de fuerza

Interacción	Cuanto de campo	Masa	Spin
Electromagnetismo	Foton	0	1
Fuerza nuclear debil	Bosones vectoriales $W^+ W^-$ Z^o	>80 Gev	1
Fuerza nuclear fuerte	Gluón (fuerzas de color?)	0	1
Gravitación	Gravitón	0	2

Grupo Local

- Vía Láctea
- Leo A
- Leo I
- Leo II
- Sextans A
- Sextans B
- Enana Osa Menor
- " Sextans
- " Draco
- " Carina
- " esfer. Sagitario
- " Sculptor
- " Fornax
- " Phoenix
- " irreg. Sagitario
- " Acuario
- " Pegaso
- " Cetus
- " Tucán
- " Antlia
- " Boötes
- " Canis Venatici
- Nube Mayor Magallanes
- Nube Menor Magallanes
- NGC 185
- NGC 147
- NGC 6822
- NGC 55
- NGC 3109
- And. I
- And II
- And III
- And IV
- And V
- And VI
- And VII.
- LGS 3
- IC 10
- EGB 0427+63
- M 31 and
- NGC 205
- M 32
- WLM
- IC 1613
- IC 5152
- UKS 2323-326



MESSIER 51 consta de una magnífica galaxia espiral, NGC 5194, y un pequeño compañero irregular, NGC 5195, a unos diez millones de años-luz. Cuando las galaxias se fotografían en luz azul (arriba), los brazos espirales del sistema grande quedan claramente delineados por complejos de estrellas jóvenes y calientes y sus regiones asociadas de hidrógeno ionizado. Cuando las galaxias se fotografían en el infrarrojo próximo (abajo), las imágenes están dominadas por la población de estrellas que son más antiguas, más frías y más rojas. La foto en el infrarrojo revela las crestas de nubes bastante uniformes que representan la posición en ese momento de la configuración estacionaria en el disco del gran sistema espiral. La foto con luz azul se hizo con el telescopio reflector de 4 metros de Kitt Peak. La infrarroja fue tomada por Eric Jensen con un intensificador de imagen en el telescopio de 90 cm de Kitt Peak.

CINCO:

ESTRELLAS: Las estrellas se mantienen en equilibrio gracias dos fuerzas contrapuestas: la gravitación, presión del gas hacia el centro de la estrella, y radiación que presiona el gas hacia fuera. Esto mantiene la estructura de la estrella. La materia que las componen responde a las leyes que gobiernan el comportamiento de los gases. Poseen forma esferoidal debido a una rápida rotación o a la interacción gravitatoria con una estrella compañera (sistema binario compacto o cerrado). En su centro la temperatura alcanza muy altos valores (permitiendo así las reacciones nucleares que generan su temperatura). Las estrellas expulsan materia hacia el espacio (viento estelar).

El ordenamiento de Hyparco en 6 magnitudes considera que una estrella de 2° magn. (por ej.) es tanto mas brillante que una de 3° magn. como menos brillante que una de 1° magn. Esto es cierto desde el punto de vista de las magnitudes visuales, pero no lo es con respecto a la energía luminosa real que emite la estrella. Esto se debe al 'umbral diferencial' que refleja cuanto debe aumentar un estímulo para notar una variación con respecto al estímulo anterior. Así, una estrella de 1° magnitud es unas 100 veces mas brillante que una de 6°.

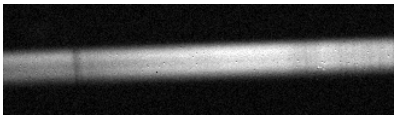
Por interferometría (los fotones emitidos por 2 fuentes cercanas una de otra siguen trayectorias ligeramente distintas, los interferómetros reciben la luz de la estrella por dos ranuras separadas, se envia la luz hacia el medio del interferómetro y como los haces están ligeramente desfasados se producen interferencias entre ambos) se han medido los diámetros de las estrellas (en la actualidad se utilizan telescopios separados cumpliendo la función de ranuras de un interferómetro antigüo). La estrella mas grande tiene unas 100 veces el tamaño del Sol y la mas chica (estrella de neutrones) un diámetro de alrededor de 20 Km. Aproximadamente el 75 % de las estrellas son enanas rojas y marrones.

El Sol tiene una masa de 2 x 10 (33) (10 a la 33) grs., las masas de las estrellas se cuantifican en masas solares (ms). Las mayores pueden llegar hasta 200 ms. La gran mayoría llegan a 50/60 veces la masa del Sol. La menor posee una masa de 1/100 ms.

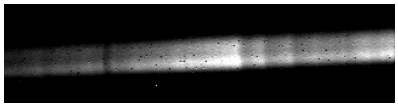
CLASIFICACION:
Por sus propiedades físicas (temperatura):
O : 31000/40000 K
B : 10000/31000 K
A : 7400/10000 K
F : 6000/7400 K
G : 5300/6000 K
K : 3900/5300 K
M: 2200/3900 K
L : 1700/2200 K
T : Menos de 1200 K (enanas marrones, emiten la mayoría en el infrarrojo)
El 99 % de las estrellas están entre la clase B y la M.

Longitud de estado: Se le llama así a la suma de todas las propiedades que puede tener una estrella: masa, densidad media, luminosidad, radio, temperatura superficial, clase espectral, producción de energía por cm3 y segundo, aceleración de la gravedad superficial, velocidad de rotación, campo magnético y composición química.

ESPECTRO ESTELAR: La energía se produce en el centro de la estrella, los cuantos de E son fotones, los mismos se desprenden de la fotósfera. Los fotones atraviesan la atmósfera de la estrella (compuesta por iones) y son absorbidos y vueltos a irradiar en cualquier dirección. La fotósfera se comporta como un sólido, por lo que posee un espectro contínuo. La atmósfera absorbe cierto tipo de fotones (con cierta cantidad de E determinada por la composición química de la atmósfera) produciendo así un espectro de absorción (con líneas obscuras).



Espectro de Sirio
(Espectrógrafo estelar, Celestron 11", Cámara CCD Pictor 216XT, 13 Marzo 2001)



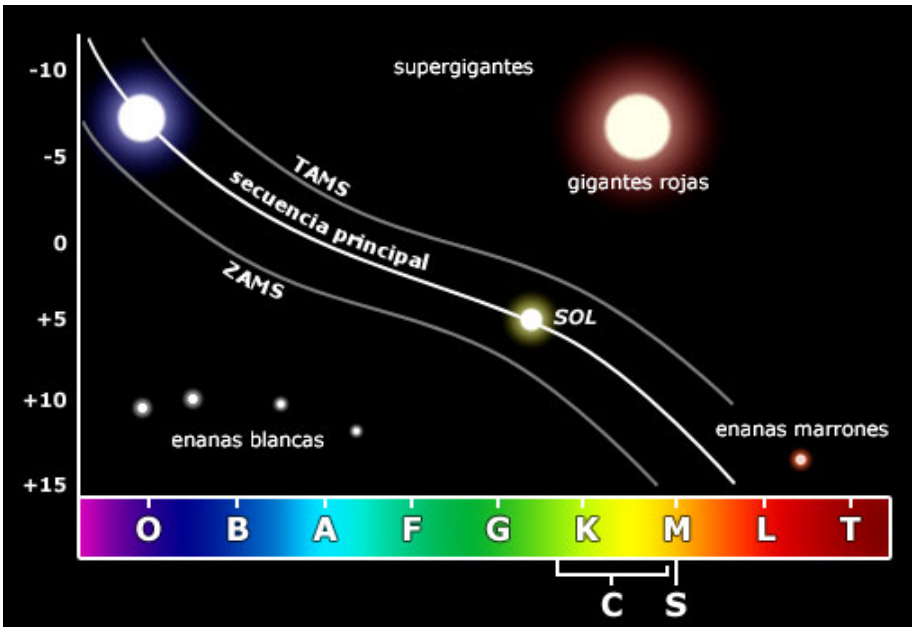
Espectro de Betelgeuse
(Espectrógrafo estelar, Celestron 11", Cámara CCD Pictor 216XT, 13 Marzo 2001)

COMPOSICON QUIMICA:

1) en las estrellas no existe ningún elemento que no exista en la Tierra.
2) en general, las estrellas tienen composición química parecida a la del Sol.
3) la gran diferencia entre los espectros de las estrellas se debe mas a diferencias en las condiciones físicas, como temperatura y densidad y también a diferencias en los campos eléctricos y magnéticos.

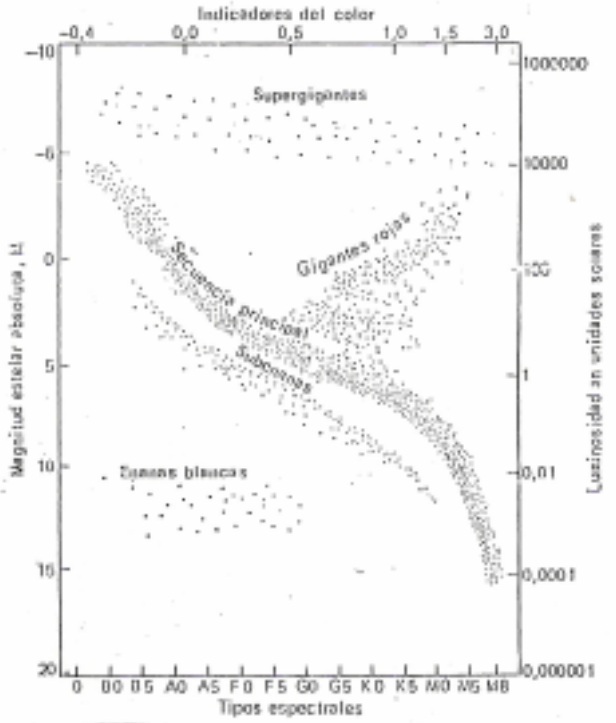
Las estrellas no poseen límites definidos, pero a cierta distancia del centro hay una parte que adquiera características de capa o manto bien definidas, dándole así la forma característica (ver el Sol). Los fotones fluyen desde el centro de la estrella hacia fuera, pero la presión va disminuyendo hacia las capas exteriores del gas. Los fotones, entonces, son absorbidos y vueltos a emitir hasta que llegan a una capa donde la existencia de iones es tan baja que ya no son vueltos a absorber, pudiendo así salir de la estrella. Esa zona es la fotósfera, y es el límite que impone la física para conocer la estrella (ya que de allí proviene el espectro de absorción que podemos observar).

DIAGRAMA DE H-R:
En el eje de las abcisas va la temperatura (disminuyendo de izquierda a derecha) y en el eje de las ordenadas el brillo (creciendo de abajo hacia arriba). El brillo va en magnitudes y la temperatura se relaciona con el color.
La distribución de las estrellas en este diagrama forma ‘secuencias’ (agrupaciones de estrellas), esto no sólo permite combinar cualidades y así poder clasificarlas sino también ver su evolución.


-10
-5
0
+5
+10
+15
supergigantes
gigantes rojas
TAMS
secuencia principal
ZAMS
SOL
enanas blancas
enanas marrones
O
B
A
F
G
K
M
L
T
C
S

FOTOCOPIAS:

Fig. 8. Diagrama espectro — magnitud estelar absoluta



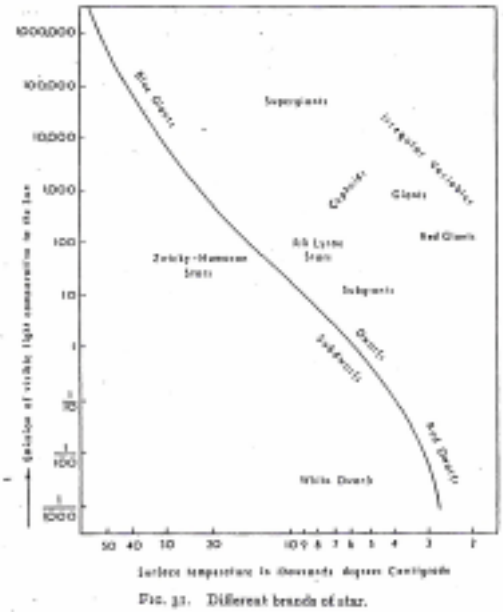


Fig. 31. Different brands of star.

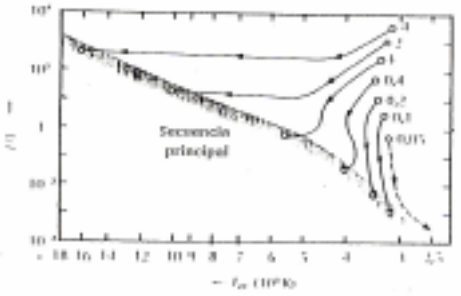


FIGURA 12-2. Caminos evolutivos de estrellas de distintas masas hacia la secuencia principal. Los puntos iniciales de la derecha corresponden al punto C de la fig. 12-1. Los números indican las masas de las estrellas en unidades solares. (C. Hayashi, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, vol. 4, p. 171, 1966.)

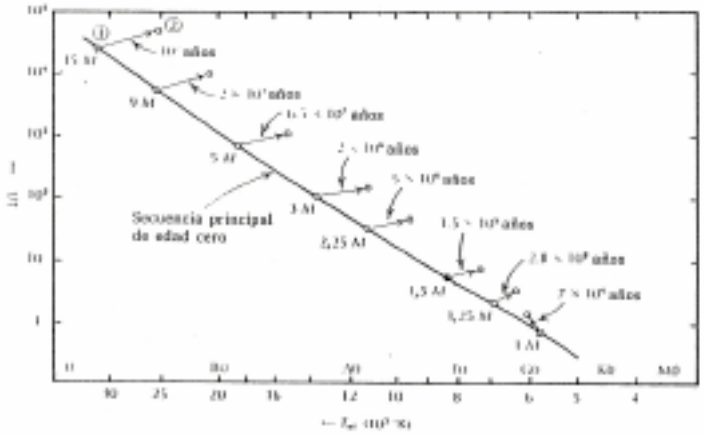


FIGURA 12-4. Caminos evolutivos de estrellas de distintas masas desde la secuencia principal de edad cero (puntos 1) hasta el estado de eliminación del hidrógeno en el núcleo (puntos 2). Las estrellas se identifican por sus masas en unidades solares. También se indican los tiempos que las estrellas permanecen en la secuencia principal. (I. Iben, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, vol. 5, p. 571, 1967.)

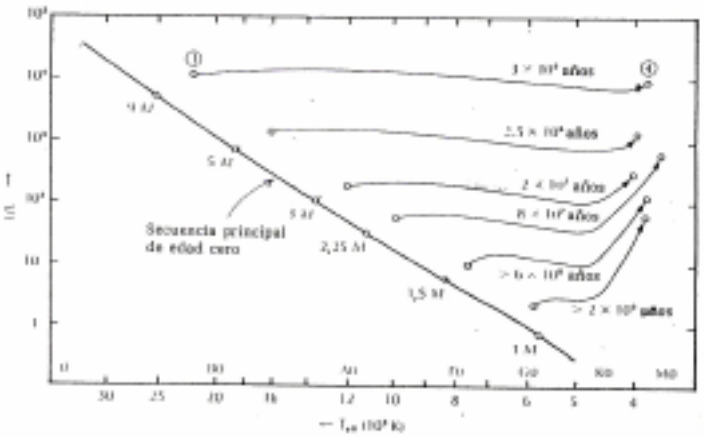


FIGURA 12-6. Caminos evolutivos de estrellas de distintas masas durante la fase de combustión del hidrógeno en capa. En los puntos iniciales 3, el núcleo ha agotado todo el hidrógeno; en los puntos 4, el helio comienza a arder. Las estrellas se identifican por sus masas en unidades solares. También se indican los tiempos que las estrellas necesitan para completar la fase de combustión en capa. (I. Iben, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, vol. 5, 571, 1967.)

SEIS: La duración de la vida de una estrella depende de su masa, cuanto más masa más rápido evoluciona y menos vive. Entre 50 y 60 masas solares la duración es de unos 4.000.000 años. Con unas 20 masas solares la duración es de unos 10.000.000 de años.

Producción de energía estelar: En los aceleradores y colisionadores de partículas se confirma la fórmula E = m c2 (c al cuadrado).
Al bombardear un núcleo de N_{14} con una partícula alfa (un núcleo de He) tenemos que:

N_{14} + He ⟶ Fe_{18} (Hierro)

El He posee una energía de 7,7 mev (mega electrón voltio).

Se produce entonces un núcleo de Hierro (Fe_{18}), que es sumamente inestable y se desintegra rápidamente en O_{17} y H. El O_{17} tiene una energía de 0,7 mev y el H (protón) posee 6 mev.

O sea, que se empieza con 7,7 mev y se termina con 6,7 mev. El faltante es la energía que se gastó para materializar la masa del O_{17} y el H.

A la inversa, si se bombardea un núcleo de Be_9 (berilio) con partículas alfa:

Be_9 + He_4 ⟶ O_{13} ⟶ O_{12} + H

El He_4 posee 5,5 mev, sumado al Be_9 se convierte en O_{13}, altamente inestable, que se desintegra en O_{12} (que posee 10 mev) y H (un neutrón, 8 mev). Así se produce energía.

En ambas reacciones los núcleos de N_{14} y de Be_9 se destruyen.
Esto es la fisión nuclear. La primera es una reacción endotérmica, ya que absorbe energía para conseguir materia. La segunda es una reacción exotérmica, ya que consume materia para producir energía.

En una estrella se transforma la materia en energía, pero los núcleos no se destruyen sino que se fusionan entre sí. Resultado de esto es un elemento diferente de los que se fusionaron con una masa un poco inferior a la suma de las masas de los elementos fusionados. Este faltante de masa es lo que se transforma en energía.
El elemento utilizado en la fusión estelar es, por excelencia, el H.

Para que los protones se fusionen se debe vencer la 'barrera de Coulomb', respulsión electrostática entre los dos protones (núcleos de H). La energía necesaria para conseguir esto proviene de la fuerza gravitacional. La presión del gas hacia el interior aumenta la temperatura del centro de la estrella, lo que hace que aumente la energía cinética (el movimiento) de los núcleos, esto los acerca hasta una distancia de 10^{-13} (10 a la menos 13) cms. En este momento actúa la Fuerza nuclear fuerte fusionándolos (venciendo así a la repulsión electromagnética, ya que la fuerza nuclear fuerte es unas 1000 veces mas fuerte que la electromagnética).

El H dura el 90 % de la vida de la estrella, por lo que es el verdadero motor de la energía que produce. En el interior de la estrella pueden desarrollarse diversas reacciones nucleares (de acuerdo a la masa de la estrella).

Para una estrella como el Sol (enana clase G) la principal es la reacción Protón-Protón (o cadena P-P): Cuando dos núcleos (2 protones) se unen

1) $H + H \longrightarrow H_2 + e^+ + \upsilon$ ↗

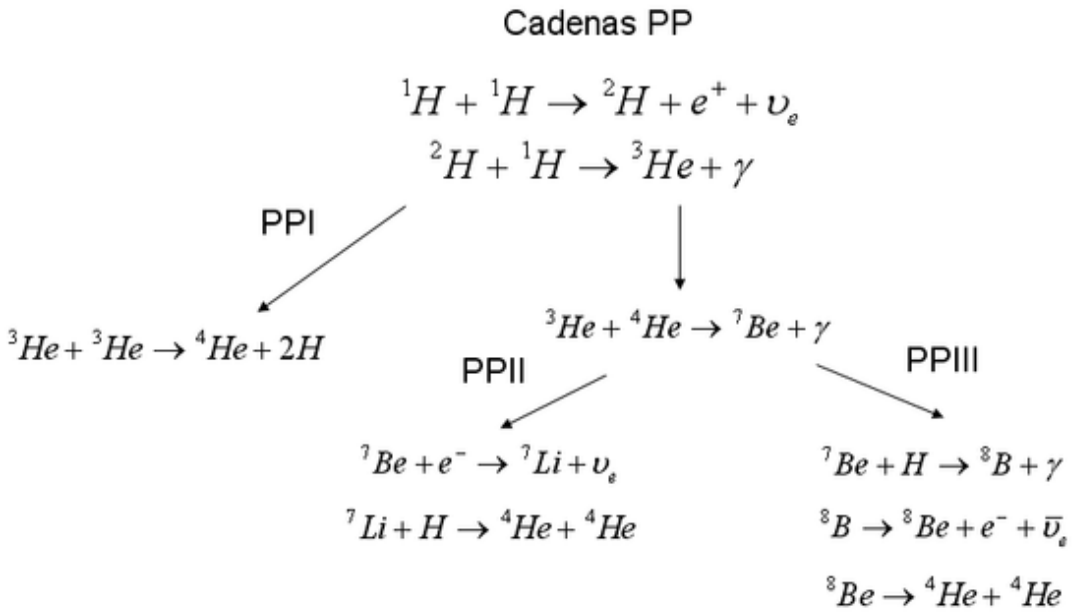
se materializa un núcleo de deuterio (un protón mas un neutrón en el núcleo). Para que este núcleo sea estable un protón debe convertirse en un neutrón, lo que implica un cambio de energía, por lo qe la diferencia se emite en forma de un positrón (e^+ , un anti-electrón, electrón positivo) y un neutrino (υ).

2) Luego el deuterio se une a otro protón, produciendo He_3 y fotones.

$H_2 + H \longrightarrow He_3 + \gamma$ ↗

$He_3 + He_3 \longrightarrow He_4 + 2\,H$

Por último, el He_3 se une a otro núcleo de He_3 produciendo un núcleo de He_4 (estable) mas dos núcleos de H.



Esta cadena se produce bajo una energía equivalentea una temperatura de 13/15 millones de grados (K), y opera en el centro de las estrellas solares (enanas clase G).
Gracias a esta cadena se convierten 600 millones de toneladas de protones en 596 millones de toneladas de He por segundo. Las 4 toneladas faltantes se convierten en energía (100.000 trillones de kilovatios por segundo).

La energía se produce así con un gasto de 0,007 de la materia. Esto es lo que se llama el 'número epsilón', uno de los 7 números que gobiernan el universo.

En estrellas mas masivas que el Sol la temperatura interior es mayor, así la reacción de fusión será otra. La más común es el Ciclo C-N-O (carbono, nitrógeno, oxígeno) (ciclo de Bethe, su descubridor). Para que esta reacción se de se necesita carbono. Como el carbono se produce después que el He y el O, esto significa que estas estrellas se formaron a partir de nubes de materia interestelar ricas en núcleos de C producidos por las primeras estrellas que funcionaron en el universo).
El C actúa como catalizador de la reacción:

$$C_{12} + H \longrightarrow N_{13} + \gamma \nearrow$$

(Cárbono 12 mas un protón se transforma en Nitrógeno 13, inestable, y se emite un fotón gama).

$$N_{13} \longrightarrow C_{13} + e_{+} + \upsilon \nearrow$$

(Nitrógeno 13 se descompone en Carbono 13, emitiendo un positrón y un neutrino).

$$C_{13} + H \longrightarrow N_{14} + \gamma \nearrow$$

(El Carbono 13 se combina con un protón produciendo así Nitrógeno 14 y emitiendo un fotón gama).

$$N_{14} + H \longrightarrow O_{15} + \gamma$$

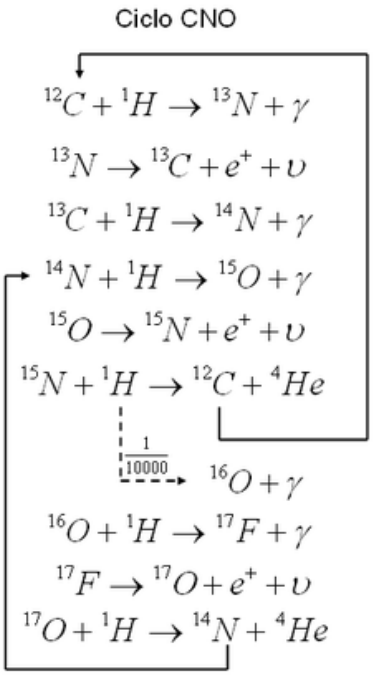
(el nitrógeno 14 se combina con un protón produciendo Oxígeno 15, altamente inestable, y emitiendo un fotón gama).

$$O_{15} \longrightarrow N_{15} + e_{+} + \upsilon$$

(el oxígeno 15 se desintegra dando como resultado Nitrógeno 15 y emitiendo un positrón y un neutrino), y por último

$$N_{15} + H \longrightarrow C_{12} + 4\,He$$

El nitrógeno 15 se combina con un protón formando Carbono 12 y 4 núcleos de He.



Como se ve, el carbono 12 no se gasta, se usa como catalizador. Esta cadena se desarrolla bajo una energía equivalente a unos 20.000.000 K.

Hay 3 maneras de transportar la energía:

1) por conducción, si un extremo de un hierro se calienta los átomos comienzan a vibrar con mayor violencia excitando así a los átomos que los rodean. De esta manera se va conduciendo la energía (excitación del movimiento de los átomos de una punta a la otra del hierro).
2) Por radiación. Los fotones de alta energía, rayos x y gamma, producidos en el centro de la estrella viajan hacia el exterior de la misma. En su camino chocan con núcleos (iones) que absorben parte de su energía. Los núcleos se excitan, aumentando así su energía, y cuando esta excitación decae emiten un fotón con un poco menos de energía que la que tenía el fotón que había chocado con ellos. Esto se repite hasta que el fotón logra salir a la superficie de la estrella, la fotósfera, desde donde viaja al espacio exterior. Este fenómeno de radiación es muy lento.
3) Por convección, enormes masas de gases estelares se calientan aumentando así su temperatura cinética, lo que les permite liberarse de la atracción gravitatoria (del centro de la estrella) y emergen hacia la superficie solar. Al llegar a la fotósfera se enfrían (pierden parte de su energía) y vuelven a caer hacia el centro de la estrella. Esto permite también que se renueve el H en los alrededores del centro estelar.

Las estrellas transmiten energía desde el centro hacia el espacio exterior por medio de los dos últimos fenómenos (radiación y convección).

Las estrellas de mucha masa irradian por radiación hasta un cierto punto de su radio, de allí en mas comienza un fenómeno de convección.
Las estrellas un poco mas frías irradian primero por convección y luego por radiación.

Las que son muy frías sólo utilizan la convección.

Como no se puede reproducir experimentalmente las condiciones que se dan durante la producción de energía en una estrella se adoptan 6 presupuestos básicos:

1) Las estrellas mantienen su estructura gracias a la acción de fuerzas opuestas
2) Como primera aproximación se debe aceptar que la envoltura de la estrella está soportada por la presión interna, considerando como despreciable a la presión de la radiación.
3) La materia de las estrellas se comporta como un ‘gas perfecto’ o ‘gas matemático’.
4) La opacidad (resistencia de la atmósfera estelar para dejar pasar la radiación) es predominantemente fotoeléctrica (debido a los iones).
5) Se debe suponer que la energía fluye sólo por radiación.
6) La única fuente de energía debe ser considerada como la fusión nuclear.

Con estas 6 premisas básicas y conociendo la lumosidad, la masa y el radio de la estrella se pueden realizar los cálculos sobre la producción de energía.
La luminosidad es proporcional a la quinta potencia de la masa. $L \sim M^5$
La luminosidad es proporcional a la séptima potencia del radio. $L \sim R^7$

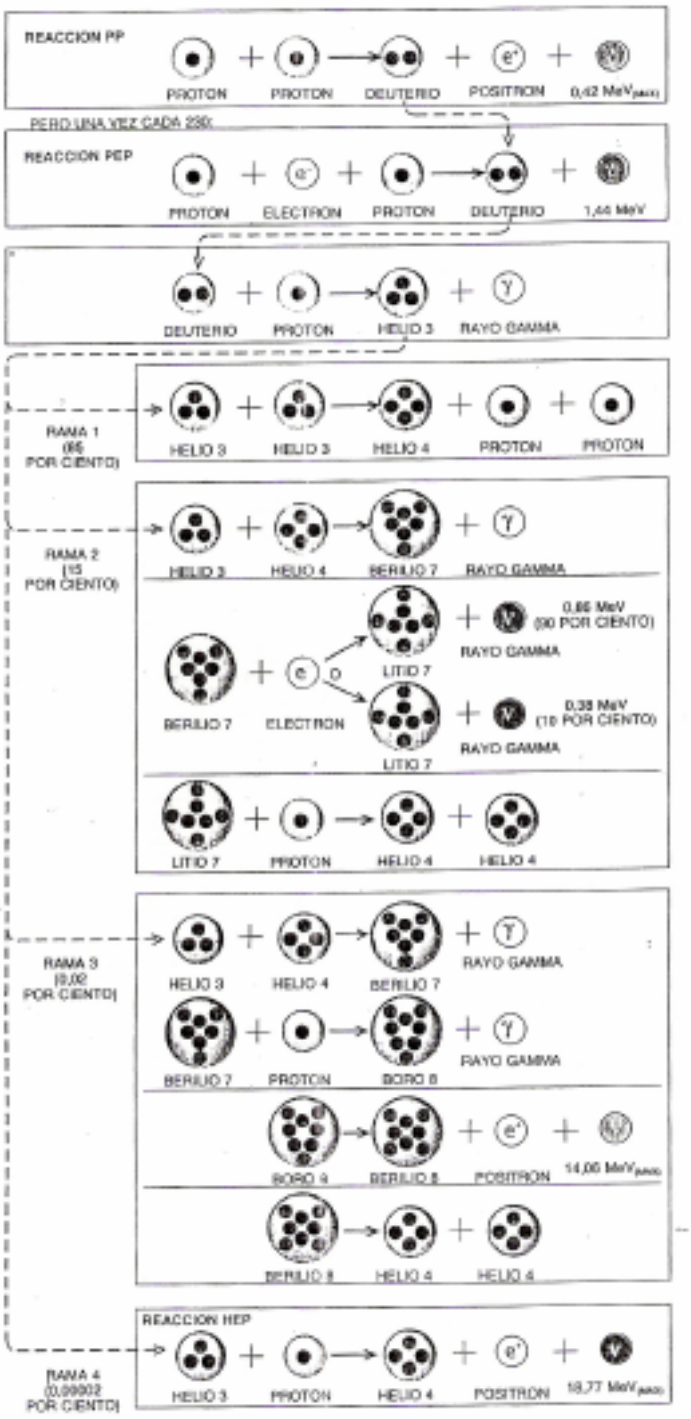
FOTOCOPIAS:

Relación masa - temperatura

Clase	Masa (sol=1)	Temp. (10^4 K)
O	15	34
B	6	28
A	1,5	19
F	1,1	17
G	1,0	15
K	0,5	9,5

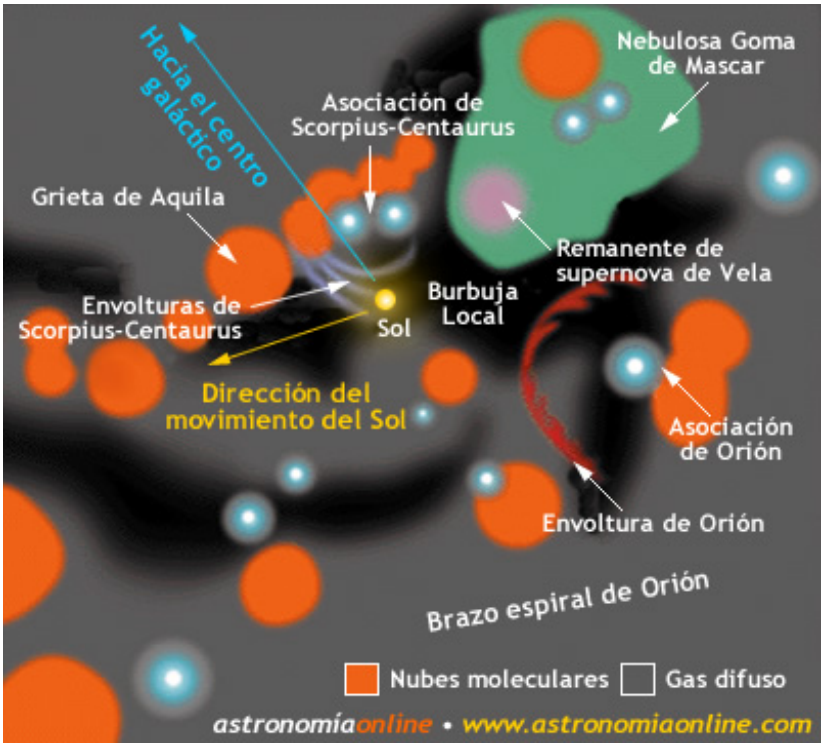
Permanencia en la secuencia principal

Clase	Masa (sol=1)	Radio (sol=1)	Brillo (sol=1)	En sec. princ.
B0	17,0	9,0	30.000	3.10^6 años
B5	6,3	4,2	1000	8.10^7
A0	3,2	2,8	100	4.10^8
A5	1,9	1,5	12	2.10^9
F0	1,5	1,25	4,8	4.10^9
F5	1,3	1,24	2,7	6.10^9
G0	1,02	1,02	1,2	$1,1.10^{10}$
G2	1,00	1,00	1,0	$1,3.10^{10}$
G5	0,91	0,92	0,72	$1,7.10^{10}$
K0	0,74	0,74	0,32	$2,8.10^{10}$
K5	0,54	0,54	0,10	7.10^{10}


REACCION PP
PROTON
PROTON
DEUTERIO
POSITRON
0,42 MeV (MAX.)
PERO UNA VEZ CADA 230
REACCION PEP
PROTON
ELECTRON
PROTON
DEUTERIO
1,44 MeV
DEUTERIO
PROTON
HELIO 3
RAYO GAMMA
RAMA 1
(85
POR CIENTO)
HELIO 3
HELIO 3
HELIO 4
PROTON
PROTON
RAMA 2
(15
POR CIENTO)
HELIO 3
HELIO 4
BERILIO 7
RAYO GAMMA
0,86 MeV
(90 POR CIENTO)
RAYO GAMMA
BERILIO 7
ELECTRON
O
LITIO 7
0,38 MeV
(10 POR CIENTO)
RAYO GAMMA
LITIO 7
LITIO 7
PROTON
HELIO 4
HELIO 4
RAMA 3
(0,02
POR CIENTO)
HELIO 3
HELIO 4
BERILIO 7
RAYO GAMMA
BERILIO 7
PROTON
BORO 8
RAYO GAMMA
BORO 8
BERILIO 8
POSITRON
14,06 MeV (MAX.)
BERILIO 8
HELIO 4
HELIO 4
REACCION HEP
RAMA 4
(0,00002
POR CIENTO)
HELIO 3
PROTON
HELIO 4
POSITRON
18,77 MeV (MAX.)

SIETE:

FORMACION ESTELAR: Todo lo que se 'sabe' sobre el tema responde a los conocimientos adquiridos mas las simulaciones realizadas en computadora. No puede observarse la formación de una estrella realmente.



Entorno galáctico 1500 AL

Los procesos formadores de estrellas se dan en las nubes moleculares (nubes de materia difusa, fría. Las regiones H2, calientes, están en proceso de expansión).
En las nubes moleculares la materia no se distribuye uniformemente, la densidad posee fluctuaciones cuyo orígen son:

1) A nivel micro: los movimientos térmicos de las partículas excitadas por la radiación
2) A nivel macro: puede haber varios orígenes: a) estrellas con alta temperatura superficial, la energía ultravioleta que emiten excita las partículas de gas, lo que hace que superen la velocidad de escape de la estrella, alejándose así de ella, y colisionen con la materia difusa empujándola – b) estallidos de supernovas, la materia expulsada por ellas amontona la materia inter-estelar creando así zonas de diferente densidad, c) estrellas variables explosivas (igual función que las supernovas).

Cuando una zona de materia difusa adquiere suficiente masa comienza a contraerse por autogravitación. Pero, ¿cuánta masa se necesita para esto?

El Sol es la estrella mas conocidad, tanto en tamaño como en masa ($m = 2 . 10^{33\ grs}$). Si se dispersara la materia que compone toda la masa del Sol hasta que tenga una densidad de alrededor de 1000 átomos por cm^3 y una temperatura de entre 10/20 K ocuparía el tamaño de una esfera de unos 3,26 AL. En estas condiciones, esta materia no podría contraerse, la autogravedad no sería suficiente.
Esto es así porque el Sol tiene un radio de 700.000 Km, y su velocidad de escape es de 618 Km./s. (la de la Tierra es de unos 11,3 Km/s).

$$Ve = \sqrt{\frac{2\ G\ m}{R}}$$

Donde Ve es velocidad de escape, G es la constante gravitatoria, m es la masa y R es el radio.
O sea que si el radio influye sobre la velocidad de escape. Por otro lado, recordar que a efectos de la gravedad se considera que toda la masa del objeto está contenido en un punto en el centro del mismo.

Si la masa del Sol se dispersa a los valores antedichos, la velocidad de escape sería de unos 10 Km/s, lo que es mucho menor que la velocidad de las partículas a unos 10/20 K. Así, el Sol se diluiría en el espacio.

Se calcula entonces que para que una masa de materia difusa comienze a contraerse por autogravitación tiene que tener, como mínimo, una masa unas 1000 veces mayor que la del Sol. Sin embargo, no existen ni existieron estrellas con 1000 masas solares (en los comienzos del Universo se especula que hubo estrellas con hasta 500 mS). Entonces se debe concluír que la masa que comenzó a contraerse debe, en algún momento, fraccionarse (las estrellas actuales van de 0,01 mS a 100 mS). O sea que las estrellas se forman de a varias al mismo tiempo (hasta de centenares y millones de estrellas juntas).
La contracción de la nube de gas molecular es un proceso muy lento:

1) porque está conformada por moléculas, las cuales bloquean con mucha eficacia la radiación térmica (infrarroja) (efecto invernadero)
2) los movimientos térmicos y aerodinámicos (convección) de las moléculas producen que masas de gas se trasladen de un lado a otro, creando así fluctuaciones de la densidad y transportando la energía.

Si la masa de la nube de gas no es muy alta, al contraerse no subirá demasiado la temperatura (en su centro), entonces la energía se gastará en producir movimientos térmicos. Si la temperatura es mayor se gastará en producir movimientos aerodinámicos. Así, la energía se gasta en aumentar la presión interna, lo que frena la contracción por autogravitación. Por esto es que es un proceso muy lento.

Dentro de la nube hay fluctuaciones de densidad (grumos de moléculas), muchas de estas fluctuaciones pueden adquirir potencial gravitatorio para comenzar a contraerse, fragmentándose así la nube en diversos sub-sistemas. En cada sub-sistema habrá también fluctuaciones de la densidad, produciéndose en cada uno de ellos también varios sub-sistemas. Pero la fragmentación de los subsistemas es más rápida, ya que disminuye el tamaño (del sub-sistema) y aumenta la densidad de la materia, haciéndose cada subsistema un poco más opaco cada vez.
Se calcula que cada episodio de fragmentación dura un 30 % menos que el anterior. Llega un momento en que la fragmentación es tan opaca que la energía interna frena la contracción. Si cada proceso de fragmentación duran un 30 % menos que el anterior, esto significa que no puede haber mas de 4 ó 5 procesos de fragmentación.

Las estrellas con alta temperatura superficial son las menos. Cuando se forma una de ellas disocia las moléculas que la rodean, quedando sólo átomos. Los átomos se excitan e ionizan y comienzan a emitir luz, generándose así una región H2 (gas luminoso). La materia difusa alejada de la estrella también recibe el impacto de esa energía pero en mucho menor grado, así que conserva sus características moleculares (región H1, obscura, con polvo). Así, habrá 2 zonas: una luminosa, caliente y en expansión penetrando en una zona fría y molecular.
El límite entre las dos zonas es muy delgado (pocas horas luz), sinuoso y con edentaciones (cuando dos fluídos con temperaturas y densidades diferentes se interpenetran siempre se produce esto). A esto se lo llama ‘inestabilidad de Raleigh-Taylor’.
Así, se verá una zona luminosa con penetraciones obscuras. A estas zonas obscuras se las llama ‘trompas de elefante’ (ver pilares del águila, cabeza de caballo, neb. Trífida, etc).
El gas caliente sigue penetrando hasta que en cierto momento rodea una ‘isla’ obscura (gas molecular). Estos son los ‘glóbulos de Bock’, materia fría rodeada de materia luminosa y caliente.
Llegado este punto, las fragmentaciones quedan en el interior de una masa de materia obscura y llena de polvo, por lo que los estudios deben realizarse a través de radiotelescopios (ya que no llega la luz).

Se registran entonces ‘núcleos densos’ de unos 3 m. luz de diámetro, muy densos (con una densidad de unas 300.000 moléculas por m^2). Aún así, la materia es tan escasa que la nube no puede contraerse mas, y su temperatura es de unos 10/20 K. La acción gravitatoria es poca en las afueras del núcleo denso, pero en su interior es mayor. Se forma entonces un centro de unos 300.000 Km de diámetro, con una densidad que no alcanza para formar una estrella aún. Esta semilla de estrella comienza a atraer la materia que está a su alrededor, la materia comienza a caer en éste núcleo interno... pero no toda, alguna es desviada de su caída y una gran parte comienza a girar alrededor formando un disco de acreción (acumulación). Este disco gira alrededor del núcleo atractivo, retorciendo las líneas del campo magnético que lo atraviesan (generadas por el núcleo). Este campo magnético comienza a dispersar plasma en sentido perpendicular al disco (dos chorros de plasma), plasma que a su vez chocará con el resto de la nube de gas produciendo nuevas fluctuaciones de masa.
La materia del disco de acreción girará en un círculo cada vez mas cerrado hasta caer en el núcleo a gran velocidad. Se calcula que unos $2 \cdot 10^{33}$ grs. caen en unos 100.000/1.000.000 años.

Al comprimirse el gas se caliente hasta 1.000.000 K (recordar que las mas luminosas son las tipo O, con temperaturas superficiales de unos 49000 K). Pero la estrella en formación no puede verse ya que está encerrada en la nube de gas obscuro. Comienza a darse entonces la única reacción que puede darse a esa temperatura (1000000 K), la fusión del deuterio, pero el deuterio es escaso y se agota rapidamente.
Luego de esto, al agotarse el deuterio en el núcleo de la proto-estrella, en parte por convección y en parte por otros procesos no conocidos aparecen vientos estelares muy fuertes que comienzan a alejar el gas que rodea a la proto-estrella, permitiendo entonces que se haga visible.

Al acabarse el deuterio la proto-estrella vuelve a contraerse hasta que la temperatura en su centro llega a unos 13/15.000.000 K, comenzando ahora sí las reacciones nucleares P-P (cadena protón-protón) hasta que la presión interna detiene la contracción.

La velocidad de giro de la nube de gas es el 'momento de rotación'. En un cuerpo que gira, la velocidad del giro dependen del radio, al disminuír el radio debe aumentar la velocidad de giro para conservar el momento de rotación. Se calcula que todas las estrellas deberían comenzar a girar a mas de 100 KM/s, pero es raro encontrar alguna que lo haga. Se estima que la estrella, a medida que se achica, va cediendo momento angular a favor de la materia que la rodea, la cual comienza entonces a agruparse (en función de 'grumos' pre-existentes) formando así los sistemas planetarios, nube de Oort, etc.

FOTOCOPIAS:

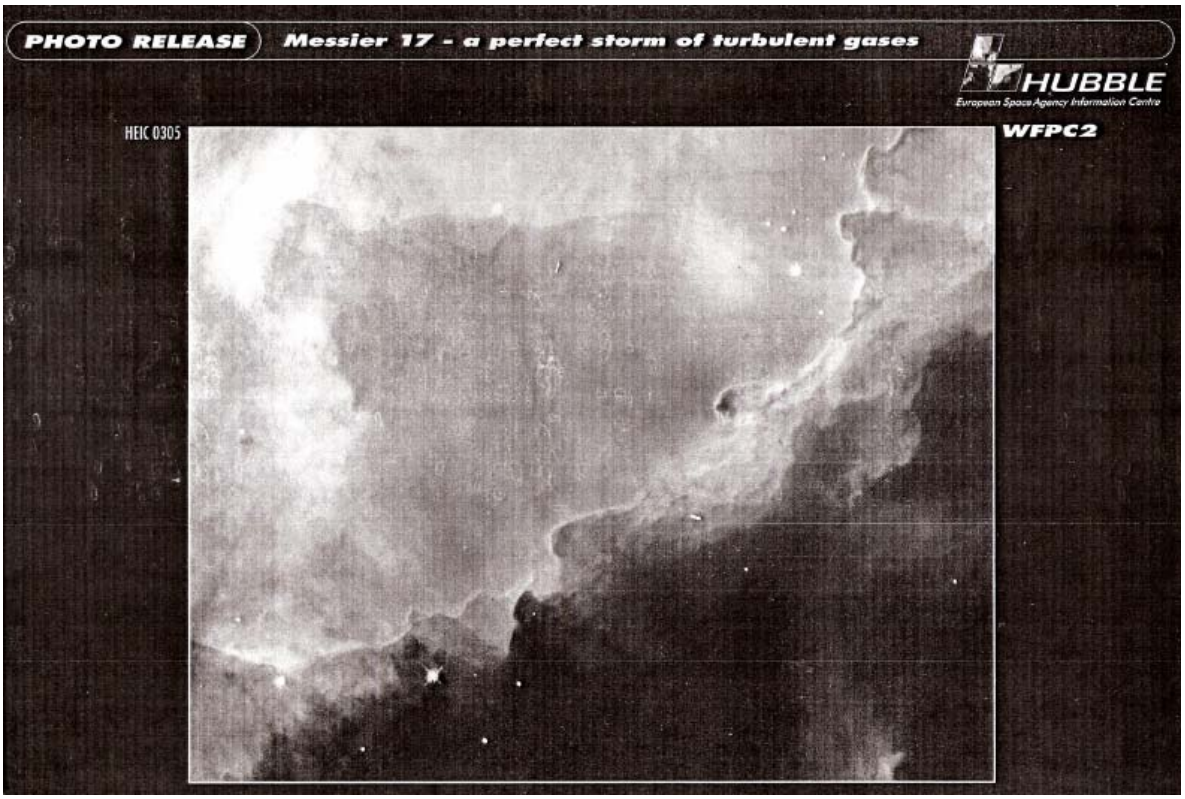
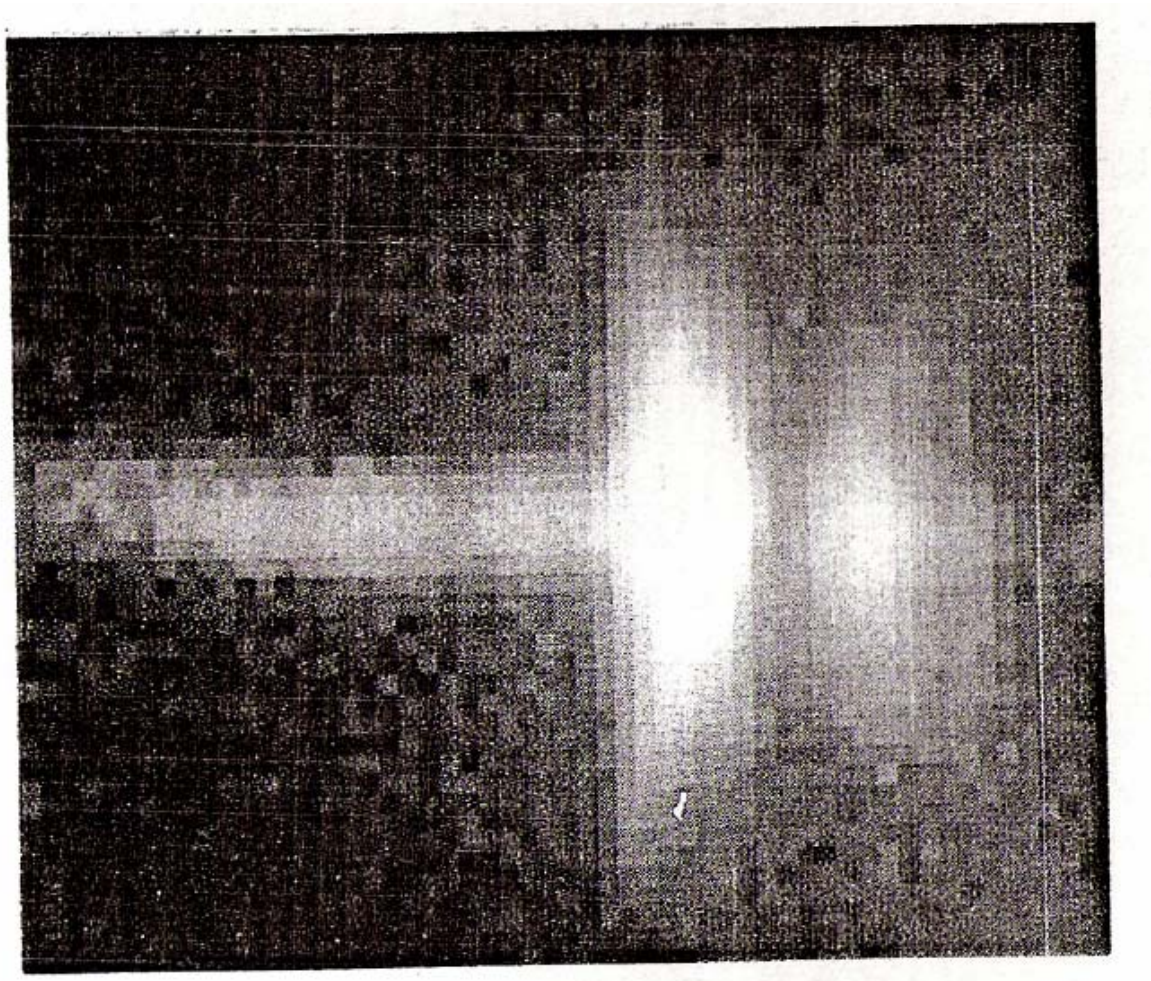


PHOTO RELEASE
Messier 17 - a perfect storm of turbulent gases
HUBBLE
European Space Agency Information Centre
HEIC 0305
WFPC2



Estrella con disco de acreción, chorros de gas expulsados a través de las líneas de campo magnético (retorcidos).

OCHO:

EVOLUCION ESTELAR: Todas las estrellas se forman igual. Al comenzar las primeras reacciones de fusión se van ubicando en la Secuencia Principal del diagrama H-R (se considera que una estrella está definitivamente constituída como tal cuando comienza en su interior la fusión del H). La velocidad de las reacciones nucleares es aproximadamente proporcional a la 15ª. (quinceava) potencia de la temperatura en en centro de la estrella. Como la temperatura depende de la masa, tenemos entonces que la velocidad de las reacciones nucleares depende de la masa. Así, la evolución de una estrella depende, fundamentalmente, de su masa (lo que tarde una estrella en consumir sus reservas nucleares depende, fundamentalmente, de su masa).

Se calcula que la mayoría de las proto-estrellas no llegan a sufionar el H. y que, seguramente, se contraen todo lo mas posibles hasta que quedan como enanas marrones.

Las enanas rojas continuarían evolucionando durante mucho tiempo (hay estrellas de este tipo de unos 12000/13000 millones de años). Se las suele encontrar en los cúmulos globulares (el halo que envuelve a las galaxias).

Estrellas con la masa del Sol (y similares) consumen sus reservas nucleares en unos 15000 millones de años.

Estrellas de unas 9 masas solares llegan a agotar sus reservas en 10/20 millones de años.
Por último, se supone que al principio del Universo se formaban estrellas con unas 500 masas solares, que duraban 1 ó 2 millones de años (finalizando como una hipernova).

Estrellas con masa aproximada a la del Sol (reacción P-P o C-O-N): mientras la estrella tenga H en su centro o cerca de él seguirá consumiendo este combustible en una 'vida tranquila' (se calcula que el núcleo estelar tiene un 30 % de toda la materia de la estrella). Cuando el H se fusiona se transforma en He. A medida que disminuye el combustible nuclear también baja la energía irradiada que sostiene la envoltura gaseosa (atmósfera) de la estrella. Esto provoca que la estrella comience a comprimirse (el gas que compone su envoltura 'cae' hacia el núcleo), lo que causa una elevación de la temperatura (por la energía cinética del gas cayendo). La fusión del H se traslada entonces hacia fuera del centro núclear (donde el H ya está prácticamente agotado), rodeándolo. Es lo que se llama combustión en capa, ya que se forma una capa de H fusionándose alrededor de un núcleo formado por He.
La fusión en capa agrega He al núcleo estelar, pero además genera energía extra (se suman entonces la temperatura que se origina por la contracción mas la de la fusión). Esto causa que aumente la energía irradiada al exterior, lo que contrarresta la presión de las capas exteriores hacia el centro, aumentando nuevamente el volúmen de la estrella (su diámetro). Decrece por lo tanto la densidad del gas estelar y disminuye la temperatura (la energía por unidad de superficie es menor que antes), llegando a los 3300/3700 K°

Si la energía es pobre (o sea, si los cuantos de energía transportan poca energía) tendrá una longitud de onda muy larga. La luz emitida es entonces roja, pero la estrella es muy brillande debido a la gran superficie que ocupa. Así, la estrella se ha transformado en una gigante roja.
La fusión en capa es la que mas dura, ya que la energía es transportada por convección. Una masa de gas cercana a la capa de fusión se calienta y se dirige hacia el exterior de la atmósfera estelar, allí se enfría y vuelve a caer hacia el núcleo pero llevando ahora H fresco de las capas exteriores de la estrella.
Llega un momento en que el H ya no se aporta lo suficiente hacia el centro de la estrella como para sostenerla, la estrella comienza entonces a contraerse nuevamente aumentando la presión y la temperatura en el núcleo. Se enciende entonces la reacción 3alfa, fusionando el He ($3\ He^4 \longrightarrow C^{12}$) para producir Carbono.
Luego vendrá la fusión del He en capas, etc. Este proceso se repite formando elementos cada vez mas pesados hasta llegar al Fe.
En las estrellas con la masa del Sol es casi seguro que las reacciones paren en la producción de C. Estrellas mas pesadas continuarán con la secuencia.

La 'Vp' $= \sqrt{\frac{2\,G\,M}{R}}$ (donde Vp es velocidad parabólica o de escape, G es la constante gravitatoria, M la masa y R el radio)

O sea que $Ve = \frac{1}{R}$ (se puede considerar que la velocidad de escape es inversa al radio)

Así, si la masa de la Luna es 1/8 de la de la Tierra, la Ve es de 1/6 la de la Tierra (o sea, menor que 1/8), porque el cuerpo estará mas cerca del centro de atracción gravitatoria (el centro del cuerpo mayor del sistema) en la Luna que en la Tierra.
Esto viene a cuento porque todas las estrellas expulsan materia al espacio (no se sabe bien porque, se supone que en ese proceso intervienen los fenómenos internos de la estrella, o sea, movimiento de la energía por convección, irradiación, etc.) en forma de 'viento estelar', sobre todo protones. El Sol expulsa por año unos 10^{-13} (diez a la menos 13) de su masa (10 billonésimos) en forma de protones (que golpean la Tierra a una velocidad de 400 Km/seg.). Al aumentar el radio (R) de una estrella disminuirá la velocidad de escape necesaria para el viento estelar.
Una gigante roja expulsa unos 10^{-4} (10 a la menos 4) de su masa por año (una 10 milésima). Así, cada vez expulsa mas masa. Este es un proceso bastante rápido, por lo que se forma entonces una nebulosa planetaria.
En el caso del Sol, al ser su núcleo de C ya no podrá comprimirse mas (ni tampoco habrá suficiente presión para iniciar un nuevo tipo de reacciones nucleares), quedando sólo el núcleo de la estrella. Las capas exteriores escaparán de su atracción, brillando en el ultravioleta debido a sus altas temperaturas.

Si el núcleo estelar tiene una masa comprendida entre las 0,5 y 1,44 masas solares lo mas seguro es que quede como enana blanca.
En estrellas mas masivas se darán procesos similares, pero la expulsión de materia no será lenta sino que adoptará una forma explosiva. Si el núcleo central entra en el rango de 1,44 a 3 masas solares, la explosión dejará una estrella de neutrones.

Estrellas con mas masas evolucionarán aún mas rapidamente, el núcleo que quedará será enorme, lo que causará que la gravitación (la menos potente de las 4 fuerzas que actúan en el Universo) sea tan grande que se anularán las otras fuerzas, formándose un agujero negro estelar.

Así, en la estrella todo está reglado por la masa. Si bien la evolución es parecida para todas, el final no es el mismo.

FOTOCOPIAS:

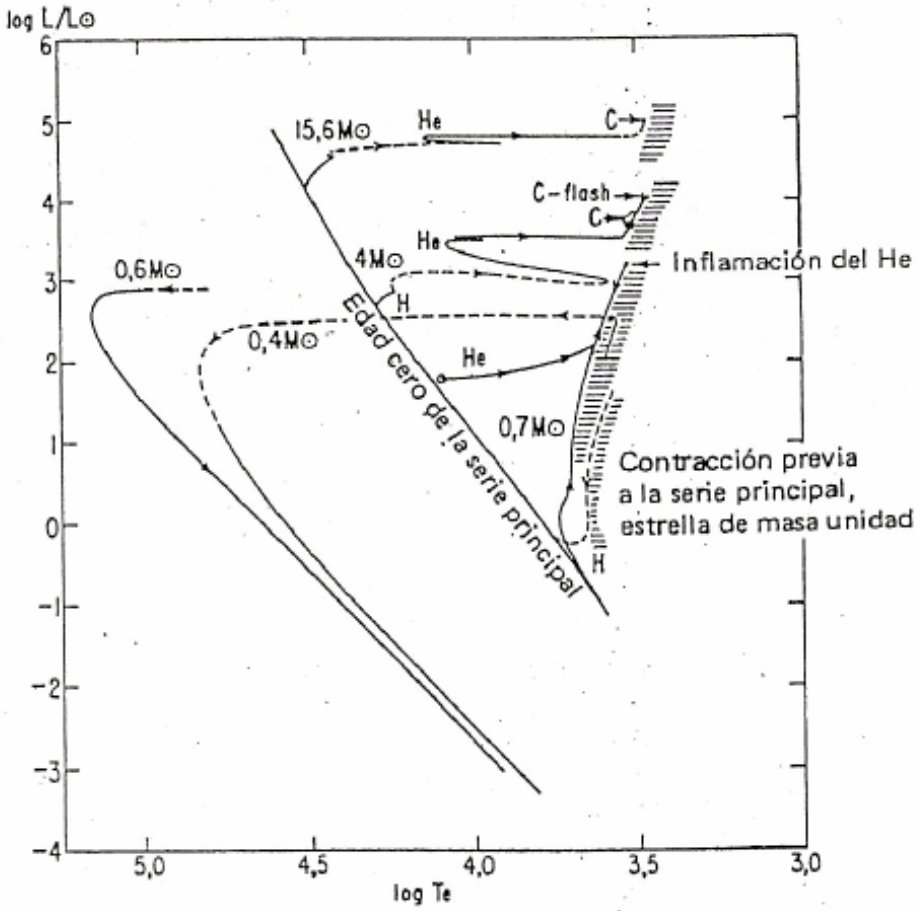


Figura 6-4. Trayectorias evolutivas en el diagrama de Hertzsprung-Russell, calculadas teóricamente para estrellas de distintas masas, según la obra *Progress of Theoretical Physics*, supl. 22, de C. Hayashi, R. Hoshi y D. Sugimoto, Kyoto (1962).

NUEVE:

El equilibrio estelar se mantiene aproximadamente el 90 % de la vida de una estrella. Hay 3 factores que se le oponen:

1) Hay muchas estrellas que por su poca masa no pueden llegar a la fusión del H, por lo que deben contraerse casi desde el principio de su formación.
2) Otras estrellas, con una masa similar a la del Sol, no pueden llegar mas allá de la fusión del C.
3) Con masas mayores que la del Sol producen elementos cada vez mas pesados, pero al llegar a la síntesis de los núcleos de Fe (Fe_{56}) pierden su equilibrio, ya que en ese momento dejan de producir energía (hace falta demasiada presión para fusionar los núcleos de Fe.

Al romperse el equilibrio la estrella debe contraerse, es la única forma de mantener la estructura. La contracción lleva a que la materia se compacte cada vez mas (en el núcleo estelar). ¿Hasta dónde puede contraerse la materia? Si la estrella tiene un núcleo de entre 0,5 y 1,44 mS dejará de contraerse al llegar al estadio de Enana Blanca.
Con un núcleo de entre 1,44 y 3 mS la contracción se frenará quedando como una Estrella de Neutrones.
Ambas son muy pequeñas y muy densas, por lo que se las puede llamar (en conjunto) estrellas hiperdensas.

ENANAS BLANCAS: En 1840 Bessel observa Sirio (Alfa del Can Mayor) y descubre que describe una trayectoria sinuosa en el espacio, atribuye esto a una compañera pequeña y muy densa. Años después se descubre esta compañera, muy débil (Sirio B). Posee una temperatura superficial de 8000 K, pero es 10.000 veces más débil que Sirio A, por lo que debe ser muy pequeña (con poca superficie radiante). Se calcula su radio en 86 centésimas del radio del Sol (unos 4.700 Km, cercano al radio de Neptuno o Urano). Sirio B gira alrededor del baricentro (centro de masas del sistema doble) en unos 50 años. Esto permite calcular la masa conjunta del sistema, que es de unos 3,4 mS. Sabemos que Sirio A posee una m de 2,4 mS, por lo que Sirio B posee una masa de 1 mS. Con estos datos se puede calcular su densidad, que es de unos 1.000.000 grs/cm^3 (pequeño tamaño, temperatura elevada, mucha densidad). Al tener tan alta temperatura, su radiación es de una frecuencia muy alta en el espectro, por lo que quedó este nombre (Enana Blanca) para toda etrella de este tipo, aún cuando hay otras con menos temperaturas y otras prácticamente frías.
Hasta agosto del 2003 se habían catalogado 3.121 Enanas Blancas. Este tipo de estrella es muy difícil de descubrir (por su débil luz). En un radio de 30 AL a partir del S hay unos 54 sistemas, de los cuales 9 cuentan con Enanas Blancas. Promediando entonces se puede decir que en el total de la Galaxia habría un 2 ó 3 % de Enanas Blancas (entre 40.000 y 60.000 millones de Enanas Blancas).
ESTRUCTURA FISICA: La estructura física de una estrella de estas características es consecuencia del colapso gravitatoria de la materia que la compone. Las partículas sub-atómicas poseen una propiedad (asimilable a la rotación), el espín, que se describe a partir de sus propiedades vectoriales: la velocidad de giro, el eje de giro, el sentido del giro alrededor de su eje.

Las leyes cuánticas imponen ciertas restricciones al comportamiento de las partículas sub-atómicas. En los electrones, el espín puede ser sólo de –1/2 (menos un medio).
Los protones y los neutrones tienen una sola unidad de espín (espín 1). Los fotones tienen espín 2, los mesones M (muones) y los mesones K (Kaones) no tienen espín.

Los electrones tienen sólo cierta manera de disponerse alrededor del núcleo (por el Principio de Exclusión de Pauli), y no pueden ser agrupados estrechamente. Cuando la materia se comprime aparece entre los electrones una repulsión (Principio de Fermi) que impide que los átomos se interpenetren. Así, ante la compresión surge una suerte de rigidez cuántica, por lo que la compactación se frena. Llega entonces un punto en la Enana Blanca en que la materia no puede interpenetrarse, la estrella ya no puede seguir contrayéndose. Esto lleva a que deje de producir energía (de contracción gravitatoria).
La estrella queda entonces compuesta de 'materia degenerada', que desde el punto de vista morfológico es igual a la materia corriente, por lo que a pesar de la tremenda densidad a la que está expuesta se comporta como un gas (por esto también se la llama 'gas cuántico' o gas de Fermi).

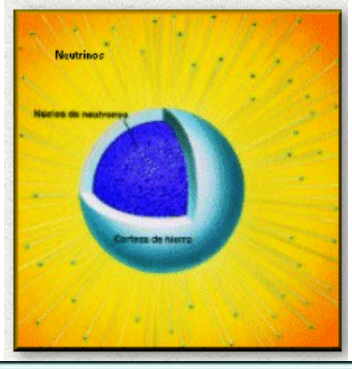
Las Enanas Blancas son estrellas que han agotado el H (el poco que les queda puede llegar a estar en la atmósfera, la cual, debido a la inmensa presión gravitatoria que ejerce el núcleo estelar, puede tener un ancho de unos 100 m.). Debajo de la atmósfera estelar puede haber C, Neón y O.
Al no poder contraerse y, por lo tanto, no poder generar energía (ni de fusión ni gravitatoria) se van enfriando por radiación muy lentamente. En el espectro las líneas son mas anchas de lo normal porque:

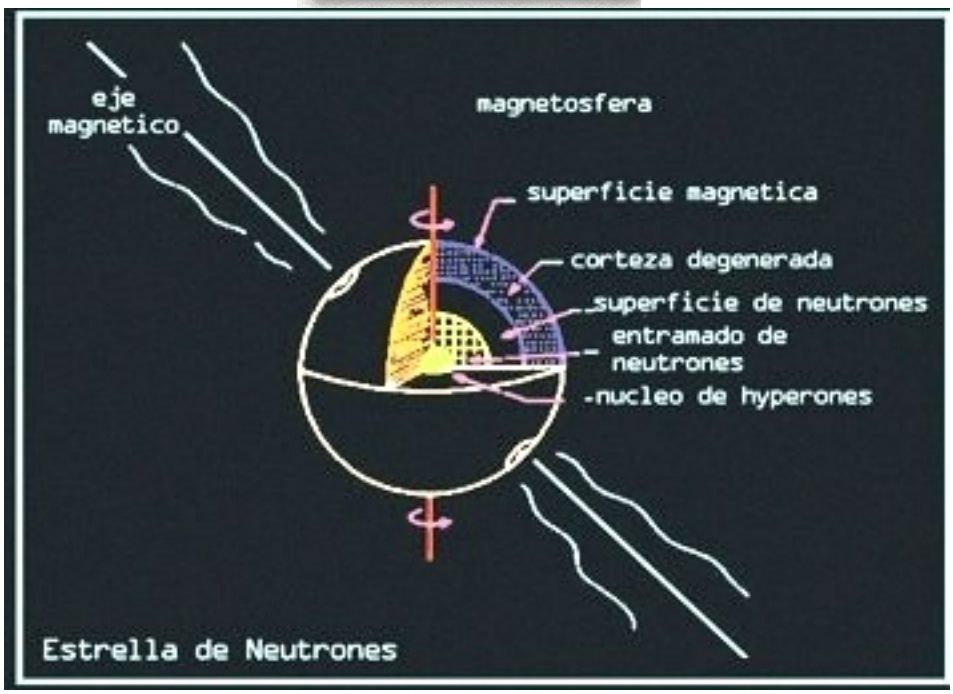
1) Si la materia está muy comprimida, los átomos irradiantes están cerca de los iones (núcleos de C, O y Neón rodeados de una nube cuántica de electrones). Cuando un átomo está sometido a un campo eléctrico o magnético producirá en el espectro una línea desdoblada (por lo que se verá más ancha).
2) La estrella posee un gran campo gravitatorio, así, los fotones que salen al espacio deben vencer un potencial gravitatorio muy alto, gastando parte de su energía en ello y corriéndose al rojo en el espectro (corrimiento gravitatorio hacia el rojo, longitud de onda mas larga y menor energía).

La masa de una Enana Blanca (núcleo de una antigua estrella) sólo puede llegar a 1,44 mS., y su tamaño puede llegar a ser similar al de la Tierra.

Evolución: Como no puede contraerse y no puede, por ello, producir más energía gravitatoria, no pueden llegar a producir la temperatura necesaria para generar reacciones nucleares (a pesar de contar con el material necesario). Luego de un proceso muy lento de enfriamiento terminará como un 'cuerpo planetario hiperdenso (estrella negra)', que no irradia nada, sin temperatura. Este proceso puede tardar unos 10_{10} (10 a la 10) años (10.000 millones de años).

ESTRELLAS DE NEUTRONES: Estrellas que poseen de unas 9 mS hacia arriba, con un núcleo de hasta 3 mS. Aquí la compactación de la materia logra vencer la resistencia de la rigidez cuántica.
La estabilidad del núcleo deriva del electromagnetismo (repulsión entre los protones de igual carga) y de la Fuerza Nuclear Fuerte (atracción entre los protones y los neutrones que componen el núcleo). Hasta los 10^{10} K (diez a la diez grados Kelvin) este equilibrio se conserva, pero muy cercano a los 10^{11} K la agitación de las partículas es tan violenta que los núcleos se escinden, separándose los protones de los neutrones. Esto da como resultado la formación de nuevos neutrones en base a la unión de un protón mas un electrón.
A este tipo de materia se la llama 'materia neutrónica' (o 'neutronium' al decir del 'jovatium profesorum').





Una estrella de neutrones se puede comparar con un inmenso núcleo atómico, con una densidad 1.000 millones de veces mayor que la materia ordinaria. Si la Tierra se compactara hasta esta densidad, toda su masa (8×10^{14} grs.) se compactaría en un radio de 125 mts. Si lo hiciera el Sol, sería una esfera de 14 Km.

Se calcula que en la Vía Láctea hay 100.000 millones de estrellas de neutrones (10^8). La masa neutrínica marca un límite entre las fuerzas actuando normalmente y el momento en que la gravitación (la fuerza mas débil de las 4) se transforma en la mas poderosa de todas las fuerzas que actúan sobre la materia.

Se supone que no todos los núcleos se escinden, algunos pueden quedar formando la corteza de unos 1.000 mts. de espesor, núcleos pesados nadando en un mar de electrones. Por debajo de ella la materia se estratifica. La presión aumenta con la profundidad (una estrella de neutrones tiene un radio de unos 10 – 15 Km). A mayor presión se transforma el comportamiento de la materia.

En teoría, si una Estrella de Neutrones tuviera una perturbación de tipo mecánico (la caída de un meteorito, por ej.), la onda de presión se desplazaría a través de ella a una velocidad cercana a la de la luz, ya que la masa neutrónica carece de viscosidad (es lo que se llama un superfluído).

Cuando la materia tiene una densidad de 10^{12} grs. por cm3 (un billón de gramos por centímetro cúbico) se sigue comportando como un plasma homogéneo (gas). Un poco más de compactación y la acción electrostática entre los núcleos es mayor que las oscilaciones térmicas que se producen por la presión, por lo que los núcleos se van ordenando de a pares (lo que se llama 'condensado de Bose-Einstein), formando algo parecido a un cristal.
Si la presión aumenta mas, estos núcleos emiten como prolongaciones (filamentos) que los unen. Con una presión de 12^{14} (12 a la 14) estas prolongaciones se engrosan, formando puentes entre los núcleos que encierran cavidades entre ellos.
Si la presión aumenta aúnmas, $2{,}7 \times 10^{15}$ (2,7 por 10 a la quince), desaparecen las cavidades, totalmente ocupadas ya por las prolongaciones de los átomos, y no es posible distinguir los núcleos del resto. La materia adquiere uniformidad (materia nuclear).
Las Estrellas de Neutrones son los objetos mas densos del Universo y poseen, también, los campos magnéticos mas intensos.

Este proceso de presión en aumento va produciendo la estratificación de la Estrella de Neutrones. Los modelos sugieren que puede haber 4 tipos de Estrellas de Neutrones:

1) Estrella de Neutrones Típica. Formada por una corteza externa (núcleos pesados y nubes cuánticas de electrones), una corteza interna (núcleos, electrones y neutrones) y un núcleo (materia nuclear).
2) Estrella de Neutrones Hiperónica. Podría haber un estrato debajo del núcleo formado por Hadrones. Se los llama Hiperones ya que en su constitución aparece siempre por lo menos un quark S (extraño). (Son hiperones las partículas Lambda - Λ, u-d-s – y la partícula Sigma Σ).
3) Estrella de Neutrones Híbrida. Debajo del estrato hiperónico habría otro estrato de materia extraña. Los quarks no pueden estar libres, siempre están aglutinados formando las partículas no elementales (protones, neutrones, electrones). La 'fuerza de color' que los aglutina aumenta con la distancia. Esto significa que al acercar los quarks entre si disminuye, hasta llegar a una distancia en que la fuerza de color desaparece, quedando así los quarks en libertad. Esta sopa de quarks es la 'materia de quark' o 'extraña', ya que los quarks que allí aparecen son todos de la segunda familia, la del quark extraño.

4) Estrella de Neutrones Extraña. Formada totalmente por quarks desconfinados (esto se supone que puede producirse por la gran fuerza gravitatoria de una Estrella de Neutrones).

Si la materia extraña tuviera carga positiva podría coexistir con la materia normal. Pero si su carga fuera negativa al ponerse en contacto con materia normal la transformaría totalmente (y el cambio se trasladaría a la velocidad de la luz) en materia extraña.

Imagen: Estrellas Masivas en el Cumulo Abierto Pismis 42.

Que tan masiva puede ser una estrella?.
Estimaciones hechas desde la distancia, tomando en cuenta su brillo y los modelos estándares solares, han arrojado como resultado que en el cumulo abierto Pismis 24 existe una estrella con una masa 200 veces mayor que la de nuestro Sol, lo que establece un record.

Esta estrella es el objeto mas brillante localizado justo a la derecha enfrente de la nube de gas, en la imagen anexa.

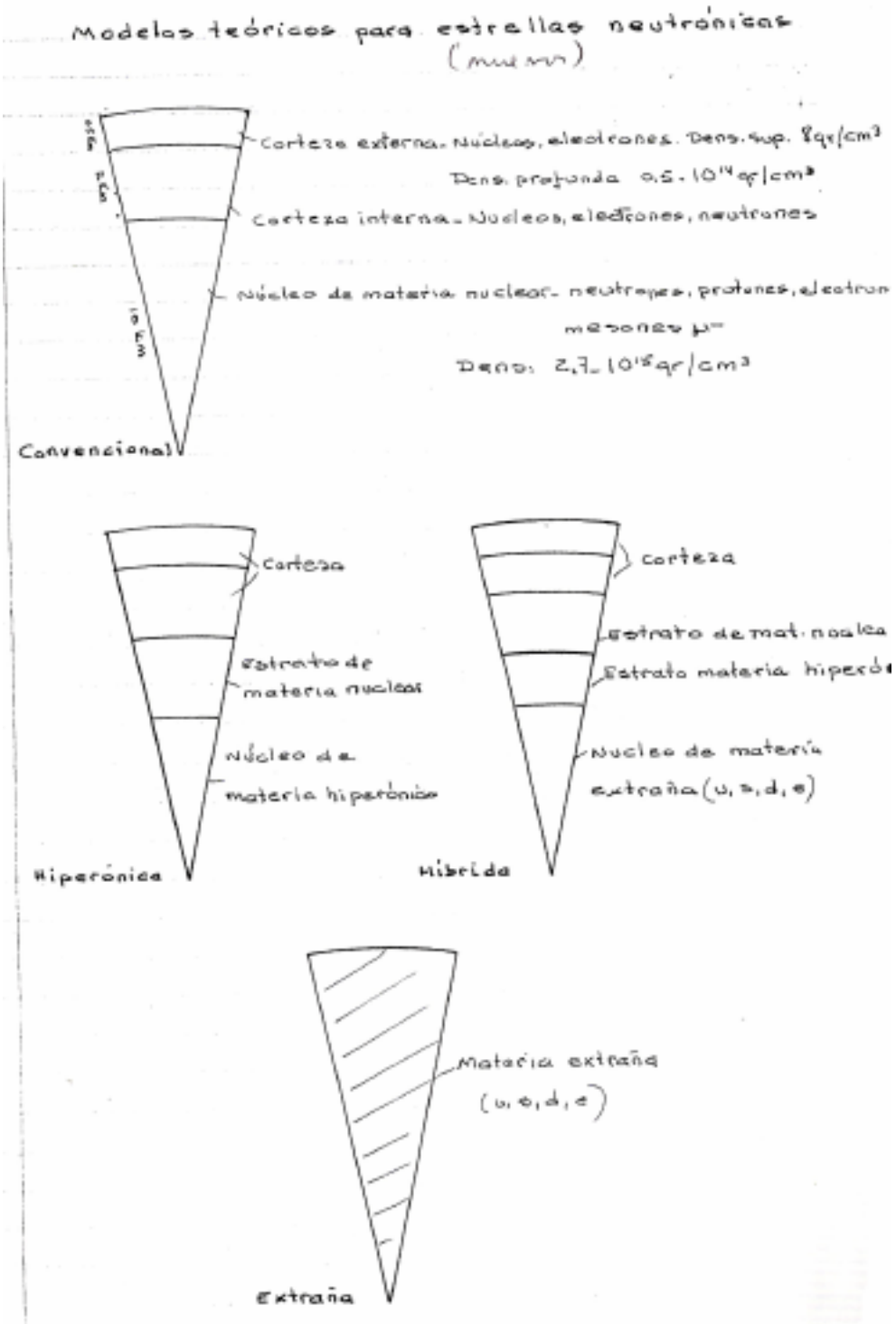
Las tomas cercanas tomadas recientemente por el Telescopio Espacial HUBBLE sin embargo, muestran que Pismis 24-1 deriva su brillante luminosidad no de una estrella solitaria sino de tres.

Estas estrellas tendrían un peso cercano a las 100 masas solares, haciendo por tanto que estas sean las estrellas mas masivas detectadas hasta el momento.

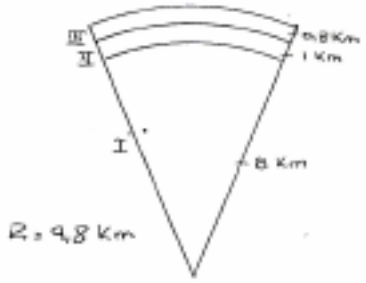
En la Imagen (hacia la izquierda), las estrellas se están formando en la asociada nebulosa de emisión NGC 6357, incluyendo algunas que parecen explotar e iluminan este espectacular "capullo".

credito: NASA, ESA and J. M. Apellániz (IAA, Spain).

FOTOCOPIAS:

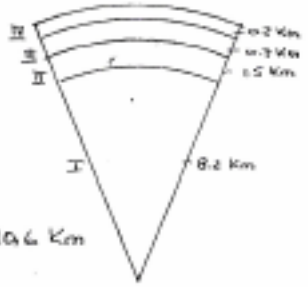

Modelos teóricos para estrellas neutrónicas
Corteza externa. Núcleos, electrones. Dens. sup. 8gr/cm³
Dens. profunda 0.5.10¹⁴ gr/cm³
Corteza interna. Nucleos, electrones, neutrones
Núcleo de materia nuclear. neutrones, protones, electron
mesones μ⁻
Dens: 2,7.10¹⁵gr/cm³
Convencional
Corteza
Estrato de materia nuclear
Núcleo de materia hiperónica
Hiperónica
Corteza
Estrato de mat. nuclea
Estrato materia hiperó
Nucleo de materia extraña (u, s, d, e)
Hibrida
Materia extraña (u, e, d, e)
Extraña

Modelos para estrellas neutrónicas (viejos)



R = 9,8 Km

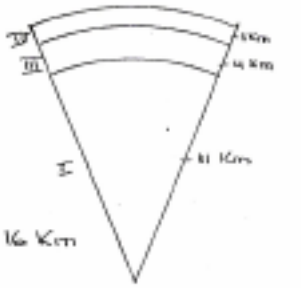
I. Nucleo interno
II Nucleo
III Corteza



R = 10.6 Km

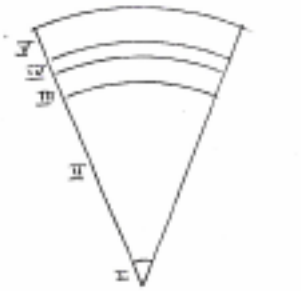
I. Nucleo interno
II Nucleo
IV Corteza interna
III Corteza externa

Nucleo interno. Condensado piónico
Nucleo. Neutrones y prot. superfluidos. Electrones
Corteza interna. Nucleos, electrones y neutrones superfluidos
Corteza externa. Nucleos y electrones



R = 16 Km

I Nucleo
III Corteza interna
IV Corteza externa



I. Nucleo solido
II Líquido neutrónico. Dens. $6 \cdot 10^{14}$ gr/cm³
III Corteza interna " $2,1 \cdot 10^{14}$ gr/cm³
IV Corteza externa " $4 \cdot 10^{11}$ gr/cm³
V Fotósfera " 10^7 gr/cm³

Valores promedio para estrellas neutrónicas

Masa máxima	$\sim$	2,5 - 3 masas solares
" media	$\sim$	1,4 masa solar
Radio	$\sim$	10 - 15 Km
Dens. central	$\sim$	$2,7 \cdot 10^{15}$ gr/cm^3
Veloc. de rotación		0,0015 - 8,5 ciclos/seg.
Campo magnético	$\sim$	10^{12} gauss
Temperatura	$\leq$	$5 \cdot 10^6$ K

DIEZ:

NOVAS

En 1572, Tycho Brae escribe 'De Nova Stella', dando cuenta de la aparición de una estrella en el cielo. Recién en 1901 se tiene un nuevo registro de una nova. Las novas se ven, en promedio, a razón de una cada 9/10 años, aunque ésa no sea la frecuencia real en que se producen (el polvo del plano central de la Galaxia dificulta la observación de un 20% del Universo).
En ausencia de polvo interestelar, una Nova puede verse a 25.000 AL. El polvo tapa el 90% de las Novas que se dan en nuestra Galaxia.
En una galaxia típica aparecen unas 25 Novas por año (esto se deduce de la observación de las galaxias vecinas).
En promedio, las estrellas que se transforman en Nova tienen una magnitud de 3,1 y son de las clases (espectrales) O, B y A. Así, son estrellas de bajo brillo pero con altas temperaturas.

Variación del brillo: Se estudia mediante la confección de las 'curvas de brillo' (en un sistema de coordenadas se colocan en las ordenadas los brillos en magnitud creciente de abajo hacia arriba y en las abcisas el tiempo). Puede verse entonces el brusco aumento de magnitud que significa una Nova, por lo que se la considera un fenómeno explosivo que aumenta de 7 a 9,5 magnitudes en 3 ó 4 días, llega a un máximo (donde puede quedar estabilizada un tiempo) y luego comienza a descender, prímero rápido y luego más lentamente (con pequeñas fluctuaciones). En algunos casos el brillo llega a aumentar 13 magnitudes, en promedio llega a unas 11 magnitudes (o sea que el brillo inicial aumenta en un factor de 150.000).

Este aumento de brillo es acompañado de expulsión de materia (a veces se ve el gas emitido por la Nova que se expande de manera gradual y uniforme, otras veces se lo ve en forma de dos chorros opuestos, otras en forma de burbujas o de aros, sin comprenderse todavía a qué fenómenos se debe las diferentes formas de expulsión).

Las fotografías tomadas luego del estallido de una Nova muestran que en ése lugar queda una estrella de igual tipo que la que había anteriormente. En 1924, estudiando una Nova, se descubre que formaba parte de un sistema doble. Esto lleva a estudiar los registros y se llega a la conclusión que 7 de cada 10 explosiones de Nova eran parte de sistemas dobles. Así, una Nova es una estrella donde se produce un proceso que expulsa materia y que hace que aumente su brillo y que, al terminar, deja la estrella tal como estaba antes.

Al principio se las clasificó en Lentas y Rápidas de acuerdo a las curvas de brillo. Pero la evolución del brillo es tan variada que obligó a agregar sub-tipos, clasificándolas entonces de la siguiente manera:

Na	muy rápidas	hasta mg. –8
	rápidas	hasta mg. –7,2
	medianas	hasta mg. –6,5

Estas Novas disminuyen unas 3 magnitudes en 100 días.

Nb lentas hasta –5,4
Disminuyen unas 3 magnitudes en 200 días.

Nc muy lentas
Disminuyen 3 magnitudes en 1000 días.

Nd Novas recurrentes (variables explosivas)

Ne Novas enanas (novitas)

Al mismo tiempo que se traza la curva de brillo se toma el espectro de la estrella, y el cruce de estos datos permite verificar no sólo el tipo de material que la compone sino también que pasa en su interior.
Cuando la curva llega al máximo de brillo, el espectro es de absorción, que se caracteriza por ser contínuo con líneas obscuras (las líneas de absorción). Este espectro es más intenso en el violeta para las Novas Na y en el infrarrojo para las Novas Nc, lo que habla de la intensidad de la energía implicada en cada caso.
Las líneas del espectro aparecen ensanchadas. Esto se da porque la materia es expulsada en todas direcciones. Debido a la materia que se aleja (velocidad radial positiva) el espectro se corre hacia el rojo. Debido a la materia que se acerca (velocidad radial negativa) el espectro se corre al azul. Gracias a la medida y comparación del ensanchamiento de las líneas espectrales se puede saber la velocidad a la cual es expulsada la materia (la cual varía entre 50 y 4.000 Km/seg). Esto es lo que produce que la línea se ensanche hacia un lado y hacia el otro.

Al disminuír el brillo se puede ver que las líneas de absorción de los distintos elementos empiezaan a tener velocidades diferentes. Esto es porque la explosión expulsa la materia en forma caótica y no ordenada.
Además, empiezan a aparecer líneas brillantes (también ensanchadas) transformando el espectro en uno de absorción superpuesto a otro de emisión. Estas líneas corresponden, generalmente, al He_1, C_2, Ne. O sea, elementos pesados. Esto significa que también estamos recibiendo el espectro de la materia expulsada por la estrella (si el espectro es de emisión es gas a baja densidad y sometido a una alta energía que lo ioniza).
A esto se le agrega una línea obscura, de absorción, que corresponde a la luz de la estrella que atraviesa la materia expulsada que se dirige hacia nosotros.

Cuando el brillo está por decaer totalmente comienzan a desaparecer las líneas en el orden inverso en que aparecieron y, por último, el espectro vuelve a ser igual al anterior a la Nova.

Una Nova expulsa entre 0,01 y 0,001 (entre un centésimo y un milésimo) de la materia estelar, o sea que no produce un importante menoscabo en la estrella (por esto se mantiene igual que antes de la Nova).
Los espectros de la materia expulsada son ricos en elementos pesados. Así, se trata de estrellas avanzadas en la evolución.

Con todo esto se puede proponer un modelo de lo que es una Nova y de cuando sucede.

MODELO PARA UNA NOVA: Se trata de un sistema binario compacto. Dos estrellas muy próximas donde una de ellas es de la Secuencia Principal y la otra es una Enana Blanca. La de la Sec.Principal evoluciona, aumentando así de diámetro y transformándose en Gigante Roja. Al llegar a este punto su exterior se acerca a la EB y comienza a transferirle materia (donde la mayoría es He). Esta materia no cae directamente sobre la EB, ya que ambas están girando. La materia, que es cedida por la estrella de la Sec.Principal a través del 'punto de Lagrange 1', va formando un disco de acreción alrededor de la EB, cayendo, entonces sí, en espiral hacia ella.

Esta caída aumenta la fricción entre las partículas que se acercan cada vez más, aumentando la temperatura de las mismas.
La atmósfera de la EB ya está aplastada por el potencial gravitatorio de la estrella. La materia que cae sobre ella aumenta cada vez mas la temperatura y al llegar a los 18.000 K se encienden las reacciones nucleares del H. En una estrella normal esto obligaría a que la estrella se expandiera, pero como la EB está formada por materia degenerada no puede expandirse ni achicarse demasiado. Así, la EB sólo puede calentarse cada vez más, hasta que llega un momento en que se libera toda esa energía arrastrando tras sí parte de la atmósfera de 100 m de la EB (C, O, Ne).
Entonces, lo que estalla y produce el efecto Nova es la atmósfera de la EB y no la estrella en sí misma (es por esto que luego de una Nova siempre puede verse una estrella igual a la que había anteriormente).

Según este modelo el estallido debería ser cíclico, pero observando las Novas recurrentes se ve que a mayor brillo más largo es el período entre dos explosiones. Las de más alto brillo son las Novas comunes, por lo que es de esperar que todas las Novas estallen periódicamente, sólo que con un período muy largo. Se supone que una Nova común debe acumular materia por cientos o miles de años antes de producir un estallido.

Las Novas enanas son sistemas binarios compactos con un traslado de materia pequeño, donde el estallido no ocurriría en la estrella sino en el disco de acreción. Al ser poca la materia que se traspasa de una estrella a otra hay poca fricción, y no se llegaría a los 5.000K, por lo que el disco de acreción gira a poca velocidad y la materia cae de a poco en la EB. La energía se va acumulando muy despacio, y en determinado momento ocurren pequeños estallidos (como sucede con la combustión espontánea en los bosques, donde aparecen incendios por sí solos, por acumulación de energía en el sistema) y se dispara un brote de energía que se acepta como una nova.

Por último, con detectores de alta definición ubicados fuera de la atmósfera de la Tierra se pueden observar lo que se llama Novas de rayos X, ya que sólo se las ve en dicha frecuencia. Esto puede ser porque una estrella gira alrededor de un agujero negro al que le cede materia, dicha materia formaría un disco de acreción alrededor del agujero. Las diferentes velocidades entre la materia que forman el disco (mas lenta en el exterior, mas rápida cuanto más cercana al agujero negro) es tan aguda que produce una fricción impresionante entre las partículas, por lo cual cada tanto se produce una emisión de energía desde el disco de acreción en forma de Rayos X.

FOTOCOPIAS:

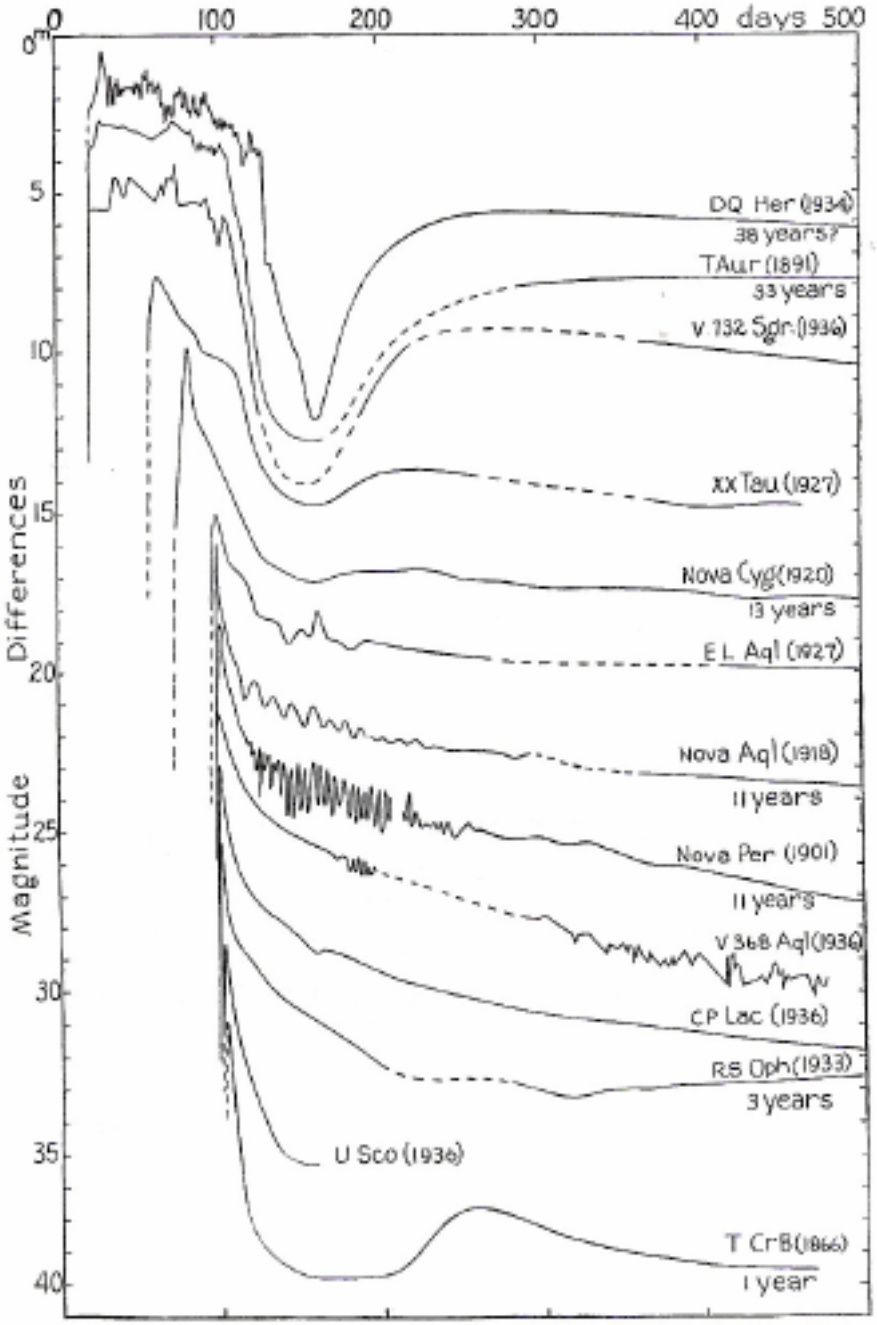
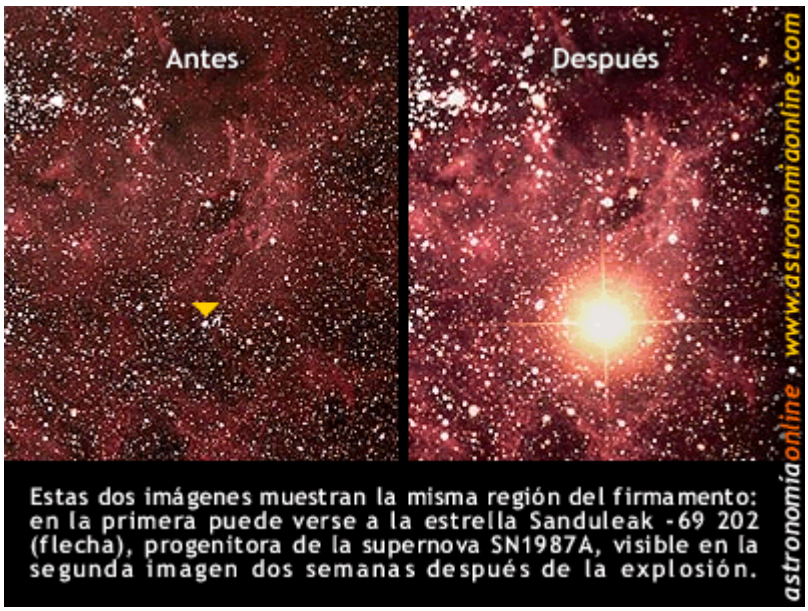


Fig. 54.—For descriptive legend see opposite page.

ONCE: SUPERNOVAS



Puede definirse una Supernova como una estrella que aumenta su brillo en forma explosiva alcanzando una luminosidad comparable a la de la galaxia donde ha estallado.
Se tiene conocimiento de unas 14 Supernovas en la Vía Láctea en los últimos 2000 años. De estas sólo quedan constancias escritas de 3 (año 1054, constelación de Tauro, informada por astrónomos chinos – año 1572, constelación de Casiopea, consignada por Tycho Brae – año 1604, constelación de Ofiuco, consignada por Kepler). El resto ha sido detectado por sus restos gaseosos.

En una galaxia promedio estallan aproximadamente entre 50 y 100 Supernovas por siglo.
El primero que se dedicó al estudio de las Supernovas fue Minkowski, las dividió en dos tipos (T1 y T2). Luego se le agregó un tercer tipo (actualmente continúa la subdivisión de los tipos en sub-tipos, aunque los mismos aún no están claros). Así, tenemos Supernovas Tipo 1a, Tipo 1b, Tipo 2.

Supernova Tipo 1a: Se incluyen en este tipo todas aquellas Supernovas caracterizadas por el parecido entre sus estallidos (son muy similares – homogéneos – entre sí). Las curvas de luz de este tipo aumentan unas 20 magnitudes adquiriendo su máximo en 2 – 5 semanas, llegando a las magnitudes –14 y hasta –20.
La curva comienza a caer con mucha velocidad al principio (disminuyendo unas 3 magnitudes en 20/22 días) para luego caer mas lentamente. Los estallidos mas brillantes y mas violentos son los que duran mas tiempo. La luminosidad promedio de este tipo de Supernova está bastante bien calculada, por lo que pueden usarse como referencia para tomar la distancia a la galaxia donde ha estallado.
Siempre se encienden en galaxias elípticas, las cuales se sabe que están formadas por estrellas ya avanzadas en su evolución (estrellas viejas, con materiales pesados). Así, estas Supernovas tienen la particularidad que en su espectro no se encuentran las líneas que corresponden al H y al He y sí las de los elementos pesados (C, O, Cadmio, Cobalto).

Modelo Tipo 1a: Dos estrellas, una de la secuencia principal y una compañera enana blanca. La de la secuencia principal se transforma en gigante roja y vuelca su atmósfera en la enana blanca, esta última se encuentra entonces recibiendo muchísimo H. Como está formada por materia degenerada no puede comprimirse (ni agrandar su diámetro), por lo que el peso agregado hace que aumente la temperatura en su centro (hasta unos 4000 K), comenzando entonces a fusionarse el C. Este proceso produce muchísima energía.
La inercia de la materia degenerada de la enana blanca hace que el aumento de temperatura se transmita en forma de ondas sub-sónicas (como ondas de calor) hacia el exterior de la estrella. En su camino, estas ondas van produciendo, por fusión, elementos pesados, pero al llegar al último 7% de la estrella encuentran menor resitencia a su avance (por haber menor cantidad de materia) por lo que se transforman en ondas ultra-sónicas. Estas ondas ultrasónicas producen una nucleosíntesis explosiva, convirtiendo a la totalidad de la estrella en una bomba nuclear (según los cálculos, el 40 % de la masa de la enana blanca se transforma en $Níquel_{56}$. Toda la materia de la estrella es entonces expulsada a velocidades de entre 6.000 a 25.000 Km/seg., quedando sólo gas donde antes estaba la enana blanca. Por esto al Tipo 1a se lo llama Supernovas termonucleares.

El resto de gas llega a quedar brillando durante un año, pero no por excitación (o sea, por recibir energía proveniente de una estrella) sino porque el gas está formado por $Niquel_{56}$ que es altamente radioactivo y se está transformando en $Cobalto_{56}$. Así, brilla por desintegración radioactiva.

TIPOS DE ESTALLIDO: Dos clases:

Deflagración: De deflagrar, arder súbitamente con llama y sin explosión.

Detonación: Explosión brusca capaz de iniciar la de un explosivo relativamente estable.

Tipo 1b: Se detecta en ellas gran cantidad de H y He. Todavía no se sabe bien cómo estan formadas las estrellas, no hay un modelo. Se especula con una estrella solitaria rica en He o un sistema doble donde ambas estrellas tienen una masa de entre 20 y 50 masas solares.

Tipo 2: Se caracterizan porque la curva de brillo no se puede determinar bien. Alcanzan una magnitud 16. Esto es porque la mayor parte del brillo se emite en frecuencias de alta energía, por lo que no son Supernovas ópticas. La curva cae mas lentamente y dura mas tiempo y la luminosidad es menor. O sea, hay una explosión mucho mas violenta que en los otros tipos, pero menos visible.

El lugar donde se producen las reacciones nucleares en una estrella tiene un diámetro de unos 3000 Km (centro). Con respecto a la materia (o sea, exceptuando la energía que se genera y que se irradia), se pueden mencionar las siguientes reacciones:

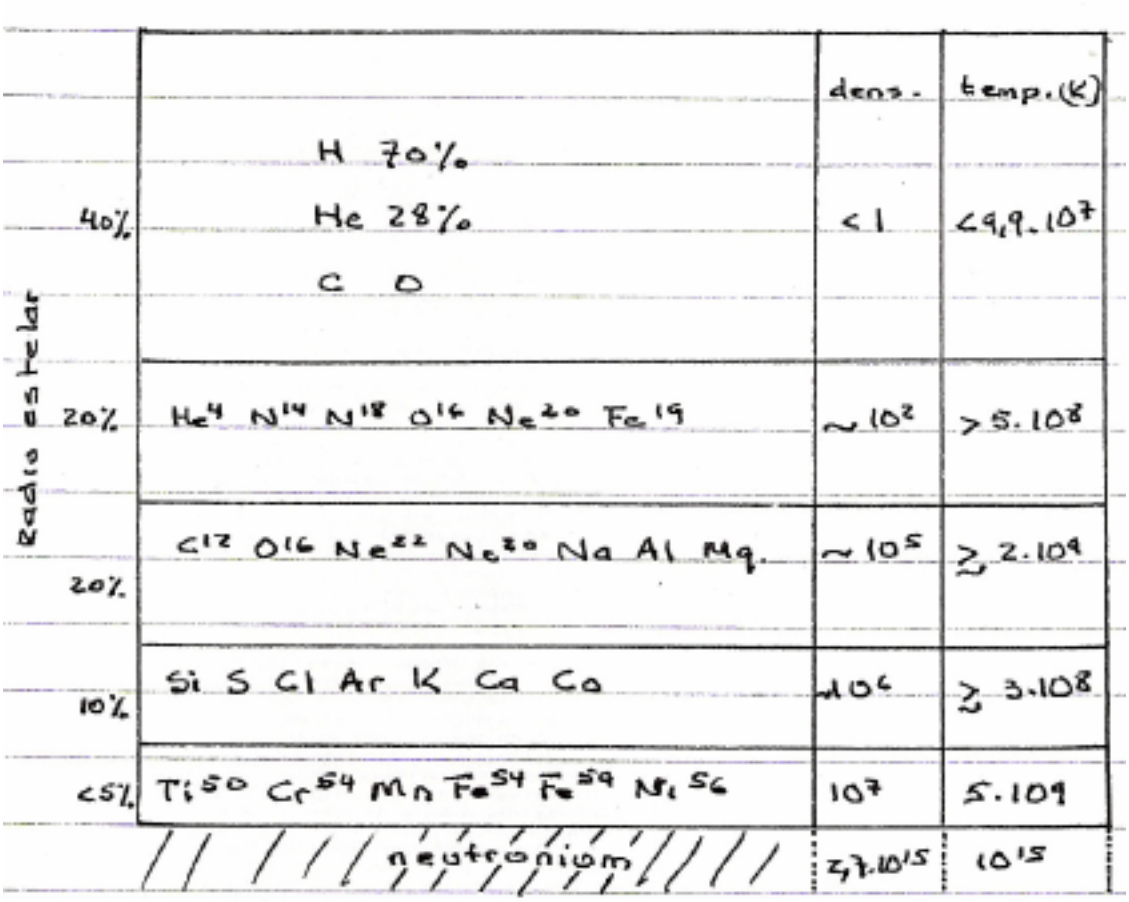
$4H$			He
$3He_4$			C_{12}
C_{12}	+	He_4	O_{16}
O_{16}	+	He_4	Ne_{20} (neón)
Ne_{20}	+	He_4	Mg_{24} (magnesio)
Mg_{24}	+	He_4	Si_{28} (silicio)
Si_{28}	+	He_4	S_{32} (azufre)
S_{32}	+	He_4	Ar_{36} (arsénico)
Ar_{36}	+	He_4	Co_{40} (cobalto)

Estas son las reacciones llamadas Alfa (o múltiplos de 4). (Ojo que hay mas).
Como los elementos pesados se producen luego de los mas livianos se va produciendo una estratificación de la estrella con los elementos pesados hacia el centro. Esta cadena de reacciones termina en el Fe (hierro).
Este es el modelo para una estrella formada sólo por H (modelo matemático) pero no se da en la realidad ya que las estrellas tienen, desde su nacimiento, elementos pesados. Las únicas estrellas que no tenían elementos pesados son las primigenias (primeras estrellas formadas en el universo). Así, hay estrellas donde, de acuerdo a su masa, se dan otro tipo de reacciones. Para formar elementos mas pesados se necesita cada vez mas energía, y esta energía se da en el estallido de una Supernova.

Mientras una estrella consume H y He los mecanismos de radiación y convección son suficientes para enfriarlas (evacuar la energía producida por las reacciones termonucleares). Pero en una estrella que consume elementos mas pesados estos mecanismos no alcanzan, la energía es cada vez mayor, por lo que aparece entonces la formación de neutrinos. Como los neutrinos no interactúan con la materia la atraviesan llevandose así la energía, pero se llevan mas energía de la que estrella perdería por radiación. En los momentos previos al estallido de una Supernova el 99 % de la energía producida por la estrella es transportada al exterior de la misma a través de los neutrinos.

En las supernovas Tipo 1b y Tipo 2 las estrellas colapsan al recibir materia, por lo que el mecanismo es predominantemente gravitatorio y no termonuclear.

FOTOCOPIAS:



elemento	10 masas. sol	20 masas. sol
He	10^6 años	500.000 años
C	10.000 años	600 años
Ne	12 años	1 año
O	4 años	6 meses
Si	~ 7 días	1 día
Fe	-	100 segundos

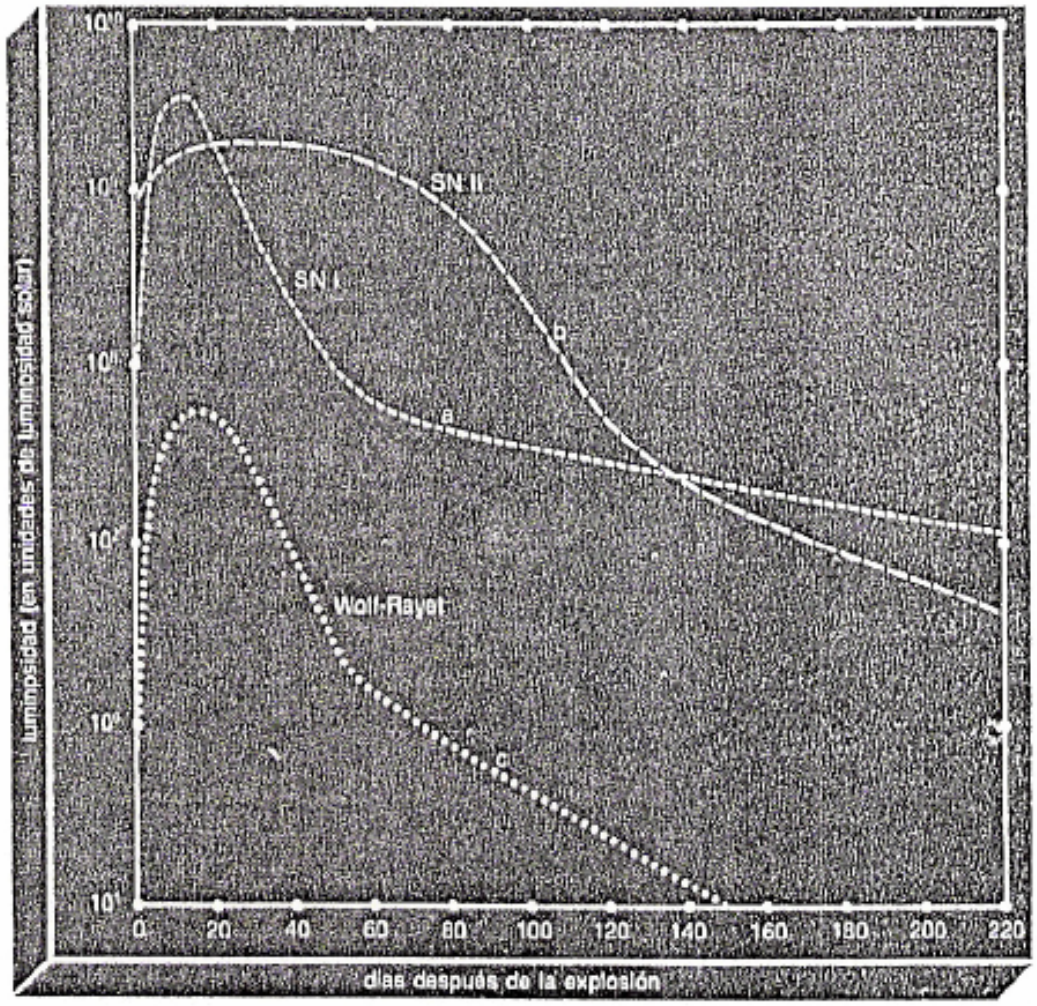


Figura 2. La variación de la luminosidad con el tiempo, o curva de luz, explica la diferenciación de las supernovas en los tipos I y II. En el tipo I (a), la luminosidad aumenta continuamente durante tres semanas, cae durante un mes y luego declina durante más de un año. En el tipo II (b), la luminosidad se mantiene durante un mes y luego disminuye progresivamente. En el nuevo tipo (explosión de una estrella de Wolf-Rayet) (c), la curva de luz se caracteriza por su débil luminosidad y su brevedad.

Curvas de luz según el tipo de super nova.

DOCE:

SUPERNOVAS TIPO 2: Se comportan de manera totalmente diferente de las Supernovas Tipo 1A (las supernovas 'termonucleares').

Todos los procesos físicos que preparan el estallido de una Supernova Tipo 2 se llevan a cabo en el núcleo de la estrella. Las envolturas estelares no intervienen para nada, reaccionan secundariamente sólo al final, produciéndose en ellas el estallido. El núcleo de la estrella no estalla, sólo revierte la dirección de la energía gravitatoria (vectores hacia el centro de la estrella).
La síntesis de los elementos que se va dando en el interior del núcleo va agotando la existencia de los mismos. Cada vez que se agota la existencia de uno de los elementos en el núcleo la estrella se contrae, lo que aumenta la temperatura del núcleo. De esta manera la estrella se va estratificando (los elementos se van disponiendo en capas). Los elementos precursores del Fe son los elementos silíceos. Cuando estos se agotan el núcleo de la estrella se contrae y comienza la fusión en capas en el espacio adyacente al núcleo.
En ese momento el núcleo está formado por Fe_{57} (un isótopo del Fe). Cuando la provisión de silicatos se agota (lo que sucede muy rapidamente, en unos 100 seg. para una estrella de 20 masas solares) la presión interna de la estrella cae, la estrella se contrae y aumenta la temperatura en el núcleo.

Pero los núcleos de Fe_{57} se caracterizan por su estabilidad, porque la energía de ligadura del núcleo de Fe_{57} es muy grande (fuerza nuclear fuerte = ligadura del núcleo). Esto impide que los núcleos de Fe_{57} se fusionen o se fisionen (para que esto suceda es necesaria muchísima mas energía).

El núcleo tiene mas o menos el 30 % del volúmen total de la estrella (es una esfera de aproximadamente 3000 Km de radio). Cuando se agotan los elementos silíceos la temperatura en el núcleo aumenta a unos 480 millones de grados K. Cuando la energía es tan grande comienzan a materializarse partículas y antipartículas, las que se aniquilan mutuamente. De la aniquilación surgen fotones de alta frecuencia (fotones gamma duros, que transportan mucha energía). Esta energía así producida es absorbida por los núcleos de Fe_{57} en lo que se llama una reacción endotérmica (adiabática, transformación termodinámica de un sistema donde no hay intercambio de energía con el medio).
De repente el núcleo queda sin capacidad de resistir el peso de las envolturas exteriores (ya que absorbe la energía y no la emite, recordar que lo sostiene a las capas exteriores de la estrella es la energía emitida por el núcleo), el núcleo se transforma entonces en un gran refrigerador que absorbe energía y no la emite. Ante esto y al no poder sostenerse el núcleo de la estrella se derrumba en 0,04 seg. A esto se lo llama 'colapso adiabático'. De aquí que el Fe y sus elementos afines son los últimos que se producen en la estrella.

Este colapso del núcleo estelar se estudia por medio de simulaciones en computadora, en las cuales se varían los datos de la 'ecuación de estado de la materia' (densidad, presión, temperatura).

Modelo para la explosión de una Supernova Tipo 2: El colapso de la estrella dura 0,04 seg. Si se lo examina como si fuera en cámara lenta se pueden distinguir los siguientes procesos:

a) A medida que la materia cae aumenta la densidad, la materia se va comprimiendo. Al llegar a una densidad ρ (ro) de 5 x 10^{11} grs.(5 por 10 a la 11 gramos) los neutrinos que se producen empiezan , parcialmente, a interactuar con la materia (ya no pueden atravesarla fácilmente). O sea que la materia se va opacando para los neutrinos. Cuando la densidad llega a 2,7 x 10^{15} grs. (2,7 por 10 a la 15 grs.) esta interacción se acentúa. (El neutrino es una partícula que se caracteriza por producirse sólo en presencia de altas energías, es como un pequeño neutrón, con una pequeñísima masa, que puede atravesar casi todo tipo de materia sin interactuar con ella, salvo cuando la densidad es muy grande). Al no poder escapar fácilmente, los neutrinos se van concentrando, almacenando en el núcleo de la estrella.
b) La materia que cae (por gravedad) lo hae a gran velocidad y la esfera de 3000 Km. de radio se comprime a la velocidad de 75.000/90.000 Km/seg. La materia cae en bloque porque está en fase de neutronización (la materia neutrónica es un superfluído, carece de viscosidad)
c) Esta materia que cae ocupa cada vez menos volúmen. En ella se producen diversas modificaciones a medida que aumenta la densidad (ver materia neutrónica, proceso de neutronización).
d) Cuando la materia llega a la 'densidad nuclear' (2,7 x 10^{15} grs., materia neutrónica) la caída se frena de golpe (por la resistencia que opone la fuerza nuclear fuerte).

En el momento en que el 40 % mas interior del núcleo ya se ha transformado en materia neutrónica la caída del restante 60 % del núcleo hace ceder un poco al interior (se comprime un poco mas), pero en 0,002 seg. el interior se recupera en forma elástica (como un resorte). Esto produce una emisión de energía hacia el exterior del núcleo contra la energía del resto del material en caída, lo que provoca ondas sonoras de acreción. Estas ondas sonoras de acreción se dirigen al exterior con igual velocidad que cae la materia hacia el interior (75000/90000 Km/seg). (se habla de ondas sonoras porque tienen características de ondas de compresión, y de acreción porque se van sumando unas a otras). Estas ondas se detienen en el borde el núcleo empequeñecido (de 3000 Km de radio pasa a tener 10 Km de radio) (el núcleo tiene todas las características de una estrella de neutrones).

El borde de la esfera donde se detiene la onda sonora se llama 'punto sónico', y el momento en que se produce la recuperación elástica del núcleo se llama 'punto de máximo quebranto'. La onda sonora tarda unos 0,02 seg. en llegar del punto de máximo quebranto al punto sónico. Pero una vez que ha llegado continúan llegando ondas sonoras sumándole su energía (ondas de acreción). Esto empuza a la onda sonora la que se dispara en forma de onda de choque abandonando el núcleo a 50.000 Km/seg., abriéndose así paso en las envolturas estelares.

Las ondas sonoras no producen cambios permanentes en el medio en el que se desplazan, en cambio las ondas de choque si lo hacen, ya que se abren paso con tanta velocidad que modifican la ecuación de estado de la materia, elevando la temperatura a 5.000 millones de K.

Este súbito aumento de la temperatura hace que todos los elementos que componen las envolturas estelares se fusionen de golpe (con su correspondiente reacción y resultado en el elemento siguiente). Esta energía sí es lo suficientemente alta como para generar elementos mas pesados que el Fe (se calcula que la onda de choque atraviesa toda la estrella en 2 horas). Toda la estrella se enciende en un lapso muy corto, de golpe. Estas reacciones nucleares liberan energía, y esta energía es la que compone el estallido de la Supernova.

Así,
0,04 seg. dura la caída
0,002 tarda la recuperación en forma elástica del núcleo
0,02 tarda la onda sonora en llegar al punto sónico
0,001 es la duración del punto sónico de manera estable

0,063 es el tiempo que tarda la onda de choque hasta salir disparada

Así, el O produce Si (silício) y S (azufre),
El Si y S producen Ni_{56} y Ni_{57}
El $Ni_{56/57}$ procuce $Co_{56/57}$
El Co_{56} produce Fe_{56}
El Co_{57} produce Fe_{57}

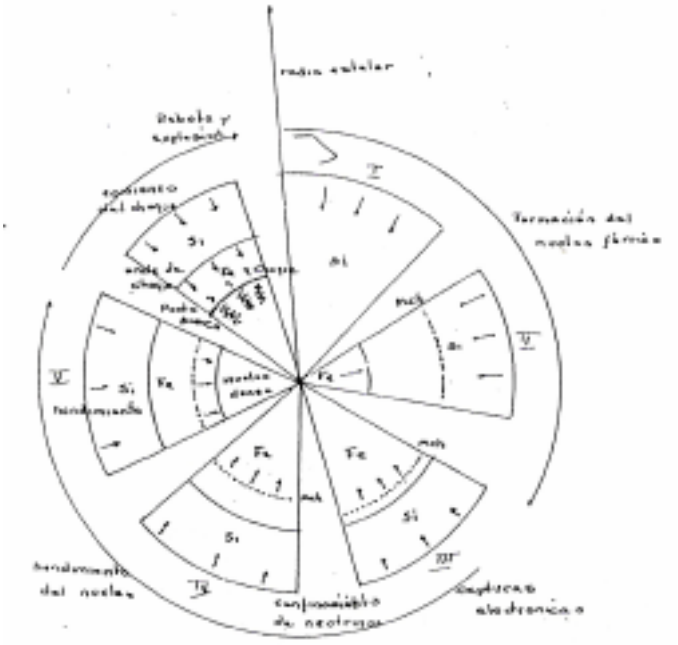
Estos elementos y otros mas que se producen en ese momento son radioactivos, o sea que se descomponen en otros elementos. Estudiando la radiación recibida de una Supernova se puede identificar la descomposición de los diferentes elementos.

En las Supernovas Tipo 1A teníamos que las curvas de brillo son muy similares, en cambio, en las Supernovas Tipo 2 las curvas ascendentes son poco claras y mal delimitadas, ya que al estallar su luz se ve poco o nada. Esto es porque la masa de materia que se expulsa es tan grande que vela la luz de la Supernova, además esta materia expulsada brilla mucho ya que lleva en sí misma su propia fuente de energía, porque está formada por materia radioactiva en proceso de desintegración (desintegración que produce energía en forma de fotones, los cuales excitan a los átomos de la nube en dispersión).

OTRO MODELO: Otra teoría piensa que el golpe de la materia que cae sobre el núcleo denso lo hace vibrar produciendo un estallido asimétrico, por lo que la estrella de neutrones sale disparada hacia atrás (se han encontrado púlsares con un movimiento de desplazamiento en el espacio de 1000 Km/seg).

Así, la diferencia entre las Supernovas Tipo 1A y las Tipo 2 está dada porque la Tipo 1A es una explosión y la Tipo 2 es una implosión, donde el núcleo revierte la dirección de la energía (en forma de ondas de choque).

FOTOCOPIAS:



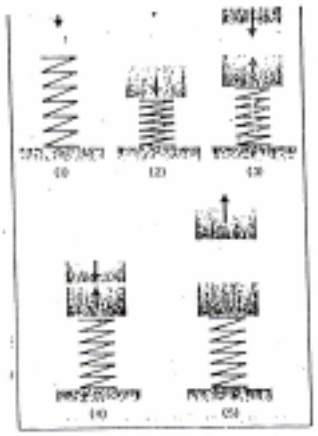


Figura 4. El paso del hundimiento de una estrella a su explosión es uno de los puntos más cruciales de la descripción de las supernovas. Puede esquematizarse sumariamente como la caída de dos bolsillas (las capas de la estrella) sobre un muelle (el núcleo). Las capas en forma de cebollas de la estrella caen hacia el centro (en 1) y comprimen el núcleo (en 2). Las capas más exteriores siguen cayendo mientras la trayectoria [incomprensible]

Supernova tipo 2.

TRECE: SUPERNOVAS

La detención de la onda sonora en el punto sónico dura un milésimo de segundo. Esto se da hasta que la acumulación de la energía de las ondas sonoras (que siguen llegando) forma la onda de choque que se dispara sobre las envolturas estelares. Otro factor para que el punto sónico dure poco es la acción de los neutrinos. Del comportamiento de los neutrinos dependerá que la explosión de una Supernova pueda tener una de dos consecuencias distintas.

Los procesos que obran con altas energías se caracterizan por materializar gran cantidad de neutrinos (los que, a su vez, son portadores de alta energía). Los neutrinos se desplazan casi a la velocidad de la luz debido a su escasísima masa.
Cuando los neutrinos aparecen gracias a energía gravitatoria lo hacen en un ambiente cada vez mas denso (por el colapso de la materia de una estrella, gracias a la energía gravitatoria, la materia adquiere mayor densidad lo que a su vez provoca la aceleración del colapso y la elevación de la energía gravitatoria). Al aumentar la densidad de la materia los neutrinos empiezan a interaccionar con ella (hasta ese momento escapaban libremente hacia el espacio exterior atravesando las diversas capas estelares). Se calcula que desde que se materializa un neutrino hasta que puede abandonar el núcleo denso de la Supernova pasa algo menos de 1 seg. (o sea que tiene cierta dificultad para abandonar el núcleo denso cuyo radio es de 10 Km – recordar que el neutrino se mueve casi a la velocidad de la luz).
A esto se lo llama ‘confinamiento de los neutrinos’, e implica que también se confina la energía que ellos transportan. El núcleo denso (densidad neutrónica) adquiere entonces un gran poder radiactivo (o sea, una gran capacidad de emitir radiación – por la alta energía – estimada como superior a la emitida por todo el Universo visible).

A partir de aquí pueden pasar dos cosas diferentes (los modelos arrojan dos resultados posibles):

A) La energía confinada puede ser cedida al medio (lo que equilvadría a un aumento de temperatura en el mismo). Esta energía sumada a la de las ondas sonoras dispara la onda de choque. A esto se lo llama ‘reactivación de la onda de choque’.
B) Puede ser que el confinamiento dure mas tiempo (entre 3 y 5 seg.). Esto puede darse porque el núcleo tiene una masa de 3 ó mas masas solares, por lo que tanto su densidad como su poder gravitacional serán mucho mayor. En este caso la energía de los neutrinos irradiados hacia el exterior no puede soportar el peso de la estrella. Entonces toma el control la gravitación y aplasta la materia neutrónica venciendo la resistencia opuesta por la fuerza nuclear fuerte. Por esto, en una centésima de segundo se forma un agujero negro en el interior de la estrella (en el lugar que ocupaba antes el núcleo denso) desapareciendo esa porción de materia del universo (visible). Alrededor del agujero negro se forma un disco de acreción desde el cual, y siguiendo las líneas del campo magnético, se emiten dos chorros de partículas con una velocidad de 99,99 % la velocidad de la luz. Si estos chorros estan colimados (o sea, que la apertura angular de los mismos no supera los 3°) atraviesan la estrella, chocando con la materia interestelar. El resultado de este choque es una gran fulguración de radiación gamma.

Si la Tierra está en la línea de visión de uno de estos chorros se denomina Hipernova al fenómeno nova. Pero si la abertura de colimación es grande (la abertura angular) la onda de choque de los chorros cumple igual función que la onda de choque de la Supernova. Atraviesa las capas exteriores de la estrella produciendo nucleosíntesis de elementos pesados y luego la gran explosión.

Los neutrinos se llevan el 99 % de la energía de toda la estrella inmediatamente antes del estallido. La energía implicada es tanta que es 300 veces mayor que la energía cinética de la materia expulsada por la Supernova (la masa de materia expulsada es de alrededor de 10 masas solares y la velocidad que asume esta masa oscila entre 16.000 y 35.000 Km/seg.; sin embargo, los neutrinos se llevan 300 veces mas energía que la masa) y 30.000 veces mayor que la energía del destello lumínico (si el destello luminoso puede ser unas 40 veces mas potente que la luminosidad de 200.000 estrellas, los neutrinos se llevan 30.000 veces mas energía). En un segundo, el estallido expulsa tanta energía como la que produciría el Sol durante 10.000 millones de años (toda su vida).

Los destellos explosivos de radiación gamma pueden ser cortos o largos. Los cortos duran unos 2 segundos y pueden darse gracias a la energía liberada por el choque de dos estrellas de neutrones que giraban en torno a un punto de masa, o por absorción de una estrella de neutrones por un agujero negro. Los largos duran unos 100 segundos.

Al formarse la Vía Láctea el Universo era mas joven, mas pequeño y, por lo tanto, mucho mas denso. La mayor densidad podría permitir la contracción de nuebes de gas mucho mayores que en la actualidad, permitiendo así la formación de estrellas con una masa de 200/300 masas solares. Estas estrellas serían tan grandes que durarían muy poco, liberando su energía en un gran estallido. Esto puede haber sido común en el Universo antigüo. Se estima que los procesos formadores de estrellas son proporcionales al cubo de la densidad (densidad que se designa con la letra RO, ρ).

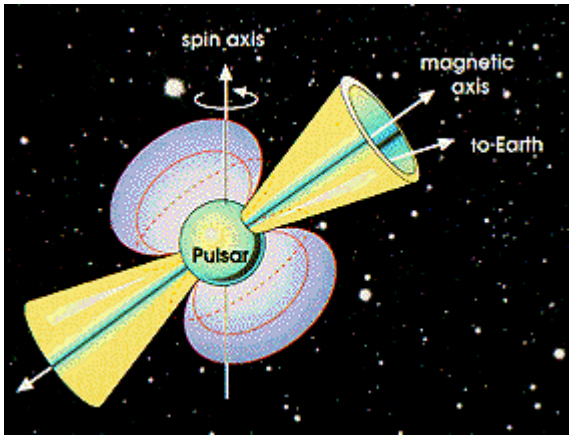
Se considera que la frecuencia de los estallidos era entonces 100 veces mayor que la actual, la densidad sería entonces unas 5 veces mayor que la actual (raíz cúbica de 100 $\cong$ 5). Actualmente estallan 2 Supernovas por siglo, por lo que en 1.000 miullones de años serían unos 10.000 estallidos. Así, desde que existe el Universo hasta ahora habrían estallado unos 100.000 millones de Supernovas.

Si una Supernova estallara a escasa distancia del Sistema Solar serían diferentes las consecuencias para el mismo si es una Supernova de estallido o una Supernova de energía colimada (chorros de materia con un ángulo no superior a los 3°).

Supernova de estallido:
A 30 parsecs (1 parsec = 3,26 AL) se vería una estrella que aumenta de brillo hasta tener el brillo de la luna llena, por lo que sería visible a medio día... y nada mas. Ese brillo se iría apagando de a poco (ver curvas de brillo).
A 10 parsecs se vería una estrella que aumenta de brillo hasta alcanzar 1.000.000 de veces el brillo de Sirio, la Tierra quedaría envuelta en un destello de luz ultravioleta 30 veces mas intenso que el que recibe actualmente del Sol, pero se estima que la capa de ozono de la atmósfera terrestre podría absorber esta dañina radiación. Por último podrían verse las masas de gas luminoso que se alejan de lo que fue la estrella. La materia expulsada, frenándose contra la materia interestelar, llegaría a la Tierra en 10.000 años. Así, el Sistema Solar se vería envuelto en una radio-nebulosa por varios siglos (plasma relativístico que emite ondas de radio). La radiación cósmica que golpea la alta atmósfera terrestre aumentaría unas 10 veces.
En este momento la radiación a nivel del suelo tiene una energía de 0,12 R/año (Roentgen), de los cuales 0,04 corresponden a la radiación cósmica y el resto a los elementos radioactivos de la propia Tierra. Al aumentar unas 10 veces se iría a 1,2 R/año, lo que podría afectar la genética de la vida.

Supernova con chorros colimados: (menos de 3° de ángulo de difusión del chorro). Si el destello dura unos 10 segundos, al llegar a la alta atmósfera disociaría las moléculas de O y N (oxígeno y nitrógeno) dejando O y N atómicos. Estos dos gases se combinan para producir NO (dióxido nitroso), el cual tiene la particularidad de destruír el ozono. Así, en unas pocas semanas desaparecía el ozono de la alta atmósfera quedando la Tierra totalmente expuesta a la radiación ultravioleta del Sol, la cual actúa sobre el ADN de las células. En 3 ó 4 meses los gases de la atmósfera se mezclarían con las partículas de agua de las nubes apareciendo así ácido nítrico, lo que daría como resultado lluvias y nevadas ácidas. Alrededor de un año después, el ácido nítrico se trasladaría por toda la atmósfera, descendiendo hacia la Tierra. Mientras tanto, sólo se restituiría por sí mismo el 20 % de la capa de ozono actual. En pocos años estos gases llegarían a la superficie terrestre contaminando el agua libre (lagos, ríos). Todo esto llevaría a la extinción de la vida en la Tierra aún cuando la Supernova se hallase a 3.000 millones de AL de ella.

CATORCE: PULSARES



Todas las señales (lumínicas, radiales, etc.) que llegan del espacio 'titilan' por interacción entre los fotones y las masas de materia dispersa que hay en el espacio.

En 1968, en la Universidad de Cambridge, se estaba investigando la interacción del viento solar con dichas masas de materia dispersa y se detectaron señales muy potentes pero intermitentes. En un primer momento se pensó que era contaminación (ruido) pero esto se dejó de lado cuando se constantó que dichas señales seguían el movimiento estelar aparente, por lo que se concluyó que no podían ser de origen terrestre. Al poco tiempo aparecieron 3 fuentes mas de señales. Ninguna de ellas parecía ser afectada por el efecto Doppler (como sería si la fuente proviniera de un planeta en órbita alrededor de una estrella).
Se las bautizó como Radio Estrellas Pulsantes (púlsares) por su semejanza con las estrellas variables.

Cada pulso tiene diferentes intensidades, pero la señal es muy regular, tanto es así que el período se puede determinar con una precisión de hasta 15 decimales.
Si se toma una secuencia larga de pulsos se puede armar una banda de frecuencias de emisión (primero llegan los pulsos de frecuencia mas alta y luego los de frecuencia mas baja). Cada pulsar tiene su frecuencia propia (el de mas larga frecuencia es de algo mas de 4 seg., el de mas baja es de 0,001 seg.). A este intervalo entre pulso y pulso se lo llama período.

Hasta ahora (2006) se conocen 1627 pulsares, y teniendo en cuenta su distribución espacial se calcula que en el plano de la Vía Láctea habría mas del doble de esta suma. Sabiendo que el intervalo es tan regular se puede concluír que la fuente emisora debe ser un cuerpo muy pequeño. También debe ser un objeto que gira (para producir una variación de pulsos tan rápida) a gran velocidad. Por último, la materia que compone el objeto debe tener una energía de ligadura (dada por la densidad de la materia) tal que soporte los efectos desintegradores de la fuerza centrífuga.
Tales condiciones sólo se dan en las estrellas de neutrones.

La ley de la conservación del momento angular dice que la velocidad superficial (Vs) de un objeto que gira multiplicada por su masa es constante (k). La velocidad superficial depende (es función) del radio del objeto.
Así, M x Vs x R = k
O sea que si el radio disminuye debe aumentar la velocidad superficial. Y a la inversa, si la velocidad superficial baja el radio debe agigantarse (como les sucede a las Gigantes Rojas).

Características de emisión: Los pulsos son regulares y rápidos. Pero el intervalo entre pulso y pulso no es un fenómeno permanente. Se va alargando en pequeñas fracciones de segundo al cabo de mucho tiempo. Esta regularidad permite utilizar los pulsares como 'relojes' de diversos fenómenos estelares. Que el perído se alargue implica que la velocidad disminuye.
Este frenado implica una gran pérdida de energía mecánica (cinética, de movimiento) de la estrella de neutrones en rotación.
Los pulsares no emiten en todas las frecuencias del espectro electromagnético (lo cual iría en contra de lo que hasta ahora se sabe con respecto a los cuerpos emisores) o, por lo menos, no vemos toda su emisión (su emisión principal es en la longitud de las radio-ondas).
El frenado de los pulsares se llama 'frenado magnético'. Las estrellas de neutrones tienen un campo magnético que se comporta como el de cualquier imán, donde las líneas de campo salen por uno de los polos e ingresan por el otro. Es un gran imán giratorio. Cuando un campo magnético gira produce un campo electromagnético, el cual se va alejando y diluyendo en el espacio circundante. Este fenómeno resta energía al pulsar, ya que el campo magnético de los pulsares es muy intenso (por lo que creará un campo electromagnético muy intenso que se irá diluyendo). Cuando un cuerpo disminuye su radio a la mitad (leyes de Maxwell del electromagnetismo) su campo magnético aumenta 4 veces.

El flujo magnético (Fm) multiplicado por el cuadrado del radio es constante (k).
Así, Fm x $R_{(4)}$ = k
Por esto, la estrella de neutrones tiene un tremendo campo magnético (debido a su bajo radio, 5 Km).
Al perder energía (en forma de campo electromagnético) el pulsar se va frenando.

Si bien el pulsar es regular, la intensidad de los pulsos es aleatoria. Pero si toman centenares de pulsos puede hacerse una media de intensidades, construyendo una curva o perfil. Dicho perfil es característico, individual y exclusivo para cada pulsar. Pero este perfil no es constante, en algunos pulsares a veces desaparece y luego vuelve a aparecer.
Otra característica es que de repente un pulsar pareciera recibir un impulso que lo acelera, fenómeno que es de muy corta duración, y luego vuelve a frenarse hasta la velocidad anterior. A esto se lo llama 'Glichst' (¿?), y aún no se sabe porqué sucede. Podría deberse a que debido a la gran velocidad de giro seproduce un abultamiento ecuatorial que, al ser la estrella de neutrones tan rígida, no puede adaptarse al frenado. Esto motivaría que la corteza de la estrella se agriete liberando energía de golpe, lo que causaría el sacudón de aceleración y frenado. Otra opinión atribuye este fenómeno a la caída de un meteorito sobre la estrella de neutrones, lo que produciría un pequeño aumento de energía que se traduciría en un aumento de velocidad.

¿Cómo se produce la energía que emite el pulsar? La energía radial o luminosa está polarizada. Esto implica que se debe a un proceso no térmico (radiación sincrotón). La energía entonces está producida por la interacción entre partículas y campos magnéticos muy grandes (plasma relativístico).
El campo eléctrico que genera el campo magnético de una estrella de neutrones al girar es de unos 10_{51} (10 a la 51) vatios. Esto arranca partículas de la estrella de neutrones, dichas partículas se disponen como una nube rodeando la estrella, encerradas por el campo magnético de la misma, formando lo que se llama magnetósfera (volúmen de espacio en el cual el campo magnético de la estrella controla los movimientos de las partículas).
Estas partículas tienen 2 movimientos en la nube:

a) giran siguiendo el giro de la estrella de neutrones y
b) también se mueven a lo largo de las líneas del campo magnético.

Esto provoca que haya dos lugares donde la intensidad del campo es mayor, en los polos magnéticos y en el lugar mas externo de la magnetósfera (donde las partículas deben girar mas rápido para seguir el giro de la estrella, adquiriendo velocidades relativísticas).
¿Porqué la energía se recibe en pulsos y de manera contínua? La estrella de neutrones tiene un eje de giro, pero también tiene un eje magnético que no tiene por qué coincidir con el de giro. Al girar el eje magnético va describiendo un cono en el espacio, si el cono coincide con la dirección espacial de la Tierra llega a ella la emisión. La duración del intervalo entre pulso y pulso dependerá de la velocidad de giro.

Modelo del casquete polar: El campo eléctrico arranca las partículas mas livianas, o sea, los electrones. Entonces la superficie de la estrella queda cargada de manera positiva (los electros son negativos). Los electrones se aceleran entonces a velocidades cercanas a la de la luz, adquiriendo en ese momento mas masa y comenzando a frenarse. Al frenarse emiten fotones (fotones de luz, gamma duros, de gran energía) para mantener su equilibrio energético. Siempre que los electrones a gran velocidad emiten fotones gamma duros se crean una partícula y su antipartícula, electrones y positrones. Los electrones así creados son atrapados por la corteza de la estrella (de carga positiva) y los positrones son repelidos por la misma. Esto provoca que la magnetósfera reciba contínuamente una carga de partículas con alta energía. Dicha energía sale colimada por los polos, como si fuera el foco de un faro.

En otro modelo se consideran paquetes de partículas que giran en la magnetósfera a casi la velocidad de la luz. Al girar a gran velocidad emiten fotones. Si la dirección de los fotones coincide con la dirección en el espacio de la Tierra se detecta el pulsar.

De un pulsar no se recibe emisión en todas las frecuencias del espectro. Esto puede ser porque no todas las frecuencias se coliman con igual ángulo, por lo que la Tierra recibirá solamente la emisión de la frecuencia cuyo ángulo de colimación la incluya.

Si la frecuencia, y por ende la velocidad de giro, se va frenando, podemos deducir que también nos está indicando la edad del pulsar. Según ciertas teorías las estrellas de neutrones duran 5.000 años como pulsar, y no mas. Los pulsares de largo período serían entonces muy viejos, y los de período corto mas jóvenes.

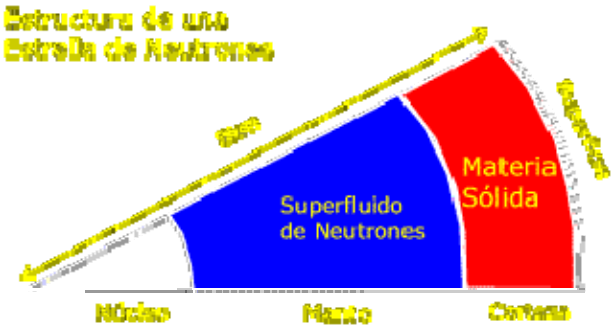
Universo - Púlsares

En 1968, dos astrónomos de Cambridge (Inglaterra), A. Hewish y S.J. Bell, se hallaban realizando observaciones radioastronómicas cuando descubrieron pulsos extremadamente regulares que se repetían en intervalos de tiempo muy cortos. Los denominaron púlsares; casi inmediatamente se los identificó como una manifestación de las estrellas de neutrones. Este descubrimiento confirmó la predicción realizada en la década del '30 cuando comenzó a discutirse la posibilidad de que existieran estrellas de neutrones; hacia 1934 se predijo que podían ser el resultado de las explosiones de supernovas en las que la energía de las explosiones provocaría un colapso que acabaría formando un objeto de enorme densidad. Posteriormente, se fueron detectando varios cientos de púlsares más, y se fue encontrando que los períodos de sus pulsaciones comprenden un rango entre 0,0016 seg. y unos pocos segundos.

El púlsar más famoso es el descubierto en el interior de la Nebulosa del Cangrejo. Además de analizar su radioemisión, se lo estudió mediante observacio en la zona infrarroja y visible del espectro electromagnético; así, se logró identificarlo con una estrella de 15m situada aproximadamente en el centro de la nebulosa. Recientemente, se detectó también como púlsar en rayos X. Este púlsar es lo que ha quedado de la explosión de una supernova en el año 1054. Por otra parte sabemos que la Nebulosa del Cangrejo está lentamente en expansión desde que se formara como resultado de la explosión, y el centro de la expansión es justamente la posición ocupada por el púlsar.

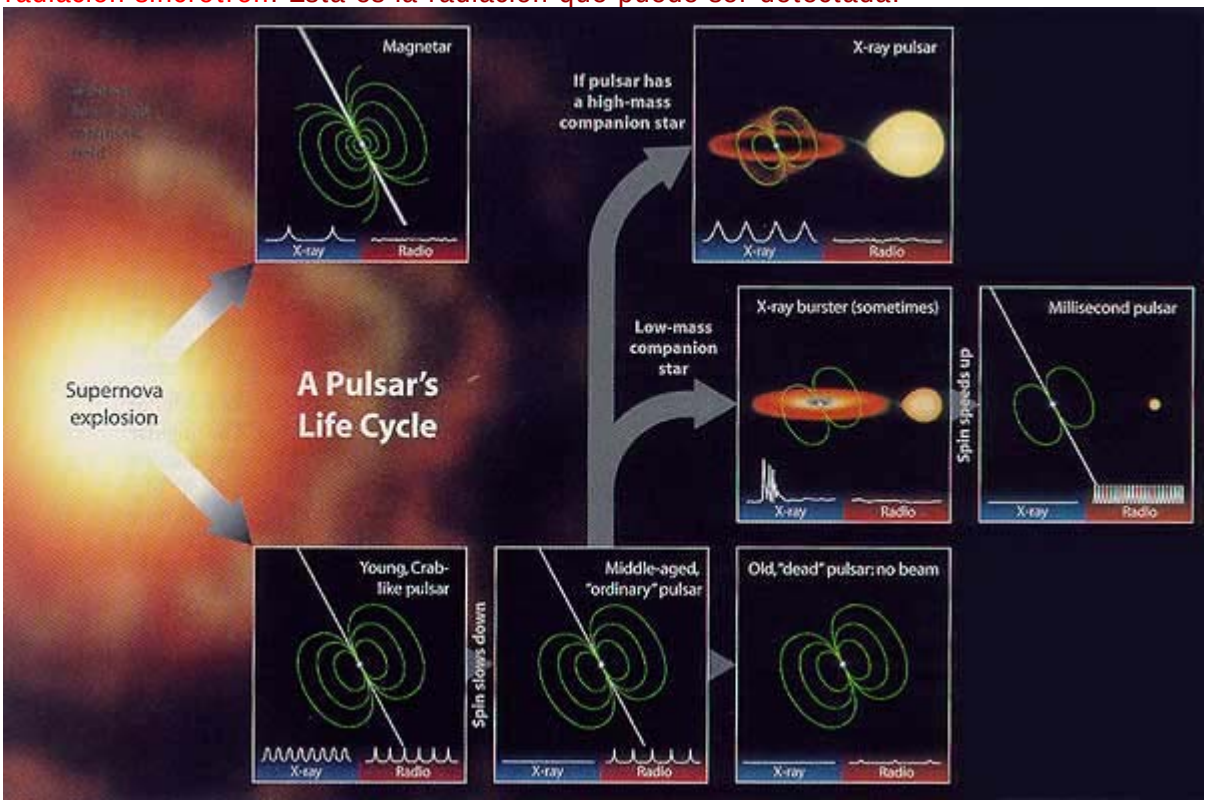
¿Cómo se genera un púlsar?

Cuando la masa inicial de la estrella es de tres a cinco veces la masa del Sol, su estado final es más complejo que el de una enana blanca: la densidad llega a ser notablemente mayor. Una vez que la estrella ha evolucionado más allá del estado de gigante, si su masa aún es mayor que 1,4 masas solares, no se convertirá en una enana blanca; la gravedad conduce a la estrella a un estado final conocido como estrella de neutrones. En estos casos, comparada con la de las enanas blancas, es mucho mayor la energía de los electrones, los cuales se combinan con protones formando neutrones y liberando energía. Los neutrones no se repelen mutuamente (no tienen carga eléctrica), y puede alcanzarse entonces una densidad extremadamente grande: alrededor de 100 millones de toneladas por cm3 en una esfera de radio tan pequeño como unos 10 km. Por otra parte, estas estrellas deben rotar muy rápidamente por la conservación del momento angular al disminuir su tamaño.



La presión del gas de neutrones degenerado soporta la gravedad de la misma manera que en las estrellas enanas blancas lo hace el gas de electrones. Las estrellas de neutrones consisten en una estructura sólida con una atmósfera extremadamente delgada. Como son cuerpos muy pequeños no se los ve, pero se los puede detectar a través de la intensa emisión de radioondas debido al fuerte campo magnético que

generan. Cuando la estrella comienza su contracción, conserva su pequeño flujo magnético, el cual es proporcional al campo magnético y a la superficie de la estrella. Como al evolucionar, la estrella disminuye de tamaño el campo magnético va adquiriendo valores enormes; de esa manera los electrones son acelerados violentamente en espirales a lo largo de las líneas del campo magnético, emitiendo radiación sincrotrón. Esta es la radiación que puede ser detectada.



FOTOCOPIAS:

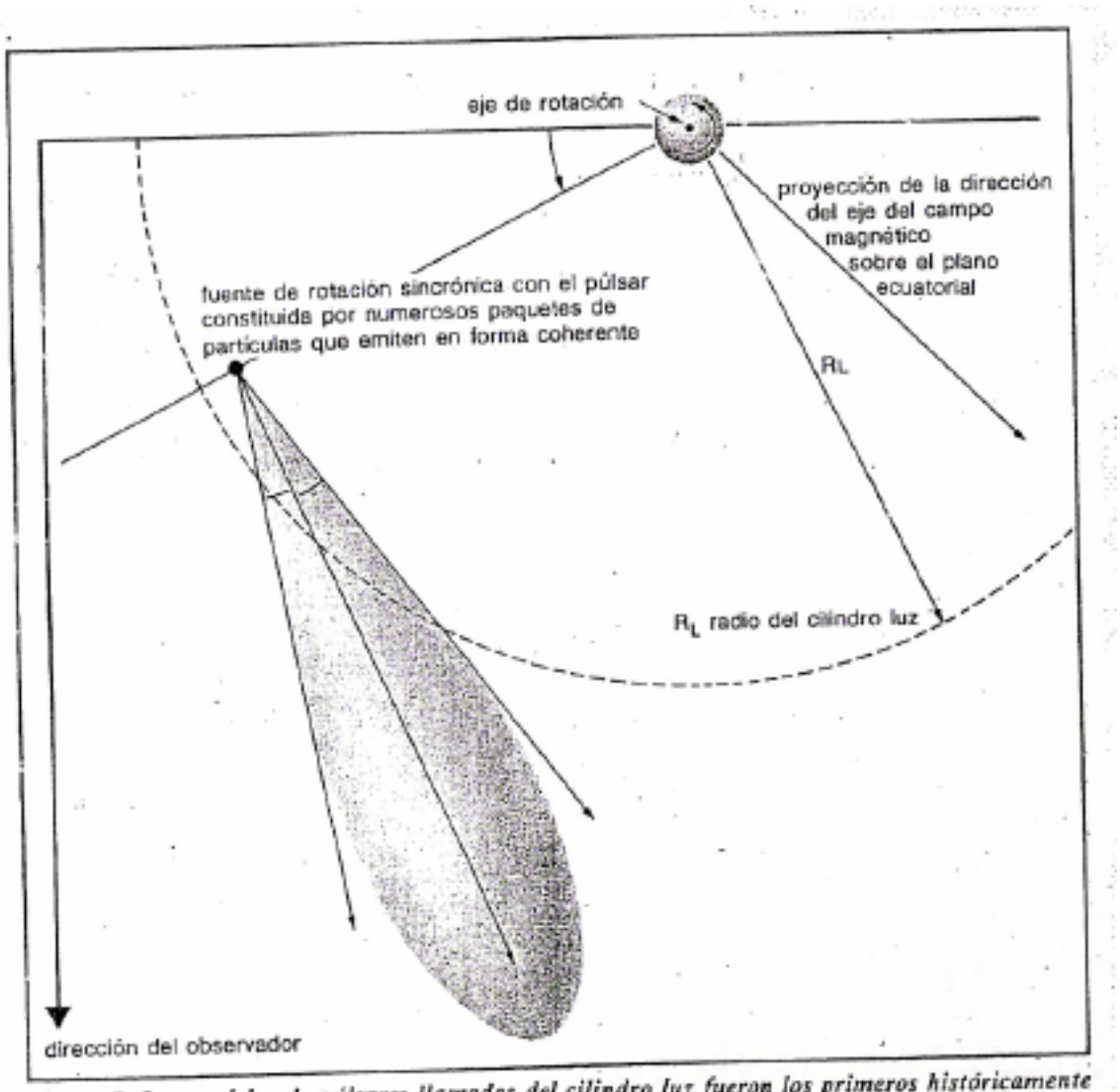


Figura 7. Los modelos de púlsares llamados del cilindro luz fueron los primeros históricamente propuestos para explicar la radiación de los púlsares. El radio del cilindro luz es la distancia a la que una partícula que girase con el púlsar alcanzaría una velocidad próxima a la de la luz. En esta región, la radiación de las partículas está completamente dominada por los efectos predichos por la teoría de la relatividad, y una fuente isótropa en movimiento a esta distancia del púlsar parece, debido a estos efectos, radiar fuertemente hacia adelante en la dirección de su movimiento. En los modelos del cilindro luz, la región de emisión situada a una distancia ligeramente inferior a la distancia del cilindro luz está constituida por una o varias fuentes que reagrupan paquetes de electrones capaces de radiar eficazmente. Debido a los efectos relativistas relacionados con su gran velocidad, los paquetes de electrones, cuya trayectoria es circular alrededor del eje de rotación, radiarán en un cono muy estrecho. Este cono, al barrer el campo visual del observador, produce en cada rotación el pulso observado en los púlsares. Este modelo puede reproducir una gran variedad de formas de pulsos de radio cambiando la distribución de las cargas en el cilindro luz.

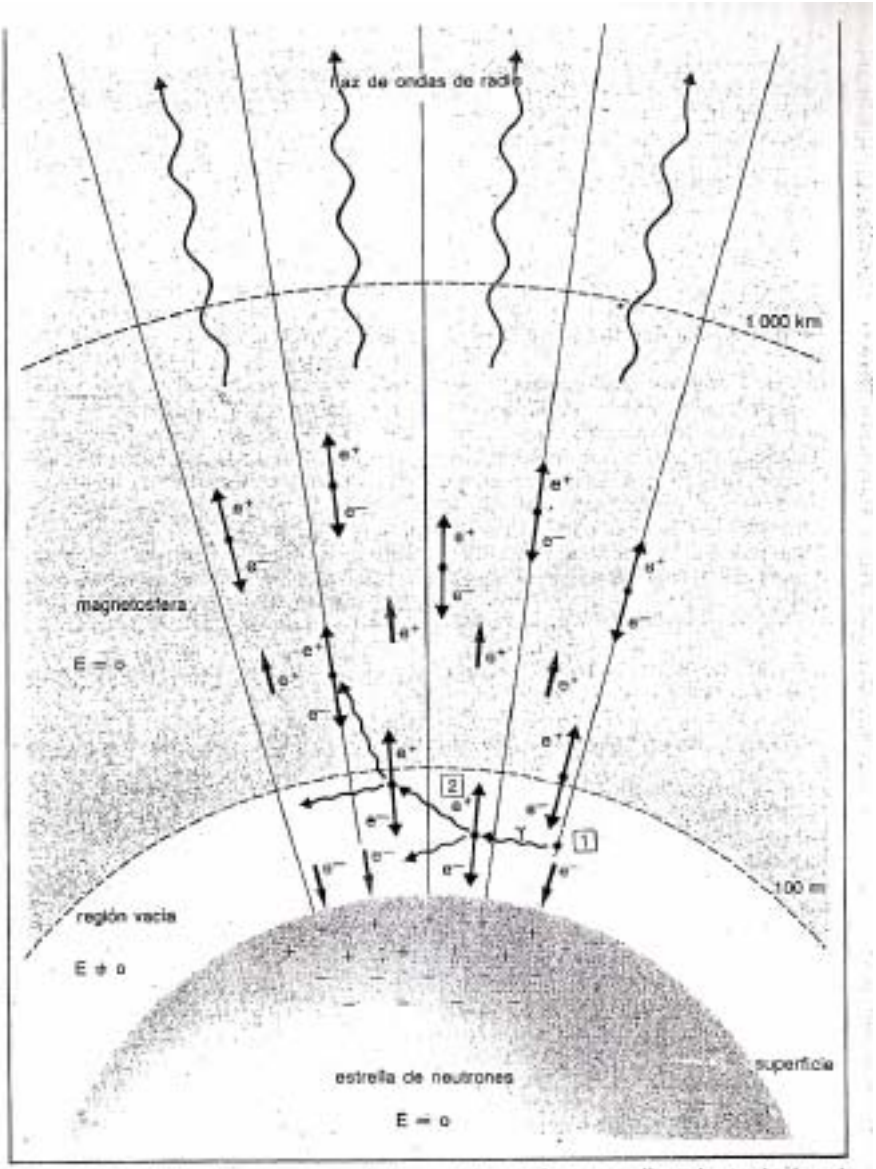


Figura 6. Una de las primeras tareas de los modelos teóricos es explicar el estrecho haz de ondas de radio emitidas por los púlsares y la intensidad de la radiación que contienen. En el modelo de Ruderman y Sutherland, este haz es delimitado por las líneas de campo magnético surgidas de una región próxima a los polos (el casquete polar) y aún poco separadas del eje de campo. La radiación está ligada a la existencia de un fuerte campo eléctrico (E) en una delgada capa (en claro) en la proximidad inmediata de la superficie de la estrella de neutrones. Los electrones son acelerados por este campo (en 1). Radian entonces fotones γ muy energéticos, que a su vez se materializan en pares electrón-positrón (e^-, e^+) (en 2) los cuales emiten fotones γ, y así sucesivamente. Esta cascada de creación de pares dará lugar a una inestabilidad en la delgada capa eléctrica, en forma de una violenta descarga. Los electrones (en color) se dirigirán a la superficie, cargada positivamente, mientras los positrones, bruscamente inyectados en la magnetosfera (en color), interaccionarán con los pares ya creados para producir la intensa radiación radio observada. Este modelo, que ha tenido mucho éxito, parece no obstante cuestionado por el descubrimiento de los púlsares rápidos.

Modelos de emisión de los pulsares.

QUINCE: AGUJEROS NEGROS – PRIMERA PARTE

Cuando se compacta la materia ésta llega primero al estado de materia degenerada (gas de Fermi) que se sostiene por la 'presión de Fermi' (ver 'Enanas Blancas') y luego a la materia neutrónica sostenida por la fuerza nuclear fuerte.

En los años 30 (1930) Oppenheimer investiga cuanta materia sería necesaria para vencer la resistencia de la fuerza nuclear fuerte. De sus estudios concluye que cuando la fuerza nuclear fuerte es vencida no hay ninguna otra fuerza que pueda oponerse a la gravitación (que en condiciones normales es la más débil de las fuerzas).
Un colapso de este tipo modifica las propiedades del propio espacio-tiempo. Para ver esto hay que hacerlo dentro del marco de la Teoría de la Relatividad General, que intenta explicar la gravedad dejando de lado el concepto de fuerza.

La física clásica dice que dos cuerpos ejercen entre si una fuerza atractiva que es proporcional a sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos. Se llama fuerza a toda acción (energía por tiempo, o sea, una x cantidad de energía aplicada durante un cierto tiempo) que tiende a anular la inercia de un cuerpo (poner en movimiento un cuerpo si éste está inmóvil o modificar su velocidad o dirección si éste está en movimiento). Esto es:

$$F = \frac{m1 \times m2}{D(2)}$$

O sea, masa del cuerpo 1 por masa del cuerpo 2 dividido la distancia entre ellos al cuadrado.

La magnitud de la fuerza necesaria para variar el estado de inercia de un cuerpo es función de la masa (que interpretamos como peso) del cuerpo (peso es la fuerza que ejerce un cuerpo sobre otro cuando está apoyado sobre su superficie, masa es la cantidad de materia que posee un cuerpo).
Estos conceptos hacen que dentro del sistema newtoniano se considere a la gravedad como una fuerza. Pero Einstein considera que una masa de materia puede modificar, deformar, curvar el espacio (para comprender esto no puede verse el espacio como relacionado con los objetos).
Los cuerpos en movimiento siempre siguen la trayectoria mas simple (la mas corta entre dos puntos, la recta), pero la presencia de una gran masa que deforma el espacio-tiempo hace que esa trayectoria ya no sea recta sino curva, siguiendo la deformación (es una geodésica, tal cual son las rectas trazadas sobre un globo terráqueo).
Esto significa abandonar el concepto de fuerza, ya que un objeto seguirá o no una trayectoria recta según esté solo en el espacio o se encuentre en presencia de una masa tal que curve el espacio-tiempo cercano a ella.
Así, la materia le dice al espacio cómo debe curvarse, y el espacio le dice a la materia cómo debe moverse.

Para calcular distancias en un espacio-tiempo curvado debe tenerse en cuenta el valor de la deformación existente en dicho espacio (se utiliza el concepto de tensor que indica el grado de curvatura del espacio-tiempo).

La palabra la introdujo William Rowan Hamilton en 1846, pero la usó para lo que actualmente se conoce como módulo. La palabra se usó en su acepción actual por Waldemar Voigt en 1899.

La notación fue desarrollada alrededor de 1890 por Gregorio Ricci-Curbastro bajo el título de *geometría diferencial absoluta*, y lo hizo accesible a muchos matemáticos con la publicación del texto clásico de Tullio Levi-Civita el *cálculo diferencial absoluto* en 1900 (en italiano; con posteriores traducciones). La aceptación más amplia del cálculo tensorial se alcanzó con la introducción de la teoría de Einstein de la relatividad general, alrededor de 1915. La relatividad general se formula totalmente en el lenguaje de los tensores, que Einstein había aprendido del mismo Levi-Civita con gran dificultad. Pero los tensores se utilizan también dentro de otros campos por ejemplo la mecánica del medio continuo (véase tensor de tensiones o elasticidad lineal).

Nótese que la palabra "tensor" se utiliza a menudo como abreviatura de campo tensorial, que es un valor tensorial definido en cada punto en una variedad. Para entender los campos tensoriales, se necesita primero entender la idea básica de tensor.

Hay dos maneras de acercarse a la definición de tensor:

- La manera usual de la física de definir los tensores, en términos de objetos cuyas componentes se transforman según ciertas reglas, introduciendo la idea de transformaciones covariantes o contravariantes.

- La manera usual de las matemáticas, que implica definir ciertos espacios vectoriales sin fijar cualesquiera conjuntos de coordenadas hasta que las bases se introduzcan por necesidad.

Ejemplos

No todas las relaciones en la naturaleza son lineales, pero la mayoría es diferenciable y así se pueden aproximar localmente con sumas de funciones multilineales. Así la mayoría de las cantidades en las ciencias físicas se pueden expresar provechosamente como tensores.
Como ejemplo simple, considere una nave en el agua. Deseamos describir su respuesta a una fuerza aplicada. La fuerza es un vector, y la nave responderá con una aceleración, que es también un vector. La aceleración en general no estará en la misma dirección que la fuerza, debido a la forma particular del cuerpo de la nave. Sin embargo, resulta que la relación entre la fuerza y la aceleración es lineal. Tal relación es descrita por un tensor del tipo (1, 1) (es decir, que transforma un vector en otro vector). El tensor se puede representar como una matriz que cuando es multiplicada por un vector, dé lugar a otro vector. Así como los números que representan un vector cambiarán si uno cambia el conjunto de coordenadas, los números en la matriz que representa el tensor también cambiarán cuando se cambie el conjunto de coordenadas.
En la ingeniería, las tensiones en el interior de un cuerpo rígido o líquido también son descritas por un tensor; la palabra "tensor" viene del latin "tensus", pasado participio de estirar. Si un elemento superficial particular dentro del material se selecciona, el material en un lado de la superficie aplicará una fuerza en el otro lado. En general, esta fuerza no será ortogonal a la superficie, sino que dependerá de la orientación de la superficie de una manera lineal. Esto es descrito por un tensor del tipo (2, 0), o más exactamente por un campo tensorial del tipo (2, 0) puesto que las tensiones pueden cambiar punto a punto.

Algunos ejemplos bien conocidos de tensores en geometría son las formas cuadráticas, y el tensor de curvatura. Los ejemplos de tensores físicos son tensor de energía-momento y el tensor de polarización.

Las cantidades geométricas y físicas pueden ser categorizadas considerando los grados de libertad inherentes a su descripción. Las cantidades escalares son las que se pueden representar por un solo número --- rapidez, masa, temperatura, por ejemplo. Hay también cantidades tipo vector, por ejemplo fuerza, que requieren una lista de números para su descripción. Finalmente, las

cantidades tales como formas cuadráticas requieren naturalmente una matríz con índices múltiples para su representación. Estas últimas cantidades se pueden concebir solamente como tensores.

Realmente, la noción tensorial es absolutamente general, y se aplica a todos los ejemplos antedichos; los escalares y los vectores son clases especiales de tensores. La propiedad que distingue un escalar de un vector, y distingue ambos de una cantidad tensorial más general es el número de índices en la matriz de la representación. Este número se llama el **rango** de un tensor. Así, los escalares son los tensores de rango cero (sin índices), y los vectores son los tensores de rango uno.

(wikipedia)

Así, si t = tensor y p = propiedades del espacio plano tenemos que

p - t = c donde c es el grado de curvatura del espacio-tiempo. En un campo gravitatorio débil el valor de c será menor que 1, si el campo gravitatorio es muy intenso el valor de c tiende a 1.

Un campo gravitatorio es muy intenso cuando en su proximidad la curvatura del espacio-tiempo es muy marcada, lo que sucede cuando el radio de curvatura es muy pequeño. Así, si tenemos una gran masa concentrada en un punto la curvatura del espacio-tiempo lejos de ese punto será suave, disminuyendo la distancia al punto la curvatura se irá haciendo mayor (según la teoría de Newton aumenta la fuerza de gravedad). El grado de curvatura varía con la inversa de la distancia.

La curvatura del espacio-tiempo aumenta a medida que se acerca a la masa puntual (disminuye su radio de curvatura). Llegará un momento en que la curvatura va a ser comparable con la distancia. Esto lleva a preguntarse hasta que grado una masa de materia puede modificar las propiedades del espacio. En 1783 George Mitchel observó que para una estrella lo suficiéntemente densa la velocidad de escape podría ser mayor que la de la luz, entonces no podríamos verla. En 1794 Pedro Simón llegó a la conclusión de que el en el Universo debería haber masas lo suficiéntemente grandes como para que la observación de Mitchel fuera verdad.

La Ve (velocidad de escape) de un cuerpo se calcula con la siguiente fórmula:

$$Ve = \sqrt{\frac{2\ G\ M}{R}}$$ donde G es la constante gravitatoria, M la masa y R el radio

o sea que para calcular la Ve no interviene la masa del cuerpo que desea 'escapar'. Por otro lado, la Ve es inversamente proporcional al Radio del cuerpo que se desea abandonar. Mitchel se preguntó entonces cómo averigüar la masa de materia necesaria para generar una curvatura del espacio tal que la luz quede atrapada (es de suponer que él hablaba de gravedad). La fórmula sería:

$$Rs = \frac{2\ G\ M}{C_2}$$

Rs es el Radio de Schwaizschild (quien pergeñó la fórmula).

Así, el Rs o radio crítico es el que tiene que tener una masa de materia para poder deformar el espacio en grado tal que la luz no pueda abandonarla, ya que la luz seguirá una trayectoria enormemente curvada. C^2, la velocidad de la luz al cuadrado, se utiliza porque es el nexo entre espacio y tiempo en la Teoría de la Relatividad. Tomando como referencia la masa del Sol,

$$Rs \cong 3 \frac{M}{M_\odot}$$

Esto significa que la estrella que luego de despojarse de su envoltura (por viento solar en el caso de una Gigante Roja o por explosión de SuperNova) quede con mas de 3 Masas Solares.... será un agujero negro.
Cuanto mayor es la masa originalmente considerada, al llegar al Rs menor será su densidad.

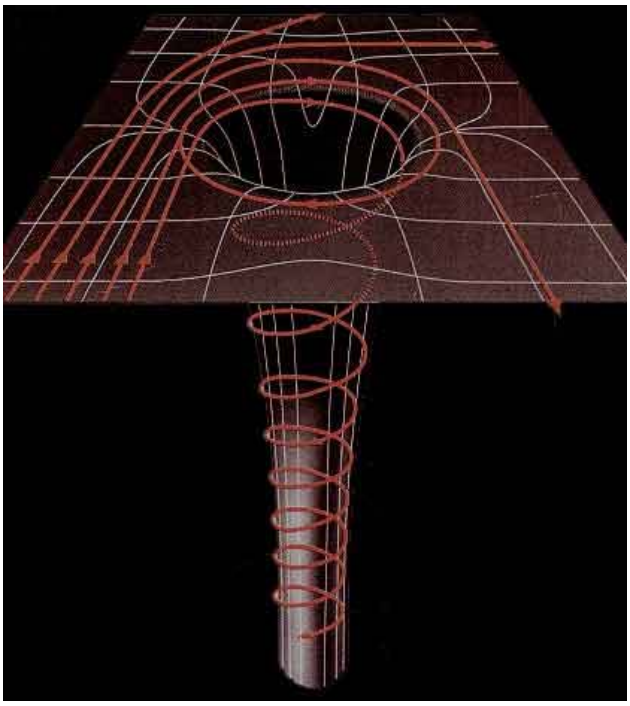
MASA	RADIO CRITICO	DENSIDAD
Tierra	0,87 cm.	$10^{(31)}$ mayor que el agua
Sol	2,5 Km.	$10^{(28)}$ mayor que el agua
Sol por 100	600 Km	$10^{(23)}$ gramos
Sol por $10^{(9)}$	6 x $10^{(9)}$ Km	1 gr.
Vía Láctea	3 x $10^{(14)}$ Km	$10^{(-6)}$ gramos
Universo	3 x $10^{(9)}$ Años Luz	gas muy tenue

Si la materia que se ve compactada hasta llegar al Rs emite luz, un observador verá que la luz irá disminuyendo y virando al rojo. Esto es el resultado del aumento de curvatura del espacio-tiempo, ya que los fotones emitidos cada vez tienen mas dificultad para abandonar la masa de materia por lo que deben perder energía (por esto la luz vira al rojo, corrimiento gravitatorio hacia el rojo).

Las ecuaciones relativísticas predicen que en un campo gravitatorio muy intenso el tiempo discurrirá mas lentamente. Así, para un observador externo un suceso que ocurre en una masa que avanza hacia el Rs será cada vez mas lento, y al llegar al Rs el movimiento cesará.
Por esto es que a este tipo de objetos se los llamó estrellas congeladas, colapsares, cementerios estelares, pero quedó el nombre de agujeros negros, aunque no son agujeros ni son negros (agujeros negros porque la luz no puede escapar de ellos).

En la actualidad se piensa en 3 posibles orígenes para un agujero negro:

a) Estallido de Super-Nova de estrellas muy masivas que dejan detrás un resto de mas de Masas solares, son los Agujeros Negros Estelares con masas entre 3 y 50 Masas solares.
b) No es imposible que en el Big-Bang la gran presión reinante aplastara alguna irregularidad de la materia original, comprimiéndola hasta el Rs. Son los Mini Agujeros Negros o Agujeros Negros Primigenios, su masa variaría entre fracciones de gramo (mayores a $10^{(-4)}$ grs.) hasta masas planetarias.
c) Por coalescencia (propiedad de las cosas de unirse o fundirse) de materia por acción de la gravedad en lugares donde la densidad es muy elevada, como los cúmulos globulares o en los núcleos de los bulbos galácticos, su masa sería de miles de masas solares.



DIECISEIS: AGUJEROS NEGROS – SEGUNDA PARTE

Un agujero negro sólo puede estudiarse desde el punto de vista teórico según los postulados de la Relatividad General. La observación directa queda descartada, todas las propiedades que se le asignan derivan de estudios matemáticos basados, sobre todo, en la topología. De allí que se recurra a comparaciones con objetos y situaciones familiares.

Supongamos que alrededor del núcleo estelar en colapso colocamos un observatorio y sobre la superficie de dicho núcleo un astronauta que enviara una señal radial por segundo, siendo que la masa alcanzará el Radio de Schwaizschild (Rs) a las 09:00 Hs.:

1) El observador notará primero que se encuentra en una situación de ingravidez, ya que la superficie del núcleo estelar está en caída libre (la ingravidez se deriva de la falta de acción gravitatoria).
2) Luego notará que todos los elementos del núcleo estelar desaparecen súbitamente, primero los más lejanos y luego los más cercanos. Esto es porque el núcleo está disminuyendo su radio aceleradamente, lo que causa que el horizonte sea cada vez mas cercano.
3) Luego notará que la radiación que provenga del espacio se corre hacia mayores frecuencias, corrimiento hacia el rojo por velocidad radial positiva (de alejamiento) de las fuentes radiantes. Esto también porque él está en caída libre.
4) En un breve tiempo podrá ver toda la historia del Universo, ya que la radiación está siendo absorbida a gran velocidad (por radiación aquí entendemos a luz).
5) No se dará cuenta del momento en que atravesará el límite crítico de Schwaizschild.
6) Si pudiera parar su caída hacia el centro del núcleo luego de atravesar el límite de Schwaizschild vería que la radiación aparece corrida al azul. Esto es porque él se quedaría quieto pero la radiación seguiría entrando en el agujero negro (por el potencial gravitatorio de la curvatura espacio-temporal).
7) Fuera del agujero negro un cuerpo puede moverse en cualquiera de las tres dimensiones espaciales, pero no así en la temporal, ya que la flecha del tiempo apunta inexorablemente al futuro. Al sobrepasar el límite de Schwaizschild el astronauta podrá, desde el punto de vista formal, moverse un poco hacia el presente y hacia el pasado, pero en cuanto a las dimensiones espaciales sólo podrá caer. Fuera del agujero negro existe la dictadura del tiempo, dentro del mismo existe la dictadura del espacio que se achica cada vez mas.

En cuanto a los que permanezcan en el observatorio:

1) Al principio no notaran nada.
2) Cuando el explorador envíe la señal de las 08:59:59 notaran un leve atraso en la recepción.
3) Deberán sintonizar nuevamente la radio ya que la frecuencia de la señal emitida por el astronauta será cada vez menor.
4) La señal de las 09:00:00 jamás será recibida. Este es el momento en que el núcleo estelar llega al Rs, por lo que visto desde afuera la imagen del astronauta continuará cayendo eternamente (la visión que se tenga de él desde el exterior quedará congelada como una foto). La señal no se recibirá nunca porque desde el momento en que el astronauta cruza el Rs ya nada puede salir del agujero negro.

5) Es por esto que al Límite de Schwaizschild se lo llama 'Horizonte de Sucesos' u 'Horizonte fáctico'. Todo entra pero nada puede salir, perdiéndose toda estructura organizada de materia, ya que a los efectos formales la materia del agujero negro es retraída afuera del Universo.
6) Pero sin embargo, hay 2 maneras en que el agujero negro sigue comunicado con el exterior: a) con su masa, actuando sobre la materia que está a su alrededor y b) con su momento angular, ya que la velocidad de rotación es capaz de arrastrar al espacio adyacente. Una tercer manera, en estudio, es si un agujero negro tiene carga eléctrica, ya que de tenerla la misma podría filtrarse hacia fuera.

Si se coloca un foco emisor de luz fuera del agujero negro, los frentes de luz por él emitidos (las ondas) son atraídos hacia el agujero, siguiendo la curvatura del espacio-tiempo. Si el foco se aproxima, al llegar al horizonte de sucesos todos los frentes de onda se desfasan hacia el interior del agujero negro, por lo que nada de la luz emitida podrá salir de él. Al rebasar el horizonte de sucesos todos los frentes de onda estarán cayendo hacia el interior del agujero negro.

En la explicación de los agujeros negros y sus efectos suele aplicarse una mezcla de física clásica (newtoniana) con Teoría de la Relatividad (Einstein). Así, se considera a los agujeros negros como burbujas de líquido. Si esto fuera así los agujeros negros tendría, entre sus propiedades, tensión superficial y tensión eléctrica. Entonces, al perturbar a un agujero negro éste vibraría y las vibraciones serían a nivel espacio-temporal.

Un agujero negro particular es una cosa suspendida en el espacio cuya naturaleza, estructura y orígen son imposibles de discernir (ya que no puede obtenerse información precisa sobre él).

La intensidad de los campos gravitatorios que operan en un agujero negro causan una serie de paradojas. Por ejemplo:

a) Al nivel del límite de Schwaizschild la curvatura espacio-temporal es enorme, lo que produciría la destrucción de cualquier cosa que se le acerque. Esta destrucción se debería a las distintas intensidades de la acción de las fuerzas de marea sobre las diferentes partes del objeto. Esta diferencia se puede encontrar sobre cualquier superficie (por ej., la Tierra), sin embargo normalmente es muy pequeña. En un agujero negro, en cambio, la acción de la gravedad sobre la parte inferior de un objeto es enormemente superior a la acción sobre la parte superior del mismo objeto. Esto causa un proceso de 'espaguetización' en el que el objeto se ve deformado por estiramiento (desmenbrándose al final del mismo). Pero además en un agujero negro el espacio se achica en las tres dimensiones espaciales, por lo que si pudiera filmarse la caída de un objeto hacia el interior de un agujero negro se lo vería como un proceso de 'embudización' (adoptar forma de embudo, nuevo neologismo de cosecha propia), hasta su desaparición.

b) El comportamiento de la materia, el espacio y el tiempo es aparentemente ilógico. Cualquier objeto, hasta un rayo de luz, que se acercara a una distancia de 1 ½ (uno y medio) Rs del horizonte de sucesos de un agujero negro quedaría girando en una órbita perfectamente circula. Si una persona pudiera ir montado sobre ese haz de luz no notaría que está describiendo una trayectoria circula, para él sería perfectamente recta. Si estuviera a menor distancia del horizonte de sucesos notaría que está en una trayectoria que lo llevaría al espacio exterior (alejándose del agujero negro) y notaría también una fuerza centrífuga que lo tiraría hacia dentro del agujero negro (ver fotocopia, geometría óptica).

El tiempo de caida de un objeto hacia el interior del agujero negro se calcula según la siguiente fórmula:

$$\frac{Rs}{c}$$

o sea el Radio de Schwaizschild (propio de cada agujero negro) dividido la velocidad de la luz.

Otra paradoja es que un agujero negro posee masa, es como una burbuja flotando en el espacio a la que todo lo que se le acerca desaparece, con un límite para ello, y en realidad está vacío. Sólo es espacio-tiempo curvado.

Pero, ¿qué le pasa a la materia cuando llega al interior de un agujero negro? La Teoría de la Relatividad es la única herramienta matemática capaz de predecir los efectos gravitatorios. Pero cuando se trata de campos gravitatorios miles de millones de veces mas grandes que los habituales, como los de los agujeros negros, no se sabe si se puede confiar en la Teoría de la Relatividad. Pero cómo es la única herramienta que hay es la única que se utiliza para explicar las cosas.
Así, se llega a la conclusión que toda la materia que entra en un agujero negro, debido a las fuerzas de marea y al achicamiento de las tres dimensiones espaciales, se destruirá (incluyendo las partículas sub-atómicas). Se considera así que toda la materia termina en un punto matemático a-dimensional, donde la curvatura espacio-temporal es infinita. A esto se lo llama Singularidad de Schwaizschild. Esto es, desde ya, un concepto puramente matemático, ya que carece de sentido atribuír propiedades físicas a algo no físico como es un punto a-dimensional. Además, en física están excluídos los infinitos, ya que los infinitos no son propiedades de las cosas.

Hay quienes niegan la existencia de la singularidad, basándose en que cuando los campos gravitatorios son tan intensos la Relatividad General no puede describir lo que sucede.
Por otra parte, la Teoría de la Relatividad aplicada al estudio de los agujeros negros no tiene en cuenta los efectos cuánticos. Si se los tiene en cuenta se llega a la conclusión de que la materia llega al centro del agujero negro y ocupa allí un espacio muy pequeño (10^{-33} cm). Este sería el Radio de Planck, que tiene que ver con la Teoría de Supercuerdas.

Penrosse y Hawking confeccionaron los teoremas de la singularidad, donde demuestran que en un colapso gravitatorio irrefrenable siempre se debe terminar con una singularidad. El fín de la materia incluye su no permanencia en el espacio-tiempo conocido.
La formación de la singularidad no siempre debe derivar en un Horizonte de Sucesos que la rodee. Puede darse sola, lo que conformaría una ‘singularidad desnuda’.

FOTOCOPIAS:

Los agujeros negros y la paradoja de la fuerza centrífuga

Un objeto que orbite cerca de un agujero negro experimentará una fuerza centrífuga que lo empujará hacia dentro. Este efecto paradójico tiene importantes consecuencias astrofísicas

Marek Artur Abramowicz

Usted, sin duda, habrá viajado en coche, autobús o tren; usted, entonces, sabrá muy bien qué es la fuerza centrífuga: ese tirón que experimentamos en el interior de cualquier vehículo que esté trazando una curva y que actúa desde el centro de ésta hacia fuera. Podrá, pues, imaginarse perfectamente la sorpresa que, no hace demasiado tiempo, A. R. Prasanna, del laboratorio de investigaciones físicas de Ahmedabad, India, y yo nos llevamos al descubrir que, según la teoría general de la relatividad, hay circunstancias en que la fuerza centrífuga se dirige hacia el centro del movimiento circular, en vez de alejarse de él. Demostramos que, si una nave especial se aproximase lo suficiente a un agujero negro, se experimentaría en ella una fuerza centrífuga que tiraría hacia dentro, no hacia fuera, y más cuanto mayor fuese su velocidad orbital. Justo lo contrario de lo que la experiencia corriente nos enseña.

Nuestros cálculos muestran que, en la región cercana al agujero negro, no sólo la fuerza centrífuga invierte su dirección, sino que todos los efectos dinámicos que dependen de la distinción entre lo que es apuntar hacia dentro y lo que es apuntar hacia fuera están también invertidos.

La causa de la paradoja es el fortísimo campo gravitatorio que el agujero negro genera. Como Albert Einstein predijo en 1915, un campo gravitatorio deforma el espacio y curva los rayos de luz. El campo gravitatorio del Sol curvará un rayo de luz que pase rozando su superficie un poco menos de una milésima de grado. Dado que un agujero negro genera un campo gravitatorio mucho más fuerte que el solar, desviará la luz mucho más.

Un agujero negro atrapará para siempre cualquier radiación o materia que se acerque demasiado a él. El punto de no retorno define el tamaño de un agujero negro, o su radio gravitatorio. Un agujero negro que tuviese la misma masa que el Sol tendría un radio gravitatorio de unos tres kilómetros. Si un rayo de luz viajara paralelamente a la superficie de un agujero negro a una distancia de tres veces el radio gravitatorio, se desviaría unos 45 grados. Lo que aún es más notable, si un rayo de luz pasara a una distancia del agujero negro de exactamente 1,5 veces el radio gravitatorio, orbitaría alrededor del agujero negro describiendo un círculo perfecto. La existencia del rayo circular de luz es elemento clave en la paradoja de la fuerza centrífuga.

Con Jean-Pierre Lasota (hoy en el Observatorio de París) descubrí la primera indicación de la paradoja casi por casualidad, hace casi 20 años, en el Centro Astronómico Copérnico de Varsovia. Bozena Muchotrzeb, alumno nuestro, había obtenido una fórmula según la cual un objeto que orbitara alrededor de un agujero negro por el mismo camino que un rayo de luz experimentaría siempre la misma fuerza total fuese la que fuese la velocidad con que girase, una fuerza que lo empujaría hacia dentro. En particular, un objeto en reposo experimentaría idéntica fuerza hacia dentro que un proyectil que recorriese el círculo a casi la velocidad de la luz.

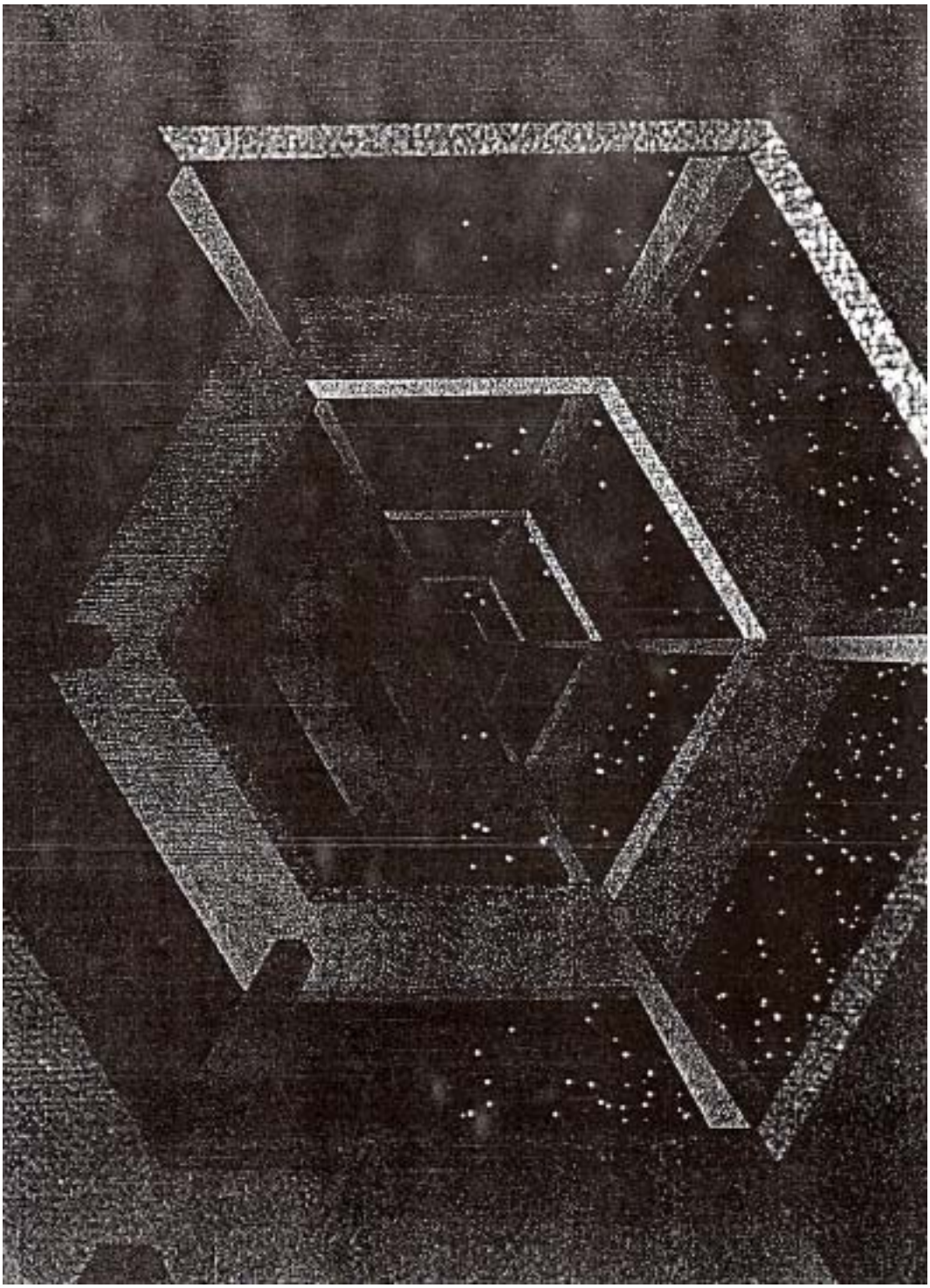
Aquello nos pareció carente de sentido. Según la dinámica elemental, la fuerza centrífuga depende de la velocidad orbital, mientras que la gravitatoria no. Por tanto, la fuerza total —suma de las fuerzas centrífuga y gravitatoria— debería depender también de la velocidad orbital. Al no ofrecernos la respuesta que esperábamos, supusimos que la fórmula no era correcta. Pero lo era.

No hay verdaderas paradojas en física. Alguna veces un fenómeno nos puede parecer paradójico debido a la inercia de nuestra mente: nos basamos en una imagen incompleta que nos impide entender cómo funcionan realmente las cosas. Lasota y yo nos dimos cuenta de que el movimiento a lo largo de la trayectoria de un rayo circular nos parece tan paradójico porque nos cuesta aceptar el hecho de que, aunque el rayo en cuestión sea en verdad circular, también es, en cierto sentido, perfectamente recto.

A fin de desarrollar la correcta intuición acerca de los rayos de luz circulares, imaginemos dos astronau-

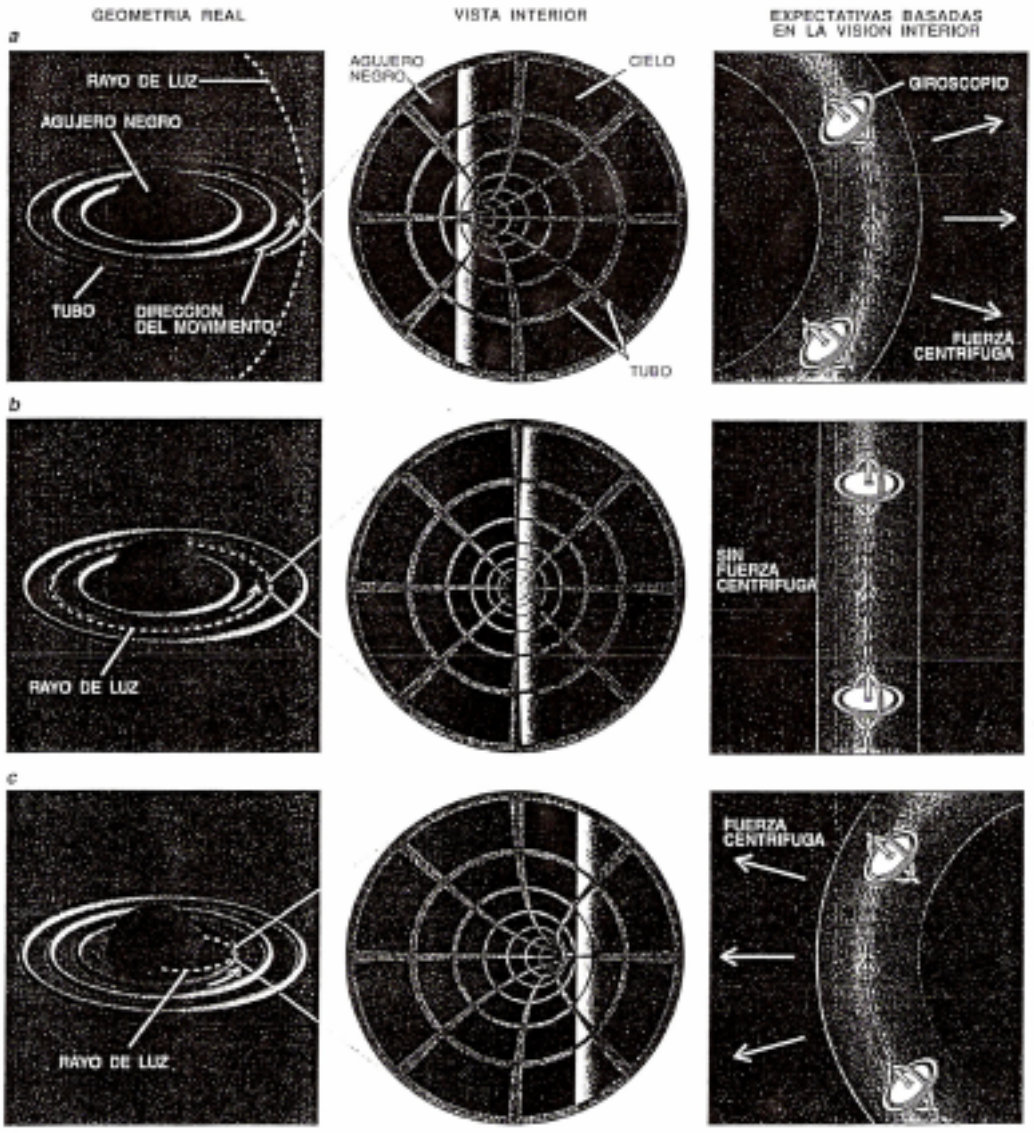
MAREK ARTUR ABRAMOWICZ es catedrático del departamento de astrofísica de la Universidad de Göteborg. En 1974 obtuvo su doctorado en física teórica por la Universidad de Varsovia. Durante más de una década, ha colaborado con Dennis Sciama en Oxford y Trieste.

1. ESTRUCTURA ESPACIAL construida con vigas y nervios hexagonales alrededor de un agujero negro esférico a una altitud igual a 1,5 veces el radio del agujero. Aunque la estructura se curva alrededor del agujero, le parecería, sin embargo, recta a un observador que estuviera en el interior. El efecto se debe al campo gravitatorio del agujero, que a esta precisa altitud es tan intenso que los rayos de luz viajan en círculos perfectos alrededor del agujero. Además, un observador que viajase alrededor del agujero por dentro de esta estructura no experimentaría fuerza centrífuga. La pequeña distorsión de los nervios hexagonales distantes es otra consecuencia de la curvatura de la luz.



Fuerzas centrífugas cerca de un agujero negro

Un observador ve de lejos tres tubos circulares alrededor de un agujero negro; dentro de ellos, le parecería que tendrían otra forma. El primer tubo (*a*) está lejos del agujero, donde los rayos de luz son casi rectos: el observador alejado y el del interior verían el tubo curvado alrededor del agujero, y ambos predecirían correctamente que un objeto que viajara por dentro del tubo sería empujado hacia fuera, por la fuerza centrífuga; un giroscopio que se moviese por el tubo sufriría, por la fuerza centrífuga, precesión. El segundo tubo (*b*) está construido alrededor de la región del espacio donde los rayos se curvan formando círculos por la acción del campo gravitatorio del agujero negro. Debido a la curvatura de los rayos, el observador del interior del tubo lo vería recto, y predeciría correctamente que no habría fuerza centrífuga. El tercer tubo (*c*) se halla cerca del agujero negro. En este caso, los rayos de luz están tan curvados que el tubo parece que, a su vez, se curva, separándose del agujero. El observador del interior del tubo predeciría correctamente que la fuerza centrífuga empujaría el objeto hacia dentro, y provocaría la precesión del giroscopio.



tas (digamos, Juan y Alicia) que llevan a cabo experimentos dentro de una estación espacial de forma tubular, construida alrededor de un agujero negro de manera tal que su eje y el camino del rayo circular coincidan. Los astronautas saben que el eje del tubo es circular: Juan ha medido la curvatura de las paredes a lo largo del tubo usando reglas rectas. Sin embargo, a causa de la curvatura de los rayos de luz, ¡a Juan y Alicia les parece visualmente que el tubo es perfectamente recto!

Imaginemos que Alicia sujeta una linterna al tubo de forma que quede en el centro. Echa a andar por el tubo alejándose del foco. Para Alicia, la linterna no deja nunca de estar en el centro, y la curvatura del pasillo no se la va ocultando. Donde sea que esté, la luz de la lámpara llega hasta ella por la misma trayectoria circular. Si Alicia mira hacia atrás, ve que la lámpara va debilitándose progresivamente a medida que se aleja más y más, y si mira hacia delante, ve que se hace progresivamente más brillante. De hecho, la luz de la lámpara circula a lo largo del tubo muchas veces, así que Alicia ve múltiples imágenes de la lámpara.

Aunque Alicia podría tener algunas dificultades para explicar por qué la lámpara aparece detrás y delante suyo, y aunque las múltiples imágenes quizá la confundan, deberá concluir que el tubo es recto porque sus paredes nunca tapan la lámpara. Juzgando por lo que ella ve, por tanto, no esperaría que ningún efecto centrífugo actuara sobre los objetos que se movieran dentro del tubo. Deduciría que la fuerza centrífuga sería nula. Supondría también que la única fuerza que actúa sobre los objetos en el interior del tubo es la gravitatoria, que no depende de la velocidad orbital. Alicia lleva a cabo predicciones exactas basándose en lo que de hecho ve. Llamaré a esto el principio de ver-es-creer.

El significado real del principio se me escapó hasta 1985. Di una charla informal sobre la paradoja de los rayos de luz circulares en el Instituto de Física Teórica de Santa Bárbara en California. Tuve la fortuna de dirigirme a varios expertos en la teoría de la relatividad, entre ellos Brandon Carter, del Observatorio de París. Al día siguiente, Carter aportó una idea brillante: si un objeto se mueve con velocidad constante a lo largo de la trayectoria de cualquier rayo de luz —circular, curvado o recto— la fuerza que lo mantiene en movimiento no dependerá de cuán rápidamente se mueva. Por supuesto, aunque el objeto siga el camino de un rayo de luz en el espacio, lo hará a una velocidad menor que la de la luz.

Por ejemplo, si un cohete tuviera que seguir la trayectoria de un rayo de luz que pasará por delante del Sol, debería girar paulatinamente menos de una centésima de grado. Para mantenerse en movimiento a una velocidad constante, debería poner en marcha cohetes secundarios en una dirección perpendicular a su trayectoria. Pero la fuerza que los cohetes secundarios necesitarían ejercer no dependería de cuán rápido se estuviera moviendo el cohete.

Carter sugirió que el principio de ver-es-creer debería ser válido en todas partes, en cualquier campo gravitatorio. En otras palabras, si un objeto viajara a velocidad constante a lo largo de la trayectoria de un rayo de luz curvado por algún campo gravitatorio, se comportaría como si estuviera viajando en línea recta. Carter, Lasota y yo demostramos más tarde que esta suposición era correcta siempre que el campo gravitatorio asociado no cambiara con el tiempo. Desarrollamos el concepto de geometría óptica, que proporciona un marco muy útil para comprender el comportamiento dinámico de objetos en campos gravitatorios intensos. Más tarde, John C. Miller, del Observatorio Astronómico de Trieste, y Zdenk Stuchlík, de la Universidad Silesiana de Opava, descubrieron algunas relaciones básicas entre dinámica y geometría en este contexto, y Norbert Wex, del Instituto Max Planck de Física y Astrofísica de Munich, sugirieron una manera elegante e inteligente de adaptar la geometría óptica a los agujeros negros en rotación.

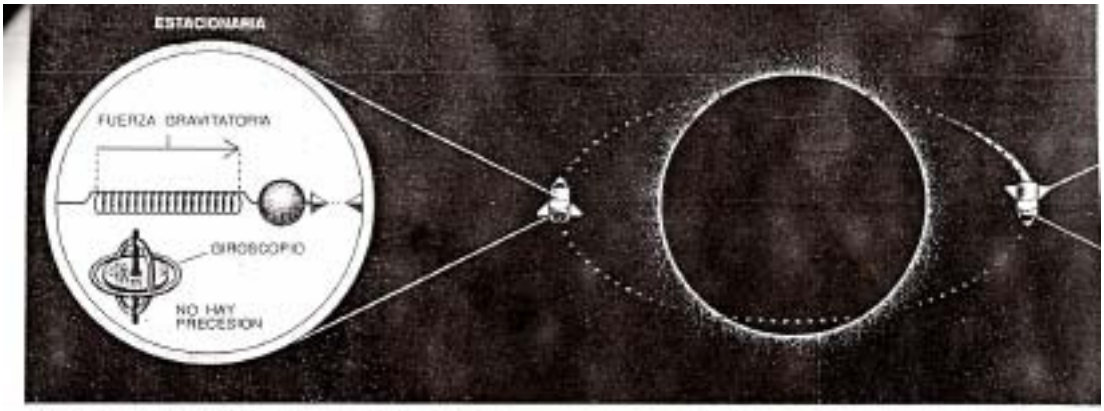
La geometría convencional del espacio se basa en medidas realizadas con reglas rectas corrientes, que definen la unidad de longitud. La geometría óptica, por su parte, depende de medidas realizadas con señales luminosas.

En la geometría convencional, se puede medir la longitud de una curva contando cuántas reglas caben a lo largo de la misma. La distancia entre dos puntos del espacio puede entonces definirse como la longitud de la curva más corta que los une. Esta curva más corta se conoce como geodésica. Si se realizan medidas en un espacio plano o, lo que es equivalente, en un espacio libre de campos gravitatorios, la curva más corta, o geodésica, entre dos puntos es una línea recta.

En la geometría óptica la distancia entre dos puntos del espacio se define como la mitad del tiempo que tarda la luz en ir de un punto a otro y volver. El tiempo se mide mediante un reloj situado en el primer punto. En un espacio libre de campos gravitatorios, la geometría óptica es exactamente la misma que la geometría convencional porque tanto los rayos de luz como las geodésicas son rectas. Así, en este caso, la geometría del espacio determina la trayectoria de los rayos de luz.

Según la teoría de la relatividad general de Einstein, las tres dimensiones del espacio y la dimensión del tiempo forman conjuntamente un espacio-tiempo cuadridimensional. En cualquier espacio-tiempo, con o sin campo gravitatorio, la luz se mueve siempre a lo largo de geodésicas, y por tanto sigue el camino que le marca la geometría del espacio-tiempo. En un espacio deformado por un campo gravitatorio, sin embargo, los rayos luminosos están curvados y en general no coinciden con las geodésicas en el sentido explicado anteriormente. Así pues, en el caso general, la geometría del espacio no determina la trayectoria de los rayos de luz.

La geometría óptica restablece la conexión entre la geometría del espacio y las trayectorias de los rayos de luz mediante el cambio de la escala de todas las distancias "verdaderas" (esto es, las medidas realizadas con reglas rectas). La aplicación de la geometría óptica es similar, en muchos aspectos, al procedimiento seguido al hacer un mapa plano de un globo redondo. La geometría óptica es una manera de hacer mapas convenientes de un espacio curvo, pero tiene algunas de las mismas dificultades que encuentra la cartografía convencional: un globo no puede representarse mediante un mapa plano sin que medie algún tipo de distorsión. Lo mismo en la cartografía convencional que en la geometría óptica, una representación puede minimizar las aberraciones de ciertos aspectos mientras distorsiona otros hasta hacer imposible su reconocimiento. La elección de la representación viene determinada por el motivo que lleve a hacer el mapa. Por ejemplo, la conocida proyección Mercator exagera las regiones polares, pero no tiene precio para los navegantes, ya que muestra todas las líneas de dirección constante como líneas rectas. De forma parecida, la geometría óptica, aunque distorsiona las distancias verdaderas, reviste particular interés para estudiar la propagación de la



2. DOS NAVES ESPACIALES en la misma órbita alrededor de un agujero negro sirven para medir la fuerza centrífuga. Cada nave espacial tiene un giroscopio y un peso que cuelga de un muelle. Cada una maniobra de manera que el peso apunte hacia una señal marcada en el casco. Una de las naves espaciales ajusta su velocidad orbital a cero, con lo que cesa la precesión del giroscopio; la fuerza centrífuga en el muelle entonces es cero, y la fuerza total, pues, igual a la gravitatoria. La otra

luz y la dinámica, pues los rayos de luz son geodésicas en el mapa que proporciona la geometría óptica (al menos siempre que el campo gravitatorio no cambie con el tiempo y su fuente material no gire.) Así, aunque la propagación de la luz y la dinámica no estén relacionadas en la geometría convencional del espacio, lo están en la geometría óptica.

El cambio de escala utilizado por la geometría óptica es un ejemplo de un procedimiento matemático empleado en la teoría de la relatividad y técnicamente conocido como transformación conforme. El cambio de escala endereza los rayos de luz curvados, de manera que aparezcan como geodésicas en la geometría óptica.

Aplicando la geometría óptica, los físicos pueden dejar a un lado problemas técnicos impuestos por la curvatura del espacio y concentrarse en los problemas físicos básicos. Este tipo de transformación conforme nos permite entender la dinámica en espacios curvos de manera intuitiva. La dinámica siempre está de acuerdo con lo que se ve. La geometría óptica explica el comportamiento aparentemente paradójico de los objetos que se mueven a lo largo de la trayectoria de un rayo de luz circular.

Puede que el resultado general más importante obtenido con la ayuda de la geometría óptica sea que, en ciertas situaciones, el espacio parece estar vuelto al revés. Me di cuenta de esto leyendo una publicación de Malcolm Anderson y José P. S. Lemos, becarios de investigación de Donald Lynden-Bell, de la Universidad de Cambridge. Anderson y Lemos demostraban que, si una nube de gas viaja en una órbita muy cercana a un agujero negro, las tensiones viscosas de la nube transfieren momento angular hacia dentro. Descubrimiento harto extraño, porque de ordinario las tensiones viscosas transfieren momento angular hacia fuera.

En efecto, la transferencia hacia fuera de momento angular por medio de una tensión viscosa es un principio de importancia fundamental en astrofísica. Ayuda a explicar la razón por la que una nube de gas (un disco de acreción) que orbita en torno a un agujero negro central suministra la energía que alimenta los núcleos activos de algunas galaxias. La tensión viscosa tiende a hacer que la rotación del disco de acreción sea más rígida, frenando por tanto la parte interior del disco que gira rápidamente y acelerando la parte exterior, que roza despacio. De este modo, el momento angular se conduce hacia fuera.

Anderson y Lemos descubrieron que la tensión viscosa puede transportar momento angular hacia dentro, pero no pudieron razonar el motivo. Tras leer su trabajo, caí en la cuenta de que la geometría óptica sugiere una potente explicación del efecto y de varios resultados similares, no menos sorprendentes. Encontré que el espacio cercano al agujero negro se vuelve al revés; la dirección hacia fuera que definen las reglas rectas es directamente opuesta a la dirección hacia fuera definida por los rayos de luz. En la situación descrita por Anderson y Lemos, el momento angular se transporta hacia fuera, como debe ser, pero "hacia fuera" ha de entenderse siempre en el sentido de la geometría óptica. Cuando se está lejos de un agujero negro, y no a otra cosa estamos acostumbrados, la dirección hacia fuera de la geometría convencional coincide con la definida por la geometría óptica. Pero cerca del agujero estas dos direcciones son opuestas, de suerte que el momento angular es transportado hacia dentro con respecto a la geometría convencional, cosa que parece paradójica.

Para comprender por qué esto es así, pensemos otra vez en una estación espacial circular tendida en torno a un agujero negro, sólo que ahora la estación no se construirá alrededor del rayo circular de luz, sino alrededor de un círculo menor, centrado en el agujero negro. Juan mide las distancias verdaderas mediante una regla recta corriente; Alicia usa, en cambio, señales luminosas. Por conveniencia, supongamos que Juan y Alicia siempre miran a lo largo del tubo dejando el agujero negro a su izquierda. Con su regla corriente, Juan encuentra que el tubo se curva hacia la izquierda. Y, en efecto, sus medidas están de acuerdo con la geometría real; le bastaría tocar el tubo con sus manos para experimentar que las paredes se curvan hacia la izquierda. Concluirá que la

nave viaja a cualquier velocidad. La fuerza centrífuga en su muelle se deduce midiendo su tensión y comparando el resultado con el de la segunda nave.

dirección hacia fuera es la dirección hacia la derecha.

Juan sabe por la experiencia diaria que la fuerza centrífuga empuja en dirección hacia fuera. Podría entonces predecir que debería empujar los objetos hacia la derecha. De manera similar, supondría que las tensiones viscosas transportan el momento angular hacia la derecha. Pero la verdad es exactamente la opuesta.

Alicia realiza un conjunto distinto de mediciones, basados en lo que realmente ve, y llega a la conclusión correcta. Pide a Juan que camine alejándose de ella, sosteniendo una linterna de forma que se mueva a lo largo del eje del tubo. Si el campo gravitatorio no curvase los rayos de luz (es decir, si los rayos fueran rectos), la lámpara desaparecería por la parte izquierda del tubo, y Alicia concluiría que el tubo estaba curvado hacia la izquierda. Si los rayos fueran circulares, la lámpara no desaparecería; daría la impresión de que el tubo es recto. Pero el tubo está tan cerca del agujero negro, que los rayos de luz se curvan incluso más que los rayos circulares. Por tanto, Alicia ve que la lámpara desaparece por la derecha y concluye que el tubo se curva hacia dicho lado. Así, predice que la fuerza centrífuga empuja hacia la izquierda y que la tensión viscosa transporta momento angular hacia la izquierda. Sus predicciones son correctas, como garantiza el principio de ver-es-creer. Observemos que, según la geometría convencional, dentro del tubo la fuerza centrífuga atrae hacia el centro del movimiento circular.

A lo largo de los últimos años, la geometría óptica se ha venido aplicando con éxito a varios problemas astrofísicos relacionados con el comportamiento de la materia en rotación en campos gravitatorios intensos. Los dos problemas centrales de este tipo son el colapso gravitatorio de estrellas giratorias y la fusión de dos estrellas de neutrones, objetos densísimos.

John Miller y yo hemos demostrado que la geometría óptica puede ser muy útil para afrontar estos problemas. Conforme a la teoría no relativista, se esperaría que un cuerpo gaseoso en rotación que se comprimiese conservando su masa y su momento angular debería hacerse progresivamente más plano. Sin embargo, en 1974 Subrahmanyan Chandrasekhar, de la Universidad de Chicago, y Miller, entonces en la Universidad de Oxford, encontraron que, según la teoría de Einstein, en las últimas etapas de la contracción, cuando el campo gravitatorio es muy intenso, cesa la tendencia a aplanarse y la estrella en rotación se torna más esférica. Miller y yo hemos explicado este efecto gracias a la geometría óptica y a haber tenido en cuenta el carácter insólito de la fuerza centrífuga en un campo gravitatorio intenso.

No me ha sido fácil convencer a mis colegas de que la inversión de la fuerza centrífuga es un efecto físico real. El problema estribaba en cómo se definía y medía la fuerza centrífuga en un espacio muy curvado. Nada me hizo progresar más que las cuestiones que me planteaba Fernando de Felice, de la Universidad de Turín. Como resultado de mis amigables batallas con él, he llegado a una peculiar definición de la fuerza centrífuga. Hay otras, pero entiendo que son menos útiles y no tan convincentes.

A fin de medir la fuerza centrífuga, imagino dos naves espaciales que viajan en la misma órbita alrededor de un agujero negro. Juan pilota una nave y Alicia la otra. Cada nave espacial lleva un equipamiento que consta de dos piezas: un giroscopio y un peso que cuelga de un muelle. Midiendo su longitud, Juan y Alicia pueden determinar la tensión del muelle. La tensión, a su vez, es igual a la suma de las dos fuerzas que actúan en el peso: la fuerza gravitatoria y la fuerza centrífuga.

Para medir solamente una cualquiera de estas fuerzas, Juan y Alicia deben cambiar la orientación de sus naves espaciales mientras orbitan el agujero negro; deben girar de manera que el muelle estirado apunte siempre hacia una señal marcada en el casco de la nave. La dirección del muelle está por tanto fijada en ésta, pero no en el espacio. Por otro lado, el giroscopio de cada nave apunta siempre hacia una dirección fija en el espacio, y, por tanto, a medida que la nave se vaya moviendo por su órbita, sufrirá una precesión en relación a la dirección del muelle.

Para medir la fuerza gravitatoria, Juan hace parar su nave; sabe cuándo ha parado porque cesa la precesión de su giroscopio, y concluye, por ello, que en ese momento la fuerza que alarga el muelle es sólo la gravitatoria. Comunica su resultado a Alicia, que sigue viajando alrededor del agujero negro en la misma órbita. Alicia mide la fuerza total que alarga su muelle y calcula la fuerza centrífuga sustrayendo de aquélla la fuerza gravitatoria que Juan ha medido. Este método de medición de la fuerza centrífuga parece complicado, pero tiene la ventaja de ser exactamente el mismo en campos gravitatorios débiles y fuertes.

La geometría óptica proporciona una manera adecuada de atacar problemas difíciles de relatividad general; de ahí su valor práctico. Es también útil pedagógicamente.

Y en un nivel más básico, nos muestra que los conceptos de "hacia dentro" y "hacia fuera" no son absolutos en espacios deformados por campos gravitatorios intensos. En otros tiempos se creía que las nociones de arriba y abajo, incluso las de izquierda y derecha, eran absolutas. Quizá dentro de unos años no haya quien se sorprenda de que la distinción de dentro y fuera sea, en realidad, tan relativa como aquéllas que a nuestros antepasados les parecían absolutas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ON TRAVELLING ROUND WITHOUT FEELING IT AND UNDERWIND CURVES. M. A. Abramowicz y J.-P. Lasota en *American Journal of Physics*, vol. 54, págs. 936-939; octubre de 1986.

REVISITING CENTRIFUGAL FORCES. Bruce Allen en *Nature*, vol. 347, n.º 6294, págs. 615-616; 18 de octubre de 1990.

RELATIVITY OF INWARDS AND OUTWARDS: AN EXAMPLE. M. A. Abramowicz en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 256, n.º 4, págs. 710-718; 15 de junio de 1992.

THE WALL OF DEATH. M. A. Abramowicz y E. Szuszkiewicz en *American Journal of Physics* (en prensa).

DIECISIETE: AGUJEROS NEGROS – TRES

Con el fín de poder implementar modelos (matemáticos y de computadora) para estudiar los Agujeros Negros se considera a estos como perfectamente esféricos y estáticos. Pero hay otros enfoques:

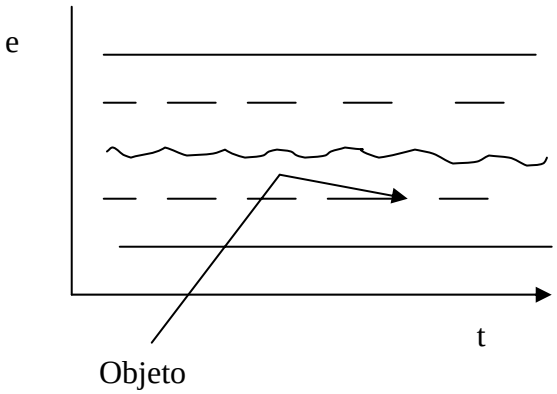
1) Modelo en el cual al AN se lo dota de carga eléctrica
2) Modelo en el cual se tiene en cuenta la conservación del momento angular. Los AN se consideran con rotación (conservación del momento angular de la estrella que origina el AN).

Aparecen así 4 nuevas consideraciones sobre los AN:

1) La velocidad de rotación es tal que para un observador alejado la singularidad adquiere una forma anular. Ya no es un punto matemático sino una esfera (Horizonte de sucesos) con una singularidad anular en el medio.
2) El Horizonte de sucesos adquiere un abultamiento ecuatorial (igual que cualquier cuerpo con rotación).
3) En las adyacencias, por fuera del horizonte de sucesos, el espacio y el tiempo son arrastrados (por la velocidad de rotación del AN) conformando un torbellino espacial donde las partículas son arrastradas en el mismo sentido del giro del AN.
4) En un AN rotatorio, a cierta distancia de la singularidad se forma otro horizonte, llamado Horizonte interno.

¿Cómo se comporta la materia en estos casos? Si miramos hacia un AN en dirección a uno de sus polos y vemos una fuente de luz arrastrada por la gravedad del AN:

1) Si la fuente luminosa está cerca del Horizonte de sucesos los frentes de onda que emite se desvían hacia el Horizonte de sucesos. Si está mas alejanda los frentes de onda se desvían en el sentido de la rotación (por la gran velocidad que le es impuesta por el AN). Si está mas lejos los frentes de onda serán desviados hacia fuera por la fuerza centrífuga, pudiendo así escapar de la atracción del AN. Es por esto que un AN emite un suave resplandor (cualquier objeto emite, no sólo una fuente luminosa), es la radiación de Hawking o superradiación.
2) Las ecuaciones dicen que si algo entrara bajo un ángulo apropiado podría ser expulsado hacia fuera con mas energía que la tenía cuando cayó hacia el AN (hasta el doble de la energía que tenía la masa en reposo del objeto en cuestión). Esto convertiría a los AN en la mejor máquina generadora de energía de todo el Universo. La zona donde esto puede darse (la zona adyacente al AN donde la gravedad del mismo arrastra el tiempo y el espacio y en el que el objeto puede ser expulsado) se denomina Ergósfera (del griego, trabajo). El límite entre la zona de espacio arrastrada y el espacio normal se llama Límite estático.
3) Si un objeto cae en un AN con rotación no desaparece en la singularidad. La fuerza centrífuga rechaza al objeto y la distancia a la que el mismo se aleja dependel del momento angular que tenga el AN. El máximo alejamiento coincide con el horizonte interno.

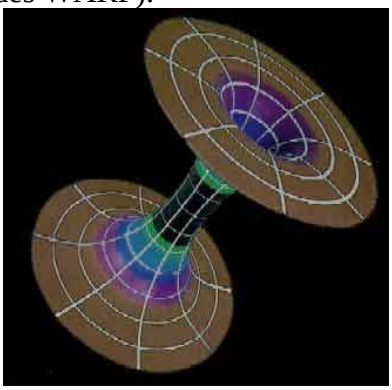


Horizonte de sucesos

Singularidad

Horizonte interno

4) Ahora bien, si el objeto no puede salir del AN, ¿dónde va? Las ecuaciones topológicas dicen que debe deslizarse a otro lugar del Universo. Estos son los puentes de Rosen-Einstein o túneles del espacio-tiempo (agujeros de gusano). Todo objeto que caiga en un AN con momento angular y carga eléctrica, y bajo ciertas condiciones, puede trasladarse millones de años luz en un breve momento (a esto se le llama asumir velocidades WARP).



5) Desde ya que estos túneles no están formados por espacio-tiempo común. La traslación espacial se tiene que compensar con un valor temporal por lo menos igual. Así, si un objeto se traslada a 1.000 millones de años luz de distancia aparecerá en otra parte del Universo a 1.000 millones de años antes (cuando miramos una estrella o galaxia la estamos viendo como era en el pasado, exactamente la misma cantidad de años antes que la distancia en años luz que nos separa de ella).
6) Con esta traslación aparecerá en el otro extremo del túnel (y con retroactividad en el tiempo) el objeto como materia común con la energía acumulada. Si el AN expulsa toda la energía (en toda la gama del espectro electromagnético) un observador lo vería como un Agujero Blanco, que expulsa materia y energía.

Los detractores de estas teorías dicen que los AB no pueden existir porque:

1) Los AN mas pequeños (a nivel partícula) deben estar sometidos a las leyes de la mecánica cuántica, y así cumplir con el Principio de Incertidumbre de Heisenberg, fluctuando entre ser y no ser millones de veces por segundo. Por esto no pueden existir los agujeros de gusano.

Principio de indeterminación de Heisenberg

De Wikipedia, la enciclopedia libre

En mecánica cuántica el **principio de indeterminación de Heisenberg** afirma que no se puede determinar, simultáneamente y con precisión arbitraria, ciertos pares de variables físicas, como son, por ejemplo, la posición y la cantidad de movimiento de un objeto dado. En palabras sencillas, cuanta mayor certeza se busca en determinar la posición de una partícula, menos se conoce su cantidad de movimiento lineal. Este principio fue enunciado por Werner Heisenberg en 1927.

Definición formal

Si se preparan varias copias idénticas de un sistema en un estado determinado las medidas de la posición y el momento variarán de acuerdo con una cierta distribución de probabilidad característica del estado cuántico del sistema. Las medidas de la desviación estándar Δx de la posición y el momento Δp verifican entonces el principio de incertidumbre que se expresa matemáticamente como

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{2\pi}$$

donde h es la constante de Planck (para simplificar, $\frac{h}{2\pi}$ suele escribirse como $\hbar$)

En la física de sistemas clásicos esta incertidumbre de la posición-momento no se manifiesta puesto que se aplica a estados cuánticos y h es extremadamente pequeño. Una de las formas alternativas del principio de incertidumbre más conocida es la incertidumbre tiempo-energía que puede escribirse como:

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{h}{2\pi}$$

Esta forma es la que se utiliza en mecánica cuántica para explorar las consecuencias de la formación de partículas virtuales, utilizadas para estudiar los estados intermedios de una interacción. Esta forma del principio de incertidumbre es también la utilizada para estudiar el concepto de energía del vacío.

Explicación menos rigurosa

Podemos entender mejor este principio si pensamos en lo que sería la medida de la posición y velocidad de un electrón: para realizar la medida (para poder "ver" de algún modo el electrón) es necesario que un fotón de luz choque con el electrón, con lo cual está modificando su posición y velocidad; es decir, por el mismo hecho de realizar la medida, el experimentador modifica los datos de algún modo, introduciendo un error que es imposible de reducir a cero, por muy perfectos que sean nuestros instrumentos.
No obstante hay que recordar que el principio de incertidumbre es inherente al universo, no al experimento ni a la sensibilidad del instrumento de medida. Surge como necesidad al desarrollar la teoría cuántica y se corrobora experimentalmente. No perdamos de vista que lo dicho en el párrafo anterior es un símil pero no se puede tomar como explicación del principio de incertidumbre.

Consecuencias del principio

Este Principio supone un cambio básico en nuestra forma de estudiar la Naturaleza, ya que se pasa de un conocimiento teóricamente exacto (o al menos, que en teoría podría llegar a ser exacto con el tiempo) a un conocimiento basado sólo en probabilidades y en la imposibilidad teórica de superar nunca un cierto nivel de error.

El principio de indeterminación es un resultado teórico entre magnitudes conjugadas (posición - momento, energía-tiempo, etcétera). Un error muy común es decir que el principio de incertidumbre impide conocer con infinita precisión la posición de una partícula o su cantidad de movimiento. Esto es falso. El principio de incertidumbre nos dice que no podemos medir simultáneamente y con infinita precisión un par de magnitudes conjugadas.

Es decir, nada impide que midamos con precisión infinita la posición de una partícula, pero al hacerlo tenemos infinita incertidumbre sobre su momento. Por ejemplo, podemos hacer un montaje como el del experimento de Young y justo a la salida de las rendijas colocamos una pantalla fosforescente de modo que al impactar la partícula se marca su posición con un puntito. Esto se puede hacer, pero hemos perdido toda la información relativa a la velocidad de dicha partícula.

Por otra parte, las partículas en física cuántica no siguen trayectorias bien definidas. No es posible conocer el valor de las magnitudes físicas que describen a la partícula antes de ser medidas. Por lo tanto es falso asignarle una trayectoria a una partícula. Todo lo más que podemos es decir que hay una determinada probabilidad de que la partícula se encuentre en una posición más o menos determinada.

Incertidumbre

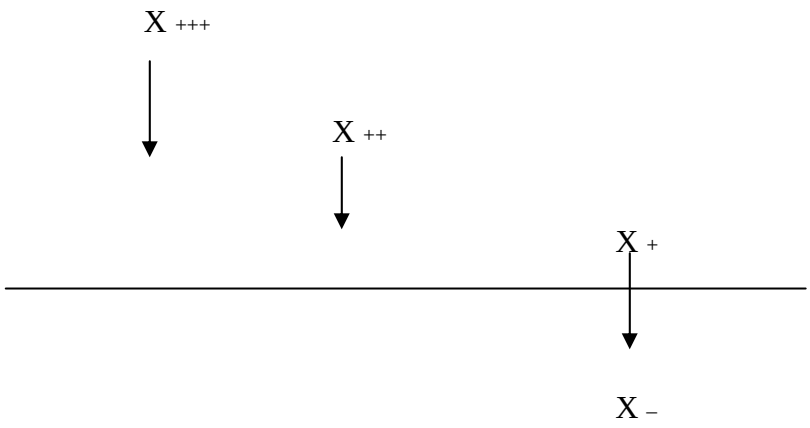
Los términos "indeterminación" e "incertidumbre" son equivalentes en este contexto, podemos referirnos al "principio de indeterminación de Heisenberg" o "principio de incertidumbre de Heisenberg" indistintamente.

2) Cualquier cosa que entre en un AN entra acompañada por la radiación que llena el espacio, la cual sería sumamente comprimida por la gravedad del AN. Semejante destello de energía destruiría el objeto.
3) Si entrara, la masa de la energía crearía su propio campo gravitatorio ($E = m\ c^2$), creando así una nueva singularidad donde caería el objeto en cuestión.

Hoy en día la mayoría de los teóricos no aceptan los agujeros de gusano (comunicación entre distintos espacios y tiempos), aunque los mismos se derivan de las ecuaciones.

El Horizonte de sucesos tiene el radio que tiene la luz girando en su interior (por eso la luz no puede salir). El Horizonte fáctico se comporta como una membrana unidireccional, todo entra y nada sale. Pero del estudio de los mini-AN (los formados en el Universo primigenio gracias a la gran presión que pudo comprimir algún grumo de la materia o energía originales) desde el punto de vista cuántico se puede concluír que pueden emitir cualquier tipo de partícula por estar en equilibrio térmico con su entorno. Por esto:

1) Desde el punto de vista cuántico el vacío no existe. El espacio, a muy pequeño tamaño, está bullendo de partículas y antipartículas que aparecen, interaccionan entre sí y desaparecen (se anulan). A esto se lo llama fluctuaciones del vacío o polarización del vacío.
2) Una partícula cercana a un campo gravitatorio tiene menos energía cuanto mas cerca de dicho campo. Ese defícit de energía se debe a la energía aplicada por la partícula para oponerse a la acción del campo gravitatorio.
3) Si el campo gravitatorio se origina en un AN la partícula cae y atraviesa el Horizonte de sucesos. La partícula posee originariamente energía positiva (se la llama positiva por convención, no tiene nada que ver con la carga eléctrica). Al ingresar en el AN adquiere energía negativa.



Si en el espacio adyacente al Horizonte de sucesos se materializa un par de partículas puede suceder una de tres cosas:

1) Se materializan y se aniquilan.
2) Se materializan y antes de poder aniquilarse son absorbidas por el AN.
3) Se materializan y sólo una cae en el AN mientras que la otra se aleja por el espacio con su energía positiva. Para un observador alejado es como si hubiera sido emitida por el AN.

Desde el punto de vista cuántico puede decirse también que una partícula es equivalente a su antipartícula pero con la dirección temporal invertida. Así, si se materializa una partícula negativa en el interior del Horizonte de sucesos del AN un observador alejado la verá como una partícula con energía positiva creada a partir del AN.
Dentro del AN hay energía negativa y sale positiva, cae positiva y se transforma en negativa; esto respeta la primera ley de la termodinámica (ley de la conservación de la energía).

Conservación de la energía

De Wikipedia, la enciclopedia libre

La ley de **conservación de la energía** establece que el valor de la energía de un sistema aislado (sin interacción con ningún otro sistema) permanece invariable con el tiempo. La conservación de la energía de un sistema está ligada al hecho de que las ecuaciones de evolución sean independientes del instante considerado.
Dentro de los sistemas termodinámicos, una consecuencia de la ley de conservación de la energía es la llamada primera ley de la termodinámica que establece que, dada una cantidad de energía térmica ΔQ que fluye dentro de un sistema, debe aparecer como un incremento de la energía interna del sistema (ΔU) o como un trabajo (ΔW) efectuado por el sistema sobre sus alrededores:

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta W$$

Transformación de la energía

Aunque la energía no se pierde, se degrada. Hay formas de energía que se pueden transformar o aprovechar mejor. Al final y tras sucesivas conversiones la energía acaba en forma de calor. Este calor es muy difícil de convertir en otras energías, por lo menos con un rendimiento cercano al rendimiento del Ciclo de Carnot, y, además, se necesita una diferencia de temperatura. Muchas veces no se puede aprovechar y hay que desecharlo. A veces, hace falta energía extra para desecharlo.

Desde un punto de vista cotidiano, las máquinas y los procesos desarrollados por el hombre funcionan con un rendimiento menor que el 100%, lo que se traduce en "pérdidas de energía" medido en términos económicos o materiales, sin que esto deba interpretarse como un no cumplimiento del principio enunciado.

El principio en las mecánicas lagrangiana y relativista

En Mecánica lagrangiana la conservación de la energía es una consecuencia del teorema de Noether cuando el lagrangiano no depende explícitamente del tiempo y, por tanto, existe un grupo uniparamétrico de traslaciones temporales o simetría que satisface el teorema de Noether.

En mecánica relativista, la conservación de la energía requiere que asociada a una masa se considere una cantidad de energía $E = mc^2$, donde m es la masa efectiva en movimiento. Por tanto, dentro de la teoría de la relatividad no es posible formular una ley de conservación de la masa análoga a la que existe en mecánica clásica. Esto lleva a que en mecánica relativista no existan leyes de conservación separadas para la energía y para la masa, entendida en el sentido clásico, sino una única ley de conservación para la "masa-energía".

Si entrara energía negativa el AN disminuiría su energía y su masa. Si el AN expulsa partículas, desde el punto de vista cuántico disminuirá de tamaño hasta desaparecer.

La temperatura del AN es directamente proporcional a su gravedad superficial e inversamente proporcional al cuadrado de su masa. O sea,

$$T^{o} = \frac{Gs}{M_2}$$

Así, cuanto mas chico sea el AN mas energía emitirá. Cuano mas pequeño sea un AN las partículas deberán recorrer menor distancia para escapar. Así, partícula a partícula todos los AN deberían desaparecer por evaporación, y cuanto mas chicos sean más rápida sería la evaporación, desapareciendo definitivamente en un colosal estallido de radiación (emitida en todas las frecuencias del espectro).
O sea, AN sólo son los de gran masa, los mas pequeños no son negros.

Singularidad desnuda: Al no tener un Horizonte de sucesos nada impide que algo salga. Esto fue analizado por Penrose por medio de los teoremas del sensor cósmico (que me hace acordar a la constante gravitatoria de Einstein). Los mismos determinan que no existen singularidades desnudas. El sensor funciona por medio de la carga y el momento angular.

Así, hoy hay acuerdo en que:

1) No existen los Agujeros de gusano.
2) Los AN no deben ser demasiado complicados.

Los AN fueron primero una construcción teórica y luego surgió la pregunta sobre su real existencia. Esto llevó a su búsqueda y detección. Para detectarlos se buscaron los efectos secundarios ocasionados por su acción gravitatoria. El AN debe tener interacción con la materia, pero sólo con la que lo rodea. Probablemente la gran mayoría de los AN no tiene materia alrededor por lo que no se los puede detectar. Se pueden ver cuando:

1) Se encuentran en lugares donde la densidad estelar es elevada, como en el centro de los cúmulos globulares o el centro de las galaxias.
2) Se encuentran formando parte de un sistema binario.

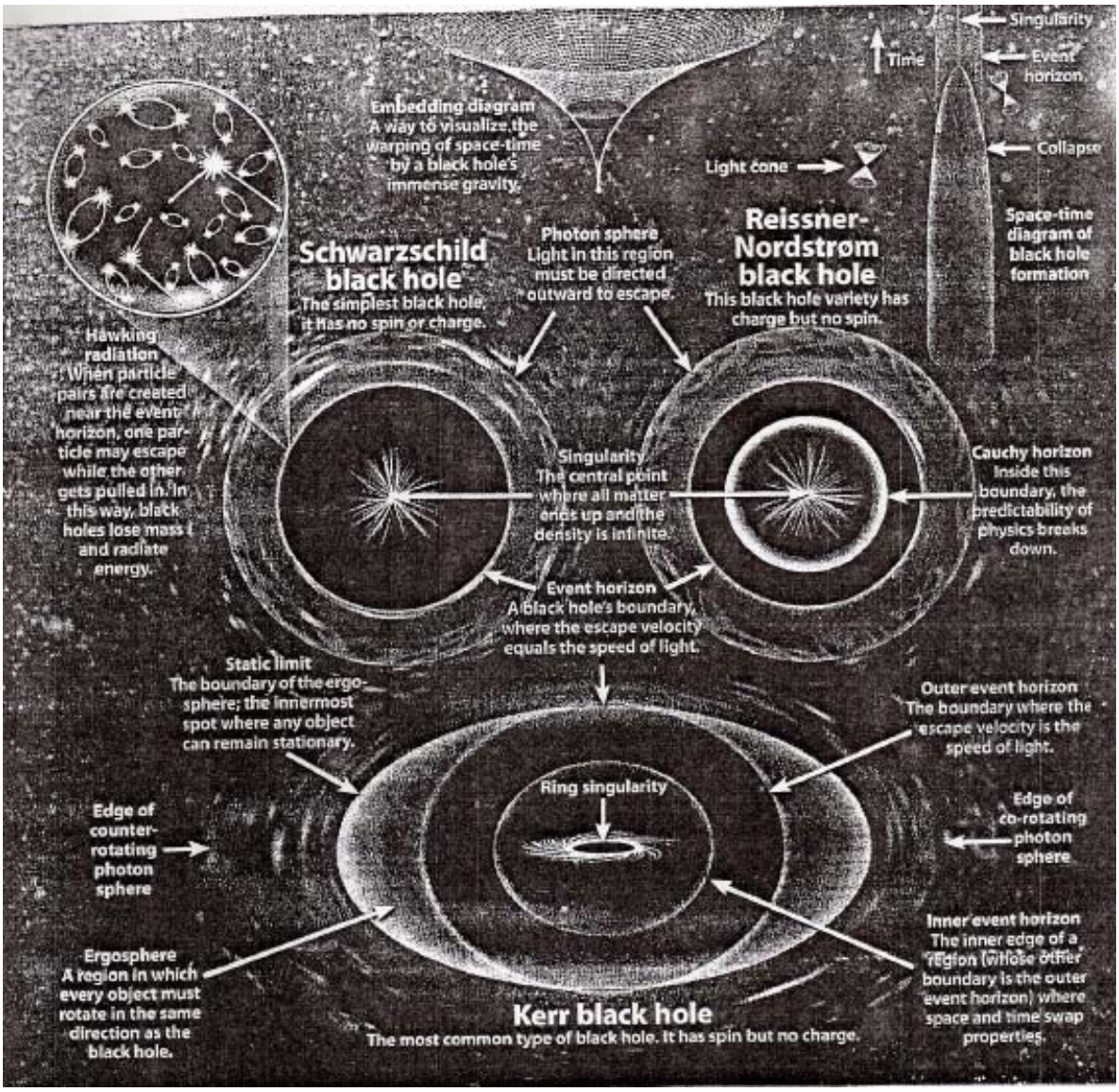
Centro de los cúmulos globulares: Allí la densidad estelar es 1.000 veces mayor que en la vencidad del Sol. Esto facilitaría la coalescencia de las estrellas como para colapsar y formar un AN con un disco de acreción con distinta densidad y distinta velocidad de rotación entre la parte interna (más rápida y mas densa) y la externa (más lenta y menos densa), el cual emite en toda las frecuencias. Se han descubierto en los cúmulos globulares dichos discos de acreción orbitando un AN de unas 100 a 1.000 masas solares.

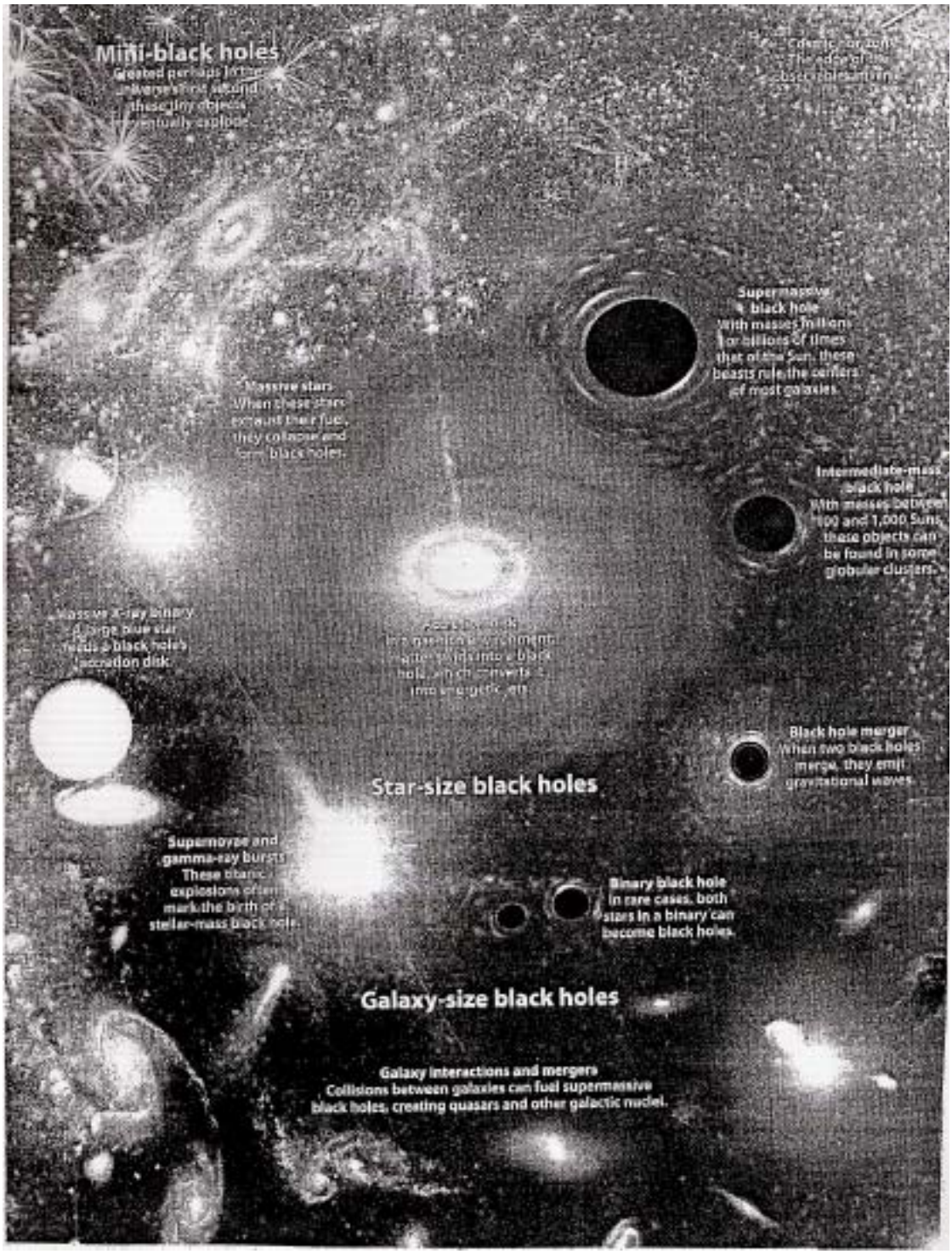
Centro de las galaxias: Allí también es muy grande la densidad estelar (se calcula que la distancia entre estrellas es de 9,12 días luz). Se formarían entonces gigantescos AN, de 3.000 a 5.000 masas solares, comprimidos en un espacio no mayor que el Sistema Planetario Solar (5.600.000 Km), con su propio disco de acreción. Ya se han descubierto discos luminosos de este tipo.

Sistemas binarios: Si se puede determinar la masa del conjunto y la inclinación del disco se puede tener la masa de cada uno de los componentes del sistema. En la constelación del Cisne se descubrió una poderosa fuente de rayos x a la que se llamó Cygnos X1. Al observar dicha zona se descubrió que sólo se veía una estrella catalogada como binaria espectroscópica (su espectro variaba primero al rojo y luego al azul, lo que indicaba que debía estar rotando alrededor de otro cuerpo estelar). Se calculó que el compañero invisible de dicha estrella tiene entre 6 y 8 masas solares, pero no puede ser visto. Por su masa no podía ser una Enana Blanca ni una Estrella de Neutrones. Por lo tanto sólo se lo puede considerar como un AN.

Se calcula que en la Vía Láctea hay unos 100 millones de AN, la mayoría inobservables.
La menor masa que puede formar un AN se ha calculado en 10^{-5} grs. Para que una masa tan pequeña pueda formar un AN debe comprimirse hasta 10^{-33} cm. (un Radio de Planck). Al compactarse a este tamaño aumentaría su densidad hasta 10^{94} grs. (densidad de Planck). Esta densidad es tan grande que podría incluír toda la masa y la energía del Universo, lo que es un absurdo total. Es por esto que se afirma que dichos AN tan pequeños no pueden existir.

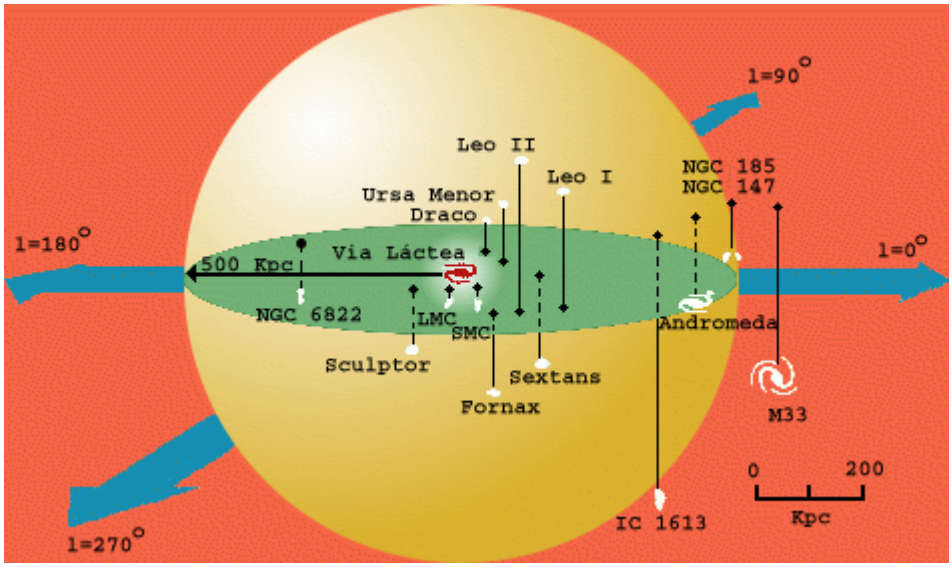
FOTOCOPIAS:


Singularity
Event horizon
Collapse
Time
Embedding diagram
A way to visualize the warping of space-time by a black hole's immense gravity.
Light cone
Space-time diagram of black hole formation
Schwarzschild black hole
The simplest black hole; it has no spin or charge.
Photon sphere
Light in this region must be directed outward to escape.
Reissner-Nordstrøm black hole
This black hole variety has charge but no spin.
Hawking radiation
When particle pairs are created near the event horizon, one particle may escape while the other gets pulled in. In this way, black holes lose mass and radiate energy.
Singularity
The central point where all matter ends up and the density is infinite.
Cauchy horizon
Inside this boundary, the predictability of physics breaks down.
Event horizon
A black hole's boundary, where the escape velocity equals the speed of light.
Static limit
The boundary of the ergosphere; the innermost spot where any object can remain stationary.
Outer event horizon
The boundary where the escape velocity is the speed of light.
Ring singularity
Edge of counter-rotating photon sphere
Edge of co-rotating photon sphere
Ergosphere
A region in which every object must rotate in the same direction as the black hole.
Inner event horizon
The inner edge of a region (whose other boundary is the outer event horizon) where space and time swap properties.
Kerr black hole
The most common type of black hole. It has spin but no charge.


Mini-black holes
Created perhaps in the universe's first second, these tiny objects eventually explode.
Cosmic "or torn" The edge of the observable universe.
Supermassive black hole
With masses in billions or billions of times that of the Sun, these beasts rule the centers of most galaxies.
Massive stars
When these stars exhaust their fuel, they collapse and form black holes.
Intermediate-mass black hole
With masses between 100 and 1,000 Suns, these objects can be found in some globular clusters.
Massive X-ray binary
A large blue star feeds a black hole's accretion disk.
Black hole merger
When two black holes merge, they emit gravitational waves.
Star-size black holes
Supernovae and gamma-ray bursts
These titanic explosions often mark the birth of a stellar-mass black hole.
Binary black hole
In rare cases, both stars in a binary can become black holes.
Galaxy-size black holes
Galaxy interactions and mergers
Collisions between galaxies can fuel supermassive black holes, creating quasars and other galactic nuclei.

DIECIOCHO: GALAXIAS ACTIVAS

Galaxias: Miles de millones de estrellas, materia difusa y materia obscura (la materia obscura es el 90 % de la masa total de las galaxias y el 25 % de la masa total del Universo) aglutinadas por la fuerza gravitatoria. En un volúmen de espacio de 1 parsec (3,25 AL ó 31 billones de Kms.) de radio a partir del Sol hay 42 galaxias, lo que se llama el Grupo Local de Galaxias.



Pasado este límite hay miles de millones de galaxias hasta el límite de lo visible. En 1952, Hubble comenzó el estudio y clasificación de las galaxias de acuerdo a su estructura. Así, las galaxias pueden clasificarse como:

1) Galaxias elípticas, caracterizadas por tener forma elipsoidal, un núcleo o bulbo central, disminuyendo la luminosidad hacia la periferia. Las hay de forma perfectamente redonda hasta las que poseen un cierto achatamiento.

2) Galaxias espirales, poseen un núcleo del cual salen en forma tangencial brazos espirales que están formados por estrellas mas azules, de gran masa y alta luminosidad, y materia difusa (gas y polvo). En los brazos hay una gran actividad productora de estrellas. En algunas galaxias espirales los brazos se proyectan desde una barra que atraviesa la galaxia, son las llamadas Galaxias espirales barradas.

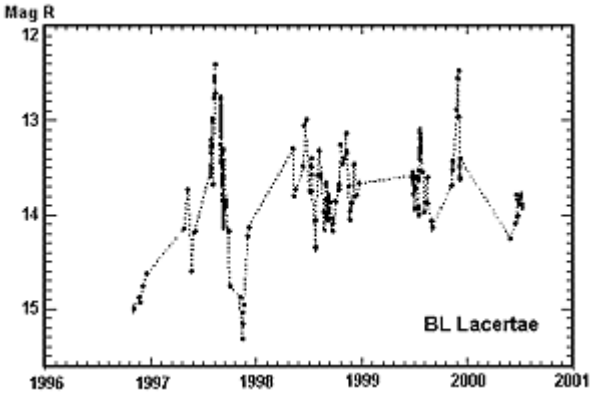
3) Galaxias lenticulares, poseen un núcleo central sin brazos. Tienen forma de lenteja.

4) Galaxias irregulares, sin forma. Irregulares Tipo 1: con estrellas muy azules y masivas, ricas en radiación ultravioleta, demuestran gran actividad formadora de estrellas (por ej., la Nube Mayor de Magallanes, donde se encuentra 'La Tarántula', nebulosa brillante). Irregulares Tipo 2: se caracterizan por casi no tener materia difusa, sus estrellas son muy antiguas, de color rojo y baja luminosidad.

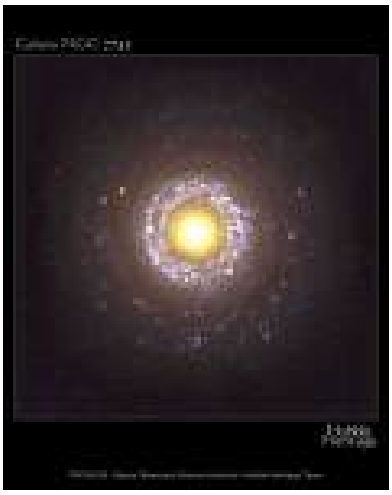
Observando el espacio profundo puede verse que:

1) Las galaxias irregulares son las mas abundantes en el Universo.
2) La mayor parte de las radiofuentes son extragalácticas, o sea, sólo pueden ser Galaxias.
3) La mayoría de las galaxias emiten su espectro mayormente en frecuencias visibles, pero hay algunas donde es al revés, emiten mas en frecuencias radiales. A estas últimas se las llama RadioGalaxias.
4) Hay una gran cantidad de radiofuentes que, al buscar su correspondica óptica, tienen su equivalencia como una estrella. Sólo se ve una imagen puntual de la radiofuente. En 1944 se demostró que esos puntos son en realidad galaxias muy lejanas. Esto demuestra una energía luminosa en cantidades inimaginables. Se las llamó entonces Radio Fuentes Cuasi Estelares, o Cuásares.
5) Otro tipo de radiofuentes, caracterizado por variar la intensidad de su radiación, coinciden con estrellas que hace años que están catalogadas como variables. A estas Galaxias se las llama lacértidos o BL Lacértidas.

Los BLLAC son objetos extragalacticos de tipo BL Lacertae, objetos compactos casi estelares mostrando espectros casi continuos con débiles rayas de absorción y de emisión y cambios de brillo relativamente rápidos con amplitudes que llegan hasta 3 magnitudes y más. Son fuentes de intensa radiación X y de ondas de radio. Su radiación muestra una polarización lineal fuerte y variable en el óptico y en el infrarrojo. Algunos objetos de este tipo, considerados erróneamente como estrellas variables e incluidos en el GCVS probablemente serán catalogados en el futuro con un registro particular en el Catálogo.

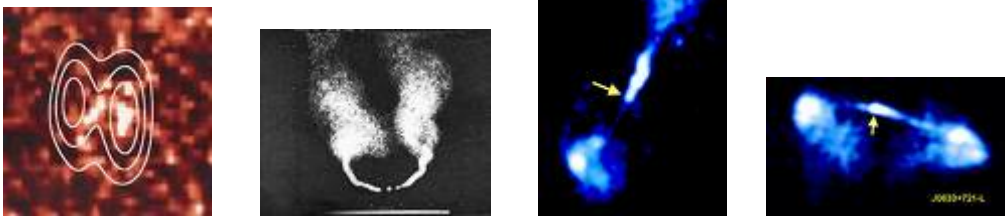


6) El examen en profundidad descubre Galaxias espirales que emiten enormes cantidades de radioenergía, el bulbo central es muy pequeño y muy luminoso. Se las llama Galaxias Seyfert



Tanto en los cuásares como en las Seyfert, las radiogalaxias y los lacértidos, obran mecanismos físicos capaces de producir grandes cantidades de energía. Se las llama, en conjunto, Galaxias Activas. Actualmente se conocen mas de 13.000 GA y se calcula que su número real es superior a las 100.000.-
Algunas de ellas se han analizado con los radio-interferómetros (sistemas de antenas conectadas entre sí para producir una sola imagen), logrando una definición de 0,0001 grados (un diesmilésimo de grado de definición, lo que equivale a poder ver a un hombre caminando en la Luna).

Las radiogalaxias aparecen como puntos luminosos en una placa fotográfica, pero bajo la mirada del radiotelescopio se muestran 2 enormes zonas separadas, las que se encuentran unidas por estructuras finas que parten de un punto apenas visible. A las zonas se las llama radiolóbulos, son como el remate de 2 líneas de energía de apenas 3 grados de apertura. A las estructuras que unen los radiolóbulos se las llama chorros. La distancia media entre los radiolóbulos es de 10 millones de AL.

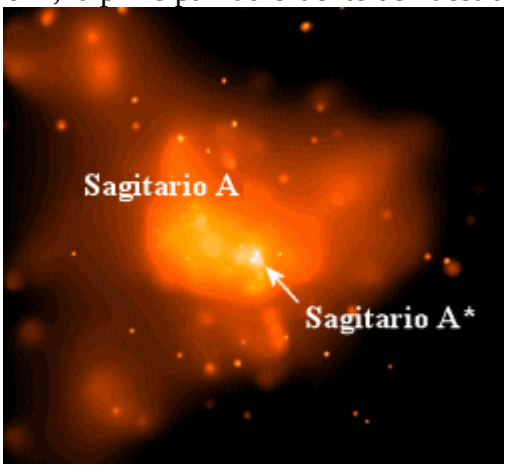


Casi todas son galaxias elípticas gigantes, hasta 10 veces mayores que la Vía Láctea. El punto desde el cual salen los chorros es el centro de dichas Galaxias. Este tipo de objetos estelares suscita diversas preguntas: ¿Cuál es la naturaleza física de los chorros y cómo mantienen su colimación de 3 grados sin desintegrarse? ¿Porqué la energía es emitida en forma de chorros? ¿Qué proceso físico puede emitir materia en dichas condiciones y a tal distancia?

1) Los análisis tanto ópticos como radiales demuestran que la energía está polarizada, o sea, que no es de orígen térmico. Su orígen es la radiación sincrotón. Son flujos de plasma relativístico, partículas desplazándose a velocidades cercanas a la de la luz y aceleradas por grandes campos magnéticos.
2) Los chorros de plasma relativístico tienen que abrirse paso a través de la materia interestelar y la intergaláctica. Si bien la materia interestelar tiene una densidad que va desde medio a 2 átomos por cm^3, y la intergaláctica de 10^{-5} átomos por cm^3, el chorro relativístico se ve frenado por las contínuas colisiones con las partículas suspendidas en el espacio, perdiendo así energía. Agotada la energía, frenada, aparece como radiolóbulos en los radiotelescopios. Los chorros aportan a los radiolóbulos materia, energía y flujo magnético.
3) De algunas radiogalaxias sólo puede identificarse un chorro. Lo que se piensa es que se ven así por la presentación del sistema a la visión de un observador terrestre y por un fenómeno relativístico (sólo se ve el chorro que se direcciona hacia la Tierra, el chorro que se aleja, por efecto doppler, aumenta su longitud de onda hasta que la misma deja el ámbito radial y por eso no se detecta).
4) Los chorros no son homogéneos ni contínuos. Con alta definición se los ve formados por nódulos o burbujas, o sea que el 'motor' central emite el plasma en forma seriada, discontínua.

Un procesamiento de imágenes por computadora nos muestra la estructura discontinua del chorro óptico de M 87.

5) La Vía Láctea también posee un par de chorros, radiofilamentos que salen del centro perpendicularmente al plano de la galaxia. El orígen de estos chorros coincide con Sagitario A, la principal radiofuente de nuestra galaxia.



6) En 1944 se descubren los cuásares. En las placas fotográficas se los ve como estrellas de magnitud 15 ó 16.

Magnitudes

La escala de magnitudes fue implementada por primera vez en el siglo II antes de Cristo por Hiparco, donde las estrellas mas brillantes eran de primera magnitud, mientras que las mas pálidas perceptibles a simple vista eran de sexta magnitud. Esta escala fue dotada de una base matemática hacia el siglo XIX.
Las mediciones establecieron que una diferencia de 5 magnitudes se correspondía con un factor de aproximadamente 100 veces el brillo. Hoy en día se fijo que un factor de 100 en la diferencia de brillo corresponde exactamente a una diferencia de 5 magnitudes. Así resulto que algunas estrellas tenían un brillo superior al de la 1ra magnitud, de tal forma que se les asignaron magnitudes menores que 1, incluso negativas. Por ejemplo la estrella mas brillante del cielo es Sirio (Canis Major) con una magnitud de -1.46.
Esta escala se distingue de muchas otras porque al pasar de una unidad a la siguiente se debe multiplicar por un numero fijo (unos 2.512, o raíz quinta de 100). Esto quiere decir que una estrella de 1ra magnitud es 2,512 veces mas brillante que una de 2da magnitud. En el siguiente cuadro se dispone el factor de brillo en relación a la magnitud:

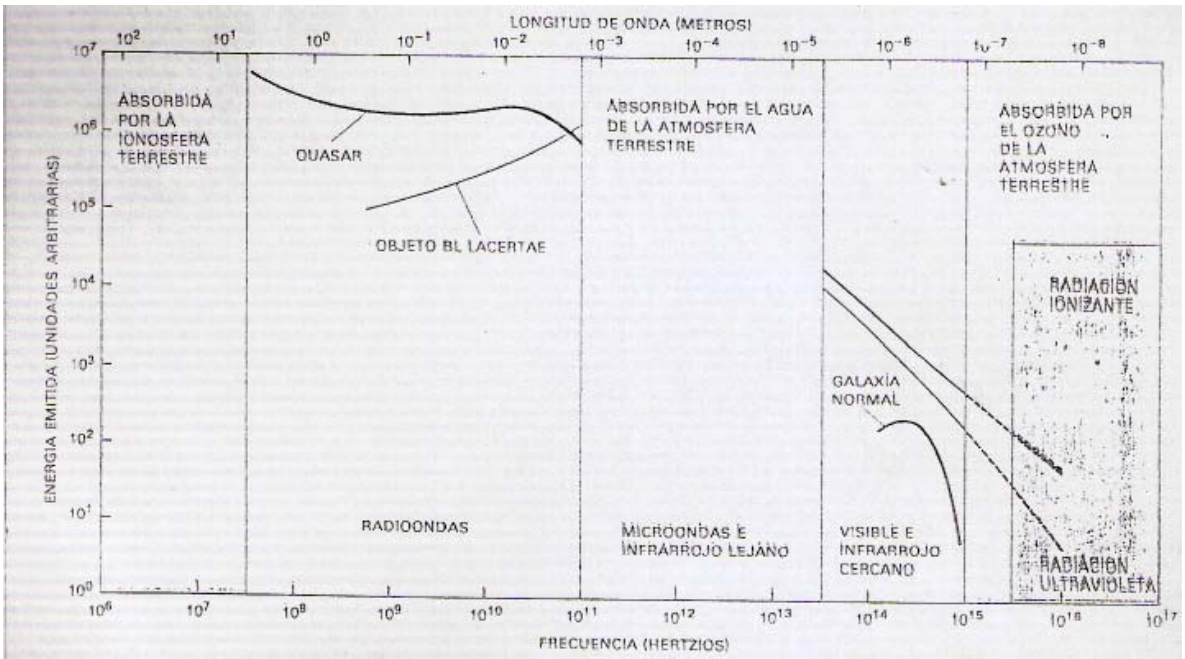
Diferencia en cuanto a magnitud	Factor en cuanto a brillo
1	2.512 veces
2	6.31 veces
3	15.85 veces
4	39.81 veces
5	100 veces
6	251 veces
7	631 veces
8	1585 veces
9	3981 veces
10	10000 veces
15	1000000 veces

Por definición, cada 5 magnitudes adicionadas las estrellas son 100 veces menos brillantes. Un incremento o decremento de 2 magnitudes corresponde a 2.512E2 (2.512 al cuadrado), de 3 magnitudes corresponde a 2.512E3 (al cubo), etc.
Un telescopio de tamaño medio (unos 11 centímetros o 4.5 pulgadas) puede distinguir estrellas de hasta magnitud 11 o 12, dependiendo de las condiciones de observación. El telescopio espacial Hubble puede captar estrellas tan débiles como magnitud 27 o 28.

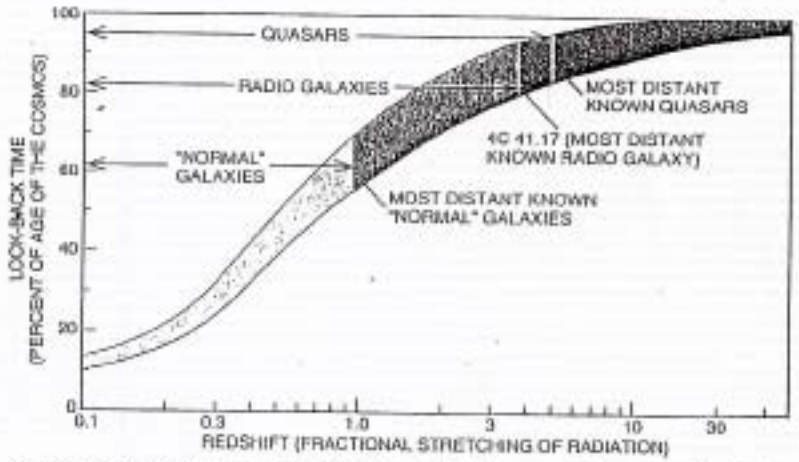
Analizando su espectro se descubrió que ninguna línea coincidía con las emitidas por los elementos conocidos. En realidad, sí son de elementos conocidos, pero las líneas aparecen en la franja infrarroja del espectro, franja de largas longitudes de onda. Son corrimientos hacia el rojo colosales. Con esto se puede determinar la velocidad con que se alejan estos objetos, miles y miles de km. por segundo. Esto también demuestra que no pueden ser estrellas (ya que ninguna estrella puede moverse a dichas velocidades), sino que son galaxias. El 90 % de los cuásares no emite radio, por eso ahora se los Objetos Cuasi-Estelares (y no radiofuentes cuasiestelares como antes). Que se presente corrimiento hacia el rojo no es igual a ver una estrella que se aleja y en la que se detecta efecto doppler. No es que las galaxias escapen unas de otras, sino que es el mismo espacio intergaláctico el que se está estirando.

7) El espectro de estos objetos es de absorción, con líneas obscuras, igual que el de cualquier galaxia (el espectro de las galaxias es de absorción porque es el espectro resultante de la suma de los espectros individuales de las estrellas, que en el 99 % de los casos es de absorción). Pero, tienen superpuestas líneas de emisión, algunas corridas al azul (que sería resultado de gas a baja presión que se dirige en dirección a la Vía Láctea, grandes nubes de baja densidad que poseen zonas mas densas que se mueven a gran velocidad, lo que puede implicar que estén sometidas a un gran campo gravitatorio), la luz está polarizada, y las líneas están ensanchadas, lo que parece indicar que emiten materia en todas las direcciones (la materia que se aleja ensancha las líneas del espectro hacia el rojo, la que se acerca a la Tierra hacia el azul, esto provoca el ensanchamiento de las líneas).
8) El 100 % por 100 % de los cuásares tiene movimiento radial positivo, se alejan de la Vía Láctea. Si la edad del Universo se calcula (actualmente) en 13.800 millones de años, estaríamos viendo estos objetos como cuando la edad del Universo era de un 10 % de la actual (1.380 millones de años). De allí la importancia de los cuásares para estudiar los comienzos del Universo.
9) Las Seyfert varían su luz cada vez que emiten un glóbulo de energía. En los lacértidos varía la emisión de luz y de ondas de radio. Como ningún objeto puede variar su luz en menos tiempo del que tarda la luz en recorrerlo, el ritmo de variación nos indica el tamaño del objeto. Normalmente el tamaño es chico (desde 3 horas luz a 1 semana luz). ¿Cómo pueden objetos tan pequeños producir tanta energía? El modelo aceptado actualmente es que se produce por fenómenos físicos en la inmediata vecindad de Agujeros Negros, que se encuentran ocupando el centro galáctico, de masas enormes (mas precisamente, en el disco de acreción de dichos AN).

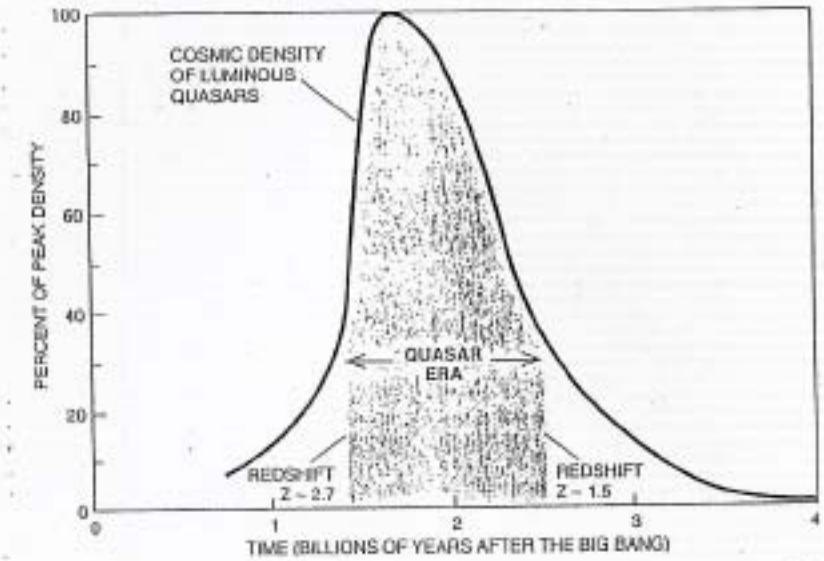
FOTOCOPIAS:



EL ESPECTRO DE RADIACION revela grandes diferencias entre la energía total emitida por una galaxia normal y la emitida por objetos cuasi-estelares o la de un objeto BL Lacertae. Casi toda la radiación de una galaxia normal está en longitud de onda óptica, y el espectro tiene la configuración característica de la radiación térmica, como en la luz estelar. La radiación de los quasars y de los objetos BL Lacertae cubre una gama mucho más amplia de longitudes de onda. Además, la intensa emisión óptica de ambos radian fuertemente en las longitudes de onda de radio, siendo el espectro de los quasars casi plano en esta región, e, "invertido" e inclinado en una dirección opuesta a la normal, el de BL Lacertae. Tanto los quasars como los objetos BL Lacertae deben ser más potentes en las partes del espectro correspondientes a las microondas y al infrarrojo, pero estas longitudes de onda están eclipsadas por la absorción de la atmósfera terrestre. La absorción terrestre oscurece también las emisiones ultravioleta, incluyendo radiaciones de longitudes de onda corta, capaces de ionizar átomos de hidrógeno. Nubes de tal gas ionizado crean líneas de emisión en el espectro de los quasars, pero dichas líneas no aparecen en los espectros de BL Lacertae. La extrapolación desde la parte accesible del espectro sugiere que los Lacertae emiten una radiación ionizante relativamente pequeña; de forma alternativa, las líneas pueden estar ausentes, pues las galaxias elípticas asociadas a los objetos lacertae resultan deficientes en gas de hidrógeno.



REDSHIFT AND DISTANCE are intimately related because of the expansion of the universe. The farther away an object is, the more its light has been stretched, or redshifted. In this graph, distance is expressed in terms of relative look-back time, the time that light took to travel from an object to the earth divided by the time that has elapsed since the big bang. Radio galaxies and quasars display bright emission lines that can be seen at redshifts of between four and five, when the universe was only about a tenth its present age.



QUASARS AND RADIO GALAXIES were nearly 1,000 times more abundant two billion years after the big bang than they are now. The reason for the rapid rise and decline of the active galaxy population is a mystery, one that may hold important clues about the formation and early development of massive galaxies.

DIECINUEVE: CUASARES

Luego de la nova de 1901 se tomaron fotografías de manchas que se alejaban del lugar del estallido. Se calculó entonces que esto respondía a la energía liberada que iba iluminando nubes de materia difusa a su paso. Hay que recordar que los chorros que salen de los cuásares no son continuos, sino que la materia es expelida en 'burbujas'. Este tipo de fenómenos se observan durante muchos años. Los radiomapas muestran que cada vez que aparece una burbuja la energía emitida por el cuásar varía. El desplazamiento de las burbujas de plasma relativístico posee una altísima velocidad. El cuásar más cercano, 2.000 millones de AL, expele burbujas a 3 veces la velocidad de la luz. En otros cuásares la velocidad es aún mayor (hasta 3.000.000 de Km/seg.), y en otros aún llega a los 45 c (13.500 millones de Km/seg). Estas observaciones plantean el problema de velocidades hiperlumínicas.

La primer teoría con la que se intento explicar este fenómeno ponía en evidencia la existencia de los taquiones, partículas que se desplazarían a mayor velocidad que la de la luz (taqui = rápido), lo que no violaría las restricciones de la teoría de la relatividad, ya que la misma no se opone a que haya partículas que se desplacen siempre a mayor velocidad que la de la luz.

TAQUIONES

En 1962, los físicos Bilaniuk, Deshpande y Sudershan señalaron que las ecuaciones de Einstein permitirían la existencia de objetos con masa, que se expresa con lo que los matemáticos llaman una cantidad imaginaria.
Esos objetos con "masa imaginaria" deben siempre ir a velocidades mayores que la de la luz, si las ecuaciones de Einstein han de seguir teniendo validez. Por esa razón, el físico norteamericano Gerald Feinberg nombró a esos objetos taquiones, de la palabra griega que significa veloz.
Un objeto con masa imaginaria tendría propiedades muy diferentes de las de la masa ordinaria. Por ejemplo, los taquiones tienen más energía mientras más lentos son. Si se empuja un taquión, y así se le añade energía, se mueve más y más lentamente, hasta que con un empuje infinitamente fuerte se puede lograr que vaya tan despacio como la velocidad de la luz, pero nunca más lentamente. Por otra parte, si se sustrae energía empujando un taquión en contra de la dirección de su movimiento, o haciéndolo pasar por un medio resistente, se mueve más y más aprisa, hasta que, cuando su energía es de cero, se desplaza a velocidad infinita en relación con el Universo en general.
Primero, realmente no sabemos si los taquiones existen. Por supuesto, no van contra las ecuaciones de Einstein, pero, ¿es eso todo lo que se necesita para que existan? Pueden haber otras consideraciones, además de las ecuaciones, que hagan imposible su existencia. Por ejemplo, algunos científicos sostienen que los taquíones, si existen, permitirían que se violara la ley de la causalidad (que la causa debe preceder al efecto, en el tiempo), y que esto hace inevitable su inexistencia. Indudablemente, nadie ha descubierto hasta ahora taquiones, y hasta que sean localizados será difícil defender su existencia, ya que ningún aspecto de

sus propiedades parece afectar a nuestro Universo y, por tanto, obligarnos a creer en ellos, aunque no hayan sido descubiertos materialmente.
Durante 25 años, los físicos aceptaron la existencia del neutrino, aunque nunca había sido detectado, porque su existencia era necesaria para explicar algunos fenómenos observados. Ahora mismo, los físicos aceptan la existencia de partículas llamadas quarks, aunque nunca han sido descubiertas, porque su existencia es necesaria para explicar algunos fenómenos aceptados. Sin embargo, no hay fenómenos observados que demanden la existencia de taquiones, sino únicamente la manipulación de ecuaciones.

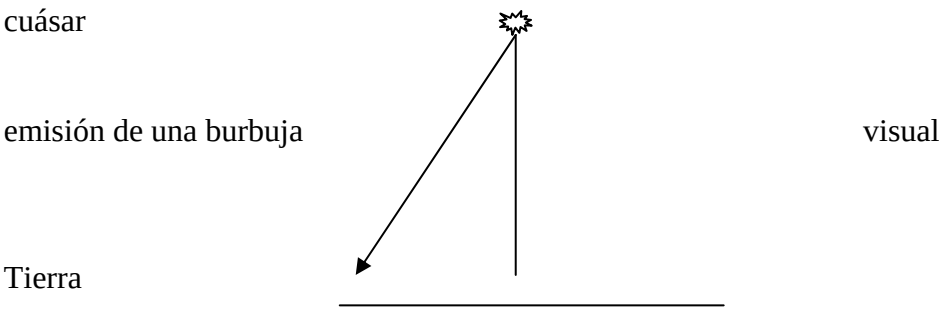
No hay idea alguna sobre los taquiones, por lo que la teoría se ha abandonado.

Luego se pensó que al deducirse la velocidad a partir del desplazamiento angular del objeto, y que este a su vez deriva del conocimiento de la distancia al objeto, la cual deriva del corrimiento al rojo (espectrografía), si los corrimientos al rojo no dependiera de la expansión del Universo la distancia sería menor, por lo que la velocidad de las partículas expulsadas por el cuásar también lo sería.

Actualmente se acepta la siguiente teoría partiendo de dos presupuestos:

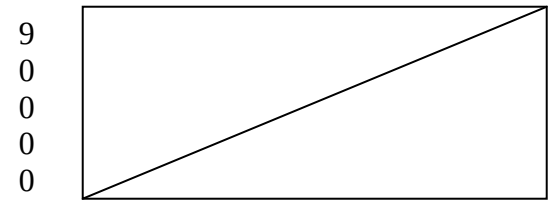
1) los chorros están compuestos por partículas relativísticas, partículas que se desplazan a velocidades cercanas a la de la luz aceleradas por inmensos campos magnéticos.
2) El eje de los chorros se produce con una pequeña abertura angular con respecto la visión.

En estas condiciones, lo que se observa en un cierto momento no es un suceso instantáneo, es una imagen extendida en el tiempo y el espacio (una combinación de imágenes sucedidas en diferentes momentos). Suponiendo un cuásar a 2 AL:



En el caso de un cuásar que se encontrara a 2 AL de la Tierra, al emitir el mismo una burbuja de plasma relativístico los fotones tardarían 2 años en llegar hasta el observador, pero la imagen de la burbuja aparecería desplazada por la abertura angular del chorro con respecto a la imagen formada por los fotones que llegan a la Tierra desde el objeto.

Si se emiten partículas relativísticas al 85 % de la velocidad de la luz y con un ángulo de 20° con respecto a la imagen que llega a la Tierra, esto equivale a 240.000 Km/seg con respecto a la visión, y a 90.000 Km en sentido angular.



240.000

En el momento de la expulsión de una burbuja emite un fotón (F1), un segundo después emite otro fotón (F2).

F1 *——————

F2 *——————

El F2 está atrasado con respecto al F1, va a 60.000 Km. atrás del F1 (c = 300.000 km/seg). Cuando llegan los fotones se verán desplazados en el espacio y el tiempo.
Así, no es que se muevan a mayor velocidad que la de la luz, sino que este fenómeno es resultado de un proceso relativístico, resultado de una apariencia de tipo relativístico. Esta teoría encuadra dentro de la teoría de la relatividad.

Una de las galaxias activas mas conocidas es una de las mas cercanas, 2.000.000 millones de AL. La energía emitida sólo en frecuencia gama es miles y miles de veces mayor que la energía total emitida por la Vía Láctea en todas las frecuencias del espectro. Esto demuestra que el proceso generador de energía es sumamente efectivo y se lleva a cabo en un pequeño volumen de espacio. Hoy en día se acepta que la única explicación posible es que el motor central de un cuásar es un AN (agujero negro) situado en el centro de las galaxias activas.

En el centro porque los AN se forman allí debido a la mayor densidad de la materia, lo que permite la coalescencia de estrellas y materia difusa conformando grandes AN de miles de masas solares (con un máximo de entre 3.000 y 5.000 masas solares). Hace poco, y gracias a los nuevos instrumentos que permiten analizar lo sucedido en los comienzos del Universo, se piensa que en el Universo primigenio (cuando ya existía la materia como tal, formada por átomos) era mas denso, pequeño y caliente que el actual. Se formaron entonces estrellas con hasta 500 masas solares, las cuales estallaron muy rápidamente. Esto sirvió para aglutinar aún mas la materia, formando pequeñas galaxias con un pequeño AN en su centro. Pero al ser tan grande la densidad las galaxias estaban continuamente chocando entre sí. Esto hizo que se formaran grandes galaxias con grandes AN en su centro, rodeados de materia difusa en rotación y estrellas.

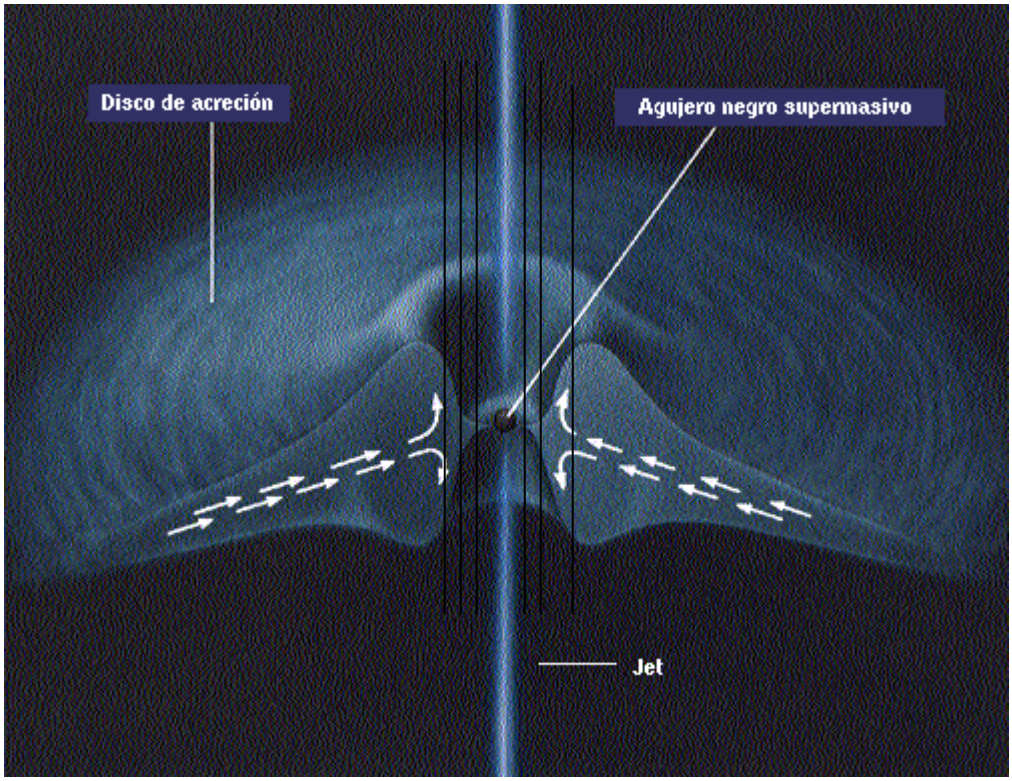
Las partículas de una nube de materia difusa tienen 2 tipos de movimiento, un movimiento caótico debido a los continuos choques y otro movimiento de rotación alrededor del AN (siguiendo la rotación de la nube). La acción gravitatoria del AN opera sobre las partículas, las cuales caen hacia él al mismo tiempo que rotan. Así termina formándose un disco giratorio con el AN en su centro, lo que hace que disminuyan las colisiones, aunque siempre las hay.

Una partícula que choca con otra pierde energía en la misma proporción que la gana la otra, cayendo entonces hacia el centro. Las partículas que van cayendo comienzan a girar cada vez más rápido (conservación del momento). Así, las partículas que están en el interior del disco giran mas y mas rápido que las del exterior. Esto ocasiona fricciones (fricción viscosa), lo que emite energía.

Las partículas de la parte interior del disco giran a velocidades relativísticas. En el borde externo se calcula que la temperatura es de unos 28°/30°, en el centro se calcula en miles y miles de grados (por la fricción). Así, el disco de acreción no sólo proporciona materia que se va a incorporar al AN sino que también transforma la energía gravitatoria del AN en energía radiante (tirando al infrarrojo en el exterior y hacia el ultravioleta en el interior del disco).

Se calcula que entre el 6 y el 40 % de toda la materia del disco de acreción se transforma en energía radiante, y esto en un volumen de espacio que puede tener el tamaño del Sistema Solar. El AN no emite energía, lo único que hace es prestar su masa para que el disco de acreción gire con diferentes velocidades. Es el disco de acreción el que emite toda la energía.

El disco de acreción puede tener diferentes densidades (de acuerdo a su formación). Si tiene una gran densidad también tendrá una gran opacidad, entonces la energía producida por la fricción no podrá salir fácilmente, por lo que comenzará a empujar a la materia del borde interno del disco formando como una boquilla (con el AN en su centro).



Representación esquemática de un cuasar, mostrando el agujero negro supermasivo, con su disco de acreción (en corte) y el doble jet de partículas de alta energía. (las líneas negras son un agregado mío, representan las líneas de fuerza del campo magnético)

Todo esto está envuelto en un campo magnético, concentrando sus líneas sobre la boquilla cercana al AN. La fricción expulsa partículas por la parte central de la boquilla. Partículas relativísticas y líneas de fuerza de inmensos campos magnéticos forman los dos chorros relativísticos.
Los chorros chocan con materia difusa, lo que produce radiación gamma. La colimación de los chorros no se debe sólo a la forma de boquilla sino también a las líneas de fuerza del campo magnético, que se retuercen junto con el giro del disco de acreción.

Si alrededor del AN no hay materia difusa ni estrellas, el AN no produce ningún efecto.

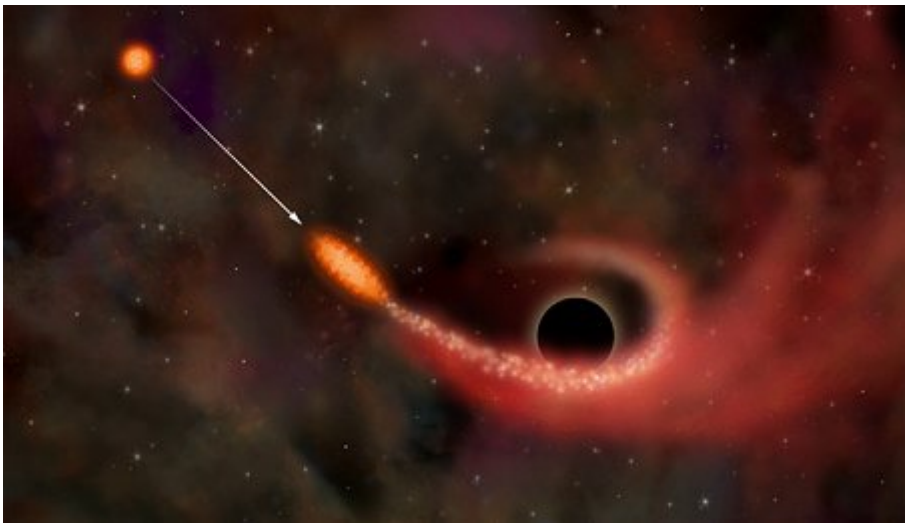
El potencial gravitatorio del AN se ejerce hasta una cierta distancia. Si alrededor del AN hay estrellas (agrupadas, en los centros galácticos, con una distancia de 9,12 días luz entre ellas) cuando una de ellas se aproxima al AN comienza a caer hacia él. A medida que va cayendo el tirón gravitatorio se hace mas intenso y la estrella tiende a aplastarse (adoptando forma de chorizo o salchicha parrillera). Al llegar al lugar que se llama ‘radio de marea’ la estrella es destruída.

Agujeros Negros Predatorios

Dos telescopios de rayos-X han sorprendido a un agujero negro en el acto de destrozar a una estrella.

Febrero 18, 2004: Gracias a dos observatorios de rayos-X que se encuentran en órbita, los astrónomos han logrado obtener la primera evidencia fuerte de un agujero negro súper-masivo en el acto de desgarrar a una estrella y consumir una porción de ella. El evento, capturado por los observatorios de rayos-X Chandra de la NASA y XXM-Newton de ESA, había sido desde hace mucho una teoría hipotética, pero nunca había sido confirmado... hasta ahora.

Los astrónomos creen que una estrella con mala suerte se acercó demasiado a un gigantesco agujero negro luego de haber sido desviada de su curso por un encuentro cercano con otra estrella. A medida que se acercaba a la enorme gravedad del agujero negro, la estrella comenzó a estirarse a causa de las fuerzas de marea, hasta que se destrozó. El descubrimiento proporciona información importante acerca de cómo estos agujeros negros crecen y afectan las estrellas y el gas que los rodean



Arriba: Una visualización artística de una estrella que se acercó demasiado a un agujero negro súper-masivo en la galaxia RX J1242-11.

Las observaciones de Chandra y XMM-Newton, combinadas con imágenes anteriores del satélite alemán Roentgen, detectaron una poderosa explosión de rayos-X proveniente del centro de una galaxia llamada “RX-J1242-11”. Esta explosión, una de las más grandes jamás detectadas en una galaxia, fue causada por el gas de una estrella calentado hasta una temperatura de millones de grados centígrados antes de ser devorado por el agujero negro. La energía liberada en el proceso fue equivalente a la de una supernova.

“Las estrellas pueden sobrevivir si son estiradas un poco, como sucede en los sistemas de estrellas binarias, pero esta estrella fue estirada hasta más allá de su punto de ruptura”, dijo Stefanie Komossa del Instituto Max Planck para la Física Extraterrestre (MPE) en Alemania, líder de un equipo internacional de investigadores. “Esta desafortunada estrella simplemente estaba paseando en el vecindario equivocado”.

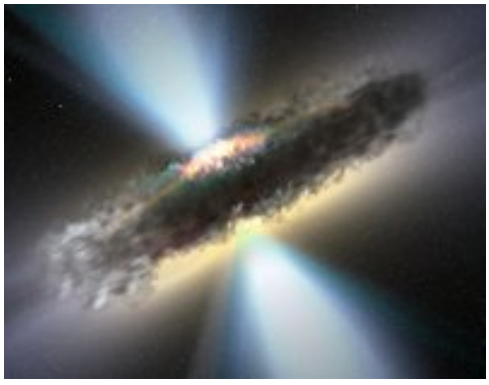
El agujero negro en el centro de RX J1242-11 tiene una masa de aproximadamente 100 millones de Soles. En contraste, la estrella destruida tenía probablemente una masa parecida a la del Sol. Los astrónomos estiman que solamente un uno por ciento de la masa de la estrella fue finalmente consumido, o acretado, por el agujero negro. El resto fue arrojado lejos del agujero negro.

La fuerza que destrozó a la estrella en RX J1242-11 es un ejemplo extremo de la fuerza de marea generada por diferencias en la gravedad que se ejerce sobre el frente y la parte trasera de un objeto. La fuerza de marea de la Luna causa las mareas en los océanos de la Tierra. Una fuerza de marea provocada por Júpiter rompió al cometa Shoemaker-Levy, antes de que éste se precipitara hacia el planeta gigante.

Las probabilidades de una disgregación estelar por causa de la marea en una galaxia típica son bajas, aproximadamente de una en 10.000 por año. Si hubiera sucedido en el centro de nuestra Vía Láctea, a 25.000 años luz de la Tierra, la explosión de rayos-X resultante habría sido unas 50.000 veces más brillantes que la más poderosa fuente de rayos-X en nuestra galaxia, pero no habría representado una amenaza para nuestro planeta.

Otras llamaradas dramáticas han sido observadas en diferentes galaxias, pero ésta es la primera estudiada con la alta resolución espacial de Chandra y la alta resolución espectral de XMM-Newton. Ambos instrumentos lograron un avance crítico. Chandra mostró que el evento RX J1242-11 ocurrió en el centro de una galaxia, donde acecha el agujero negro. El espectro de XMM-Newton reveló las huellas dactilares que se esperaban de los alrededores de un agujero negro, descartando cualquiera otra explicacion astronómica.

Algunas estrellas pueden quedar en órbita excéntrica alrededor del AN. Si una estrella es destruida por un AN, algunas partículas pueden quedar en el disco de acreción y otras ser aceleradas quedando en giro a una distancia de unos 3 Km del AN, formando un toro (forma de rosquilla).



Así tendríamos tres estructuras, el AN, el disco de acreción y el toro mas lejano.

Radiación emitida:

Espectro continuo : Luz emitida por el disco de acreción (que se comporta como una fotosfera).
Espectro de absorción : Líneas obscuras producidas por la luz, con espectro continuo que sale del disco de acreción, cuando atraviesa la materia difusa mas lejana. También se puede producir porque la luz del cuásar atraviesa nubes de gas en su trayecto hasta la Tierra.
Espectro de emisión: Porque está emitiendo gas y materia que se aleja y se enfría, excitando en su trayecto el gas que rodea al AN el cual emite.
Así, de un cuásar se reciben los tres espectros sobrepuestos uno a otro.

Radiación infrarroja: Los chorros atraviesan la Galaxia y luego el espacio intergaláctico calentando las partículas de polvo que encuentran en su camino, partículas de polvo que emiten radiación infrarroja. Lo mismo sucede cuando la energía emitida por el disco de acreción atraviesa el toro.

Radioenergía: producida por los chorros que interaccionan con la materia que encuentran en su camino.

Energía x y gamma: producida por la parte interna del disco de acreción que está a gran temperatura y girando a gran velocidad.

Si todas las galaxias activas son así por la acción de un AN central, ¿porqué se ven en 4 formas? (radio-galaxias, lacértidos, cuásares y Seyfert -las Seyfert son galaxias cercanas y de bajo grado de actividad, por lo que las descartamos del análisis-). Esto se debería a cómo está orientada su estructura con respecto al observador terrestre.

Si se la ve de frente (como un plano) recibiríamos todos los tipos de energía (x, gamma, blazar-resplandor, objetos muy luminosos-, radioondas, etc.).
Un **blazar** es una fuente de energía muy compacta y altamente variable situada en el centro de una galaxia. Los Blazars están entre los fenómenos más violentos del Universo

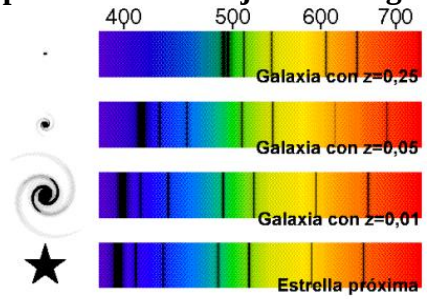
Si se la ve de perfil el toro es mucho mas espeso y no permite que pase la luz. Solo veríamos los chorros, radio-energía, radiación infrarroja (porque se calienta el polvo del toro) y tal vez algo de radiación gamma y x.

Si se la ve en posiciones intermedias veríamos una combinación de algunas frecuencias y la falta de otras.

De acuerdo a esto es que se las clasifica como Radio-Galaxias, Cuásares, etc.

A medida que se ve mas allá en el espacio (y el tiempo) aparecen mas y mas cuásares. Llega un momento, después de Z5-Z6, que los cuásares comienzan a disminuir.

Desplazamiento al rojo cosmológico (*z*)



Cuando obtenemos los espectros de galaxias lejanas observamos que las líneas espectrales están desplazadas con respecto a las observadas en los laboratorios terrestres.

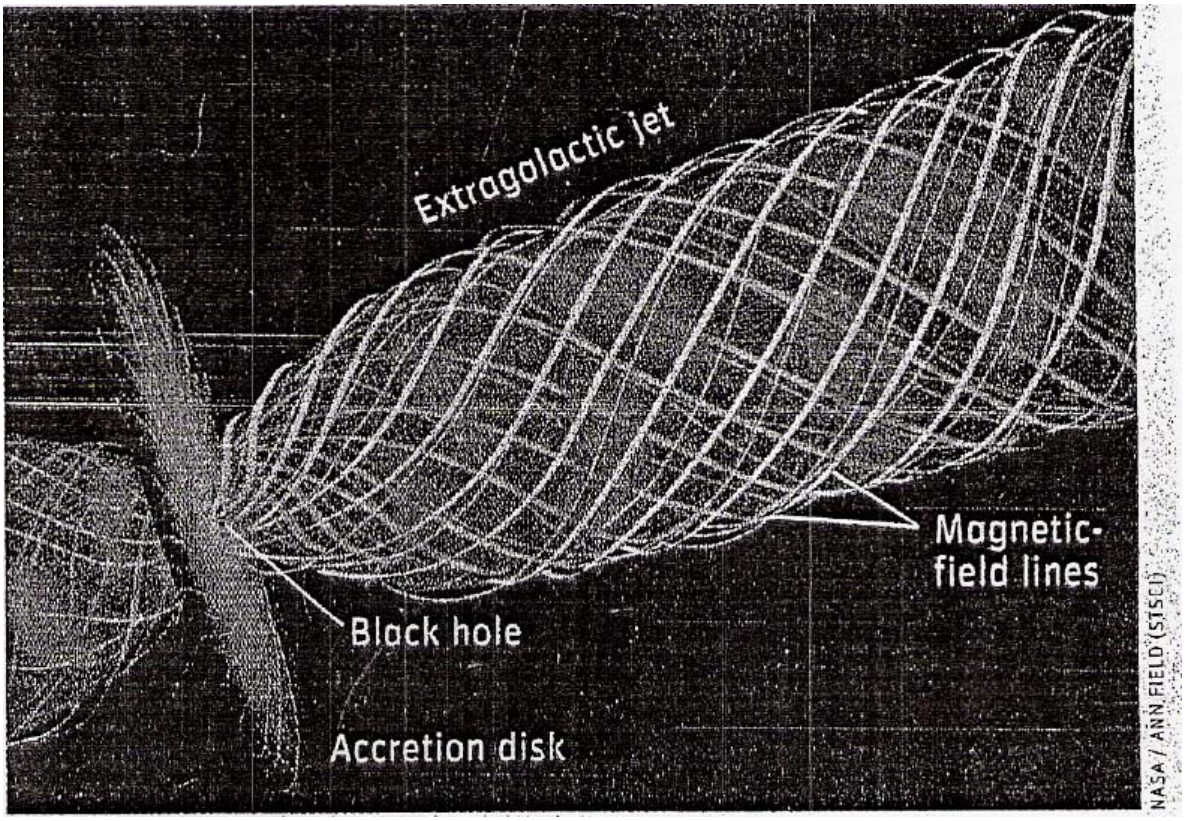
Definimos el desplazamiento al rojo z de una línea espectral como la diferencia entre las longitudes de onda observada (l_o) y emitida (l_e) en unidades de la longitud de onda emitida: $1 + z = l_o/l_e$

Las distancias entre galaxias lejanas crecen en la misma proporción de tal forma que se cumple $1 + z = D_o/D_e$, siendo D_o la distancia actual y D_e la distancia en el tiempo en que se emitió la luz.

Esto es, como si estuviéramos viendo una nube en la cual la densidad es menor la periferia que en su centro. Pero al mirar mas lejos también estamos retrocediendo en el tiempo. Los cuásares corresponderían a los primeros 2.000 millones de años del Universo. Ese sería el momento de formación de los cuásares. Por eso, a los primeros 2.000 millones de años del Universo se los llama 'la edad de los cuásares'. Se calcula que en ese momento había un cuásar por cada 100.000 galaxias, ahora hay un cuásar por cada 100.000.000 de galaxias.

¿Cuánto dura un cuásar? No hay seguridad en el tema, se calcula que la masa del núcleo central de una galaxia activa es 0,5 de la masa de toda la galaxia. Esto es válido para las galaxias elípticas, pero no así para las espirales. De acuerdo a esto se determina que la duración activa de un cuásar es corta (de entre 10 y 50 millones de años).
O sea que la edad de los cuásares estaría formada por muchísimos cuásares de corta vida.
Hasta ahora se conocen mas de 13.000 cuásares.

FOTOCOPIAS:


Extragolactic jet
Magnetic-field lines
Black hole
Accretion disk
NASA / ANN FIELD (STSCI)

VEINTE: COLISIONES GALÁCTICAS

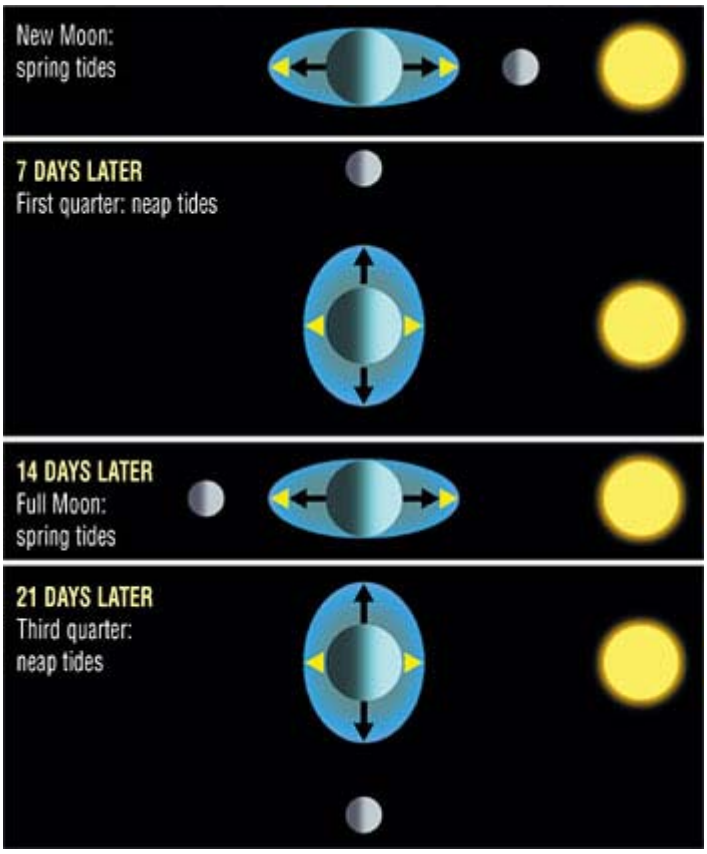
Hace unos 50 años (1950-1960) se observaron sistemas de galaxias que estaban deformados por interacción gravitatoria. Luego se tomó el atlas existente en el observatorio de Monte Palomar, se le tomaron fotos y se ampliaron, así se vio que había pares de galaxias con grandes deformaciones. El tema quedó sin estudiar hasta 1980, donde se volvió a revisar y se descubrió que este efecto era muy corriente entre las galaxias.
Con los nuevos telescopios orbitales se encontró gran cantidad de sistemas de galaxias deformados.
Aparentemente, las galaxias están dispersas en el espacio con distancias medias de 10 veces su propio diámetro (para el Universo visible). Si esto es así, entonces las galaxias están mas cercanas entre sí que las estrellas dentro de las galaxias (ya que las estrellas están separadas entre sí 100 veces su propio diámetro).
En promedio las galaxias se desplazan un diámetro en varios cientos de millones de años, así se calcula que puede producirse una colisión entre galaxias cada 50/500 millones de años.
Para que ocurra una colisión de galaxias se necesita:

1) que estén relativamente cercanas, si están alejadas puede haber interacción gravitatoria pero es difícil que tomen rumbo de colisión.
2) que su velocidad (desplazamiento en el espacio) no sea muy rápida, ya que si su velocidad es muy rápida se dificultará la pérdida de movimiento inercial como para que una caiga sobre la otra, como máximo su trayectoria se desviará un poco perdiendo en el proceso estrellas y materia difusa.

Las colisiones se dan con mayor asiduidad en los grupos de galaxias y especialmente en los cúmulos de galaxias, donde si bien la densidad de galaxias es menor que en los grupos la velocidad promedio de las mismas es menor.
Si el encuentro entre dos galaxias se hace con una velocidad combinada de unos miles de Km/seg. los sistemas pasarán uno a través del otro y luego se alejaran. Las consecuencias de esto no son fáciles de detectar ya que no son muy severas. Si la velocidad combinada es de unos centenares de Km/seg. la arquitectura de ambos sistemas se destruirá.
La velocidad influye porque si es baja permite que la gravitación (única fuerza que interviene en estos casos) tiene más tiempo para actuar.

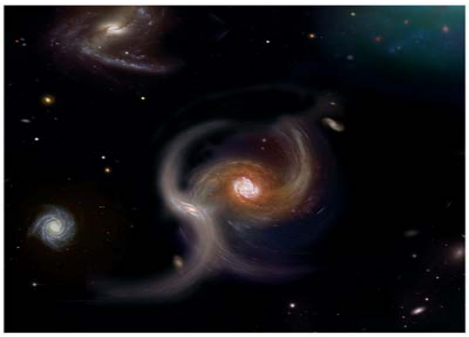
Interacción Tierra-Luna – Mareas: Para comprender mejor el fenómeno de la colisión entre galaxias conviene repasar la acción de la atracción lunar sobre la Tierra que ocasiona las mareas. Las aguas que están en el hemisferio que mira hacia la Luna son atraídas por ella.

La Luna tiende a sacar el agua de la parte sólida, y a la parte sólida de la Tierra de la parte opuesta del agua. O sea que la parte sólida de la Tierra también soporta mareas (15 cm se alarga o se acorta de acuerdo a la influencia de la Luna). Si la Luna estuviera a la mitad de la distancia actual, o sea a 190.000 Km, su fuerza gravitatoria se multiplicaría por 4.



Acción gravitatoria de la Luna de acuerdo a sus fases.

Las galaxias, con relación a sus diámetros, estarían más cerca entre sí que la Tierra y la Luna. Así, al acercarse dos galaxias se levantan brazos de mareas de una hacia la otra, pero también aparecen brazos, las 'colas', en la cara opuesta, igual que las dos pleamares en la Tierra. Estos brazos están formados por estrellas y gas.


Collision Between Galaxies
(Artist's Impression)
ESO Press Photo 10a/06 – 15 March 2006
© ESO

La aproximación entre las dos galaxias se produce lentamente, comienzan girando alrededor de un baricentro hasta caer una sobre la otra. Esto produce que se deformen. Si la Vía Láctea tuviera la densidad estelar igual a la cantidad de galaxias que hay en el Grupo Local habría varias docenas de estrellas en un volumen igual a la órbita de Plutón.

Las nuevas observaciones del espacio profundo muestran gran cantidad de colisiones entre galaxias, también se descubren galaxias aisladas que muestran señales de haber colisionado anteriormente. Por ejemplo:

1) se han detectado galaxias elípticas en las cuales la materia luminosa está dispuesta en estratos, o sea que las estrellas se disponen en capas. Esta disposición es impensable desde el punto de vista dinámico. Sólo puede haber tres causas para este tipo de disposición:
    a) Podría ser que se tratara de la expulsión en forma suave, sostenida y periódica de materia difusa, formando como capas que se alejan. A esto se lo llama 'viento galáctico'. Serían como anillos de humo que se alejan del centro, estos anillos implican mayor densidad de la materia difusa, lo que significa procesos formadores de estrellas. Así, se formarían estrellas en cada anillo de materia difusa.
    b) Podría deberse a lo mismo, pero la expulsión sería debida a procesos explosivos catastróficos ocurridos en el centro de la galaxia.
    c) Por colisiones de galaxias. En conclusión puede decirse que si el gas ha sido expulsado durante centenares de miles de años, el anillo de materia difusa mas alejado del centro galáctico tendría estrellas mas viejas que el mas cercano al núcleo. Pero no es así, siempre se encuentra en todas las galaxias elípticas estrellas de alrededor de 10.000 millones de años. Esto descarta los procesos a) y b), quedando sólo pensar en antiguas colisiones de galaxias.
2) Se han descubierto galaxias elípticas donde el centro gira en un sentido y la periferia en sentido contrario. Esto no puede explicarse por ninguna cuestión dinámica.
3) El satélite IRAS fue pensado para estudiar el espacio en el infrarrojo. Detectó muchas galaxias que emiten el 99 % de su energía en longitudes de onda que varían entre 25 y 100 micrómetros, o sea, luz infrarroja. ¿Porqué emite tanta energía calórica estas galaxias? Si dos galaxias chocan no lo hacen sus estrellas pero si la materia difusa que está entre ellas. Esto aumenta su densidad, creando las condiciones para la formación masiva de estrellas (cientos, miles o miles de millones de nuevas estrellas). En estas condiciones, las estrellas de gran masa van a ser mucho mas numerosas que cuando no hay colisiones, van a ser estrellas que irradien mas en el ultravioleta, radiación que calienta la materia difusa haciendo que esta emita radiación calórica (infrarrojo).

Hoy en día se acepta que el origen de las galaxias elípticas es una colisión previa.

Todas las galaxias, sin importar el tipo, tamaño o masa, pueden colisionar. Si el encuentro se da entre galaxias grandes, de grandes masas, a medida que se van acercando aparecen brazos de marea que forman como un puente entre ambas, estos brazos se van moviendo acompañando el giro de las dos galaxias sobre el baricentro común. Las galaxias se van acercando y aparecen otros fenómenos, por ej., empiezan a deformarse los discos.

En las galaxias espirales el polvo y el gas gira en forma ordenada alrededor del centro, pero al aproximarse a otra galaxia el tirón gravitatorio hace que muchísimas estrellas abandonen sus órbitas, desplazándose en forma de nubes de estrellas en otra dirección. Así, hay enjambres de estrellas que toman un camino, otros otro camino.

Pero estadísticamente es muy difícil que se den choques entre estrellas. Las nubes de gas de los brazos espirales también abandonan su órbita, chocando con otras nubes, lo que aumenta su densidad. Las estrellas que abandonan la órbita le restan momento orbital al gas, si el gas ya no tiene la velocidad suficiente para contrarrestar la acción gravitatoria del centro, cae hacia él y se va depositando alrededor del núcleo, cuando no cae directamente en el Agujero Negro central. Las estrellas y el gas de la periferia suelen adquirir velocidad, escapando hacia el espacio intergaláctico. Así, se destruye la arquitectura de las galaxias implicadas.

A estos ejemplares se los llamaba ‘galaxias peculiares’ o ‘sistemas patológicos’. Hoy en día se sabe que no son una clase particular de galaxias, sino sólo galaxias que han sufrido un choque con otra. Luego de un choque las galaxias se alejan, pero ya están frenadas por la gravitación, por lo que es común que vuelvan a caer una hacia la otra. El equilibrio se restaura sólo cuando se unen los dos centros galácticos, quedando rodeados de una inmensa cantidad de estrellas y poco gas (el gas formó estrellas nuevas o bien adquirió mayor velocidad que le permitió escapar de la atracción de la galaxia). La nueva galaxia tomará forma de elíptica gigante.

Galaxia elíptica gigante NGC 1316

Si el choque se da entre galaxias de diferente masa, la mas grande atraerá fuertemente a la pequeña. En general, la galaxia mayor absorbe a la menor, sin consecuencias mayores para sí misma. A esto se le llama ‘canibalismo’. Desaparece entonces la estructura de la galaxia mas pequeña, pero a medida que se acerca a la grande irá despidiendo estrellas y materia difusa.

En este momento la Vía Láctea está canibalizando a otras dos galaxias más pequeñas, se ha detectado en el espacio gas y estrellas sueltas, restos de las otras dos galaxias.

El estudio de estos objetos permite mirar el Universo primitivo, unos 13.000 millones de años hacia atrás, cuando el Universo era más pequeño, caliente y denso, y las colisiones eran muchísimo más comunes (la edad del Universo se calcula en 13.700/13.800 millones de años).
La Vía Láctea tuvo en su momento más galaxias alrededor que las que hay ahora, la pérdida de algunas se debe principalmente a la expansión del espacio. Igualmente se calcula que la Vía Láctea sufrió entre 5 y 11 colisiones con otras galaxias de menor tamaño. (La Vía Láctea es un sistema gigante, el Grupo Local tiene entre 40 y 42 miembros, de los cuales todos menos M31 Andrómeda son menores que ella).

M31 Andrómeda

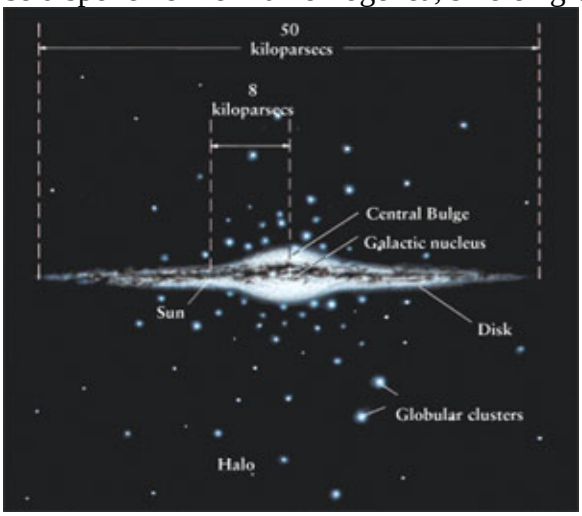
Anteriormente se creía que la Nube Mayor de Magallanes era la galaxia más próxima a la Vía Láctea, a unos 160.000 AL de ella. Pero se ha descubierto la galaxia Enana de Sagitario que está escondida debajo del disco central de la Vía Láctea, a unos 80.000 AL en dirección a la constelación de Sagitario.

Nube Mayor de Magallanes

Galaxia enana de Sagitario

Destrucción de la Galaxia enana Sagitario en las inmediaciones de la Vía Láctea.
Galaxia enana Sagitario y corrientes de marea

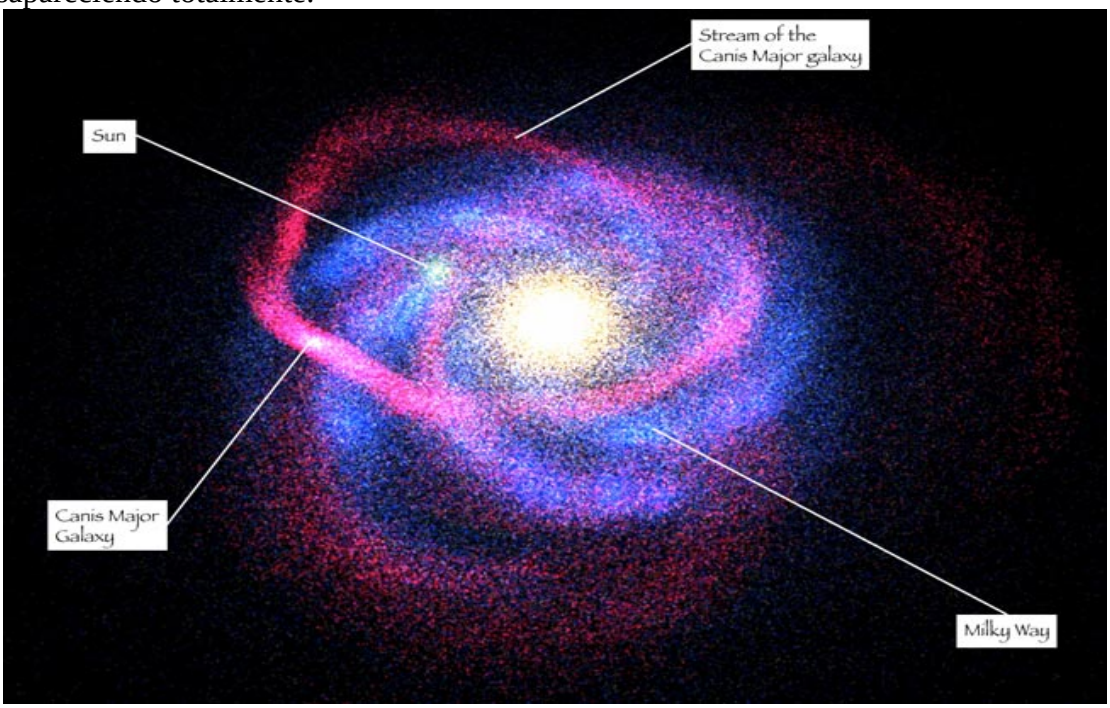
Para estudiar esto se observa la edad de las estrellas. Las estrellas mas viejas se formaron en un Universo primigenio, como producto de su evolución y muerte expulsan elementos pesados. Con estos elementos se forman estrellas nuevas. Estudiando los objetos que están en el halo galáctico se ve que hay estrellas sueltas y otras que han formado cúmulos globulares. Se encuentran allí estrellas variables RR Lyrae, viejas y de color rojo, que titilan rápidamente. No se disponen en forma homogénea, sino en grupos. ¿Porqué?



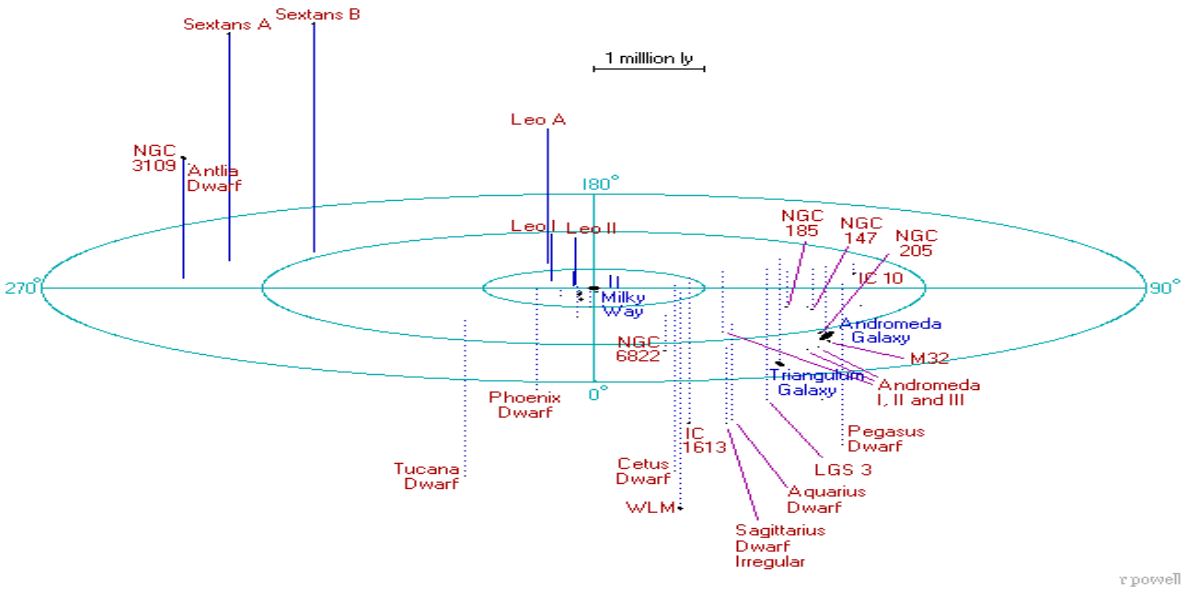
Halo de la Vía Láctea

La única explicación es que son restos de choques anteriores entre la Vía Láctea y otras galaxias. En los cúmulos globulares del halo hay estrellas viejas, jóvenes o una mezcla de ambas. ¿Porqué hay estrellas de diferentes edades si los cúmulos globulares siempre están formados por estrellas jóvenes? Se supone que dichos cúmulos son robados de las galaxias que han chocado con la Vía Láctea.

Hace 4 años se descubrió la galaxia enana del Can Mayor. La de Sagitario tiene un décimo de la masa de la Vía Láctea. La del Can Mayor está a 40.000/42.000 AL y prácticamente no tiene forma. Ambas estarían en las etapas finales de la colisión y terminarían desapareciendo totalmente.



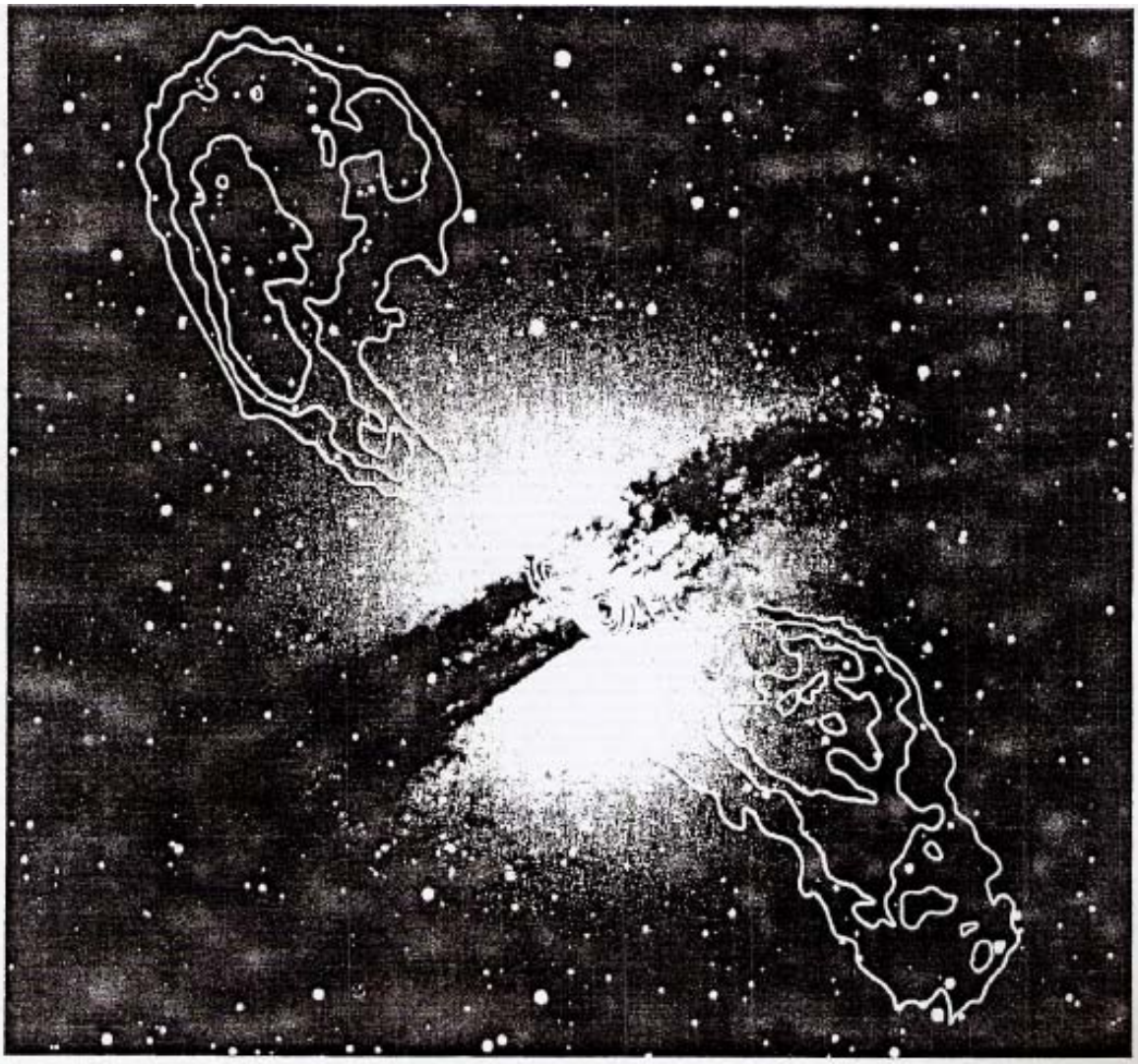
M31 Andrómeda y la Vía Láctea están cayendo una hacia la otra a unos 100 Km/seg., así, en un lapso que varía entre 1.000 y 4.000 millones de años entrarán en colisión, se irán acelerando a medida que se acerquen, se atravesarán mutuamente perdiendo estrellas y materia difusa en el proceso. Volverán a caer hasta que los núcleos se unan formando una galaxia elíptica supergigante.



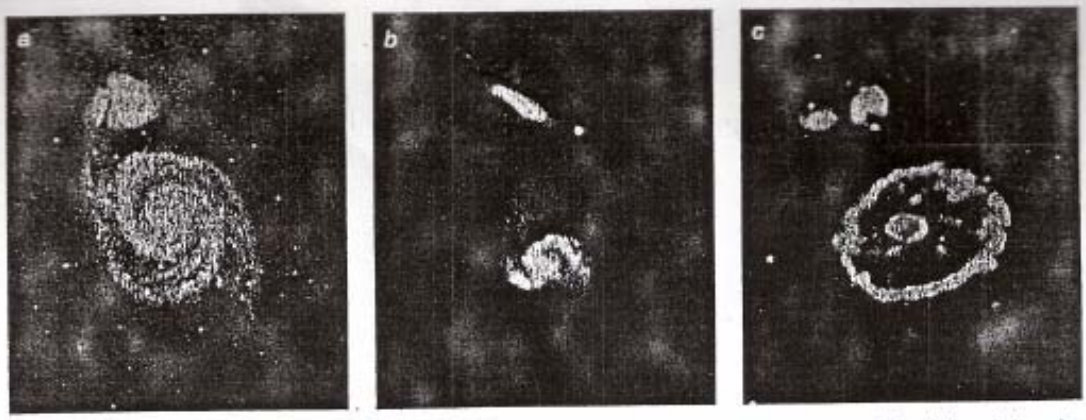
Grupo Local

FOTOCOPIAS:

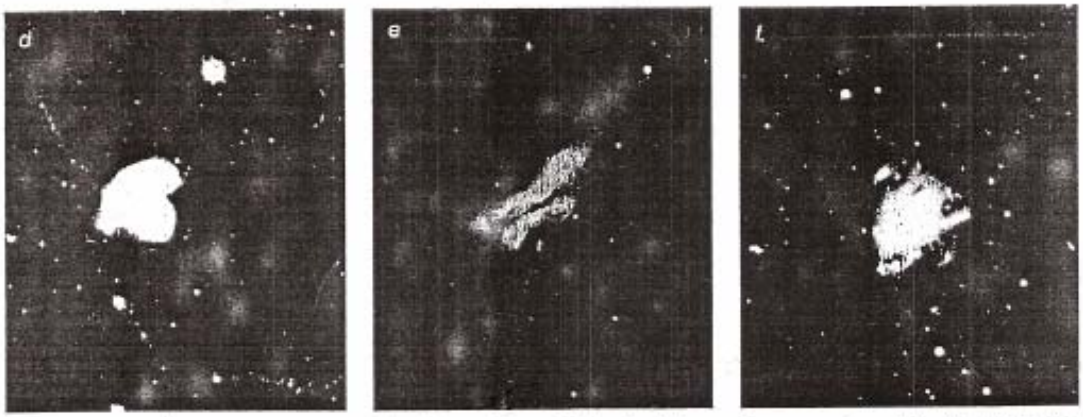
FIGURA 21-2. La galaxia peculiar NGC 5128, también conocida por radiofuente Centaurus A, fotografiada con el telescopio de 200 pulgadas. En la galaxia espiral existe una cantidad poco frecuente de materia no condensada. *(Hale Observatories.)*



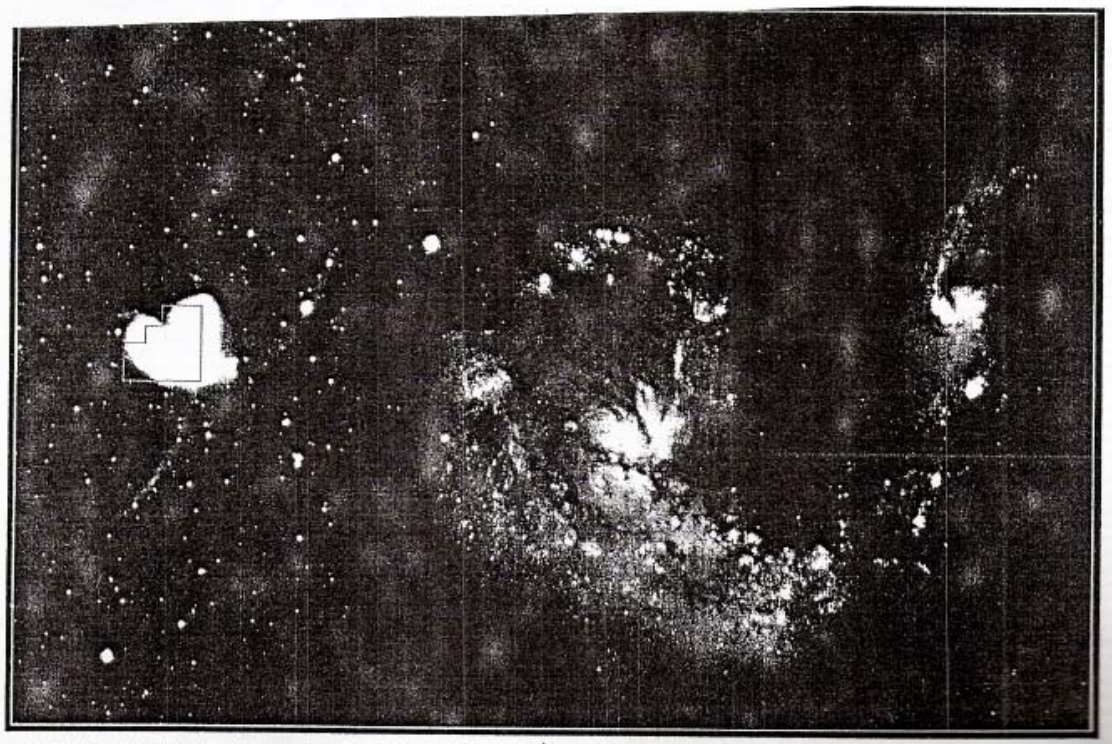
2. IMAGEN OPTICA y radiocontorno de Centauro-A, dispuestos perpendicularmente. Esta figura combina los radiocontornos de los lóbulos internos con una fotografía hecha en el visible. El área visible de NGC 5128 tiene una forma atípica con detalles de galaxias espirales y elípticas. El gran círculo luminoso se parece mucho al cuerpo de una galaxia elíptica. La banda oscura que corta al círculo es una franja de polvo, gas y asociaciones de estrellas con forma de disco, que nos recuerda las galaxias espirales. El disco se dobla en sus bordes en direcciones opuestas. A pesar de que la elipse gira muy lentamente, si lo hace, la franja de polvo gira de manera estacionaria. La radioestructura emerge desde el centro de la franja a lo largo de su eje de rotación.



2. DE LOS CHOQUES GALACTICOS surgen complejas estructuras. La forma espiral de la Galaxia del Remolino, M51, fue el resultado del paso cercano de su pequeña galaxia compañera (*a*). En el sistema NGC 3808, las estrellas, el gas y el polvo están pasando de la galaxia espiral grande a su compañera (*b*). En la Galaxia de la Rueda se formaron dos anillos de estrellas después de que una de sus compañeras atravesara el disco principal (*c*). Los choques entre galaxias de masas parejas tienden a la destrucción estructural mutua. Las Antenas (*d*) constan de dos galaxias de disco cuya interacción gravitatoria ha hecho crecer dos colas. En la NGC 520, las dos galaxias que chocan se presentan entrelazadas (*e*). Tal colisión termina produciendo una sola masa galáctica de aspecto desordenado, como NGC 7252 (*f*), que puede estabilizarse en galaxia elíptica.



A trail of gas and stars in this illustration marks the path of the Sagittarius dwarf elliptical galaxy (Sgr DEG) slowly being consumed by the Milky Way.



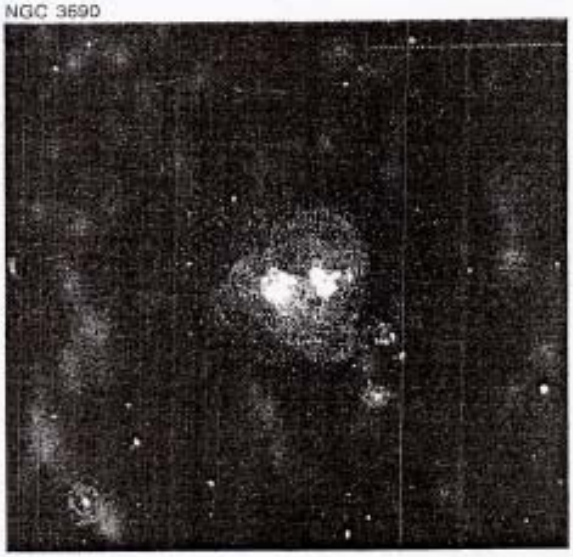
4. LAS ANTENAS, ejemplo espectacular de la fusión de las galaxias NGC 4038 y NGC 4039. Este objeto presenta dos colas luminosas que emergen de la parte central y son el resultado de las fuerzas de marea que se originan en la fusión de dos galaxias. La imagen, ampliada, de la zona central muestra los núcleos de las dos galaxias; se ven como condensaciones de color naranja. Las bandas oscuras son filamentos de polvo (grafito y silicatos) que los atraviesan; la estructura pseudoespiral está plagada de estrellas calientes, azules en la imagen, que son el resultado de la formación estelar que se ha disparado en el proceso de colisión de las dos galaxias. En el centro del encuentro se detectan miles de estrellas brillantes, jóvenes y masivas, un poderoso brote que se ha generado como resultado de la interacción gravitatoria.

NGC 2535/2536

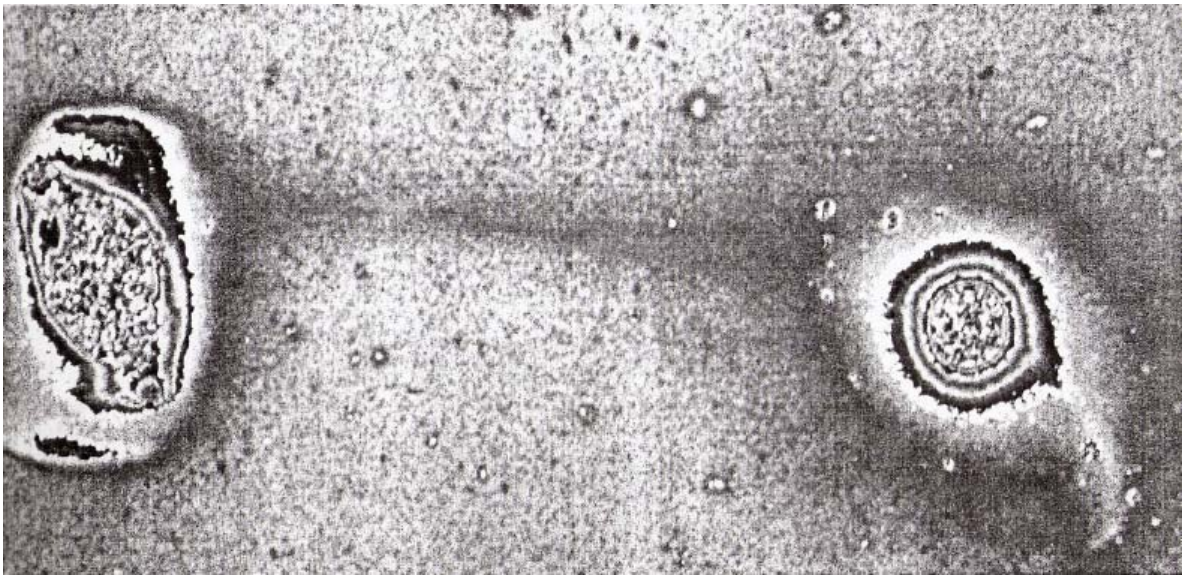
NGC 3226/3227

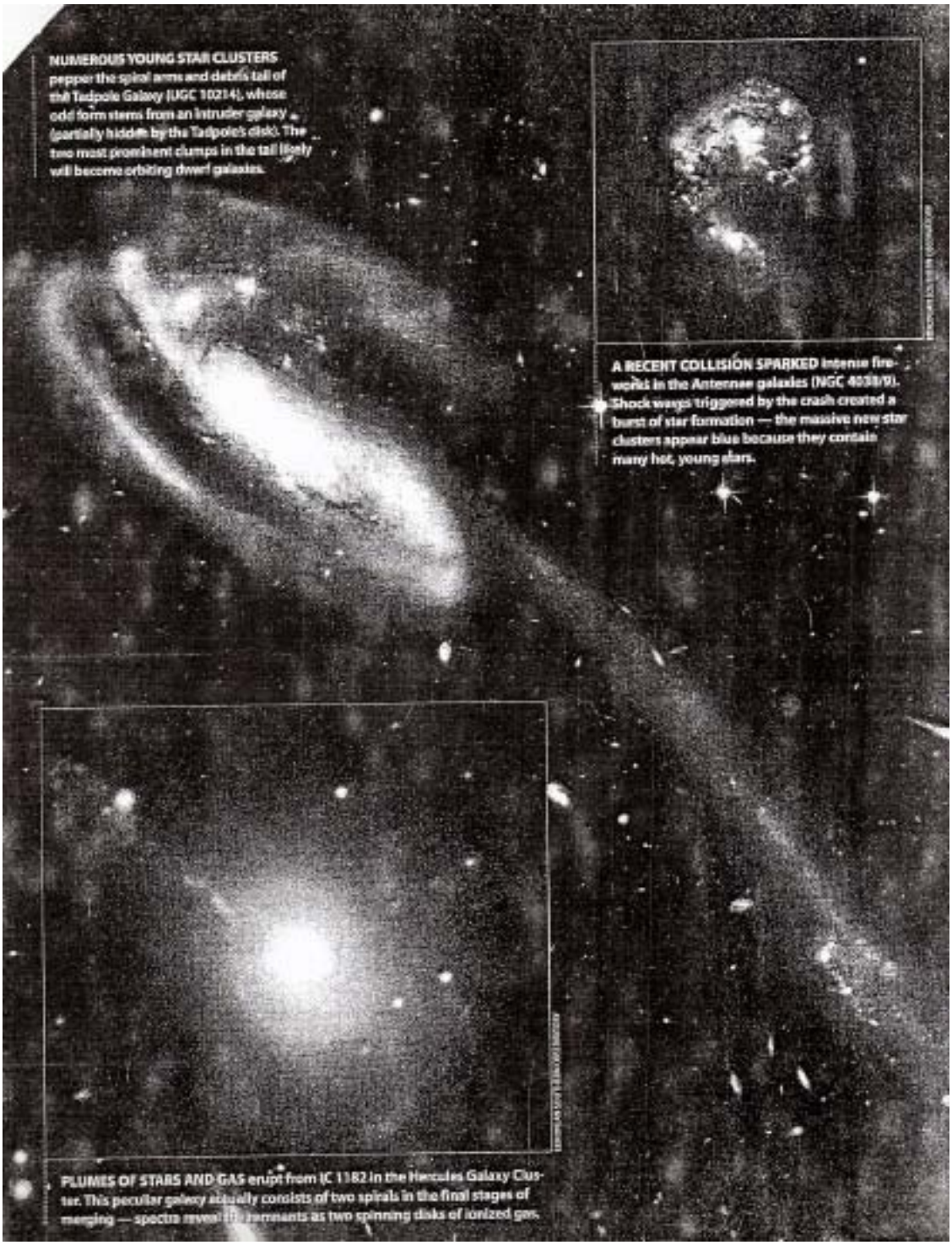
Arp 141

NGC 3690



3. GALAXIAS EN INTERACCION. En 1966, Halton Arp mostró las deformaciones y figuras extrañas que adoptaban las sometidas a una interacción gravitatoria, llevándolas en su caso más extremo a la fusión con otras galaxias. Las imágenes de las cuatro que presentamos han sido tomadas con el telescopio Isaac Newton de 2,5 m del Observatorio del Roque de los Muchachos en la isla de La Palma. El título que aparece sobre cada imagen de la figura corresponde al número de clasificación de la galaxia según el New General Catalogue (NGC); en el caso de la Arp 141 usamos la numeración correspondiente al catálogo de Arp. Todas ellas presentan estructuras diferentes y dos núcleos, pertenecientes a cada una de las galaxias que se están fusionando. Al final del proceso de fusión se perderán los restos de la morfología individual y sólo podremos ver un núcleo.





NUMEROUS YOUNG STAR CLUSTERS pepper the spiral arms and debris tail of the Tadpole Galaxy (UGC 10214), whose odd form stems from an intruder galaxy (partially hidden by the Tadpole's disk). The two most prominent clumps in the tail likely will become orbiting dwarf galaxies.

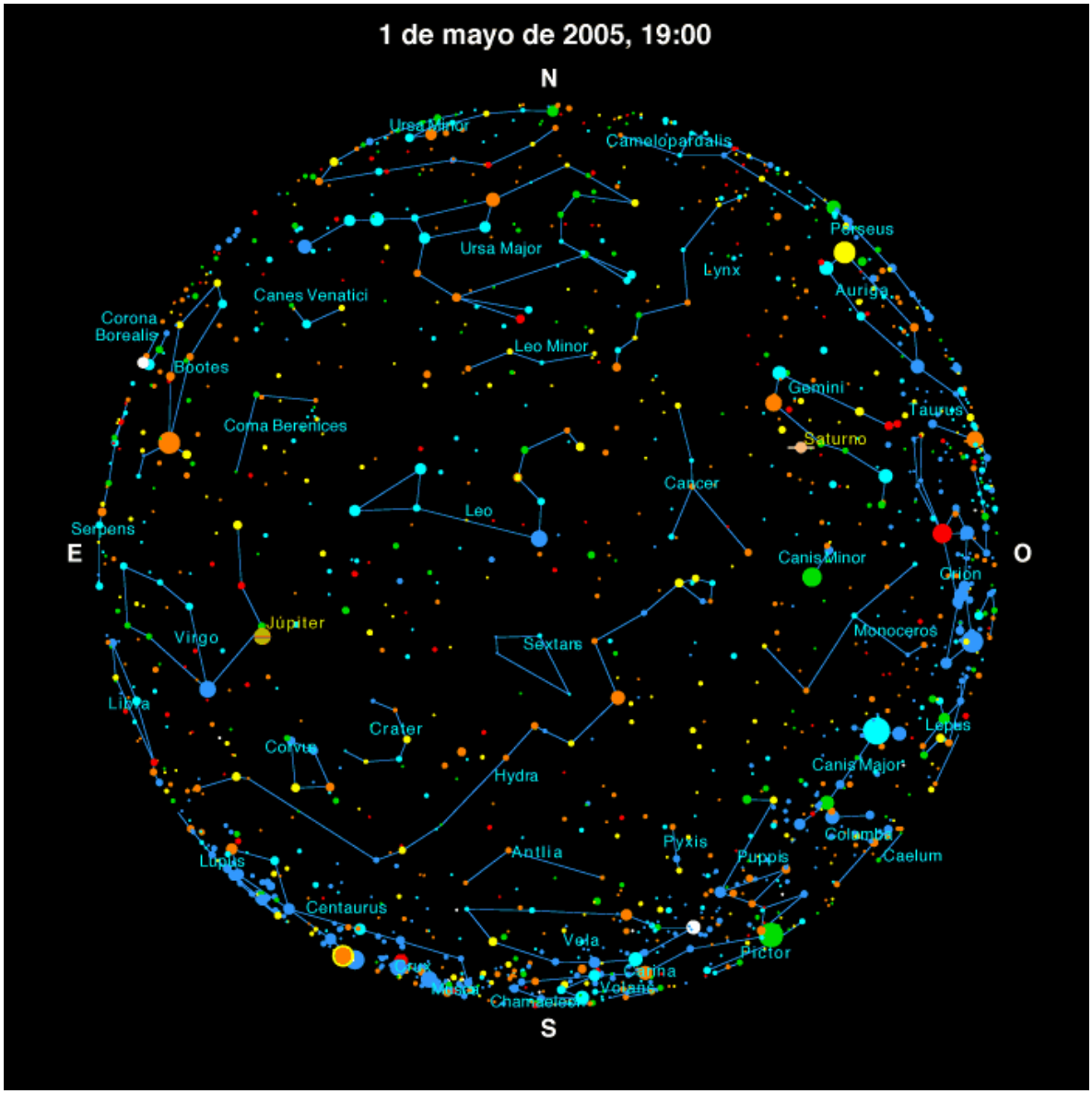
A RECENT COLLISION SPARKED intense fireworks in the Antennae galaxies (NGC 4038/9). Shock waves triggered by the crash created a burst of star formation — the massive new star clusters appear blue because they contain many hot, young stars.

PLUMES OF STARS AND GAS erupt from IC 1182 in the Hercules Galaxy Cluster. This peculiar galaxy actually consists of two spirals in the final stages of merging — spectra reveal the remnants as two spinning disks of ionized gas.

VEINTIUNO: ESTRUCTURA DEL UNIVERSO
Asociaciones Galácticas

Las formaciones visibles en el cielo son una pequeña parte de las existentes. Se calcula que el 25 % del Universo es materia oscura.

En el Universo primigenio se produjeron fluctuaciones de la densidad de la materia. Esta fue la causa primera de que los objetos que pueblan el espacio se fuesen ordenando en una escala numéricamente ascendente.
En 1922 se registran una serie de objetos difusos que se extienden como una banda que ocupa desde la constelación de Virgo, pasando por Coma Berenice, hasta la Osa Mayor.



Esfera celeste vista desde la Tierra

Se creía que estos objetos pertenecía a la Vía Láctea, y que ésta era TODO el Universo existente.

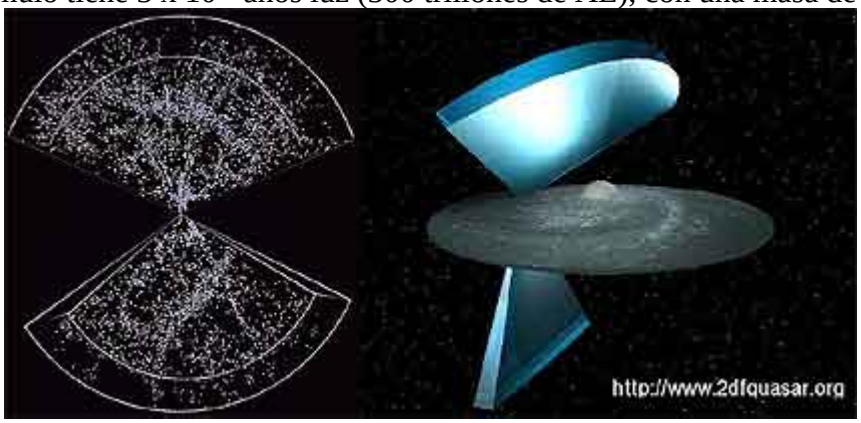
Luego se identifica un grupo de galaxias asociadas por gravitación como el Grupo Local (al cual pertenece la Vía Láctea). El Grupo Local está compuesto por entre 42/45 galaxias, y ocupa un volumen de espacio de 6 millones de años luz. Puede haber mas componentes, pero el identificarlos está dificultado por el polvo intergaláctico (que nos tapa el 20 % del Universo), las dificultades de visualización y porque muchos integrantes son galaxias enanas de baja luminosidad. Por ejemplo, en Agosto de 2006 se han encontrado dos galaxias mas, satélites de la Vía Láctea (una de ellas se encuentra en la constelación del Boyero). O sea que no se sabe a ciencia cierta cuantos galaxias integran el Grupo Local.

Los Grupos son las asociaciones de galaxias que tienen menor cantidad de componentes (con un promedio de entre 30 y 50 galaxias ocupando un volumen de espacio de 10 millones de años luz) y poseen una masa de 10^{12} soles (las masas están calculadas a partir de la materia visible).

A los Grupos le siguen los Cúmulos de galaxias, estos tienen mas de 1.000 galaxias y ocupan un volumen de entre 35 y 50 millones de años luz de diámetro, y tienen una masa de 10^{13} soles. En la década de 1940 Hubble propuso llamar Cúmulo a todo conjunto de por lo menos 50 galaxias distribuidas en un volumen de 6 millones de años luz. Encontró 2.712 conjuntos de galaxias que cumplen con este requisito. Esto planteó si podía haber asociaciones de un orden superior.

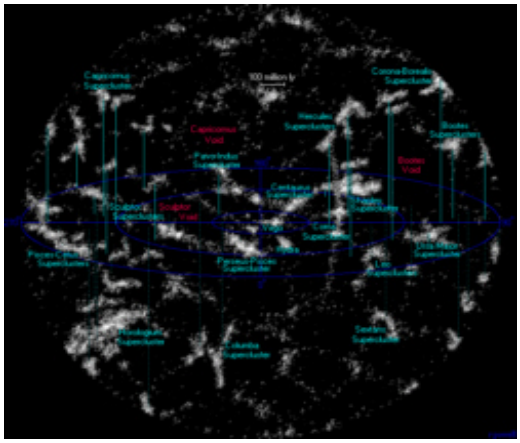
Cúmulos de Galaxias

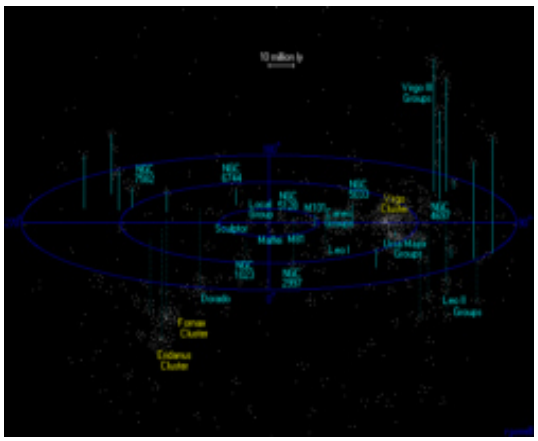
Se descubrieron entonces los Supercúmulos, con entre 10.000 y más de 100.000 galaxias. Un grupo de galaxias que se desplazara libremente a una velocidad de 300.000 Km/seg. habrá recorrido apenas una pequeña porción del Supercúmulo al cual pertenece desde que se formó (recordar que la edad del Universo está calculada en 11.000/15.000 millones de años).
Un Supercúmulo tiene 3 x 10^{18} años luz (300 trillones de AL), con una masa de 10^{16} soles.



La observación demuestra que entre estas estructuras hay inmensos espacios vacíos. Hasta ahora se conocen 18 Supercúmulos, que reciben su nombre de la constelación sobre la cual se proyectan (por ej., SC de Capricornio, Hércules, Osa Mayor, Corona Boreal, Coma Berenice, Boyero, Hidra, Leo, Persei-Piscis, Centauro, Sculptor, Columbus, Sextante, Piscis-Cetus, etc). Estas cifras varían continuamente gracias a las nuevas tecnologías utilizadas para la observación.

Supercúmulo de Virgo: Se extiende como una franja de 12° de ancho, perpendicular al ecuador de la Vía Láctea. Como todos los Supercúmulos tiende a tener forma achatada (la relación entre longitud y espesor es de 6 a 1). En el centro de esta banda la densidad de galaxias es 10 veces mayor que a los costados. En su centro se encuentra el Cúmulo de Virgo. Está formado por 11 cúmulos y rodeado por docenas de otros cúmulos y miles de galaxias individuales. De todo este enorme volumen las galaxias ocupan apenas el 5 %, o sea que es casi todo vacío. Se calcula que el eje de rotación pasa por el Cúmulo de Virgo (a 60 millones de años luz de la Vía Láctea) y completaría una vuelta entre 50.000 y 200.000 millones de años.



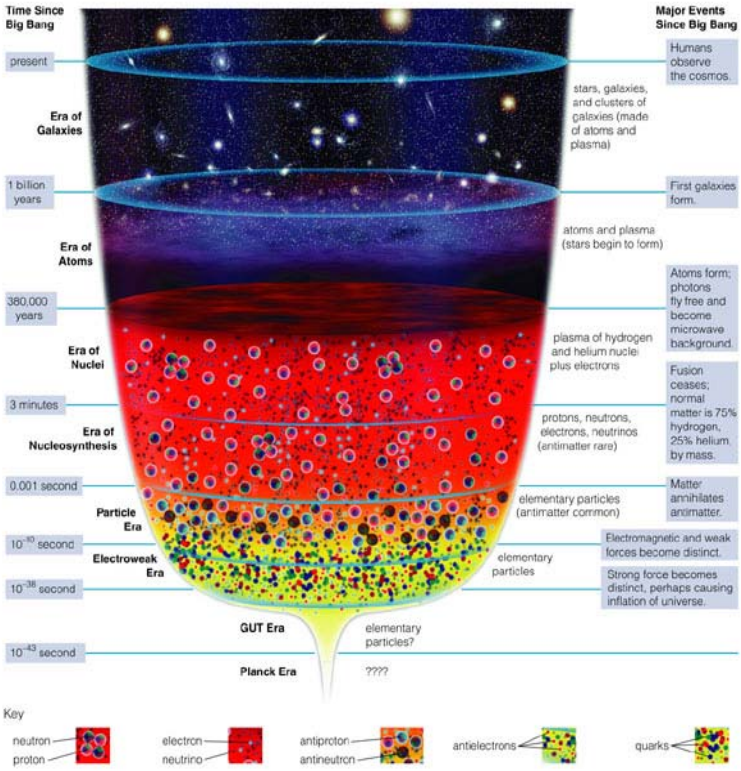


La edad del Universo se calcula en unos 13.800 millones de años, hasta ahora se puede visualizar hasta 11.200 millones de años.

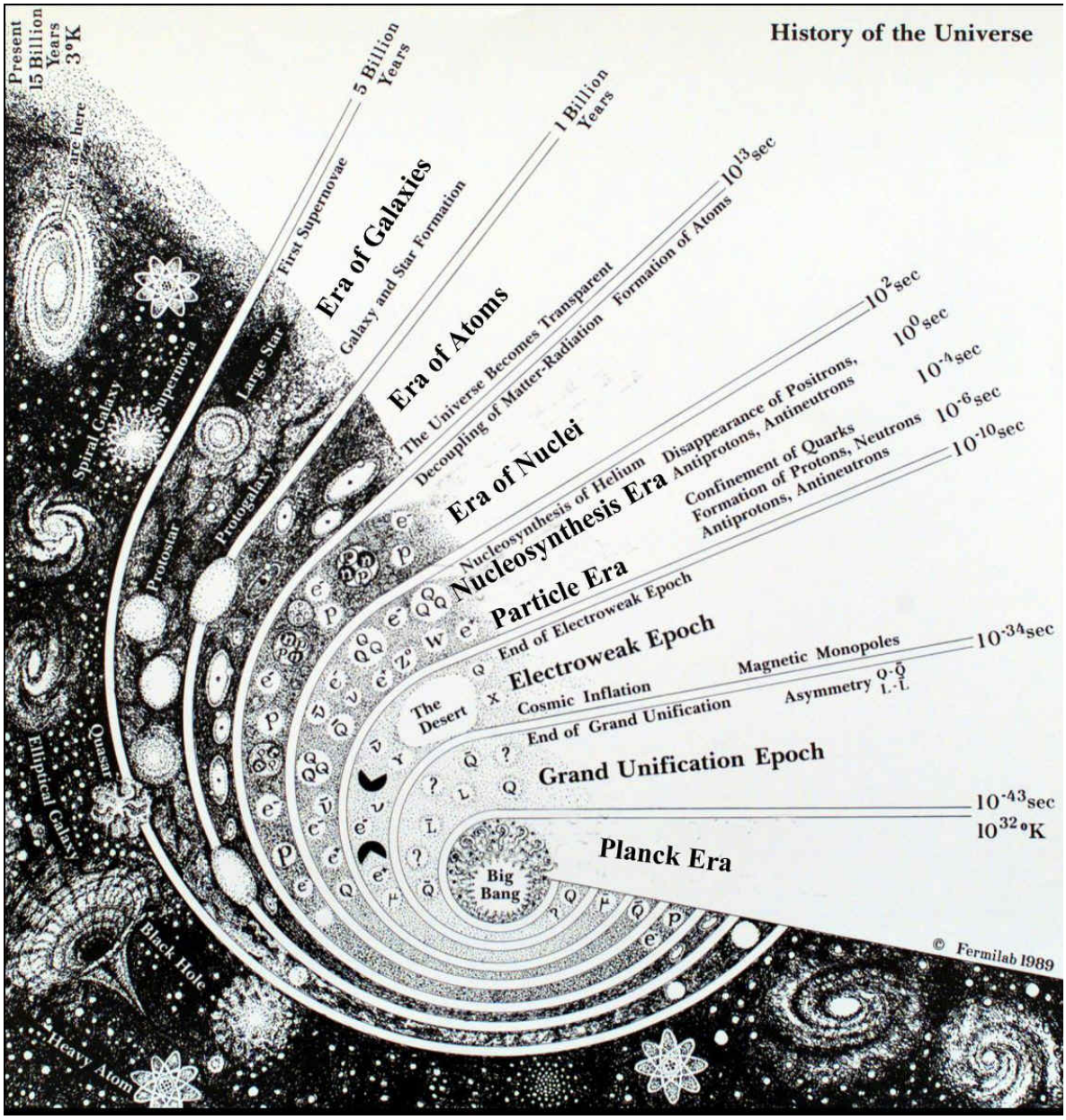
La Vía Láctea está en los arrabales del Supercúmulo de Virgo. Los cúmulos que forman el centro del Supercúmulo emiten como prolongaciones que los unen a otros cúmulos, y a su vez todos los Supercúmulos emiten también prolongaciones que los unen a otros Supercúmulos. Como si fuera un tejido que une a la materia luminosa.

Los espacios vacíos también reciben el nombre de la constelación sobre la cual se proyectan, aunque no están realmente vacíos. Se dice que están vacíos de galaxias cuando la densidad de galaxias es menor del 20 % de la densidad de galaxias del resto del Universo (o sea que habría un cien milésimo de átomo – 10^{-5} - por m^2).
Se ha comparado la estructura del Universo en un radio de 1.000 millones de años luz con la estructura de una esponja o un queso gruyere, donde las paredes de las cavidades del queso sería la materia luminosa. Actualmente se piensa mas en comparar la estructura del Universo con gotas de rocío sobre una telaraña. Parecería ser que las galaxias tienden a disponerse con el eje de rotación sobre los hilos que unen los Supercúmulos, como si estuvieran enhebradas en ellos.

¿Se trata de una casualidad o hay alguna relación causal que haya producido esta disposición? Retrocediendo en el tiempo se piensa que en los comienzos del Universo, desde la hora cero hasta 10^{-45} de segundo después (la llamada 'era de Planck') el Universo era totalmente diferente al actual. Estaba gobernado por una sola fuerza, que reunía en si a las 4 fuerzas conocidas (gravedad, electromagnetismo, fuerza débil y fuerza fuerte) actualmente en lo que sería una Superfuerza.



Copyright © 2004 Pearson Education, publishing as Addison Wesley.



Este estado duró muy poco, ya que el Universo se expandía con gran velocidad enfriándose rápidamente. Debido a la expansión la gravedad se separó de las otras 3 fuerzas, comenzando a actuar de manera independiente igual que ahora. En ese momento el Universo era radiación casi pura y partículas (no las que reconocemos actualmente) en lo que se llama un equilibrio térmico casi perfecto.
La uniformidad del Universo era casi total, pero una vez que comenzó a actuar la gravitación debieron aparecer fluctuaciones en la densidad de la materia (como grumos), perdiéndose así la uniformidad. (Desde una situación de equilibrio y uniformidad totales nunca podría haber aparecido algo como el Universo actual).

Estas fluctuaciones permitieron que la gravedad comenzara a aglutinar la materia en un Universo del tamaño de una pelota de golf.
El Universo dejó de ser homogéneo. El cálculo demuestra que estas in-homogeneidades debieron ser apenas de 0,01 % de la densidad media de la materia existente en ese momento (como si aparecieran olas de 3 mm en un lago de 30 m de profundidad).
Los grumos estaban sometidos a fuerzas antagónicas, por un lado la expansión del Universo y por el otro la gravedad. El panorama de la organización general del Universo actual nos muestra que la que triunfó fue la gravitación. Los grumos no sólo crecieron, sino que atrajeron a otros hacia sí. Estos grumos fueron dando origen a las galaxias y al resto de las estructuras del Universo (Cúmulos y Supercúmulos). Todo el Universo actual es la continuación de un Universo pequeño, muy denso, muy caliente y uniforme enfriado por la expansión.

Hay dos grandes corrientes que explican como pudo suceder esto.

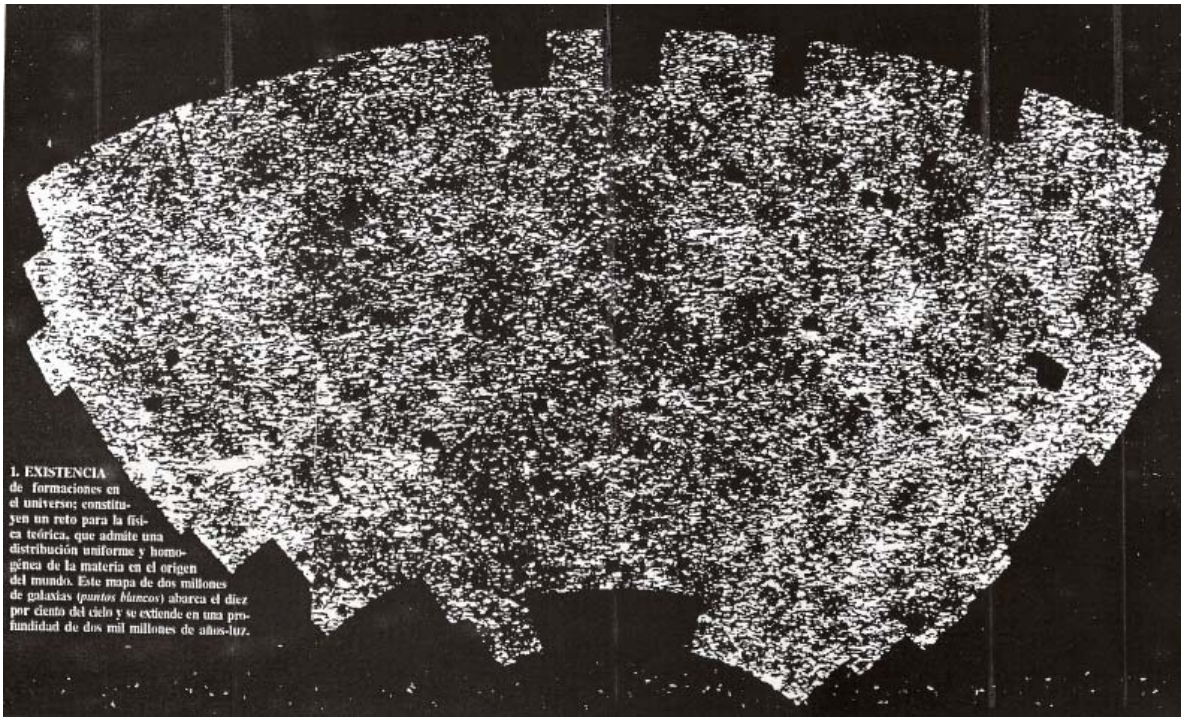
1) Modelo isotérmico: Propuesto por Peebles (cosmólogo inglés). En el principio materia y energía estaban separadas, la energía llenaba todo el Universo, inmersas en la energía había fluctuaciones de la densidad (grumos) de materia (como una sopa de arroz, donde el caldo sería la energía y los granos de arroz la materia). Con el tiempo estos grumos fueron captando a otros y creciendo por gravitación. Luego estos grumos terminaron siendo galaxias, las cuales por gravitación fueron formando los Grupos, Cúmulos y Supercúmulos. A este modelo también se lo llama abajo-arriba, ya que implica el lento crecimiento y agrupación de la materia. Actualmente se cree que la edad que se le atribuye al Universo no puede haber permitido la formación de las estructuras que se observan.
2) Modelo adiabático: En el Universo primigenio las fluctuaciones de la materia encerraban fluctuaciones de la energía, la radiación no afectaba al resto del Universo (adiabático: interacciones de un sistema donde no hay comunicación de la energía con el medio). Cada fluctuación de la materia era una fluctuación de la energía. El problema de este modelo es que las fluctuaciones primitivas debieron ser mas grandes que las planteadas para permitir la formación de las estructuras actuales, y esto no condice con la radiación de fondo (isotrópica). Del fraccionamiento de estas fluctuaciones habrían salido primero los Supercúmulos, luego los Cúmulos, luego los Grupos y luego las Galaxias. A este modelo también se lo llama arriba-abajo (primero lo grande y luego lo más pequeño).

La materia oscura sólo responde a la gravedad, no tiene nada que ver con el electromagnetismo por lo que no irradia energía de ningún tipo. En los grumos iniciales debió existir materia oscura, lo que apoyaría el hecho de que debe haber habido fluctuaciones de materia que encerraban energía. Es por esto que actualmente se acepta el modelo adiabático.

El 90 % del Universo está ocupado por espacios vacíos entre los Supercúmulos, los Supercúmulos tienen una tendencia a achatarse, a aplastarse, y las interacciones entre los Supercúmulos serían los brazos que los unen.

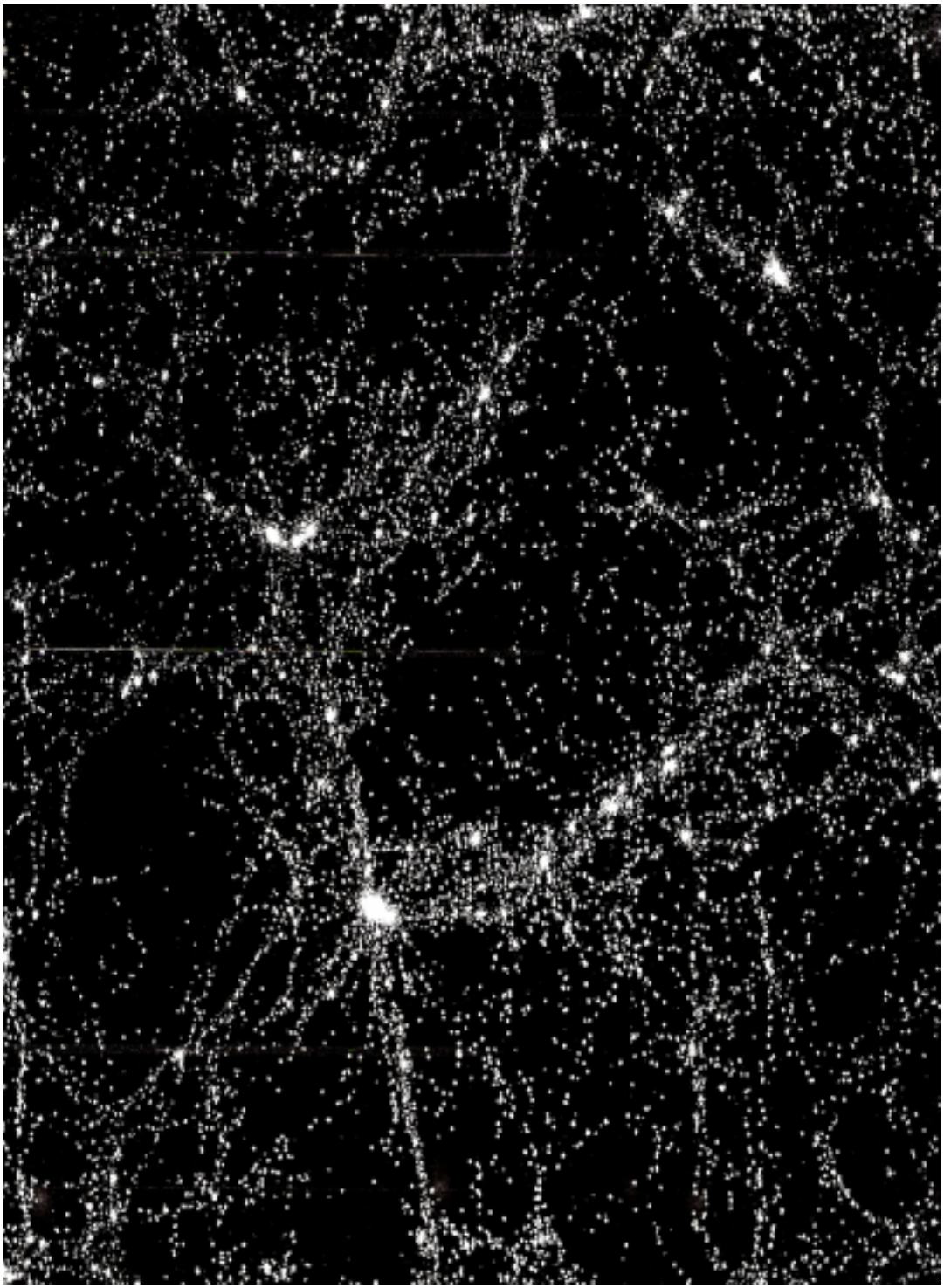
El SLOAN (nombre del telescopio y del proyecto en sí) lleva a cabo un registro tridimensional del cielo. Con lo observado hasta ahora se demuestra que la estructura del Universo continúa hasta 2.000 millones de años luz de distancia y luego desaparece, comenzando a aparecer un Universo uniforme. Este Universo uniforme sería el Universo primigenio, o sea que el SLOAN confirma que estamos mirando hacia el pasado, verificando también el crecimiento de la entropía (se desorganiza lo que estaba organizado).

FOTOCOPIAS:



1. EXISTENCIA de formaciones en el universo; constituyen un reto para la física teórica, que admite una distribución uniforme y homogénea de la materia en el origen del mundo. Este mapa de dos millones de galaxias (*puntos blancos*) abarca el diez por ciento del cielo y se extiende en una profundidad de dos mil millones de años-luz.

Hasta 1.000 millones de años luz.



Hasta 2.000 millones de años luz.

VEINTIDÓS: COSMOLOGÍA

Hace 400 siglos se escribió en una tablilla el poema babilónico sobre la creación, primera constancia que se tiene escrita de la preocupación del hombre por sus orígenes. Cada grupo humano creó su propia cosmología para explicar el universo, cosmologías que incluían los puntos de vista físico, filosófico y teológico.
La cosmología científica actual incluye toda teoría que se base en el análisis de la composición y las estructuras del universo, pero las preguntas son, básicamente, las mismas: ¿Cómo y cuándo empezó el universo? ¿Hacia dónde se dirige?

De plantearse preguntas simples a veces se obtienen respuestas inesperadas. Por ejemplo, en 1763 Olbers (un médico alemán aficionado a la Astronomía) se preguntó porqué de noche el cielo es oscuro. O sea, si estamos en un Universo poblado por un colosal número de estrellas, primero que deberíamos ver una al lado de la otra y, por otra parte, la suma de su luminosidad debería iluminar todo el cielo, el cielo debería brilla de forma uniforme.

Una de las posibles respuestas sería que el polvo interestelar interfiere con la observación, pero para que esto fuera cierto el mismo polvo debería estar uniformemente distribuido, y se sabe que la materia, por simple atracción gravitatoria, tiende a agruparse. Pero aún cuando la distribución del polvo fuera uniforme, él mismo absorbería la energía transportada por la luz estelar, devolviéndola en frecuencias visibles (brillando).

Olbers razonó de la siguiente manera: Pensó en un volumen de espacio esférico, con un radio (r) arbitrariamente grande y un espesor (e) pequeño en relación con el R. En el centro de esta capa esférica colocó a la Tierra. La superficie (S) de la capa esférica sería:

$S = 4 \pi r^2$

Y el volumen sería: $V = 4 \pi r^2 e$

Si llamamos n al número promedio de estrellas por unidad de volumen de la capa esférica, el total de estrellas estaría dado por

$Te = 4 \pi r^2 e n$

Y si llamamos l a la luminosidad promedio de estas estrellas, tendríamos que la luminosidad total (Lt) sería:

$Lt = 4 \pi r^2 e n l$

Así, la luz que producen todas las estrellas de este volumen específico es proporcional a r^2, pero la intensidad de la luz de todas las estrellas que lo ocupan se sabe que es proporcional a la inversa del cuadrado de la distancia

$$\frac{1}{d^2}$$

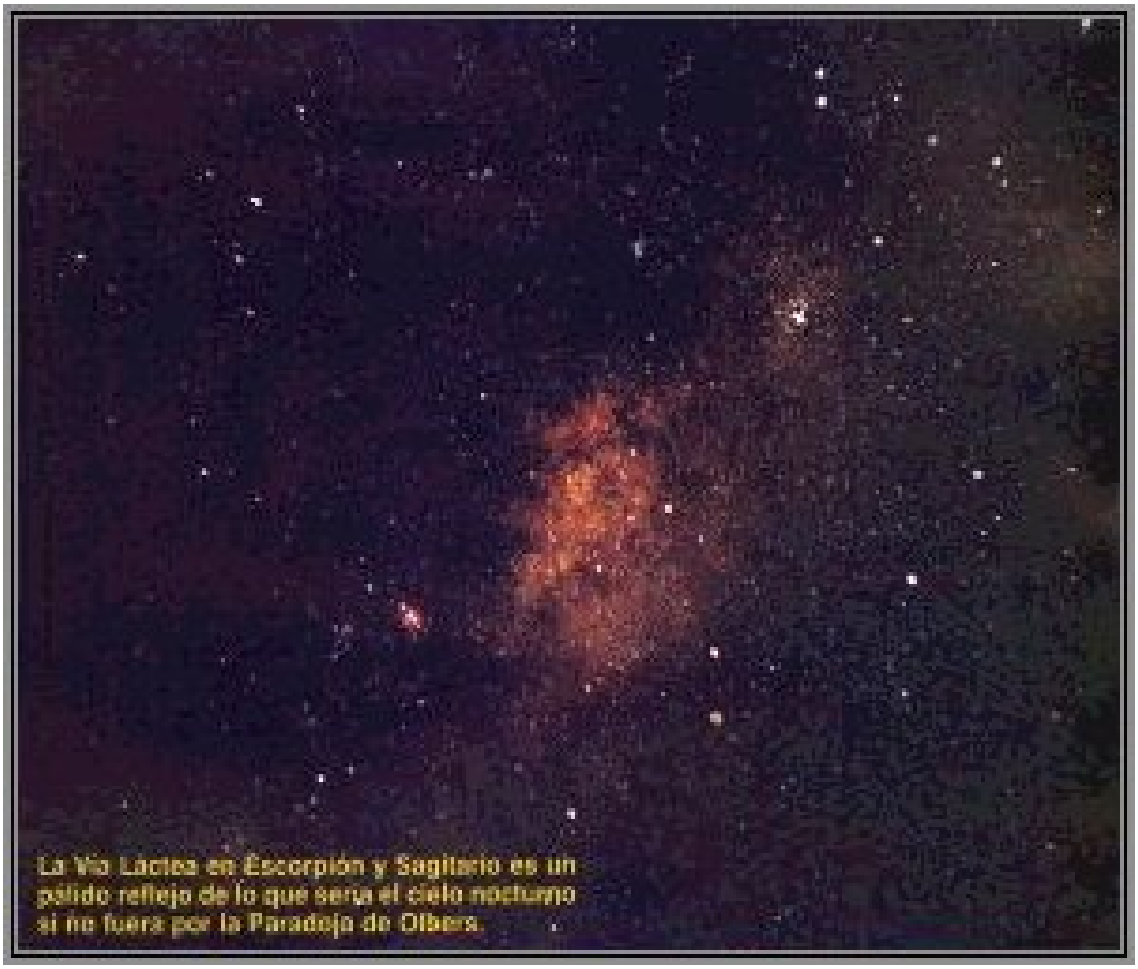
Entonces tenemos que un factor anula al otro, por lo que la luz que se recibe en la Tierra dependerá sólo del volumen de la capa esférica, de la cantidad de estrellas que lo ocupen y de su luminosidad promedio. Como el Universo es inmenso, se puede agrandar todo lo que se quiera el espacio ocupado por la capa luminosa, entonces toda la superficie que nos rodea debería brillar de manera uniforme, el cielo debería brillar 50.000 veces más que el disco solar, y su temperatura debería ser de 5.000° (700° menos que en la fotosfera solar). Por lo que no existiría la Tierra.

Esta es la paradoja de Olbers. Un resultado absurdo derivado de un razonamiento correcto.

05.01

La Paradoja de Olbers

Los problemas que Bentley le planteó a Newton, que describimos en la sección N°2 del capítulo anterior, son mucho más profundos que lo que tal vez el mismo Bentley imaginó. Efectivamente un universo infinito, uniforme, lleno de estrellas, presenta la dificultad que la atracción que se ejerce sobre una masa, proveniente de una dirección, llega a ser infinita. El mismo problema ocurre con la luz que se recibe de una dirección determinada; esto se conoce como **«la paradoja de Olbers».**



Durante siglo, pensadores y científicos se han interrogado acerca de algo que aparentemente aparece como una cuestión simple: Si el universo es infinito y está lleno de estrellas, ¿cómo puede ser el cielo oscuro por la noche?. Lo lógico sería que la línea de visión de un observador en un universo infinito debería terminar con una estrella, tal como sucede cuando se observa un bosque y se termina viendo árboles en todas direcciones. El otro efecto que debería percibirse debería ser el de un fondo continuo de luz celeste, lo que el genio literario de Edgar Allan Poe llamó las "doradas paredes del universo". El cielo nocturno no sólo sería muchísimo más iluminado que el día normal que conocemos, sino que el calor radiado por la cantidad enorme de estrellas que deberían brillar evaporarían también todos los océanos de la Tierra.

El primero en darse cuenta del problema fue Kepler en 1610. Propuso que el universo debe ser finito, pues la noche es oscura, ya que si fuese infinito recibiríamos una cantidad muy grande de luz proveniente del cielo. El astrónomo inglés Edmond Halley discutió el problema en 1720 ante la Sociedad Real Inglesa. Con un razonamiento equivocado desprecia el problema señalado que como de cada estrella distante recibiríamos muy poca luz, una cantidad despreciable, así también la suma de la luz de todas ellas tampoco sería importante. Esa reunión de la Royal Society era presidida por Sir Isaac Newton, quien tenía ya 78 años. Se ha señalado irónicamente que el hecho de que Newton dejase pasar un comentario de este estilo es una prueba irrefutable que estaba durmiendo en el momento que Halley presentó su argumentación; el razonamiento es absolutamente contrario a los principios del cálculo infinitesimal que el propio Newton había inventado para demostrar las leyes de la mecánica.

El problema de la oscuridad del cielo nocturno fue abordado nuevamente por el joven astrónomo suizo Jean Philippe Loÿs de Cheseaux en el año 1744 y posteriormente por el astrónomo alemán Heinrich Olbers (1758-1840), en forma independiente, en 1826. Ambos argumentaron que si el universo fuese infinito y estuviese lleno de estrellas, deberíamos recibir 184.000 veces más energía y luz de todo el cielo que lo que recibimos del Sol. Deberíamos ver el cielo absolutamente cubierto de estrellas y sin vacíos de oscuridad, por lo cual el cielo debería ser una superficie iluminada igual que el disco solar (sería como hacer crecer el disco del Sol hasta que cubra todo el cielo de horizonte a horizonte). Un universo así sería como vivir en un horno. Un universo infinito, que parece lo más sencillo que podemos concluir de las leyes de Newton, viola la más elemental de las observaciones astronómicas: la oscuridad del cielo nocturno. Ellos lo que conocemos como «la paradoja de Olbers».

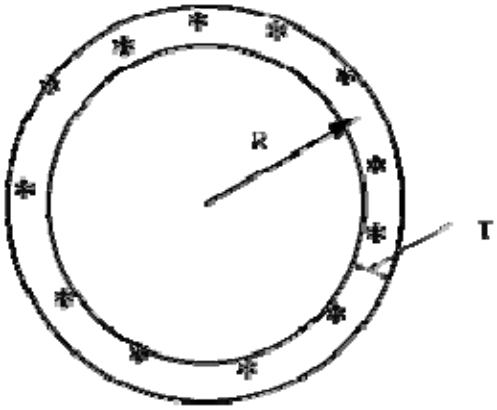
Con una argumentación matemática muy clara se puede demostrar que Loÿs de Cheseaux y Olbers tenían razón de que efectivamente en un universo uniforme e infinito el cielo debería ser muy brillante. Para ello para se pueden considerar los siguientes supuestos:

- El universo tiene un tamaño infinito;
- Las estrellas pueblan uniformemente el universo, y
- El flux de energía de una estrella está dado por la ley del cuadrado inverso (la energía es radiada en áreas por segundo):

$$\text{flux} = L / (4\pi D^2)$$

Donde L es la luminosidad intrínsica de la estrella y D la distancia desde la Tierra.

Ahora, consideremos una región estelar de un espesor T y de un radio R:



- Entonces ¿Cuánta luz recibimos desde esta región de estrella?
- El flux de energía desde una estrella es $f = L / (4\pi R^2)$.
- En función al gráfico de arriba, si hay *n* por unidad de volumen de una región, entonces el número total de estrellas por región es:

$$N = n \times \text{volumen} = n \times 4\pi R^2 \times T$$

- Entonces la cantidad de flux que recibimos desde la región es $F = f \times N = L \times n \times T$ ===› Es un simple e interesante resultado matemático.

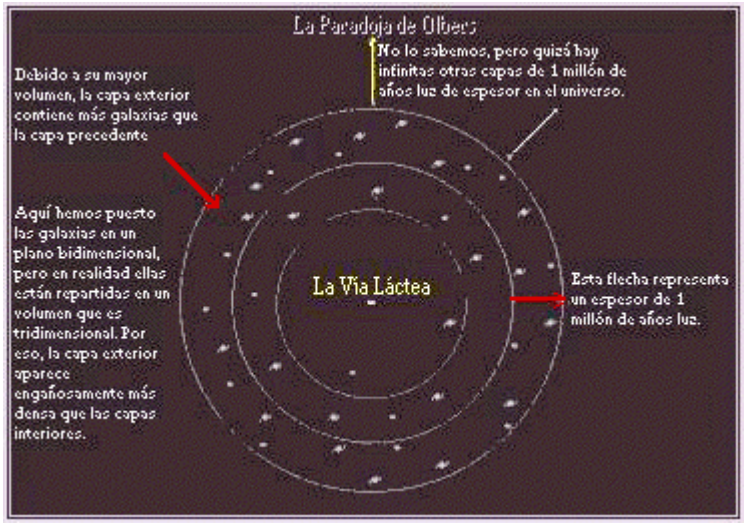
El quid del asunto es que la cantidad de luz que nosotros recibimos desde una región estelar dada, no depende de la distancia a que se encuentre desde la Tierra. Recibimos la misma cantidad de luz, ya sea que la región estelar se encuentre distante o cerca de nosotros. Si hubiese millones de regiones dadas encendidas de estrellas en el universo, entonces simplemente multiplicamos la contribución de radiación de una región estelar por los millones de estrellas para estimar la cantidad de energía que recibimos desde el universo. Adicionalmente, si ello fuera así, nosotros "deberíamos ver en todo momento" toda la luz que irradiarían esos millones de estrellas desde el universo y, con ello, no tendríamos cielos nocturnos. Esto es lo que da origen a «la paradoja de Olbers».

Otra manera de enfocar el problema es a través de comparar el resplandor del cielo nocturno con el de la superficie del Sol. Sabemos que la luminosidad del Sol nace desde una superficie que arde a una temperatura de 5.800ºK. Por otro lado, el cielo nocturno es considerablemente menos luminoso y nítido. Para conocer por qué ello es una paradoja, consideremos lo siguiente:

1. Una estrella de $R_\odot$ (igual al Sol), cubre un área de un tamaño $A = \pi R^2$. Ello es directo. Entonces, la fracción de área de superficie de una esfera de radio **r** que cubre una estrella está dada por la fracción = $f = \pi R^2 / (4\pi r^2) = [R/2r]^2$.
2. El total de la fracción de la región cubierta por todas las estrellas alojadas en ella===› es dada por la fracción de una estrella por el número total de ellas = $[R/2r]^2 \times [\, n \times 4\pi r^2 \times T\,]$ ===› *la fracción de región cubierta* ~ $5 \times 10^{-16} \times n \times T$
   Aquí, se midió la densidad estelar *n* como el número de estrellas en un pc^3 y el ancho de la región en pc.
   Recordemos que 1 pc (parsec) es igual a 3,26al (año luz). Son unidades que son convenientes tenerlas presente, ya que en nuestra galaxia hay un promedio de una estrella por pc^3 con una separación, promedio también, entre ellas de 1pc

Con la descripción matemática que hemos realizado se puede demostrar que Loÿs de Cheseaux y Olbers tenían razón; efectivamente en un universo uniforme e infinito el cielo debe ser muy brillante. Pero ¿por qué entonces tenemos cielos nocturnos? ¿Cuál es la suposición falsa? Ambos consideraron que o bien la estrellas estaban después de todo limitadas en su número, o de alguna manera su luz no conseguía llegar hasta la Tierra. El último argumento lo sostenían a raíz de que los astrónomos habían descubierto el polvo interestelar, el cual sería el culpable de la poca luminosidad del cielo nocturno sembrado de estrellas por todos los rincones del firmamento. Bastaría con que el espacio interestelar no fuese perfectamente transparente para que no recibamos una gran cantidad de energía en la Tierra. Pero los cálculos demostraron rápidamente que si las partículas de polvo absorbieran la energía de toda la luz estelar que faltaba, el polvo en sí empezaría a brillar. Un universo igual que un horno, como debiese ser si fuese infinito bajo el concepto en el que estamos hablando, más transparente o menos, la cantidad de energía recibida en la Tierra sería la misma. Por ejemplo, granos de polvo pueden absorber bastante luz (y energía) pero, terminarán calentándose y remitiendo lo mismo que absorbieron. Es curioso que ni Kepler ni Loÿs de Cheseaux ni Olbers visualizaran que la solución a la paradoja tiene que ver con la edad de las estrellas y del universo, y en definitiva con la cantidad de energía disponible (a Kepler se le puede perdonar, pues no conocía el valor de la velocidad de la luz, pero en el siglo XVIII ya se sabía positivamente que la luz no se propaga en forma instantánea).

Para entender mejor lo que estamos describiendo, retomemos aquí el ejemplo de los árboles de un bosque que enunciamos en el segundo párrafo de este capítulo. Si nos internamos en un bosque con árboles plantados sin orden, dependiendo del espesor de los troncos y de la distancia típica entre los árboles, sólo podremos ver hasta una cierta distancia, habrá un límite de visibilidad en el bosque, pues en cualquier dirección nuestra visual terminará encontrando un tronco. Es fácil ver que el límite de visibilidad en un bosque, la distancia típica a la que es posible ver, depende del grosor de los troncos y de la distancia media entre los árboles; mientras más delgados y espaciados estén los árboles, más lejos se podrá ver.



Aplicando las mismas ideas en un universo lleno de estrellas habrá un límite de visibilidad que depende del tamaño de las estrellase y de sus distancias medias. La distancia típica entre las estrellas es tan grande comparado con su tamaño que el límite de visibilidad en el universo resulta ser que 12^{23} años-luz. Por lo tanto, si recibiésemos la luz y energía de todas las estrellas del universo hasta una distancia de 12^{23} años-luz la temperatura en la Tierra debería ser igual que la que tiene la superficie de una estrella típica como el Sol, esto es, 5.800º K. Pero, para que eso ocurra, el universo debería tener una edad mayor de 12^{23} años y las estrellas deberían vivir más de 12^{23} años cada una. Si cualquiera de estas condiciones no se cumple, no podríamos recibir una cantidad abrasadora de luz en la Tierra. Por lo tanto, postulando que el universo es muy joven se soluciona el problema. Pero ninguna de las últimas evidencias que se tienen pueden sostener una edad menor que 12^{23} años para el universo, ya que se han podido observar con el Telescopio Espacial Hubble galaxias a una distancia superior a los doce mil millones de años luz. Por otra parte, sabemos que estrellas comunes como el Sol tienen una vida promedio de diez mil millones de años y, además, sabemos que estrellas con masas superiores a la del astro rey su vida promedio es bastante menor a los diez mil millones de años.

Por lo tanto, aunque el universo tuviese menos años que 12^{23} de edad y todas las estrellas se hubiesen formado simultáneamente, jamás lograríamos verlas encendidas todas al mismo tiempo.

Para que el universo fuese un horno debería ser uniforme e infinito tanto en el espacio como el tiempo (al menos tener una edad mayor que 12^{23} años). Alternativamente, si el universo fuese mucho más denso, su límite de visibilidad podría llegar a ser menor que $l2^{10}$ años-luz, produciendo un cielo muy brillante. Basta con que el universo sea joven o poco denso para resolver la paradoja. Por lo tanto, la noche es oscura porque la densidad de universo es muy baja o su edad muy pequeña. Sin embargo, pienso que la respuesta más coherente, con todas las ideas teóricas de mayor generalizada aceptación dentro del ámbito de la física, es aquella que brota de dos implicaciones ampliamente aceptadas de la teoría de la relatividad. Primero, si el universo se inició en el llamado Big Bang hace una cantidad finita de tiempo, y segundo, si la luz viaja a una velocidad finita, sólo la luz de las estrellas dentro de una distancia determinada habrá tenido tiempo suficiente de alcanzar la Tierra; todas las estrellas más allá serán simplemente indetectables. Así, aunque el número de estrellas sea infinito, el número de estrellas visibles no lo es, lo cual explica las zonas oscuras en el espacio. Otros efectos se añaden también a la oscuridad, como ya lo mencionamos. A lo largo del tiempo, por ejemplo, las estrellas se apagan, creando nuevas zonas oscuras. Y, en la expansión del espacio que siguió al Big Bang, la propia luz sufrió una transformación en el cambio.

Una razón por la que el cielo nocturno es oscuro es que el universo se inició hace un período de tiempo finito. Si el cosmos tiene unos quince mil millones de años de edad, por ejemplo, un observador sobre la Tierra sólo puede detectar la luz procedente de objetos a menos de 15.000 millones de años luz (al) de distancia. Las estrellas que se encuentran a mayores distancias, por sobre la capacidad límite de observación, son simplemente invisibles porque su luz no ha tenido tiempo de viajar hasta nosotros.

EL CORRIMIENTO AL ROJO COSMOLÓGICO

La cantidad de estrellas que podemos ver desde la Tierra está determinada por un límite máximo de observación de varios miles de millones de años luz, pero también la luminosidad de las estrellas disminuye, a todos los efectos, por el «corrimiento al rojo cosmológico», un fenómeno directamente relacionado con la expansión del universo implicada en la teoría de la relatividad.

Se suele confundir o asimilar el corrimiento al rojo cosmológico con el clásico efecto Doppler, porque ambos implican el alargamiento de las ondas de luz. Cuando hablamos de efecto Doppler en la luz, estamos describiendo un cambio producido por el movimiento de una fuente con respecto a un observador. Las ondas de luz de un objeto que se mueve hacia el observador son comprimidas hacia la frecuencia más alta, o extremo azul del espectro; las ondas de un objeto que se aleja se alargan y avanzan hacia el extremo de la frecuencia más baja, o rojo.

En el caso cosmológico, el corrimiento al rojo (redshifts) no tiene nada que ver con el movimiento de una fuente de luz, sino más bien con la distancia de la fuente con respecto al observador. Según las ecuaciones de la relatividad, el espacio en sí se expande por todas partes y en todas direcciones, excepto dentro de los sistemas ligados gravitatoriamente como las galaxias. Así, la luz de una fuente lejana en una distante galaxia recorre un camino que se tensa y alarga todas las longitudes de onda. Del mismo modo que en el corrimiento al rojo del efecto Doppler, la onda tensada da como resultado una frecuencia más baja, una forma más roja de luz. Cuanto más remota es la galaxia con respecto a la Tierra, más espacio intermedio hay en expansión, más rápidamente crece la distancia a esa galaxia, y mayor es el corrimiento al rojo. La luz de las estrellas en las galaxias relativamente cercanas simplemente enrojecerá, pero en distancias más y más grandes la luz de las estrellas puede ir más allá del extremo de las bajas frecuencias del espectro visible y entrar en las zonas invisibles de los infrarrojos y luego de las ondas de radio.

Tomado de 'ASTROCOSMOS' – libro digital.

En 1793 no se conocía la expansión del Universo, recién 237 años más tarde se tuvo conocimiento de ello. Así, en 1873 el Universo era una estructura estática. Pero al expandirse el Universo disminuye la frecuencia (medida de la cantidad de energía que transporta) de la radiación, esto causa la disminución de la intensidad de la luz de todas las estrellas que rodean a la Tierra. Los fotones sufren una disminución de su energía, y así no contribuyen a la iluminación del cielo.

A la pregunta de 1793 se le contesta: el cielo de noche es oscuro porque el Universo se expande.

Harrison (ver Universo adiabático) propuso otra respuesta: Si se tiene en cuenta que a medida que se penetra en el espacio con la observación se retrocede en el tiempo, llegará un momento en que podrá verse el Universo antes de la formación de las estrellas y las galaxias. Harrison calculó que para que el cielo brillara uniformemente por sumación de estrellas es necesario penetrar 10^{24} años luz con la observación, y esto no puede hacerse porque la edad del Universo es de $1{,}4 \times 10^{10}$ AL. La respuesta entonces es que el cielo nocturno es oscuro porque el Universo no es lo suficientemente viejo.

Como se dijo, preguntas sencillas llevan a respuestas inesperadas.

En 1930, Hubble descubrió que la luz de todas las galaxias lejanas estaba corrida hacia el rojo como consecuencia de un movimiento general de recesión (corrimiento del tipo doppler de objetos que se alejan). Este fue el punto inicial para pensar en la expansión del Universo.

Corrimiento al rojo

El término **corrimiento al rojo** (*redshift*, en inglés) se usa en astronomía para denominar la disminución en la frecuencia de radiación electromagnética detectada, respecto a la frecuencia con la cual fue emitida.

Para la luz visible, el rojo es el color con mayor longitud de onda, así que los colores sufren un corrimiento al rojo se están transladando hacia la parte roja del espectro electromagnético (ampliando su longitud de onda). El fenómeno se denomina igual para longitudes de onda no visibles (que de hecho, si son mayores que la de la luz visible, el "corrimiento hacia el rojo" los aleja aún más del rojo). El corrimiento contrario, a menores longitudes de onda, se denomina corrimiento al azul.

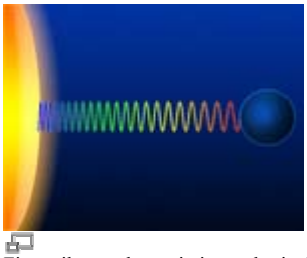


Figura ilustrando corrimiento al rojo de tipo gravitacional

Lo anterior puede deberse a dos causas:

- Expansión del Universo, en cuyo caso es una manifestación del efecto Doppler
- Campo gravitacional muy intenso, en cuyo caso es una manifestación de la relatividad general.

El corrimiento al rojo se denota por la letra ***z*** y, en términos de frecuencia, está definido por:

$$z = \frac{\nu_{em}}{\nu_{obs}} - 1,$$

donde ν_{em} es la frecuencia de la radiación emitida y ν_{obs} es la frecuencia de radiación detectada.

En términos de longitud de onda ($c = \lambda\nu$), lo anterior puede expresarse como:

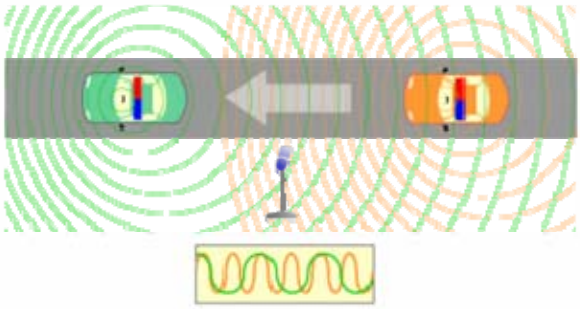
$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{em}}{\lambda_{em}}.$$

Efecto Doppler

Diagrama del **Efecto Doppler**

El **efecto Doppler**, llamado así por Christian Andreas Doppler, consiste en la variación de la longitud de onda de cualquier tipo de onda emitida o recibida por un objeto en movimiento. Doppler propuso este efecto en 1842 en una monografía titulada *Über das farbige Licht der Doppelsterne und einige andere Gestirne des Himmels* ("Sobre el color de la luz en estrellas binarias y otros astros").

Su hipótesis fue investigada en 1845 para el caso de ondas sonoras por el científico holandés Christoph Hendrik Diederik Buys Ballot, confirmando que el tono de un sonido emitido por una fuente que se aproxima al observador es más agudo que si la fuente se aleja. Hippolyte Fizeau descubrió independientemente el mismo fenómeno en el caso de ondas electromagnéticas en 1848. En Francia este efecto se conoce como "Efecto Doppler-Fizeau".



Un micrófono inmóvil registra las sirenas de los policías en movimiento en diversos tonos dependiendo de su dirección relativa.

En el caso del espectro visible de la radiación electromagnética, si el objeto se aleja, su luz se desplaza a longitudes de onda más largas, desplazándose hacia el rojo. Si el objeto se acerca, su luz presenta una longitud de onda más corta, desplazándose hacia el azul. Esta desviación hacia el rojo o el azul es muy leve incluso para velocidades elevadas, como las velocidades relativas entre estrellas o entre galaxias, y el ojo humano no puede captarlo, solamente medirlo indirectamente utilizando instrumentos de precisión como espectrómetros. Si el objeto emisor se moviera a fracciones significativas de la velocidad de la luz, entonces sí seria apreciable de forma directa la variación de longitud de onda.

Sin embargo hay ejemplos cotidianos de efecto Doppler en los que la velocidad a la que se mueve el objeto que emite las ondas es comparable a la velocidad de propagación de esas ondas. La velocidad de una ambulancia (50 km/h) no es insignificante respecto a la velocidad del sonido al nivel del mar (unos 1.235 km/h), por eso se aprecia claramente el cambio del sonido de la sirena desde un tono más agudo a uno más grave, justo en el momento en que el vehículo pasa al lado del observador.

Álgebra del efecto Doppler en ondas sonoras

Imaginemos que un observador O se mueve hacia una fuente S que se encuentra en reposo. El medio es aire y se encuentra en reposo. El observador O comienza a desplazarse hacia la fuente con una velocidad v_o. La fuente de sonido emite un sonido de velocidad v, frecuencia f y longitud de onda λ. Por lo tanto, la velocidad de las ondas respecto del observador no será la v del aire, sino la siguiente:

$v' = v + v_o$. Sin embargo, no debemos olvidar que como el medio no cambia, la longitud de onda será la misma, por lo tanto si:

$$v = f.\lambda \Rightarrow f = \frac{v}{\lambda}$$

Pero como mencionamos en la primera explicación de este efecto, el observador al acercarse a la fuente oirá un sonido más agudo, esto implica que su frecuencia es mayor. A esta frecuencia mayor captada por el observador se la denomina frecuencia aparente y la simbolizaremos con f'.

$$f' = \frac{v'}{\lambda} = \frac{v + v_o}{\lambda} = \frac{v}{\lambda} + \frac{v_o}{\lambda} = f + \frac{v_o}{\lambda} = f.(1 + \frac{v_o}{f.\lambda}) = f.(1 + \frac{v_o}{v})$$

El observador escuchará un sonido de mayor frecuencia debido a que $(1 + \frac{v_o}{v}) \geq 1$

Analicemos el caso contrario:

Cuando el observador se aleje de la fuente, la velocidad v' será $v' = v - v_o$ y de manera análoga podemos deducir que

$f' = f.(1 - \frac{v_o}{v})$. En este caso la frecuencia aparente percibida por el observador será menor que la frecuencia real emitida por la fuente, lo que genera que el observador perciba un sonido de menor altura o más grave.

De estas dos situaciones concluimos que cuando un observador se mueve con respecto a una fuente en reposo, la frecuencia aparente percibida por el observador es:

$$f' = f.\left(1 \pm \frac{v_o}{v}\right)$$

Ahora consideraremos el caso donde el observador se encuentra en reposo y la fuente se mueve. Cuando la fuente se desplace hacia el observador, los frentes de onda estarán más cerca uno del otro. En consecuencia, el observador percibe sonidos con una menor longitud de onda. Esta diferencia de longitud de onda puede expresarse como:

$$\Delta\lambda = \frac{v_s}{f}$$

Por tanto, la longitud de onda percibida será:

$$\lambda' = \lambda - \Delta\lambda$$

$$\lambda = \frac{v_s}{f}$$

Como podemos deducir que:

$$f' = \frac{v_s}{\lambda'} = \frac{v}{\lambda - \frac{v_s}{f}} = \frac{v}{\frac{v}{f} - \frac{v_s}{f}} = f.(\frac{v}{v - v_s})$$

Haciendo un razonamiento análogo para el caso contrario (fuente alajándose), podemos concluir que la frecuencia percibida por un observador en reposo con una fuente en movimiento será:

$$f' = f.\left(\frac{1}{1 \pm \frac{v_s}{v}}\right)$$

Cuando la fuente se acerque al observador se pondrá un (-) en el denominador, y cuando la fuente se aleje se lo reemplazará por un (+).

Al terminar de leer lo anteriormente expuesto surge la siguiente pregunta: ¿Qué pasará si la fuente y el observador se mueven al mismo tiempo?. En este caso particular se aplica la siguiente formula, que no es más que una combinación de las dos:

$$f' = f.\left(\frac{v \pm v_o}{v \mp v_s}\right)$$

Los signos $\pm$ y $\mp$ deben ser respetados de la siguiente manera. Si en el numerador se suma, en el denominador debe restarse y viceversa.

Ejemplo:

Un observador se mueve con una velocidad de 42 m/s hacia un trompetista en reposo emitiendo la nota La a 440 Hz. ¿Qué frecuencia percibirá el observador? (Dato: $v_{sonido} = 343m/s$).

Resolución: Si el observador se acerca hacia la fuente, esto implica que la velocidad con que percibirá cada frente de onda será mayor, por lo tanto la frecuencia aparente será mayor a la real. Para que esto ocurra debemos aplicar el signo (+) en la ecuación.

$$f' = f.\left(1 \pm \frac{v_o}{v}\right)$$

$$f' = 440Hz.\left(1 + \frac{42m/s}{343m/s}\right)$$

$$f' = 493,88Hz$$

En este caso particular, el trompetista toca la nota La a 440 Hz, sin embargo el observador percibe una nota que vibra a una frecuencia de 493,88 Hz, que es la frecuencia perteneciente a la nota Si. Musicalmente hablando, el observador percibe el sonido un tono más arriba del que se emite realmente.
(wikipedia)

La velocidad de recesión se calcula así:

$Vr = H_0 d$

donde H_0 es la Constante de Hubble (o constante de proporcionalidad). Las primeras mediciones de Hubble dieron un valor para la constante de 500 Km/seg por megaparsec (1 millón de parsecs) de distancia. Mediciones posteriores cambiaron el valor repetidas veces. Actualmente el valor se ubica en 71(+4 / -3) Km/seg por megaparsec (72 Km/seg por megaparsec). El valor de H_0 se expresa con la letra Z.

Ley de Hubble

La **ley de Hubble** establece que las galaxias se alejan unas de otras a una velocidad proporcional a su distancia. Esta ley conduce al modelo del Universo en expansión y, retrocediendo en el tiempo, a la teoría del Big Bang. Fue formulada por primera vez por Edwin Hubble en 1929. Según la Ley de Hubble, la medida de la expansión del Universo viene dada por la Constante de Hubble. En 2003, los datos del satélite WMAP permitieron dar el valor de 74(km/s)/Mpc para esta constante. En 2006 los nuevos datos aportados por este satélite dieron el valor de 70 (km/s)/Mpc, +2.4/-3.2. De acuerdo con estos valores, el Universo tiene una edad próxima a los 14 mil millones de años.

Historia

En los años 20, Hubble comparó las distancias a las galaxias con sus respectivos corrimientos al rojo debidos a la recesión o alejamiento relativo entre ellas según el Efecto Doppler, encontrando entre ambas magnitudes una relación lineal, es decir, cuanto más lejos se halla una galaxia, mayor es su corrimiento al rojo. Al coeficiente de proporcionalidad se lo denomina Constante de Hubble, H_0. Hubble interpretó esta relación como una prueba de que el Universo se estaba expandiendo y que, por lo tanto, debió tener un origen. Posteriormente, los modelos teóricos cosmológicos basados en la Teoría de la Relatividad_General de Albert Einstein permitieron explicar esta expansión, ya que surge de forma natural a partir las ecuaciones de campo. El propio Einstein, quien creía en un principio en un Universo estático, introdujo de forma artificial un término extra a estas ecuaciones, denominado constante cosmológica, para evitar el fenómeno de la expansión. Tras los resultados publicados por Hubble, Einstein se retractó y retiró este término, al que denominó "el mayor error de mi carrera".

El valor de la Constante de Hubble y la edad del Universo

Durante el siglo XX, una de las prioridades de la cosmología fue el cálculo de la Constante de Hubble. Los primeros cálculos realizados por Hubble se basaban en los datos de corrimiento al rojo de 46 galaxias, dando un valor de unos 500 km/s/Mpc, según los cuales el Universo tendría sólo dos mil millones de años, un valor insuficiente ya en esa época, pues por los isótopos de las rocas se sabía que la edad de la Tierra era de unos 4500 millones de años. En 1956, Allan Sandage determinó el valor en 180 km/s/Mpc. Dos años después, el propio Sandage publicó un artículo con el valor de 75 (km/s)/Mpc, muy cercano al valor actual. Sin embargo, a principios de los 70 el valor estimado de H_0 variaba desde los 50 km/s/Mpc, hasta los 100 km/s/Mpc, según el método empleado. Según estos datos, la edad estimada del Universo iba desde los diez mil millones de años hasta los veinte mil millones de años aproximadamente. Evidentemente, se trataba de una incertidumbre excesiva que era preciso corregir. Los errores en la estimación de H_0 se debían principalmente a limitaciones instrumentales, por lo que cuando se lanzó el Telescopio Espacial Hubble, una de sus prioridades fue la determinación de H_0, en el marco del denominado *Hubble Space Telescope Key Project*, aprovechando las excepcionales capacidades de este intrumento. En 2001 se publicaron los resultados de este proyecto tras varios años de estudio, arrojando un valor para H_0 de 72±8 km/s/Mpc, según el cual la edad del Universo debía ser de unos diez mil millones de años, insuficiente para dar cuenta de las estrellas más antiguas de los cúmulos globulares, con una edad de unos catorce mil millones de años. Sin embargo, al mismo tiempo, observaciones de supernovas lejanas revelaron que la Constante de Hubble no lo es tal y que su valor cambia con el tiempo debido a la acción de la energía oscura. En concreto, la expansión del Universo se está acelerando debido a la acción de la energía oscura, por lo que la edad del Universo teniendo en cuenta esta aceleración se acerca a los catorce mil millones de años, lo que está de acuerdo con la edad de las estrellas más antiguas.
En 2001 fue lanzado el satélite WMAP destinado al estudio de la radiación de fondo de microondas. Esta radiación aporta datos sobre el Universo primigenio, incluyendo el valor de H_0, por lo que al estudiarla los cosmólogos disponen de un segundo método alternativo al corrimiento al rojo de galaxias para el cálculo de H_0. En 2003 se publicaron los primeros resultados del WMAP que daban un valor de 71±4 (km/s)/Mpc para H_0. En 2006, análisis más detallados de los datos han permitido estimar H_0 en 70 (km/s)/Mpc, +2.4/-3.2, siendo ésta la medida de la Constante de de Hubble de mayor precisión obtenida hasta la fecha.
También en 2006 el telescopio espacial de rayos X Chandra calculó H_0 mediante otro método independiente, obteniendo el valor de 77 km/s/Mpc.

Expresión matemática de la Ley de Hubble

La ley puede escribirse:

$\mathbf{v} = \mathbf{H_0}\,\mathbf{D}$, siendo
v la velocidad de recesión debida a la expansión del universo (generalmente en km/s)
D la distancia actual a la galaxia (en mega parsec Mpc).
$\mathbf{H_0}$ la constante de Hubble

La ley de Hubble se puede derivar de su observación inicial suponiendo que el universo es homogéneo (las observaciones realizadas desde todos los puntos son las mismas) y se expande (o contrae).

Notas adicionales

La distancia **D** a galaxias cercanas se puede estimar comparando su brillo aparente, con su brillo absoluto teórico.

- En cualquier caso, **D** ha de ser la distancia actual a la galaxia, no la que existía cuando la galaxia emitió la luz que hoy recibimos. Esta distancia es muy difícil de determinar.

La velocidad **v** se define como el ratio de variación de la distancia **D**.

- Para galaxias relativamente cercanas, la velocidad puede determinarse mediante el corrimiento al rojo (z) empleando la fórmula $\mathbf{v} \approx \mathbf{zc}$; siendo **c** la velocidad de la luz. Sin embargo, tan sólo debe considerarse la velocidad debida a la expansión del universo, al margen de otros movimientos relativos de las galaxias (movimiento peculiar).

Los sistemas con ligaduras gravitacionales, como las galaxias o el Sistema Solar, no se encuentran sujetos a la ley de Hubble y no se expanden.

(wikipedia)

Z dice cuanto ha aumentado el radio del Universo desde el momento en que la luz partió del objeto que se está analizando. Ese aumento es igual a Z + 1.
Si observamos un cuásar con una Z de 6,4 y dicho cuásar empezó a funcionar como tal en el momento en que el Universo tenía un radio de 1.000 millones de AL, entonces
Z = 6,4 + 1 = 7,4, quiere decir que el cuásar está a 7.400 millones de AL.

$$Z = \frac{H_0\, d}{c}$$

El corrimiento al rojo se debe a que el espacio se está expandiendo entre las galaxias, las galaxias son arrastradas por un espacio que crece sin cesar.

Esto lleva a preguntarse si en algún momento todo empezó en un espacio muy pequeño (antes de la expansión). Se acepta entonces que todo comenzó con una explosión (la explosión primigenia, el gran estallido, Big Bang).
El BB no es asimilable a una explosión del tipo común. Lo único que tienen parecido es su comienzo súbito. Una explosión familiar significa que de alguna manera se crea un centro de alta presión que se expande en el espacio ya existente. En el Universo primigenio el centro de presión era igual en todos lados, la explosión 'era' el Universo entero. El espacio fue creado en ése momento, así el centro de presión no tenía bordes, límites, no se expandía en un espacio pre-existente.
En ese momento tampoco hubo un punto a partir del cual se expandiera todo, no hubo un punto a partir del cual todo se alejara. Todos los puntos comenzaron a alejarse de todos los demás puntos, no había un centro. Este alejamiento continúa en la actualidad. Todas las galaxias se alejan unas de otras. Esto hace que las observaciones muestren una relación lineal con cualquier movimiento expansivo, tanto de la distancia y la velocidad como del corrimiento hacia el rojo.

Del origen de todo sólo se puede hablar del movimiento a través de la acción de la materia (que aumente la distancia entre las galaxias significa que el espacio entre ellas se está estirando).
Tenemos entonces un Universo en expansión, donde la velocidad de dicha expansión se va acelerando (algo que se descubrió hará unos 5 años y que no esta previsto por nadie).

Obviando esa aceleración, surgen varias preguntas básicas:

1) ¿Qué había antes del BB? La pregunta carece de sentido, ya que no hubo un antes. La intuición del tiempo deriva de la conciencia de la sucesión de hechos (causalidad). En ese fluir del ahora se despierta la conciencia del antes y del después. En el BB se crearon la materia, el espacio, la energía y el tiempo. El Universo no se creó en un tiempo determinado, sino que el Universo creo el tiempo.
2) ¿Porqué se produjo la explosión primigenia? Se verá con el tema 'Universo inflacionario'.
3) ¿De dónde venimos y adónde vamos? ¿Qué va a ocurrir en el futuro? Hay 3 posibilidades:
    a) Puede ocurrir que la suma de materia y energía del Universo tengan un cierto potencial gravitatorio suficiente para frenar lentamente el movimiento expansivo, obligando luego al Universo a caer sobre sí mismo en una implosión (Big Crunch). Esto equivale a una cierta geometría euclidiana del espacio.
    b) Puede ser que la velocidad del movimiento expansivo supere la atracción gravitatoria de la materia-energía, así la expansión continuará para siempre.
    c) Puede ser que la materia-energía pueda frenar suavemente el movimiento expansivo, pero que sea insuficiente para comenzar un colapso gravitatorio. Aquí cambia el tipo de geometría del espacio, el Universo continuaría su expansión a una velocidad tendiente a 0. Sería el 'Universo Plano'.

Estas tres posibilidades responden al modelo estándar del Universo, donde el Universo comienza con una explosión (BB). Pero este modelo evolutivo plantea 4 grandes problemas.

Problemas de primer orden, ponen en peligro la creencia en el BB:

1) El problema de la formación de las galaxias (¿cómo se formaron?
2) Problema del horizonte: Si se mide la temperatura del Universo cuando empezaba apuntando un radiotelescopio a una zona del espacio y luego se gira la antena 180° y se vuelve a medir el resultado será siempre el mismo. Sin embargo, el comienzo explosivo marca una brusca expansión, por lo que las distintas regiones del espacio nunca estuvieron en contacto entre sí, entonces ¿porqué la temperatura es la misma en todas ellas?
3) Problema del aplanamiento: Hoy en día se acepta que el Universo es plano, que no puede caer en una implosión. Hay que explicar porqué, ya que aparentemente no hay ningún motivo para que lo sea, pero tampoco para que no lo sea.

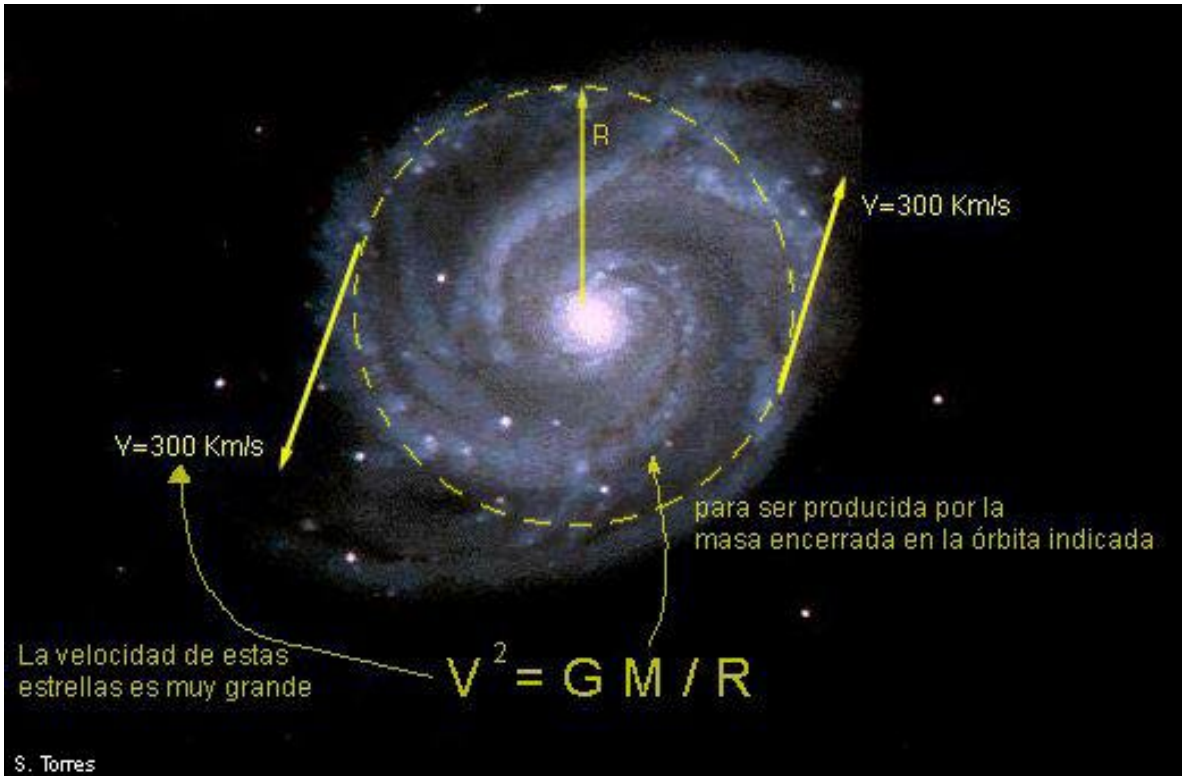
Problema de segundo orden, no pone en peligro el BB:

4) Problema de la antimateria: Hay que explicar porqué la antimateria está excluida de la constitución del Universo, a pesar que en el momento inicial había igual cantidad de materia que de antimateria.

VEINTITRÉS: MATERIA OSCURA

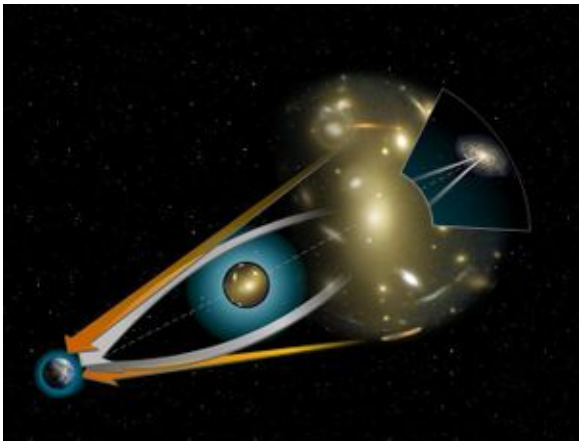
En 1933 se plantean las preguntas sobre la cantidad de masa del Universo y su naturaleza. Estudiando los cúmulos de Galaxias se vio que la velocidad de cada uno de sus integrantes superaba la necesaria para la disgregación del mismo (o sea, que el cúmulo no podría permanecer unido por gravitación). Pero si los cúmulos de Galaxias son estables entonces debía existir una cantidad de materia superior a la detectada (que era sólo la materia luminosa).
Actualmente se conocen centenares de cúmulos de Galaxias, y en todos se ve que las velocidades de las Galaxias superan a la de escape, pero los cúmulos permanecen unidos. Así, debe haber materia que no se ve. Es lo que se llama materia oscura. Se calcula que la masa de los cúmulos de Galaxias está formada en un 70/80 % por materia que no se ve, el resto (un 20 % aproximadamente) es gas, y un pequeño resto es lo que se ve. Así, se dice que la materia común y corriente contribuye a la masa total del Universo en un 15 %, la materia oscura en un 25 %, y el resto sería energía oscura.

Para determinar si la materia oscura está asociada con la materia bariónica (luminosa) se estudió la Vía Láctea y Galaxias vecinas. Para estudiar las vecinas se buscaron Galaxias que se presentaran de perfil. Midiendo la velocidad desde el centro hacia la periferia (tomando el desplazamiento doppler para medir la velocidad radial) se vio que la materia no gira alrededor del centro según las leyes de Keppler (tal como lo hacen los planetas, donde el más cercano al Sol gira más rápido y los más lejanos mas lentamente, o sea que cuanto más lejos esté un planeta menos fuerza centrífuga necesita para compensar el tirón gravitatorio del Sol). Sino que se comprobó que la velocidad de rotación se conserva a medida que la materia está más alejada del centro galáctico, y esto hasta más allá de donde termina la Galaxia (según la materia bariónica, o sea, de acuerdo a lo visible). La Galaxia completa gira como una rueda, donde un punto en la periferia gira a igual velocidad que un punto en el centro.



Esto no podría ser así si no fuera porque hay más materia de la que puede verse. Lo mismo se estudió en la Vía Láctea. Se observó que la velocidad con que gira la materia cae ligeramente hasta unos 25.000/30.000 AL del centro, y luego permanece constante.

También se observó el efecto de 'lente gravitatoria'. La materia oscura se dispone como una inmensa nube donde están insertas las galaxias. Si se interpone una masa de materia entre una estrella lejana y la Tierra, por la curvatura del espacio (gravitación) la luz se desvía, la masa de materia actúa entonces como una lente positiva. El grado de desviación es proporcional a la raíz cuadrada de la masa del objeto que actúa como lente.



Esquema de trayectorias de luz en una lente gravitatoria. Las imágenes de objetos distantes adquieren formas de arco rodeando el objeto masivo intermedio.

La luz se desvía en un grado mayor al que debería desviarse de acuerdo a lo que se calcula la masa interpuesta. Esto es otra prueba de la existencia de la materia oscura.

Otra prueba la aporta la teoría. Las galaxias se formaron a partir de inhomogeneidades de la materia primitiva. Si estas fluctuaciones de la densidad fueron pequeñas su acción gravitatoria debe haber sido pequeña también, por lo que las galaxias deberían haber tardado mucho en formarse. Sabiendo que la edad del Universo es de unos 13.800 millones de años, se puede calcular la densidad de estas inhomogeneidades en el comienzo del Universo. Y los cálculos arrojan que no hubo tiempo suficiente para la formación de las galaxias. Esto implica que en estas fluctuaciones de materia primitiva ya había más materia, materia oscura (materia no bariónica).

¿Porqué la materia oscura se dispone como una inmensa bola que rodea las galaxias? Cuando el Universo tenía 380.000 años, la materia oscura estaba mezclada con la materia común. Pero el Universo se expande y toda la materia se enfría. La materia visible se enfría y en dicho proceso emite energía, y se comprime. Pero la materia oscura no emite radiación electro-magnética, entonces sólo se contrae hasta que ya no puede hacerlo por la presión interna. Así, la materia luminosa continúa comprimiéndose, y lo hace más rápido, por lo que queda envuelta por la materia oscura.

GEOMETRÍA DEL UNIVERSO:

El Universo es una estructura espacial y, como tal, debe responder a un tipo de geometría determinada. Esta geometría está relacionada con la Teoría General de la Relatividad. Nikolai Lobachevski, János Bolyai y Bernhard Riemann demostraron, de manera independiente, que el quinto postulado de Euclides no se puede derivar a partir de axiomas anteriores.

Lobachevski y Bolyai crearon entonces la geometría hiperbólica que conserva los postulados de Euclides (y sus teoremas derivados) menos el quinto (‘por cualquier punto del plano se puede trazar una paralela a una recta dada’ se cambió por ‘por un punto exterior del plano se pueden trazar infinitas paralelas en una superficie con curvatura negativa’ –como la de una silla de montar). Las diferencias mas apreciables con la geometría euclidiana son:

1) Por un punto exterior a una recta se pueden trazar infinitas paralelas.
2) Los ángulos internos de un triángulo miden menos de 180°
3) La longitud de una circunferencia y el área del círculo aumentan más rapidamente que en la geometría euclidiana con el aumento del radio.

Riemann, 7 años después, creó una geometría diferente, la geometría elíptica, que se da en una superficie de curvatura positiva (la superficie de una esfera), donde postulaba que:

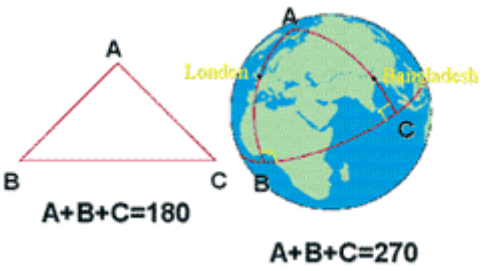
1) Por un punto del plano no se puede trazar ninguna paralela a una recta dada
2) Los ángulos internos de un triángulo miden más de 180°
3) La longitud de la circunferencia y el área del círculo aumentan más lentamente que en la geometría euclidiana con el aumento del radio.

Y ahora, cual intermedio musical, leamos una entretenida conferencia:

Stephen Hawking

El Espacio y el Tiempo se Curvan

Artículo original en inglés
Traductores : *Miguel Artime, Heber Rizzo, Sergio Alonso*



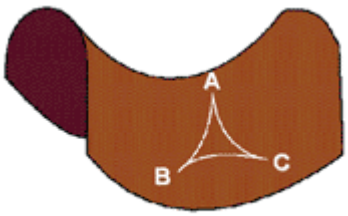
La propiedad intelectual de esta charla recae sobre el profesor S.W.Hawking. Queda prohibida la reproducción, edición o distribución de este documento, en forma alguna, con fines lucrativos.

En ciencia ficción, la curvatura del espacio y del tiempo son eventos comunes. Se les utiliza para viajes rápidos alrededor de la galaxia, o para viajes en el tiempo. Pero a menudo, la ciencia ficción de hoy es la ciencia empírica del mañana. De modo que ¿cuáles son las posibilidades de curvar el espacio y el tiempo?.

La idea de que el espacio y el tiempo pueden sufrir torsiones o curvarse, es bastante reciente. Durante más de dos mil años, los axiomas de la geometría Euclídea fueron considerados verdades evidentes. Como todos aquellos que se han visto forzados a estudiar geometría Euclídea en el colegio recuerdan, una de las consecuencias de estos axiomas es, que los ángulos de un triángulo, sumados en conjunto, dan como resultado 180 grados.

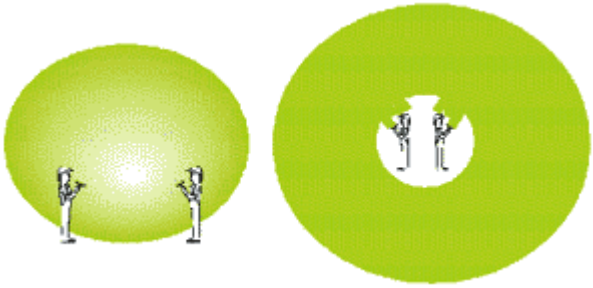
Sin embargo, durante el último siglo, la gente comenzó a darse cuenta de que existían otras formas posibles de geometría, en la que los ángulos de un triángulo, no necesariamente suman 180 grados. Considere, por ejemplo, la superficie de la Tierra. Lo más cercano a una línea recta en la superficie de la Tierra es lo que llamamos, un gran círculo. Estos son los caminos más cortos entre dos puntos,

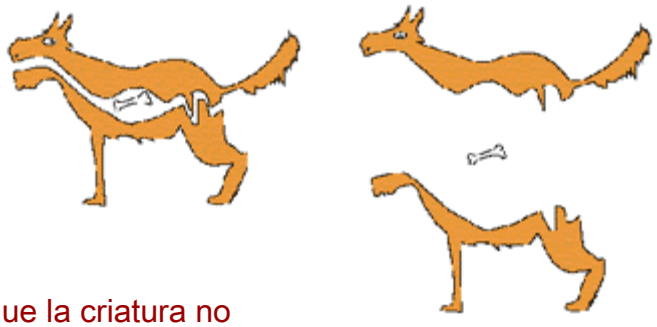
por eso las compañías aéreas los emplean como rutas de vuelo. Considere ahora el triángulo en la superficie de la Tierra compuesto por el ecuador, la línea de 0 grados de longitud que atraviesa Londres, y la linea de 90 grados longitud este que atraviesa Bangladesh. Las dos líneas de longitud cortan el ecuador formando un ángulo de 90 grados. Las dos líneas de longitud se encuentran también en el polo norte formando otro ángulo de 90 grados. Por ello, tenemos un triángulo con tres ángulos rectos. Los ángulos de este triángulo sumados en conjunto dan como resultado 270 grados. Esto supera a los 180 grados de un triángulo sobre una superficie plana. Si dibujamos un triángulo con una superficie en forma de silla de montar, descubriremos que la suma de sus ángulos da un resultado menor a 180 grados. La superficie de la Tierra, es lo que conocemos como espacio bidimensional. Lo cual significa que puedes moverte a través de la superficie de la Tierra en dos direcciones, las cuales forman un ángulo recto entre si: puedes moverte norte-sur, o este-oeste. Pero por supuesto, hay una tercera dirección que forma ángulos rectos con las otras dos, y esa dirección es arriba-abajo. Lo que es tanto como decir que la superficie de la Tierra existe en un espacio tridimensional. El espacio tridimensional es plano. Lo cual significa que obedece a la geometría Euclídea. La suma de los ángulos de un triángulo es de 180 grados. Sin embargo, podríamos imaginar una raza de criaturas bidimensionales que pudiesen moverse sobre la superficie de la Tierra, pero que no pudiesen experimentar la tercera dirección, es decir arriba-abajo. Ellos no conocerían el espacio plano tridimensional sobre el que se apoya la superficie de la Tierra. Para ellos, el espacio sería curvo, y la geometría no sería Euclídea.



A+B+C<180

Sería muy difícil diseñar un ser viviente que pudiese existir en solo dos dimensiones.





La comida que la criatura no podría digerir, debería escupirla por el mismo sitio por el que entró. Si hubiese un pasaje que atravesase al animal a lo largo, tal y como nosotros tenemos, el pobre animal acabaría deshecho en dos partes.

De modo que tres dimensiones, parecen ser las mínimas exigibles para la vida. Pero así como se puede pensar en seres de dos dimensiones viviendo sobre la superficie de la Tierra, también cabria imaginar que el espacio tridimensional en el que vivimos, era la superficie de una esfera, en otra dimensión que nosotros no vemos. Si la esfera fuese muy grande, el espacio parecería ser casi plano, y la geometría Euclídea sería una estupenda aproximación sobre distancias pequeñas. Pero nos daríamos cuenta de que la geometría Euclídea no funcionaría para grandes distancias. Como ilustración de esto, imaginemos un equipo de pintores, dando capas de pintura sobre la superficie de una enorme bola. A medida que el grosor de las capas de pintura se incrementa, el área de la superficie crece. Si la bola estuviese en un espacio plano tridimensional, se podría seguir añadiendo pintura indefinidamente, y la bola se haría más y más grande. Sin embargo, se el espacio tridimensional fuera realmente la superficie de una esfera en otra dimensión, su volumen sería enorme pero finito. A medida que se añaden más capas de pintura, la bola llegaría eventualmente a llenar la mitad de la superficie del espacio. Después de eso, los pintores descubrirían que están atrapados en un región cuyo tamaño siempre decrece, y casi la totalidad del espacio, estaría ocupado por la bola, y sus capas de pintura. De modo que descubrirían que viven en un espacio curvado, y no plano.

Este ejemplo demuestra que no se puede deducir la geometría del mundo partiendo de sus primeros principios, tal y como los antiguos griegos pensaban. En lugar de eso, hay que medir el espacio en el que vivimos, y descubrir su geometría experimentalmente. Sin embargo, aunque en 1854 el alemán George Friedrich

Riemann, desarrolló un modo para describir espacios curvos, permaneció como una parte incompleta de las matemáticas durante 60 años. Podía describir espacios curvos que existiesen en el abstracto, pero no había razones por las que creer que el espacio físico en el que vivimos pudiese ser curvo. Esa idea llegó solo en 1915, cuando Einstein presentó la Teoría General de la Relatividad.

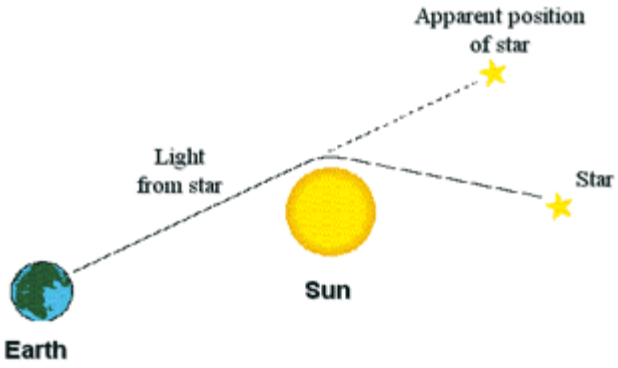
La Relatividad General fue una revolución intelectual fundamental que ha transformado la forma en que pensamos sobre el universo. Es una teoría no solo sobre la curvatura del espacio, sino también sobre la curvatura del tiempo. En 1905, Einstein había comprendido que el espacio y el tiempo están íntimamente conectados el uno con el otro. Se puede describir la localización de un evento con cuatro números. Tres de ellos describen la posición del mismo. Podrían ser, por ejemplo, millas al norte y al este de Oxford, y altura sobre el nivel del mar. En una escala mayor, podrían representar la latitud y la longitud galácticas, y la distancia desde el centro de la galaxia. El cuarto número, es el tiempo del evento. Así, uno puede pensar sobre el espacio y el tiempo en forma conjunta, como una entidad tetradimensional llamada espacio-tiempo. Cada punto del espacio tiempo está determinado por cuatro números que especifican su posición en el espacio y en el tiempo. Combinar de esta forma el espacio y el tiempo resultaría bastante trivial, si uno pudiera descombinarlos de una manera única, es decir, si hubiera una única forma de definir el tiempo y la posición de cada evento. Sin embargo, en un importantísimo artículo escrito en 1905, cuando era un empleado de la Oficina Suiza de Patentes, Einstein demostró que el tiempo y la posición en los cuales uno piensa que ocurrió un evento, dependían de cómo uno se estaba moviendo. Esto significaba que el espacio y el tiempo estaban indisolublemente ligados el uno con el otro. Los tiempos que diferentes observadores le asignarían a los eventos estarían de acuerdo si los observadores no se estaban moviendo en relación de unos con los otros. Pero diferirían en forma creciente de acuerdo a cuanto mayor fueran sus velocidades relativas. Así que uno puede preguntarse cuán rápido debe moverse para que el tiempo de un observador pudiera marchar hacia atrás con

relación al tiempo de otro observador. La respuesta se da en la siguiente jocosa quintilla:

Había una jovencita en Granada
Que más rápido que la luz viajaba,
Un día inició su partida
De una forma relativa
Y regresó en la previa alborada.

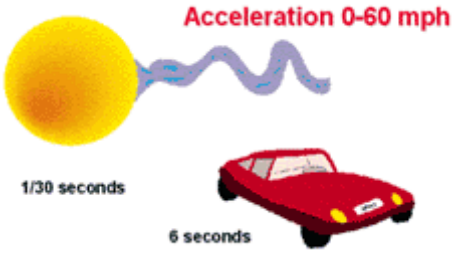
Así que todo lo que necesitamos para viajar en el tiempo es una astronave que vaya más rápido que la luz. Desafortunadamente, en el mismo artículo Einstein demostró que la energía necesaria para acelerar a una astronave crecía cada vez más y más, a medida que se acercaba a la velocidad de la luz. Así que se necesitaría una cantidad infinita de energía para acelerar más allá de la velocidad de la luz.

El artículo de Einstein de 1905 parecía eliminar la posibilidad de viajar hacia el pasado. También indicaba que el viaje espacial hacia otras estrellas sería un asunto lento y tedioso. Si uno no podía viajar más rápido que la luz, el viaje de ida y vuelta hasta la estrella más cercana tomaría por lo menos ocho años, y hasta el centro de la galaxia un mínimo de ochenta mil años. Si la nave viajara muy cerca de la velocidad de la luz, podría parecerle a la tripulación abordo de la misma que el viaje al centro galáctico hubiera durado solamente unos pocos años. Pero eso no sería de mucho consuelo, si cuando volvieran a casa todos los que hubieran conocido hubieran estado muertos y olvidados hace miles de años. Eso no era muy bueno para los “westerns” espaciales, así que los escritores de ciencia-ficción tuvieron que buscar en otros lados para soslayar esta dificultad.



En un artículo de 1915, Einstein mostró que los efectos de la gravedad podrían ser descritos, suponiendo que el espacio-tiempo era curvado o distorsionado por la materia y la energía que contenía. Podemos observar realmente esta curvatura producida por la masa del Sol, en la ligera curvatura sufrida por la luz o las ondas de radio que pasan cerca del Sol. Esto ocasiona que la posición aparente de la estrella o de la fuente de radio-ondas se traslade ligeramente, cuando el Sol se encuentra entre la Tierra y el objeto observado. El cambio de posición es muy pequeño, de alrededor de una milésima de grado, equivalente a un desplazamiento de una pulgada a la distancia de una milla. No obstante, puede ser medido con mucha precisión, y concuerda con las predicciones de la Relatividad General. Tenemos evidencia experimental de que el espacio y el tiempo están curvados. La combadura en nuestro vecindario espacial es muy pequeña, porque todos los campos gravitacionales en el sistema solar son débiles. Sin embargo, sabemos que pueden ocurrir campos muy fuertes, por ejemplo durante el Big Bang, o en los agujeros negros. Así, el espacio y el tiempo pueden ser lo suficientemente curvados como para satisfacer las demandas de la ciencia-ficción, en cosas tales como impulsos hiper-espaciales, agujeros de gusano, o viajes en el tiempo. A primera vista, todo esto parece ser posible. Por ejemplo, en 1948, Kurt Goedel halló una solución a las ecuaciones de campo de la Relatividad General que representa un universo en el que toda la materia está rotando. En este universo, sería posible partir hacia el espacio en una astronave y regresar antes del despegue. Goedel estaba en el Instituto de Estudios Avanzados en Princeton, donde Einstein pasó también sus últimos años. Era más conocido por probar que no se podía probar nada como verdadero, aún en un asunto aparentemente tan simple como la aritmética. Pero lo que probó acerca de que la Relatividad General permitía el viaje en el tiempo realmente conmovió a Einstein, quien había pensado que eso era imposible.

Ahora sabemos que la solución de Goedel no puede representar al universo en el cual vivimos, ya que el suyo no está en expansión. También contiene un valor

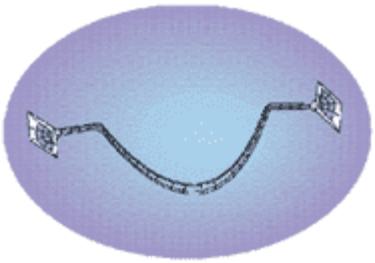


bastante alto para una cantidad llamada constante cosmológica, el cual generalmente se cree que es de cero. Sin embargo, desde entonces se han encontrado otras aparentemente más razonables soluciones que permiten el viaje en el tiempo. Una que es particularmente interesante contiene dos cuerdas cósmicas, moviéndose una con respecto a la otra a una velocidad muy cercana, aunque ligeramente más pequeña, a la de la luz. Las cuerdas cósmicas son una destacada idea de la física teórica, a la cual los escritores de ciencia-ficción aparentemente no han comprendido. Como lo sugiere su nombre, son como cuerdas, en el sentido de que tienen longitud, pero una muy pequeña sección transversal. En realidad, son más como bandas elásticas, porque se encuentran bajo una enorme tensión, algo así como cien mil cuatrillones de toneladas. Una cuerda cósmica unida al sol lo aceleraría de cero a sesenta en un trigésimo de segundo.

La teoría de las cuerdas cósmicas puede sonar como algo descabellado, pura ciencia-ficción. Pero existen buenas razones científicas como para creer que se pueden haber formado en el universo muy temprano, muy poco después del Big Bang. Ya que se encuentran bajo tan enorme tensión, uno podría suponer que acelerarían hasta casi la velocidad de la luz. Lo que el universo de Goedel y el raudo espacio-tiempo de las cuerdas cósmicas tienen en común, es que ambos comienzan tan distorsionados y curvados que el viaje hacia el pasado fue siempre posible. Dios puede haber creado un universo tan combado, pero no tenemos ninguna razón para pensar que lo haya hecho. Toda la evidencia apunta a que el universo comenzó con un Big Bang, sin el tipo de curvatura necesario para permitir el viaje hacia el pasado. Ya que no podemos cambiar la forma en que comenzó el universo, la cuestión de si el viaje en el tiempo es posible, es la de si podemos hacer que el espacio-tiempo se curve tanto como para que podamos viajar al pasado. Creo que esto es un importante tema de investigación, pero uno tiene que tener cuidado de no ser etiquetado como excéntrico. Si uno solicitara una subvención para investigar sobre el viaje en el tiempo, sería descartado inmediatamente. Ninguna agencia gubernamental podría permitirse ser vista dilapidando el dinero público en algo tan descabellado como el viaje en el tiempo.

Curvature produced by normal matter

Curvature needed for time travel



En cambio, uno debería utilizar términos técnicos, como curvas cerradas tempo-similares, que son un código para el viaje en el tiempo. Aunque esta conferencia trata parcialmente sobre el viaje temporal, sentí que debía darle un título científicamente más respetable, como el de “El Espacio y el Tiempo se curvan”. Aún así, es una cuestión muy seria. Ya que la Relatividad General permite el viaje temporal, ¿lo permite en nuestro universo?. Y en caso de que no, ¿por qué no?.

Cercanamente emparentada con el viaje en el tiempo, se encuentra la habilidad de moverse rápidamente de una posición en el espacio hacia otra. Como dije antes, Einstein demostró que sería necesaria una cantidad infinita de energía para acelerar una astronave más allá de la velocidad de la luz. Así que la única manera de llegar desde un extremo de la galaxia al otro en un tiempo razonable, parecería ser la de que pudiéramos curvar tanto al espacio-tiempo que pudiéramos crear un pequeño tubo o agujero de gusano. Esto podría conectar los dos lados de la galaxia, y actuar como un atajo, para llegar del uno al otro y volver mientras los amigos de uno todavía están vivos. Tales agujeros de gusano han sido seriamente sugeridos como para estar dentro de las posibilidades de una civilización futura. Pero si uno puede viajar de un extremo al otro de la galaxia en una o dos semanas, también podría volver a través de otro agujero y arribar antes de haber partido. Incluso se podría viajar hacia atrás en el tiempo a través de un solo agujero de gusano, si los dos extremos del mismo estuvieran en movimiento relativo uno con respecto al otro.

Se puede demostrar que para crear un agujero de gusano, es necesario curvar el espacio-tiempo en la forma opuesta a la que lo hace la materia normal. La materia ordinaria curva el espacio-tiempo alrededor de sí mismo, tal como la superficie de la Tierra.

Sin embargo, para crear un agujero de gusano es necesario curvar el espacio-tiempo en la dirección opuesta, como la superficie de una silla de montar. Lo mismo es verdad sobre cualquier otra forma de curvar el espacio-tiempo que pueda hacer posible el viaje en el tiempo, si el universo no comenzó tan curvado

como para permitirlo. Lo que uno requeriría sería materia con masa negativa, y una densidad de energía negativa, para lograr la curvatura espacio-temporal necesaria.

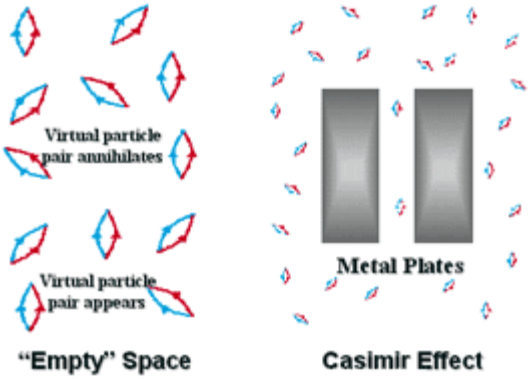
La energía es como el dinero. Si se tiene un balance bancario positivo, uno puede distribuirlo de varias maneras. Pero de acuerdo con las leyes clásicas en las que se creía hasta hace muy poco tiempo, no estaba permitido tener un descubierto energético. Así, estas leyes clásicas descartaban la posibilidad de curvar el espacio-tiempo en la forma requerida para permitir el viaje en el tiempo. Sin embargo, estas leyes clásicas fueron desplazadas por la Teoría Cuántica, que es la otra gran revolución en nuestra imagen del universo, además de la Relatividad General. La Teoría Cuántica es más relajada, y permite los números rojos en una o dos cuentas. ¡Si tan sólo los bancos fueran tan complacientes!. En otras palabras, la Teoría Cuántica permite que la densidad energética sea negativa en algunos lugares, siempre y cuando sea positiva en otros

La razón por la cual la Teoría Cuántica permite que la densidad energética sea negativa, es que está basada en el Principio de Incertidumbre.

Uncertainty Principle

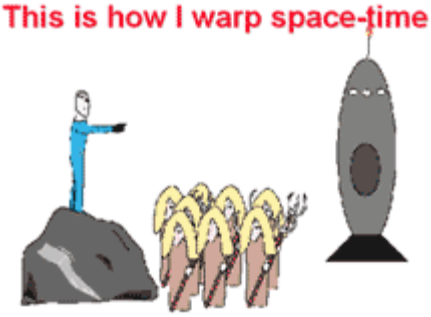
The more precisely the position of something is defined, the less precisely its speed can be defined, and vice versa.

Esto quiere decir que ciertas cantidades, como la posición y la velocidad de una partícula, no pueden tener un valor bien definido. Cuanto más precisamente sea definida la posición de una partícula, más grande es la incertidumbre en la velocidad y viceversa. El principio de incertidumbre también se aplica a los campos, como por ejemplo el campo electromagnético o el campo gravitacional. Esto implica que estos campos no pueden anularse exactamente, incluso en lo que pensamos que es espacio vacío. Si fuera exactamente nulo, ambos valores tendrían una posición bien definida en cero, y una velocidad también bien definida, que sería también cero. Esto sería una violación del principio de incertidumbre. Sin



embargo, los campos deberían tener una cantidad mínima de fluctuaciones. Uno podría interpretar estas fluctuaciones, que son llamadas fluctuaciones en el vacío, como parejas de partículas y antipartículas que repentinamente aparecen juntas, se separan y posteriormente vuelven a juntarse y aniquilarse mutuamente. Estas parejas de partículas y antipartículas se dice que son virtuales, porque no pueden ser medidas directamente con un detector de partículas. De cualquier modo, se pueden observar sus efectos indirectamente. Una manera de realizarlo es utilizando el llamado efecto Casimir. Se tienen dos discos de metal, separados por una pequeña distancia. Los discos actúan como espejos para las partículas y antipartículas virtuales. Esto quiere decir que las regiones entre los discos es algo así como el tubo de un órgano, y solo admitiría ondas de luz de ciertas frecuencias resonantes. El resultado es que hay ligeramente menos fluctuaciones en el vacío o partículas virtuales entre los discos que fuera de ellos, donde las fluctuaciones en el vacío pueden tener cualquier longitud de onda. La reducción del número de partículas virtuales entre los discos implica que no colisionarán con ellos tan a menudo, y por lo tanto no ofrecerán tanta presión en los discos como las partículas virtuales de fuera. Consecuentemente hay una pequeña fuerza empujando los discos el uno contra el otro. Esta fuerza ha sido medida experimentalmente. Así, las partículas virtuales de hecho existen, y producen efectos reales.

Ya que hay menos partículas virtuales, o fluctuaciones en el vacío, entre los discos, estos tienen una densidad energética menor que en la región externa. Pero la densidad energética del espacio vacío lejos de los discos debe ser cero. De otra manera curvaría el espacio-tiempo y el universo no sería casi plano. Por tanto la densidad energética de la región entre los discos debe ser negativa. También se tiene evidencia de la curvatura de la luz, de que el espacio-tiempo es curvo y la confirmación por parte del efecto Casimiro, de que se puede curvar en sentido negativo. Entonces parece posible, tal como se avanza en la ciencia y tecnología, que quizás sea posible construir un agujero de gusano, o curvar el



espacio y el tiempo de alguna otra manera, tal que se nos permita viajar a nuestro pasado. Si este fuera el caso, provocaría una multitud de preguntas y problemas. Una de ellas es el motivo por el cual, si en algún momento futuro aprendemos a viajar en el tiempo, no ha vuelto ya alguien del futuro para decirnos como se hace.

Incluso si hubiera razones lógicas para mantenernos en la ignorancia, siendo como es la naturaleza humana, es difícil de creer que nadie se asomaría, y nos diría a nosotros ignorantes paisanos, el secreto del viaje en el tiempo. Por supuesto, alguna gente puede afirmar que ya hemos sido visitados desde el futuro. Podrían decir que los platillos volantes vienen del futuro, y que los gobiernos están involucrados en una gigantesca trama para encubrirlos, y guardarse para ellos mismos todo el conocimiento científico que traen esos visitantes. Todo lo que puedo decir es que si los gobiernos estuvieran escondiendo algo, están haciendo un trabajo un poco tonto extrayendo información útil de los alienígenas. Soy un poco escéptico con las teorías conspiratorias, creer la teoría de que lo han arruinado todo es más probable. Los informes de avistamientos de platillos volantes no pueden haber sido todos causados por extraterrestres, porque son mutuamente contradictorios. Pero una

vez que admites que algunos son errores, o alucinaciones, ¿no es más probable que lo sean todos o que se nos esté visitando por gente del futuro o del otro lado de la galaxia?. Si realmente quieren colonizar la Tierra, o avisarnos de algún peligro están siendo un poco ineficaces. Una vía posible para reconciliar el viaje en el tiempo con el hecho de que no parece que hayamos tenido ninguna visita del futuro, podría ser que dijéramos que solo puede ocurrir en el futuro. Bajo este punto de vista se podría decir que el espacio-tiempo en nuestro pasado era fijo, porque lo hemos observado, y parece que no está lo suficientemente curvado como para permitir el viaje al pasado. Pero ya que si sólo se podrá curvar el espacio-tiempo en el futuro, no seremos capaces de viajar atrás al tiempo presente o un tiempo anterior.

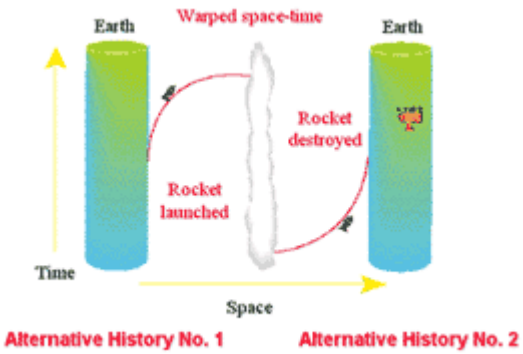
Esto explicaría por qué no hemos sido invadidos por turistas del futuro.

Aún así esto dejaría un montón de paradojas. Supongamos que te fuera posible despegar en un cohete espacial y volver antes del despegue. ¿Que te impediría reventar el cohete en su plataforma de lanzamiento, o por otro lado prevenir que partas la primera vez?. Hay otras versiones de esta paradoja, por ejemplo ir al pasado, y matar a tus padres antes de que nacieras, pero son esencialmente equivalentes. Parece haber dos resoluciones posibles.

Two Possible Solutions

1. **Consistent Histories**
   One has to find a consistent solution of the equations, even if space-time is so warped that travel into the past is possible.
2. **Alternative Histories**
   When an object comes back from the future, it enters a different, alternative history.

Una es la que debo llamar la aproximación de las historias consistentes. Dice que uno debe encontrar una solución consistente en las ecuaciones de la física, incluso si el espacio-tiempo esta tan curvado como para hacer posible el viaje al pasado. Según esta perspectiva, no podrías hacer que el cohete hubiera viajado al pasado a menos de que ya hubieras venido y hubieras fallado al reventar la plataforma de despegue. Eso es un escenario consistente, pero implicaría que estamos completamente determinados: no podríamos cambiar nuestra opinión.



Demasiado para el libre albedrío. La otra posibilidad es lo que llamo la aproximación de las historias alternativas. Ha sido defendida por el físico David Deutsch, y parece que era lo que tenía en mente Stephen Spielberg cuando rodó Regreso al Futuro (Back to the Future).

Según este punto de vista, en una historia alternativa, no habría ninguna vuelta del futuro antes de que el cohete despegara, y por lo tanto no habría posibilidad de reventarlo. Pero cuando el viajero vuelve del futuro, entra en una historia alternativa distinta. En este caso, la raza humana hace un tremendo esfuerzo para construir una nave espacial, pero justo cuando va a ser lanzada, una nave similar aparece desde otro punto de la galaxia y la destruye.

David Deutsch apoya la aproximación de historias alternativas desde el concepto de "suma de historias" introducido por el físico Richard Feinman, que murió hace unos pocos años. La idea es que según la Teoría Cuántica, el universo no tiene una única historia.

En vez de eso, el universo tiene cada una de las historias posibles, cada una con su propia probabilidad. Debe haber una posible historia en la que exista una paz duradera en el Medio Oriente, aunque quizás la probabilidad sea baja. En algunas historias, el espacio-tiempo estará tan curvado que objetos como los cohetes serán capaces de viajar a su pasado. Pero cada historia es completa y auto contenida, describiendo no solo el espacio-tiempo curvado, sino también los objetos en ella. Por lo tanto un cohete no puede transferirse a otra historia alternativa cuando vuelve de nuevo. Es todavía la misma historia, que tiene que ser auto consistente. Por lo tanto, a pesar de lo que afirma Deutsch, creo que la idea de la "suma de historias" apoya la hipótesis de las historias consistentes, más que la idea de historias alternativas.

Parece por consiguiente, que estamos encerrados en el escenario de las historias consistentes. De cualquier manera, esta necesidad no implica que existan problemas con el determinismo o libre albedrío si las posibilidades de que el espacio-tiempo esté tan curvado que el viaje en el tiempo sea posible sobre una región macroscópica son muy pequeñas. Esto es lo que llamo la Conjetura de la Protección Cronológica: las leyes de la física conspiran para prevenir el viaje en el tiempo a una escala macroscópica.

Parece que lo que ocurre es que cuando el espacio-tiempo se curva casi lo suficiente para permitir el viaje al pasado, las partículas virtuales, y su energía, se incrementan mucho. Esto quiere decir que la probabilidad de esas historias es muy baja. Por lo tanto parece haber una Agencia de Protección Cronológica trabajando, haciendo el mundo seguro para los historiadores. Pero este tema de la curvatura del espacio y el tiempo está aún en su infancia. Según la teoría de cuerdas, que es nuestra mayor esperanza para unificar la Relatividad General y la Teoría Cuántica en la Teoría del Todo, el espacio-tiempo debería tener diez dimensiones, no solo las cuatro que experimentamos. La idea es que seis de esas

diez dimensiones están enrolladas en un espacio tan pequeño que no nos damos cuenta de ellas. Por otro lado las cuatro que quedan son bastante planas, y son lo que llamamos espacio-tiempo. Si este escenario es correcto, quizás sería posible mezclar las cuatro direcciones planas con las otras direcciones que están altamente curvadas. A que podría conducir esto, no lo sabemos aún. Pero abre un abanico de posibilidades interesantes.

La conclusión de este discurso es que el viaje rápido en el espacio, o el viaje atrás en el tiempo no tiene reglas, según nuestra compresión actual. Ambos causarían muchos problemas lógicos, por lo que esperemos que existe una Ley de Protección Cronológica que impida a la gente ir atrás y que maten a nuestros padres. Pero los fans de la ciencia ficción no pierden su entusiasmo. Hay esperanza en la teoría de cuerdas.

Y como no hemos roto aún la barrera del viaje en el tiempo, me he quedado sin tiempo. Muchas gracias por su atención.

Entonces, si la masa del Universo (calculada a partir de la cantidad de materia y energía) es lo suficientemente grande como para frenar el movimiento expansivo del mismo, el movimiento cesará y revertirá en un proceso colapsante. Estaríamos en un Universo elíptico, cerrado, esférico, finito pero ilimitado. Este es el modelo que utilizó Einstein cuando analizó la acción de la materia sobre la curvatura del espacio-tiempo. Este Universo responde a la geometría de Riemann.

Pero si la cantidad de masa del Universo es insuficiente para frenar la expansión estaríamos en un Universo hiperbólico, abierto, infinito y en expansión para siempre. Respondería a la geometría de Lobachevski y Bolyai.

Y si la masa del Universo es suficiente para frenar la expansión pero insuficiente para comenzar un colapso, estaríamos en un Universo plano, infinito y en expansión que se va frenando con una velocidad tendiente a cero en el infinito. Responde a la geometría de Euclides.

NATURALEZA DE LA MATERIA OSCURA:

Los astrónomos proponen ciertas soluciones, y los físicos y los cosmólogos otras.

Los astrónomos dicen que esta materia está formada por materia común y corriente de muy difícil detección. Sería la suma de las Enanas Blancas, Marrones y Negras, Estrellas de Neutrones, planetas, Agujeros Negros y otros cuerpos menores.

Objetos de masa enorme, como agujeros negros del tamaño de galaxias, pueden ser descartados en función de los datos observados. Se contempla la posibilidad de que sean objetos de materia bariónica que incluiría enanas marrones o, quizás, pequeños y densos pedazos formados por elementos pesados; tales objetos son conocidos como "MACHOs", del inglés "*massive compact halo objects*", o, en castellano OHCM (Objetos del Halo(Galáctico) Compactos y Masivos). Wikipedia

Se inició entonces un programa de monitoreo de millones de estrellas para ver si hay objetos masivos que actúen como lentes gravitatorias. En 10 años se monitorearon 30 millones de estrellas (sobre todo observando la Nube Mayor de Magallanes), midiendo la variación de su brillo. Se calculó que si toda la masa de la materia oscura de la Vía Láctea estuviera formada por estos objetos masivos deberían verse unos 100 sucesos (de variación de brillo), pero después de los 10 años sólo se observaron 20, de los cuales se piensa que la mayoría respondería a objetos masivos de la propia Nube Mayor de Magallanes. Se siguió con la observación por 2 años más sin que los resultados avalaran las premisas teóricas. Se concluyó entonces que los objetos masivos no pueden explicar el total de la masa de la Galaxia (Físicos-Cosmólogos 1, Astrónomos 0).

Los físicos y cosmólogos opinan que la masa de materia oscura está formada por partículas masivas que no emiten radiación electro-magnética. Se proponen dos clases de partículas: las conocidas y las hipotéticas.

'conocidas', materia caliente:

1) nubes de bariones (protones y neutrones), tan frías que no se pueden detectar. Contra esto se argumenta que se conoce bastante bien el número de protones que hay en el Universo y que la suma de sus masas no da para compensar la materia oscura que debería haber en el Universo.
2) Otro candidato fue el neutrino, todos los procesos de alta energía producen gran cantidad de neutrinos, por lo que el BB debe haber producido muchísimos. Y se siguen produciendo en el interior de las estrellas y en los procesos que llevan a los estallidos de las Novas y las Supernovas, etc. Los neutrinos son casi tan abundantes como los fotones, en el Universo hay 400 fotones por cm^3 y 100 neutrinos de cada variedad (hay 3 variedades asociadas a cada una de las familias leptónicas: neutrino electrónico, neutrino muónico y neutrino tauónico). Este es el mejor candidato desde el punto de vista teórico. Si el neutrino tiene masa no puede desplazarse a la velocidad de la luz, pero en el BB no pueden haber sido capturados por la materia (gravedad). Para que esto sucediera el Universo ha debido enfriarse (rebajándose así la energía de los neutrinos). Desgraciadamente (para los teóricos) los 13.800 millones de años del Universo no pueden haber alcanzado para que los neutrinos se hallan enfriado lo suficiente como para que la suma de sus masas de el valor de la materia oscura.

‘hipotéticas’, materia fría:

1) todas las partículas no elementales están formadas por cuarks (los cuarks son los bloques de construcción de los protones y neutrones, y los gluones llevan la fuerza intensa que los mantiene unidos, los protones y neutrones son formados por 3 cuarks). Se supone que cuando el Universo tenía una edad de fracciones de microsegundos se materializaron partículas formadas por cuarks con una masa mucho mayor que la que tienen las actuales o partículas formadas por más de 3 cuarks. Estas partículas no emitirían energía electro-magnética, por lo cual son candidatos a formar la materia oscura. Ninguna de estas partículas ha sido encontrada hasta ahora, ya que aún no pueden reproducirse las condiciones cercanas a las existentes en el BB. Dos de estas partículas serían:
    a) Axión: Desde la teoría su existencia deriva de una relación entre los cuarks y los términos C y P de la simetría CPT (C: conjugación de carga, P: paridad, T: tiempo). El axión tendría una masa 1000 veces mayor que el protón.
    b) Partículas de Supersimetría: Los físicos dicen que hay una forma especial de simetría, la Supersimetría. Desde la hora 0 del BB hasta 10^{-43} de segundo después se produjeron una serie de partículas correspondientes a cada una de las partículas conocidas actualmente, formando partículas hipersimétricas. Así, cada partícula tendría una antipartícula con mas masa. Estas partículas tendrían una masa enorme, 1.000 ó 100.000 veces mayores que la de un protón.

Con todo, aún se ignora qué es la materia oscura.

Simetría

De Wikipedia, la enciclopedia libre

Denominamos **simetría** a la propiedad de determinados cuerpos, funciones matemáticas y otros elementos en donde aplicando una regla de transformación efectiva sobre dichos elementos, no parece observarse cambio alguno.

La **simetría geométrica** de un objeto es la propiedad que éste presenta cuando las características (forma, tamaño y posición relativa de sus partes) son las mismas en ambos lados de una línea divisora equidistante imaginaria llamada eje de simetría.

Simetría CPT

De Wikipedia, la enciclopedia libre

La **simetría CPT** es una simetría fundamental de las leyes físicas bajo transformaciones que involucran las inversiones de la carga, paridad y tiempo simultáneamente. Las investigaciones a fin de los años 50 revelaron la violación de la simetría P por algunos fenómenos que implican campos de la fuerza nuclear débil, y hay violaciones bien conocidas de la simetría C y T también. Por un tiempo corto, la simetría CP se creyó preservada por todos los fenómenos físicos, pero se encontró, más adelante, que también era violada. Hay un teorema que deriva la preservación de la simetría CPT para todos los fenómenos físicos si se asume la corrección de las leyes de la mecánica cuántica. Esta simetría se reconoce como una propiedad fundamental de las leyes físicas.

Violación CP

De Wikipedia, la enciclopedia libre

En física, y más en concreto en física de partículas, la **violación CP** es una violación de la **simetría CP**, que juega un papel importante en cosmología. Esta violación intenta explicar por qué existe más materia que antimateria en el Universo. La **violación CP** fue descubierta en 1964 por James Cronin y Val Fitch, quienes recibieron el Premio Nobel por este descubrimiento en 1980. [editar]

La Simetría CP

La simetría **CP** se basa en la unificación de la **simetría C** y **la simetría P**. La primera afirma que las leyes de la física serían las mismas si se pudiesen intercambiar las partículas con carga positiva con las de carga negativa. La **simetría P** dice que las leyes de la física permanecerían inalteradas bajo inversiones especulares, es decir, el universo se comportaría igual que su imagen en un espejo. La **simetría CP** es una suma de ambas.

La interacción fuerte y el electromagnetismo cumplen la simetría CP, pero no así la interacción débil, lo cual se manifiesta en ciertas desintegraciones radiactivas.

Cuando hablamos de una simetría estamos pensando en que cambiamos "algo" por "otro algo" y no observamos cambios. Por ejemplo una esfera tiene simetría de rotación, pueto que si la miramos de cualquier lado, no vemos cambios. Si rotamos un cilindro en torno a su eje, no vemos cambios, así que posee simetría de rotación en torno ese eje, pero no respecto de los otros.

La simetría C es la simetría que resulta de invertir la carga eléctrica y los números cuánticos, lo que viene a ser que cambiamos las partículas por sus antipartículas. La simetría T es la inversión de tiempo: cambiamos t por -t. Y la simetría P es la simetría respecto del espacio: revertimos las coordenadas. La simetría P es como mirar en un espejo.
Por supuesto que antes se creía que el universo poseía simetría P, es decir, Alicia y Mickey Mouse vieron un universo como el nuestro cuando pasaron al otro lado del espejo. Lo que se comprobó no es cierto: mis adorables neutrinos, en un proceso de decaimiento beta de neutrones, no tienen simetría P.

Respecto de la simetría C, pues las interacciones débiles (una de las cuatro fuerzas fundamentales del universo -gravitacional, electromagnética, nuclear fuerte y nuclear débil-) también la rompen.
Es obvio para todos nosotros, por otro lado, que el universo no posee simetría T. Sabemos esto porque el vaso que ha caído de la mesa nunca vuelve por sí solo a la mesa, cumpliendo con esa historia de que la entropía nunca disminuye, sino que crece con el tiempo (convirtiéndose así en una molestia para quienes no nos gusta hacer lo que después tendremos que deshacer). Las ecuaciones de la mecánica clasica, no obstante, no reflejan esto. Poseen simetría T. Pero el mundo real, en los experimentos, se ha visto que la simetría T tampoco se cumple
Han habido intentos de probar que el universo cumple la simetría CP. Tampoco ha resultado. Pero existe un teorema, llamado teorema CPT, que afirma que si cambiamos el tiempo por -tiempo, cambiamos las partículas por antipartículas e invertimos el espacio, tendremos un universo idéntico a este

4. El marco teórico

4.0b LEYES DE CONSERVACIÓN:
Más sobre simetrías y cantidades conservadas

Es necesario mencionar, al menos, otras simetrías y cantidades conservadas aunque no podamos detenernos en ellas:

– **Simetría CPT**

Para empezar, tenemos la simetría o invariancia CPT, según la cual los procesos físicos deben ser invariantes (es decir, no deben cambiar; deben tener las mismas probabilidades, etc.) al someterlos a las tres operaciones combinadas de:

– **C**, conjugación de carga: consistente en cambiar de signo todas las cargas (hacer en las ecuaciones el cambio $q \rightarrow -q$). Esto implicaría, por ejemplo, que las probabilidades de las siguientes dos reacciones deberían ser iguales:

$$\pi^+ + n \rightarrow \Lambda^0 + K^+ \quad y \quad \pi^- + n \rightarrow \Lambda^0 + K^-$$

– **P**, paridad: invertir todas las posiciones de las partículas (hacer $x \rightarrow -x$, $y \rightarrow -y$, $z \rightarrow -z$), lo que equivale a verlo todo reflejado en un espejo.

– **T**, inversión temporal: cambiar de signo el tiempo ($t \rightarrow -t$) y los momentos lineales de todas las partículas (es decir, invertir sus velocidades).

Los físicos confían mucho en la validez de esta simetría, pues está basada en propiedades muy generales de las teorías cuánticas de campo (ver 4.4).

Sorprendentemente, estas tres simetrías no tienen por qué darse por separado. Por ejemplo, aunque parezca mentira, nuestro mundo y su reflejado en el espejo no son iguales ¡hay procesos que no tienen igual probabilidad en uno y en otro! (esos procesos están relacionados con la interacción débil).

Anales de la Universidad de Chile, Sexta Serie, Nº 9, Agosto de 1999

[EL TIEMPO EN LA FÍSICA (*)]

ANTIMATERIA, REFLEXIÓN ESPECULAR E INVERSIÓN DEL SENTIDO DEL TIEMPO

Las consideraciones hechas en torno al principio de incertidumbre deben haber dejado en claro que el *tiempo* que aparece en nuestra descripción del mundo microscópico no es el mismo que aparece en nuestra descripción del macrocosmos de los fenómenos que observamos en nuestra experiencia cotidiana. Desde este punto de vista, talvez, no deba resultar demasiado insólito el hecho que una propiedad del tiempo macroscópico, que ha sido aceptada como evidente por la Física a nuestra escala, en apariencia no se cumpla al nivel de los fenómenos subatómicos: tal parece ser el caso de la llamada invariancia bajo *inversión temporal.*

Para entender el significado de esta simetría, o no-simetría, de las leyes físicas, parece adecuado considerar primero una simetría similar, pero referida al espacio tridimensional, lo que la hace más intuitiva. Hasta el año 1957 se aceptó como evidente el hecho que las leyes de la Física deberían seguir siendo válidas si el mundo físico se reflejara en un espejo, esto es, se aceptaba sin discusión que el mundo físico reflejado no podría ser distinguido de un modo fundamental del mundo original. Este año se descubrió experimentalmente; la proposición original fue hecha por los físicos Lee y Yang; que esta supuesta simetría de la naturaleza, que recibe el nombre de *paridad* (y se designa con la letra P), era violada por los procesos responsables de los decaimientos radiactivos, procesos que son llamados interacciones débiles. Todavía más, este descubrimiento mostró que la violación de paridad era absoluta en estas interacciones es decir, que en ellas nada aparecía de la simetría izquierda-derecha (la reflexión especular intercambia la mano izquierda por la mano derecha) que es en cambio manifiesta en las interacciones nucleares y electromagnéticas.

Una operación similar a la de paridad es la de inversión del sentido del tiempo, que se designa con la letra T, y que consiste (matemáticamente) en hacer que el tiempo transcurra *hacia atrás.* Naturalmente, en el mundo real no podemos realizar esta operación - no hay un espejo que intercambie futuro y pasado - pero podemos imaginarla como el resultado de hacer pasar hacia atrás una película de una secuencia de sucesos. Suponiendo éstos de nuestra vida diaria, como un ejemplo, lo que veríamos en caso de hacerlo sería una nueva secuencia de sucesos, esta vez de ocurrencia altamente improbable en la vida real. Imagínese, para fijar ideas, una película que muestre el colapso de un castillo de naipes; si la película se pasara hacia atrás, se vería cómo los naipes, desparrama dos originalmente sobre una mesa, se ordenarían a si mismos (lo que implicaría la acción de alguna fuerza), moviéndose en el

sentido contrario de la gravedad para finalmente alcanzar el reposo en la forma de un castillo de naipes. Sin duda un fenómeno semejante nos parece imposible. Sin embargo, nada hay en la Física que conocemos que impida la ocurrencia de este proceso; se trata solamente de que la probabilidad de que ocurra es en extremo pequeña, de modo que puede ignorarse como un proceso real. Es desde este punto de vista que puede afirmarse que las leyes de la física son invariantes bajo la operación de inversión temporal.

Existe todavía una tercera operación, que recibe el nombre de *conjugación de carga* y se designa con la letra C, que consiste en intercambiar todas las partículas que componen el mundo físico por las correspondientes antipartículas. (Un resultado teórico de la mayor importancia, debido a Dirac, afirma que para que las leyes de la Relatividad Especial y la Mecánica Cuántica sean compatibles entre sí es necesario que por cada partícula que existe en la naturaleza debe existir una correspondiente antipartícula, idéntica a la anterior pero con *cargas* de signo contrario; por ejemplo, la antipartícula del electrón, llamada positrón, tiene carga eléctrica positiva.)

Hasta el año 1957 se supuso que las leyes físicas también eran invarian-tes bajo la operación C. Sin embargo, al descubrirse la violación de paridad se descubrió también que esta invariancia era asimismo violada, e igualmente en forma absoluta, por las interacciones débiles. No obstante, este segundo descubrimiento permitió (Landau y otros) introducir una nueva simetría de las leyes físicas, su invariancia bajo la acción combinada, o producto, de estas dos operaciones. La invariancia GP emergió así como un nuevo orden en la naturaleza: si se refleja un sistema físico en un espejo y, al mismo tiempo, se intercambian partículas y antipartículas, el resultado es un sistema físico que también ocurre en ella.

Todavía más, existe en Física un teorema general, que se demuestra a partir de la aceptación de la validez de la Relatividad Especial y del principio de causalidad (amén de dos supuestos bien específicos pero de carácter demasiado técnico como para incluirlos en esta discusión), que afirma que la operación combinada CPT, esto es, el producto de estas tres operaciones, es siempre una simetría exacta de la naturaleza. Si se acepta este resultado, en consecuencia, la simetría GP implica que la operación T es también una simetría exacta del mundo físico.

Esta situación duró hasta 1964, año en que Cronin, Fitch *et al.* descubrieron una pequeñísima violación de la invariancia CP, la cual, a través del teorema CPT, implica además que la Física no es invariante bajo la operación de inversión temporal: a nivel subatómico, *la naturaleza distingue una flecha del tiempo.*

Es necesario señalar, sin embargo, que esta última conclusión es de carácter indirecto, puesto que depende de la aceptación del teorema CPT. Es por cierto en principio posible que sea este último el que pierde su validez a nivel infra-atómico y por lo tanto se mantenga allí la invariancia 1. Sin embargo, esto implicaría la no validez de alguno de los

supuestos en la demostración del teorema, lo que es difícil de aceptar por parte del pensamiento ortodoxo de la Física actual. (Se ha encontrado también cierta confirmación experimental directa de no-invariancia bajo la operación T en el mismo sistema físico en que se ha medido la no-invariancia GP.)

En cuanto al origen e implicaciones de la no-invariancia GP, en los últimos años ha habido progresos teóricos que la relacionan con propiedades del mundo físico en sus dos extremos, el microcosmos de los subconstituyentes de los núcleos atómicos - las partículas llamadas *quarks* - y el macrocosmos de los fenómenos a la escala del Universo. En efecto, es posible demostrar que el quiebre de la simetría GP es inevitable si en la naturaleza existen más de cuatro variedades de quarks; hoy ya se conocen cinco. Por otra parte, la teoría contemporánea predice que el protón debe ser una partícula inestable, con un tiempo de vida del orden de 10^{+30} años. Esta predicción está siendo puesta a prueba por experimentos que se están realizando en este momento. Si resulta ser válida, entonces - como fue propuesto por primera vez por Zakharov - unido este hecho a la violación conocida de la invariancia CP, ello explicaría el considerable exceso de materia sobre antimateria que se observa hoy en el Universo.

La naturaleza, que a un cierto nivel de observación nos maravilla con la armonía de las proporciones con que aparece construida, exhibe de este modo pequeños quiebres de esa simetría, que a su vez nos maravillan por su delicada integración en el conjunto total ¿Por qué ocurre así? Nadie puede hoy ofrecer una respuesta a esta pregunta, excepto desde fuera del marco de la Física. Como las frases que elige Feynman para terminar el primer volumen de su libro *Lectures on Physics:*

Lo único que podemos sugerir como explicación es algo como esto: Hay una puerta en Neiko, en Japón, a la que los japoneses califican a veces como la más hermosa de todo el país. Fue construida en una época en que era grande la influencia del arte chino. Es muy elaborada, con muchos tallados, hermosas columnas y cabezas de dragones y de príncipes esculpidas en los pilares. Pero al contemplarla de cerca se descubre que en el complejo y elaborado diseño de uno de los pilares hay un pequeño motivo que fue tallado boca abajo; excepto por esto, el total es completamente simétrico. Cuando se pregunta por qué, la leyenda responde que fue hecho así para que los dioses no se sintieran celosos de la perfección de los hombres. Se introdujo intencionalmente un error para evitar que el celo de los dioses los hiciera enojarse con los seres humanos.

Podríamos dar vuelta la leyenda y pensar que la verdadera explicación de la simetría no total de la naturaleza es ésta: Dios hizo las leyes de la naturaleza sólo aproximadamente simétricas para que no sintiéramos celos de su perfección.

Y digo yo, si los físicos más capos todavía no pescan una mísera mojarrita, ¿cómo pretendo yo cazar una ballena?

Extracto del capítulo 20 del libro 'El Universo ambidiestro', de Martin Gardner

PARIDAD

Cuando algo en la naturaleza permanece de la misma manera, a los físicos les gusta expresar la invarianza mediante una ley de conservación. Por ejemplo, la ley de la conservación del binomio masa-energía establece que la cantidad total de masa y energía del universo no varía nunca. La masa es una forma de energía (de acuerdo con la famosa fórmula de Einstein $E = m c^2$) y nunca se produce un crecimiento ni una disminución en el total de masa-energía. La ley de conservación que implica la base del universo, por la cual nunca varía la simetría especular (la ausencia de tendencia por la izquierda o la derecha en sus leyes fundamentales), es la ley de conservación de la paridad.

El término paridad lo utilizaron por primera vez los matemáticos para distinguir entre los números enteros impares y los pares. Si dos enteros son simultáneamente pares o impares, diremos que tienen la misma paridad. Si uno es par y el otro es impar, diremos que tienen paridad opuesta. La palabra se aplica de maneras muy diversas a diferentes situaciones en las que las cosas se dividen de manera clara en dos clases mutuamente excluyentes, que pueden identificarse con los números impares y pares.

....

En 1920, los físicos encontraron útil aplicar estos conceptos matemáticos a las funciones de onda que describen las partículas elementales. Cada función contiene los números x, y, z de las coordenadas espaciales. Si un cambio de signo de una coordenada (o de las tres) deja la función inalterada, diremos que es una función par. Se indica asignando a dicha función el número cuántico +1. Una función que cambia su signo al cambiar el signo de una coordenada (o de las tres) se dice que es impar. Esto se indica con el número cuántico –1.

Consideraciones teóricas (como la simetría izquierda-derecha del propio espacio), así como experimentos con partículas atómicas y subatómicas, indican que, en cualquier sistema aislado, la paridad se conserva siempre. Supongamos, por ejemplo, que una partícula con paridad par (+1) se divide en dos. Las dos nuevas partículas pueden tener la misma paridad par, o las dos, la misma paridad impar. En cualquier caso, el sistema en su conjunto es par, pues la suma de dos números pares, o la de dos números impares, da siempre un número par. Para decir lo mismo de forma distinta, el producto de los dos números de paridad es +1 (+1 multiplicado por +1 es +1, y –1 por –1 es igual a +1). El estado final tiene una paridad total correspondiente a +1. La paridad se conserva. Si una partícula par se dividiera en otras dos, una par y la otra impar, la paridad del estado final sería impar. (Un número par más otro impar es un número impar, o +1 por –1 es igual a –1). La paridad no se conservaría.

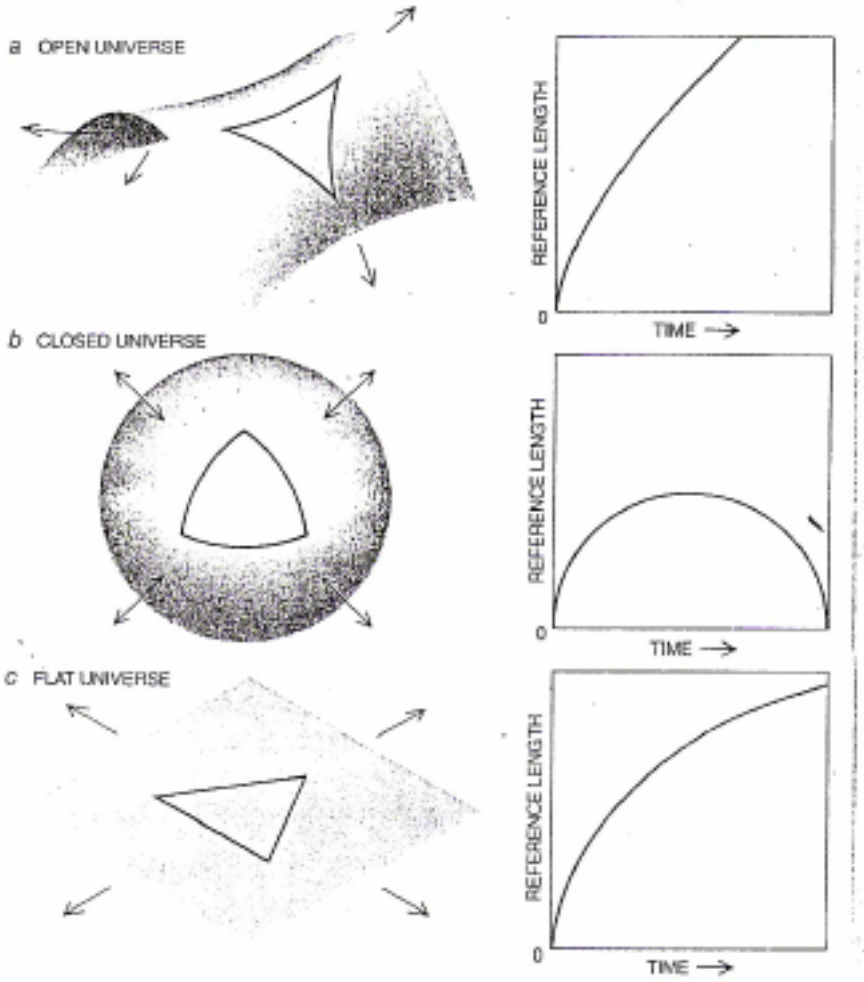
... Sería excesivamente técnico adentrarse en más detalles sobre el significado exacto de la conservación de la paridad en la teoría cuántica o los diversos caminos en los que se convierte en un concepto útil. Afortunadamente, las consecuencias no son difíciles de comprender.

En 1927, Eugene P. Wigner fue capaz de demostrar que la conservación de la paridad queda enmarcada por el hecho de que todas las fuerzas que intervienen en las interacciones entre partículas tienen libertad de inclinarse por la derecha o la izquierda. En otras palabras, cualquier violación de la paridad será equivalente a dejar de cumplir la simetría especular en las leyes básicas que describen la estructura e interacción de partículas. Los físicos saben bien que la simetría especular se impone en el macromundo de los planetas giratorios y la colisión de las bolas de billar. La conservación de la paridad extiende esta simetría especular a los niveles atómico y subatómico. Aparentemente, la naturaleza es completamente ambidiestra.

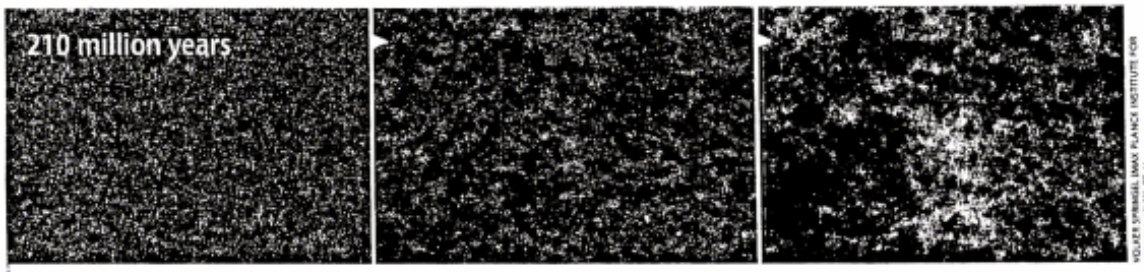
Esto no significa que la asimetría no pueda aparecer en el universo en todos sus aspectos. Significa solamente que cualquier cosa que la naturaleza fabrica, orientada a la izquierda, puede fabricarla con la misma facilidad y efectividad en su forma orientada a la derecha. Por ejemplo, nuestro Sol se mueve a través de la galaxia en una dirección tal que todos sus planetas describen trayectorias helicoidales de la misma lateralidad. Tenemos aquí un ejemplo claro de asimetría astronómica, pero esta asimetría no es más que un accidente en la evolución de la galaxia. Otros planetas, que giran describiendo órbitas alrededor de otros soles, no dudan en recorrer trayectorias helicoidales con la lateralidad opuesta. Nuestros cuerpos tienen el corazón a la izquierda, y tampoco aquí está involucrada ninguna asimetría fundamental en las leyes de la naturaleza. La localización del corazón humano es un accidente de la evolución de la vida en este planeta. Teóricamente, una persona podría estar construida con su corazón a la derecha, de hecho, tales personas existen en la realidad. Tenemos aquí un ejemplo de una estructura asimétrica que existe tanto en su forma izquierda como en la derecha, aunque una de ellas es extremadamente rara. La ley de conservación de la paridad no dice que las imágenes especulares de estructuras asimétricas deben existir en cantidades iguales. Solamente afirma que no hay nada en las leyes de la naturaleza que impida la posible existencia de los dos tipos de lateralidad.

En 1957, la ley de la conservación de la paridad se derrumbó. En el National Bureau of Standards se realizó un experimento en el que un sistema nuclear simétrico se convertía en uno asimétrico. Se puso de manifiesto una lateralidad básica en las leyes que describen la estructura de ciertas partículas elementales cuando se someten a determinado tipo de deterioro.

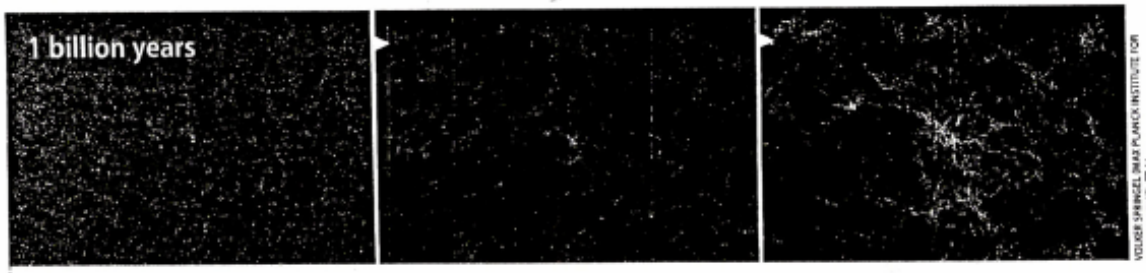
FOTOCOPIAS:



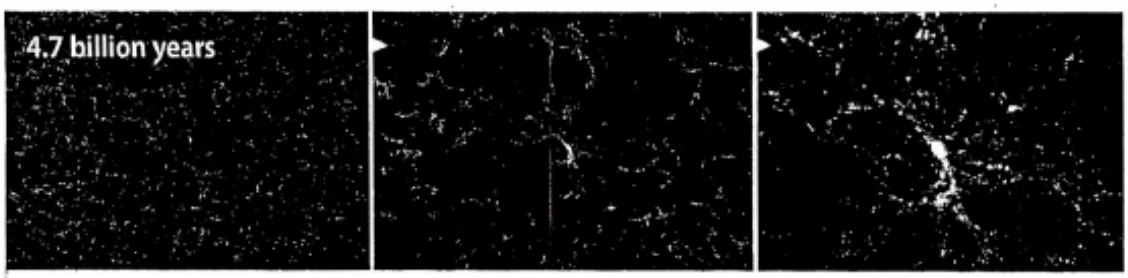
CURVATURE OF THE UNIVERSE depends on the average speed with which it is expanding and the average density of matter within it. If the rate of expansion is high in relation to the amount of mass, the universe is said to be open. Such a three-dimensional spatial geometry is analogous to a particular two-dimensional geometry: the area near the center of a saddle (*a, left*). The shape of space affects the shape of geometric objects. For example, in an open universe the sum of the angles in a triangle would be less than 180 degrees, just as it is on the surface of a saddle. The effect would not be noticeable over distances as small as those measurable on the earth, just as a triangle on a very small section of a saddle would appear to be normal. If the universe is open, it will go on expanding at a finite rate forever: any reference length (the distance between any two regions of the expanding universe) will continue to increase (*a, right*). If the amount of mass in the universe is high in relation to the expansion rate, the universe is closed. It closes on itself in much the same way as the surface of a sphere closes on itself (*b, left*). On a sphere the angles of a triangle add up to more than 180 degrees. If the universe is closed, it will eventually stop expanding and will then contract once again (*b, right*). If the recession rate and the amount of mass in the universe are exactly matched, the universe is flat and analogous to a plane (*c, left*). It will continue expanding, but the rate of expansion will slow asymptotically (*c, right*). Strong theoretical arguments support the proposition that the universe is actually flat, even though in order to be flat it would have to contain much more mass than has yet been observed, either directly or indirectly.



THE MILLENNIUM RUN simulation tracked 10 billion dark-matter particles to see how cosmic structure formed. This sequence shows the universe at an age of 210 million years (z = 18.3), well within the Dark Ages. Each image left to right zooms in by a factor of 4.



THE DARK AGES CONCLUDED about 1 billion years after the Big Bang (z = 5.7). At this time, the first stars — massive beasts weighing more than 100 solar masses drawn together by cold dark matter — already had formed. Galaxies had yet to form.



GALAXIES AND CLUSTERS appear prominent by the time the cosmos is 4.7 billion years old (z = 1.4). On the biggest scales (left), the universe still looks fairly smooth, but closer up, individual galaxies and clusters start to dominate.

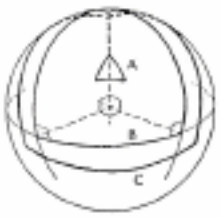


FIG. 47 (a).

El triángulo A es pequeño comparado con la esfera; por lo tanto, casi es un triángulo plano y la suma de sus ángulos se aproxima a 180°. Pero a medida que crece y llega a convertirse en el triángulo B, cuyos lados pertenecen a tres círculos máximos perpendiculares entre sí, vemos que la suma de sus ángulos llega a ser:

$$90° + 90° + 90° = 270°$$

En el triángulo C, mayor aún que el anterior, los ángulos que son todos obtusos, dan una suma mayor de 270°.

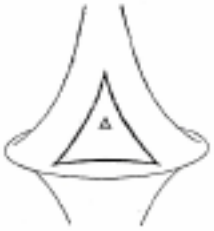


FIG. 47 (b).

Esto es lo contrario de lo que ocurre en una esfera, FIG. 47 (a). En una pseudo esfera, a medida que el triángulo crece, tiende menor la suma de sus ángulos.

12. — El siguiente diagrama es un ejemplo, algo detallado, de esta proposición. Se traza una perpendicular a la línea G perteneciente a la pseudo-esfera; desde un punto O deben trazarse dos paralelas a la línea G. Llévese la distancia δ sobre G, determinando el punto Q. Por Q levántese una perpendicular a G. Luego, si trazamos un círculo con centro O y radio δ, esta circunferencia cortará a QT en δ_1 y δ_2. Estos dos puntos, al ser unidos con O,

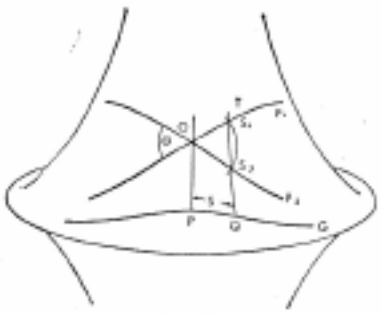


FIG. 48.

determinan las dos paralelas a G, P_1 y P_2. Todas las líneas que pasan por O, formando un ángulo menor que Θ no cortan a G, aun cuando no son paralelas a ella. Este diagrama lo hemos tomado de Coleras, *Vom Punkt zur vierten Dimension*, Viena, Szolnay, 1935. — Pág. 161.

Tipo de universo	Cociente entre la densidad de la energía y la densidad crítica (Ω)	Geometría espacial	Volumen	Evolución temporal
cerrado	>1	Curvatura positiva (esférica)	Finito	Se expande y después colapsa.
abierto	<1	Curvatura negativa (hiperbólica)	infinito	Se expande siempre
plano	1	Curvatura nula (euclídea)	infinito	Se expande siempre pero con velocidad asintótica

Partículas ordinarias		Interacción	Spin	Part. supersimétricas		Spin
bosones (energía)	gluón	fuerte	1	gluino	neutralinos	1/2
	fotón	electromag.	1	fotino		1/2
	W+ W- Z°	débil	1	wino, zhino		1/2
	gravitón	gravitación	2	gravitino		1/2
	Higgs		0	higgsino		1/2
fermiones (masa)	electrón	leptones	1/2	selectrón		0
	muón		1/2	smuón		0
	tau		1/2	stau		0
	neutrino		1/2	sneutrino		0
	quark.		1/2	squark		0

VEINTICUATRO: MECANICA CUANTICA

En el siglo IV AC, Demócrito concibió una doctrina en la que divide a la naturaleza en dos realidades básicas: ‘lo vacío’, el espacio, necesaria para el movimiento de ‘lo lleno’, la materia, formada por pequeñas partículas individuales, los átomos, que al chocar entre sí se aglomeran.
Esta concepción de la materia se perdió durante la edad media, y resurgió recién en 1895. Durante la primera mitad del siglo XX la física se revolucionó, cambiaron casi todos los conceptos. Los físicos se dieron cuenta que algunos comportamientos de los átomos no entraban en la física clásica y ni siquiera en la Teoría de la Relatividad.

Max Planck, Bohrn, Roemmen, etc., crearon nuevos enfoques matemáticos que dieron origen a la mecánica cuántica, basada en el principio de incertidumbre de Heisenberg.

PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE

Heisenberg había presentado su propio modelo de átomo renunciando a todo intento de describir el átomo como un compuesto de partículas y ondas. Pensó que estaba condenado al fracaso cualquier intento de establecer analogías entre la estructura atómica y la estructura del mundo. Prefirió describir los niveles de energía u órbitas de electrones en términos numéricos puros, sin la menor traza de esquemas. Como quiera que usó un artificio matemático denominado “matriz” para manipular sus números, el sistema se denominó “mecánica de matriz”.
Heisenberg recibió el premio Nobel de Física en 1932 por sus aportaciones a la mecánica ondulatoria de Schrödinger, pues esta última pareció tan útil como las abstracciones de Heisenberg, y siempre es difícil, incluso para un físico, desistir de representar gráficamente las propias ideas.
Una vez presentada la mecánica matriz (para dar otro salto atrás en el tiempo) Heisenberg pasó a considerar un segundo problema: cómo describir la posición de la partícula. ¿Cuál es el procedimiento indicado para determinar dónde está una partícula? La respuesta obvia es ésta: observarla. Pues bien, imaginemos un microscopio que pueda hacer visible un electrón. Si lo queremos ver debemos proyectar una luz o alguna especie de radiación apropiada sobre él. Pero un electrón es tan pequeño, que bastaría un solo fotón de luz para hacerle cambiar de posición apenas lo tocara. Y en el preciso instante de medir su posición, alteraríamos ésta.
Aquí nuestro artificio medidor es por lo menos tan grande como el objeto que medimos; y no existe ningún agente medidor más pequeño que el electrón. En consecuencia, nuestra medición debe surtir, sin duda, un efecto nada desdeñable, un efecto más bien decisivo en el objeto medido. Podríamos detener el electrón y determinar así su posición en un momento dado. Pero si lo hiciéramos, no sabríamos cuál es su movimiento ni su velocidad. Por otra parte, podríamos gobernar su velocidad, pero entonces no podríamos fijar su posición en un momento dado.
Heisenberg demostró que no nos será posible idear un método para localizar la posición de la partícula subatómica mientras no estemos dispuestos a aceptar la

incertidumbre absoluta respecto a su posición exacta. Es un imposible calcular ambos datos con exactitud al mismo tiempo.
Siendo así, no podrá haber una ausencia completa de energía ni en el cero absoluto siquiera. Si la energía alcanzara el punto cero y las partículas quedaran totalmente inmóviles, sólo sería necesario determinar su posición, puesto que la velocidad equivaldría a cero. Por tanto, sería de esperar que subsistiera alguna "energía residual del punto cero", incluso en el cero absoluto, para mantener las partículas en movimiento y también, por así decirlo, nuestra incertidumbre. Esa energía "punto cero" es lo que no se puede eliminar, lo que basta para mantener liquido el helio incluso en el cero absoluto.
En 1930, Einstein demostró que el principio de incertidumbre (donde se afirma la imposibilidad de reducir el error en la posición sin incrementar el error en el momento) implicaba también la imposibilidad de reducir el error en la medición de energía sin acrecentar la incertidumbre del tiempo durante el cual se toma la medida. Él creyó poder utilizar esta tesis como trampolín para refutar el principio de incertidumbre, pero Bohr procedió a demostrar que la refutación tentativa de Einstein era errónea.
A decir verdad, la versión de la incertidumbre, según Einstein, resultó ser muy útil, pues significó que en un proceso subatómico se podía violar durante breves lapsos la ley sobre conservación de energía siempre y cuando se hiciese volver todo al estado de conservación cuando concluyesen esos períodos: cuanto mayor sea la desviación de la conservación, tanto más breves serán los intervalos de tiempo tolerables. Yukawa aprovechó esta noción para elaborar su teoría de los piones. Incluso posibilitó la elucidación de ciertos fenómenos subatómicos presuponiendo que las partículas nacían de la nada como un reto a la energía de conservación, pero se extinguían antes del tiempo asignado a su detección, por lo cual eran sólo "partículas virtuales". Hacia fines de la década 1940-1950, tres hombres elaboraron la teoría sobre esas partículas virtuales: fueron los físicos norteamericanos Julian Schwinger y Richard Phillips Feynman y el físico japonés Sin-itiro Tomonaga. Para recompensar ese trabajo, se les concedió a los tres el premio Nobel de Física en 1965.
A partir de 1976 se han producido especulaciones acerca de que el Universo comenzó con una pequeña pero muy masiva partícula virtual que se expandió con extrema rapidez y que aún sigue existiendo. Según este punto de vista, el Universo se formó de la Nada y podemos preguntarnos acerca de la posibilidad de que haya un número infinito de Universos que se formen (y llegado el momento acaben) en un volumen infinito de Nada.
El "principio de incertidumbre" afectó profundamente al pensamiento de los físicos y los filósofos. Ejerció una influencia directa sobre la cuestión filosófica de "casualidad" (es decir, la relación de causa y efecto). Pero sus implicaciones para la ciencia no son las que se suponen por lo común. Se lee a menudo que el principio de incertidumbre anula toda certeza acerca de la naturaleza y muestra que, al fin y al cabo, la ciencia no sabe ni sabrá nunca hacia dónde se dirige, que el conocimiento científico está a merced de los caprichos imprevisibles de un Universo donde el efecto no sigue necesariamente a la causa. Tanto si esta interpretación es válida desde el ángulo visual filosófico como si no, el principio de incertidumbre no ha conmovido la actitud del científico ante la investigación. Si,

por ejemplo, no se puede predecir con certeza el comportamiento de las moléculas individuales en un gas, también es cierto que las moléculas suelen acatar ciertas leyes, y su conducta es previsible sobre una base estadística, tal como las compañías aseguradoras calculan con índices de mortalidad fiables, aunque sea imposible predecir cuándo morirá un individuo determinado. Ciertamente, en muchas observaciones científicas, la incertidumbre es tan insignificante comparada con la escala correspondiente de medidas, que se la puede descartar para todos los propósitos prácticos. Uno puede determinar simultáneamente la posición y el movimiento de una estrella, o un planeta, o una bola de billar, e incluso un grano de arena con exactitud absolutamente satisfactoria.
Respecto a la incertidumbre entre las propias partículas subatómicas, cabe decir que no representa un obstáculo, sino una verdadera ayuda para los físicos. Se la ha empleado para esclarecer hechos sobre la radiactividad, sobre la absorción de partículas subatómicas por los núcleos, así como otros muchos acontecimientos subatómicos, con mucha más racionabilidad de lo que hubiera sido posible sin el principio de incertidumbre.
El principio de incertidumbre significa que el Universo es más complejo de lo que se suponía, pero no irracional.

La Segunda Ley de la Termodinámica nos dice que la energía siempre tiende a degradarse (un movimiento ordenado puede convertirse en desordenado, pero no a la inversa). Desde el punto de vista físico formal no hay ningún motivo para que haya una 'flecha del tiempo' dada, tampoco hay obstáculo para que un trozo de materia que se deja caer no salga disparado hacia arriba. Todo esto es posible, sólo que estadísticamente es tan improbable que estas cosas no se ven, pero sólo hay que esperar el tiempo suficiente.

Principio de incertidumbre: sostiene que no todos los valores de un sistema tienen igual valor en forma simultánea. Por ejemplo, la imposibilidad de medir la posición y la energía de una partícula.

Las partículas se comportan a veces como corpúsculos materiales y a veces como ondas (ondas: fenómenos de interferencia y difracción) (partícula: efecto fotoeléctrico).
Si se estudia una propiedad corpuscular la onda se esfuma, si se estudia una propiedad ondulatoria desaparece la partícula. Ninguno de estos dos aspectos se hace evidente hasta el momento de la observación.

1) Un ente cuántico no observado subsiste en una superposición coherente de todo lo permitido, a lo que se llama 'función de onda'.
2) En determinadas situaciones las partículas pueden superar barreras infranqueables simplemente desapareciendo y apareciendo del otro lado, es el 'efecto de túnel cuántico'.
3) En ciertos sistemas la medición de una magnitud puede variar el resultado del experimento. Por ejemplo, si se mide primero la energía y luego la posición el resultado no va a ser igual a si se mide primero la posición y luego la energía.
   $A + B \neq B + A$

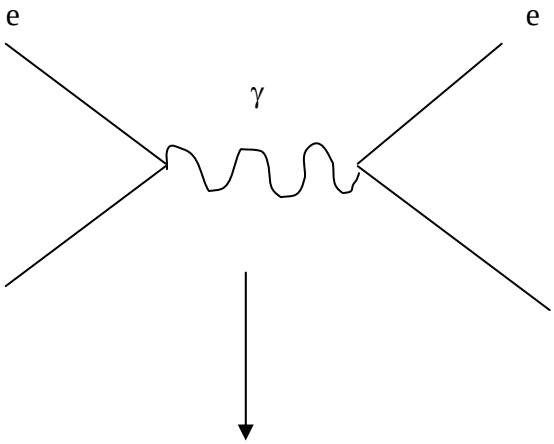
4) En el mundo cuántico carece de importancia que una partícula se desplace en el sentido del tiempo o en sentido temporal inverso.
5) La medición de una propiedad particular puede modificar en forma instantánea a la misma propiedad de otra partícula situada a tal distancia que ni la luz puede llevar la información.
6) La naturaleza íntima de los comportamientos a nivel de partícula es absolutamente desconocida.
7) La función de onda se simboliza con la letra griega Psi (Ψ), e implica la probabilidad de obtener un resultado u otro. La onda es la expresión de la probabilidad de encontrar una partícula en un cierto lugar, son ondas probabilísticas. Así, una partícula tiene una posición únicamente en el momento en que se la mide. Esto implica que en la mecánica cuántica el concepto de trayectoria no es muy necesario. Un suceso entonces no es algo que empieza y algo que termina, es un conjunto de factores iniciales y un conjunto de factores finales. En el micromundo la predicción es sólo una cuestión de estadística.

VEINTICINCO: MECANICA CUANTICA 2

Interacción entre partículas: Hay dos clases de partículas, las portadoras de masa y las portadoras de energía, un ejemplo del comportamiento cuántico puede verse en el fenómeno de dispersión, el que se observa cuando dos partículas se acercan en trayectorias convergentes.
Supongamos dos electrones que se aproximan entre sí. Ambos tienen igual signo de carga, lo que implica que a medida que se acercan crece la fuerza de repulsión. Esto hace que su trayectoria se vaya curvando hasta llegar al punto de máximo acercamiento, a partir de ahí comienzan a alejarse uno de otro.

La física clásica dice que dos partículas con igual signo de carga se repelen cuando se encuentran en sus respectivos campos de acción (campo de acción es el volumen de espacio donde se verifica una interacción). Pero la experimentación no muestra esto tal cual, de las trayectorias de las partículas se ve el comienzo y el final, el camino intermedio no puede verse.
Además, hay que tener en cuenta que la interacción de las partículas se da a través de cuantos de energía, esto hace suponer que la interacción es más bien una sucesión de saltos, de cambios repentinos más que una línea entera.

Este fenómeno se llama repulsión. ¿Cómo se entera un electrón de la presencia del otro en su camino? Podemos suponer que el cambio brusco de trayectoria se debe a la materialización de una partícula que, actuando como mensajera, le cede energía y luego desaparece. Esa partícula se llama ‘cuanto de campo’ y es el fotón. Así, al cargarse con la energía llevada por el fotón el electrón varía su trayectoria.



INTENTO DE DIAGRAMA DE FEYNMANN

Fotón, energía cedida por la partícula para que se verifique la interacción.

Ahora bien, cuando las partículas que se mueven de trayectorias convergentes tienen signo de carga contrario se atraen. Entonces la energía del fotón obra como un elástico espiral estirado que, al contraerse, las atraen entre sí.

Entonces:

1) Jamás se ve el momento del cambio de dirección.
2) Es imposible poner en evidencia al 'cuanto de campo' (la partícula mensajera).
3) Puede aparecer más de una partícula mensajera.

Al ocurrir una interacción las cosas suceden 'como sí' las partículas que se aproximan estuvieran rodeadas de partículas que se materializan cuando se necesita absorber energía. ¿Pero, de dónde vienen estas partículas mensajeras? Desde la mecánica cuántica, no vienen de ningún lado.

El principio de incertidumbre de Heisenberg dice que son 'algo de nada'. Este es un principio aplicable a muchos parámetros (energía, posición, tiempo), por ejemplo:

$\Delta E \quad \Delta t \cong \overline{h}$

donde $\overline{h}$ es la constante de Planck multiplicada por 2π

O sea, la incertidumbre (Δ, variación) que se tiene acerca de la energía de un sistema por la incertidumbre que se tiene acerca del tiempo en que esa energía está presente. Lo que quiere decir que si queremos medir la variación de energía de un sistema lleva tanto tiempo que terminamos perturbando al propio sistema a medir, por lo que la medición ya no tiene sentido.
Si una partícula emite un cuanto de campo y lo vuelve a absorber hay un evidente cambio de energía, pero la rapidez con que se hace esto es tal que no se pude verificar dicho cambio. O sea que no puede decirse que se violó el principio de conservación de la energía.

Si se acepta esto se puede aceptar que una partícula fluctúa entre su estado original y un estado de invisibilidad, esto de partícula virtual. Entonces es posible que una partícula virtual aparezca, durante un lapso muy pequeño, se encuentre con otra partícula, le ceda energía a la misma y luego vuelva a ser virtual (el fotón que separa 2 electrones tiene una existencia real durante 10^{-24} seg., por lo que es imposible ponerlo en evidencia).
Una partícula virtual es aquella que se hace real por el lapso permitido por el principio de incertidumbre de Heisemberg.

Cuando un átomo en el espacio recibe un fotón de alta energía proveniente de una estrella se ioniza, se excita, sus electrones absorben la energía y saltan de órbita y luego vuelven a caer a su antigua órbita devolviendo la energía al espacio. Esto hace que la nebulosa brille.

Todas las partículas portadoras de energía tienen spin entero, son los llamados bosones. Estas partículas pueden amontonarse (las de spin semi-entero, portadoras de masa, no). Además, las partículas mensajeras cuanto más lejos actúan menos masa tienen, por esto las que corresponden a la gravitación (gravitón) y al electro-magnetismo (electrón) tienen masa 0 (con excepción del gluón).

Vacío: El vacío suele verse como ‘nada’ (generalmente, volumen de espacio no ocupado por partículas), pero mirándolo desde el punto de vista microfísico el vacío no existe. Desde la cuántica se niega la existencia del vacío. Todas las partículas tienen energía, se puede decir, arbitrariamente, que tienen energía positiva. A las antipartículas entonces se les asigna energía negativa. Si una partícula y su antipartícula se encuentran, ambas desaparecen aniquilándose entre sí. Pero la energía debe conservarse, entonces se emiten fotones cuya energía es igual a la del sistema partícula-antipartícula anterior.
Aparece entonces un estado especial de la materia, no excitado, a lo que llamamos vacío ($m\,c^2 = E$).

¿Y si hay un fotón con una energía que fuera el doble de la energía en reposo del electrón? Puede materializarse en el espacio como un par partícula-antipartícula. Así, el vacío cuántico es un mar de partículas que se materializan, interactúan y luego desaparecen. Y esto se da tanto en el espacio no ocupado por materia tangible como en el interior de los átomos).

Si dos partículas de signos opuestos se encuentran desaparecen, pero no lo hace su energía ni su momento. Instantáneamente se emiten fotones. Así, en cuántica se niegan las partículas. Lo que se acepta es que existe una energía inmaterial (teoría cuántica de campos) que ocupa volumen. No puede saberse dónde está la partícula, sólo la probabilidad de que esté en uno u otro lugar.
La partícula material desaparece y se convierte en ‘campo’ inmaterial (para la mecánica cuántica), y el campo inmaterial se convierte en material al emitir fotones. El vacío es el recipiente donde están las partículas y los campos (recordar que la materia es lo que puede detectarse, la energía se detecta sólo por su acción sobre la materia).

A cada una de las 4 fuerzas de la naturaleza le corresponde una partícula mensajera o cuanto de campo.

Electromagnetismo : fotón, masa 0, spin 1

Fuerza nuclear fuerte (la que aglutina los protones y neutrones entre sí, y también a los quarks que los forman), donde la acción de la partícula mensajera no pasa de 10^{-13} cm. : gluón, masa 0, spin 1

Fuerza nuclear débil (interviene en los procesos de desintegración radiactiva, no detectada directamente) : 3 partículas mensajeras, los bosones w^+ , w^- y z^0 con masa algo mayor a 50 gev (50 giga electrón voltio), spin 7

Gravitación: gravitón (G), masa 0, spin 2

Fuerzas Fundamentales

De Wikipedia, la enciclopedia libre

En Física se llaman fuerzas fundamentales a cada una de las interacciones que puede sufrir la materia y que no pueden descomponerse en interacciones más básicas. En la física moderna se consideran cuatro campos de fuerzas como origen de todas las **interacciones fundamentales**:

- Interacción electromagnética: Transmitida por fotones. La sufren todas las partículas con carga eléctrica y es la fuerza involucrada en las transformaciones físicas y químicas de átomos y moléculas. Esta fuerza tiene dos sentidos (positivo y negativo). Su alcance es infinito.

- Interacción nuclear débil: Transmitida por los bosones W y Z. Es la responsable, por ejemplo, de la desintegración β (beta). Su intensidad es menor que la de la fuerza electromagnética y su alcance es aún menor que el de la interacción nuclear fuerte.

- Interacción nuclear fuerte: Transmitida por los gluones. Es la que hace que los quarks se unan para formar mesones y bariones (nucleones). Solo la sufren los hadrones. Su alcance es del orden de las dimensiones nucleares, pero es más intensa que la fuerza electromagnética.

- Interacción gravitatoria o Gravitación: Transmitida por el gravitón (partícula aún no descubierta). Entre partículas fundamentales esta fuerza es de escasa importancia y difícil de incluir en las teorías cuánticas. Es de un solo sentido, pero de alcance infinito.

La interacción electromagnética y la interacción nuclear débil según el Modelo Estándar de física de partículas son manifestaciones a energías ordinarias de una única interacción: la interacción electrodébil. El proceso por el cual esta única fuerza se separa en dos distintas se denomina ruptura de simetría electrodébil.

Obtenido de "http://es.wikipedia.org/wiki/Fuerzas_Fundamentales"

Entonces, todas las partículas interactuantes toman la energía de una partícula que se materializa durante un tiempo imposible de medir y luego desaparece.

Desde la mecánica cuántica no importa si una partícula se desplaza en el sentido del tiempo o en sentido contrario. Si va al revés es equivalente a su antipartícula. Si un anti-protón se desplaza por el espacio en sentido temporal normal es equivalente a un protón que se dirige del futuro al pasado.

VEINTISÉIS: MECÁNICA CUÁNTICA 3

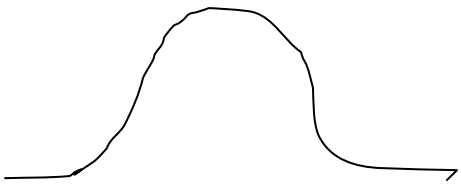
Puede pensarse que las explicaciones que da la mecánica cuántica de los distintos fenómenos microfísicos son sólo relatos basados en fórmulas matemáticas abstractas, pero la experimentación demuestra que son reflejo de la realidad.
Aparentemente, en el mundo de lo muy pequeño no se cumplen 3 condiciones que sí se aceptan para lo macroscópico:

1) Que hay objetos que existen realmente, sean observados o no.
2) Que se saquen conclusiones generales de observaciones y experimentos.
3) Que la velocidad máxima posible es la de la luz.

Experimento de los dos orificios: Se coloca una pantalla con dos orificios, o ranuras, muy pequeños a través de los cuales se puedan proyectar cualquier tipo de partículas, orificios que se pueden abrir o cerrar a voluntad. Detrás se coloca otra pantalla para detectar y registrar las partículas que pasen por los orificios.

1) Se comienza utilizando partículas del mundo macrofísico, por ejemplo, balas. Se disparan balas con un solo orificio abierto, en la pantalla detectora se pueden registrar y contar el número de proyectiles que llegan. Luego se abre el otro orificio y se vuelve a disparar, la pantalla detectora registrará los proyectiles que pasen por los dos orificios. Entonces, la intensidad total (I_t) es igual a la suma de las intensidades particulares de cada orificio. $I_t = I_1 + I_2$

1) Luego se usan proyectiles de la microfísica. Se comienza, por ejemplo, con fotones. Se proyecta luz sobre la pantalla con un solo orificio abierto. La pantalla detectora registra una imagen llamada 'imagen de difracción', bien luminosa en el centro y desvaneciéndose hacia la periferia. Se puede representar con una onda,



el comienzo de los valles indica el menor grado de probabilidad de encontrar fotones, el máximo de probabilidad está marcado por la elongación de la onda. Ese grado de probabilidad se expresa con la letra griega psi ψ, ψ es la amplitud de la onda y ψ^2 es la intensidad.

2) Se abre el otro orificio. En la pantalla detectora aparecerá una imagen de interferencia, formada por zonas claras y oscuras alternadas, donde la intensidad de las claras disminuirá hacia la periferia.

3) A continuación se cambia de proyectil, en lugar de fotones se usan electrones. Se cambia la fuente de luz por un cañón de electrones y se repite el experimento. El resultado es el mismo, imagen de difracción con un orificio abierto e imagen de interferencia con los dos orificios abiertos.
4) Luego se usan electrones nuevamente pero modificando el procedimiento, los electrones comienzan a dispararse cada vez mas espaciados, hasta llegar a un electrón por disparo. Si esto se realiza con los dos orificios abiertos, en la pantalla detectora aparece una imagen de interferencia, como si el único electrón hubiera pasado por los dos orificios al mismo tiempo. Este resultado es inequívoco, todos los experimentos realizados en cualquier parte del mundo arrojan igual resultado.

¿Esto quiere decir que el electrón no está condicionado por el hecho de haber dos orificios abiertos?

Los físicos idearon 2 procederes para intentar clarificar este extraño resultado:

1) Se dispara un electrón y en el momento en que el mismo llega a la primer pantalla se cierra uno de los orificios si estaban los dos abiertos, o se abre uno si había sólo uno abierto. La imagen en la pantalla detectora es la que corresponde a cómo estaban los orificios en el momento del disparo (antes que el electrón llegue a la primer pantalla).
2) En ambos orificios se instalan detectores de partículas, comienzan a dispararse electrones cada vez mas espaciados entre sí hasta llegar a uno por vez. En cierto momento un orificio detecta un electrón y el otro nada. En la pantalla detectora aparece una imagen de difracción.

Analizando esto, primero parece que el electrón pasa por ambos orificios a la vez, segundo parece que ‘sabe’ cuantos orificios había abiertos cada vez cuando fue disparado, y tercero, pareciera que ‘sabe’ que lo están observando, ya que actúa según lo que se espera de él.

Si hablamos en términos de probabilidades, podemos decir que el electrón perturbado por la observación tiene dos opciones: pasar por uno u otro orificio. Estas dos opciones interfieren entre sí, de allí la imagen de interferencia cuando los dos orificios están abiertos.

Por otro lado, cuando se dispara el electrón, durante el viaje no está en observación. Así, el electrón es reemplazado por muchos electrones virtuales, cada uno con su propia trayectoria. Estas distintas trayectorias interfieren entre sí produciendo la imagen de interferencia.
El electrón sólo aparece como tal cuando está siendo observado, si no hay observación no se sabe si es onda o partícula.

Si en macrofísica el observador no forma parte del experimento, en cuántica sí. A esto se lo llama 'colapso de la función de onda'. La observación produce algo que hace que las cosas sean de cierta manera.
En microfísica nada es real mientras no se lo observe. Cuando se observa la partícula ésta se hace real en forma instantánea, al cesar el experimento la partícula material pierde su materialidad y se hace virtual. Esto no puede ser explicado por la física clásica.

La búsqueda de una respuesta a estos interrogantes tomó dos caminos:

1) El primero, ya abandonado, puede ser llamado 'utilitario'. Dice que si la física cuántica puede predecir el comportamiento de un semiconductor (por ej.), lo demás no importa. Si el análisis es útil lo demás no importa.
2) El segundo camino intenta realizar igual experimento con átomos enteros, moléculas de pequeño tamaño, dando igual resultado que el experimento realizado con electrones.

Así, en microfísica se debe aceptar que no hay estados ni trayectorias definitivas para las partículas. La escuela de Niels Bohr dice que mientras no se observa no hay nada real, lo que acontece es una superposición de estados, de trayectorias y de resultados. Pero si se lo observa la función de onda colapsa y aparece una sola realidad.

Hugh Everett objeta a esto que si la función de onda colapsa, ¿porqué se decanta hacia una realidad y no hacia la otra? Lo que ocurriría entonces se da en forma real, pero cuando un electrón está pasando por uno de los dos orificios el universo se divide, y en otro universo está pasando por el otro orificio. El experimentador adquiere también dos estados, en un universo está viendo pasar el electrón por el orificio A, y en otro por el orificio B. En esto se apoyan varias teorías sobre los múltiples universos (Everett 2, o duplicación del universo).

Por otro lado se propone la teoría de coherencia. A la superposición de estados se la llama 'estado coherente'. La función de onda lleva en sí una 'censura cuántica', lo que se ve al hacer el experimento implica algo que se ve y algo que no se ve. La coherencia, superposición, está presente cuando no se la ve, cuando hay un observador colapsa en un resultado único. Esto hace que cualquier experimento, aún en la macrofósica, sea imposible de realizar sin que haya perturbaciones, por eso no se dan todas las posibilidades (el observador es un tipo de perturbación). A las partículas si puede aislárselas, de allí que haya superposición de resultados.

En definitiva, la esencia de todo el asunto no se comprende, pero se debe aceptar el resultado de los experimentos.

A gran escala la energía se degrada pero el orden del universo aumenta. Por todos lados se ve orden, de manera tal que existe la capacidad de predecir sucesos futuros y lejanos. Pero en microfísica es distinto, aquí no existe orden. La regla absoluta es el caos, la indeterminación, para los diversos sucesos sólo cabe hablar de probabilidades, de azar. Entonces, ¿es posible desde el punto de vista cuántico no analizar los sucesos sino el espacio y el tiempo? La respuesta es sí.

En física hay 3 constantes fundamentales: la velocidad de la luz (c), la constante gravitatoria (G) y la constante de Planck (h). Estas tres constantes son naturales, no se derivan de ningún tipo de cálculo, razonamiento o experimento.
Desde el tratamiento matemático se pueden combinar de varias maneras, una de esas combinaciones da el lapso temporal más pequeño compatible con la física cuántica, el tiempo de Planck.

$$\left(\frac{G\,h}{c^5} \right)^{1/2} \cong 10^{-45} \text{ seg.}$$

Otra combinación da el tamaño más pequeño compatible con la física cuántica, es la longitud o radio de Planck.

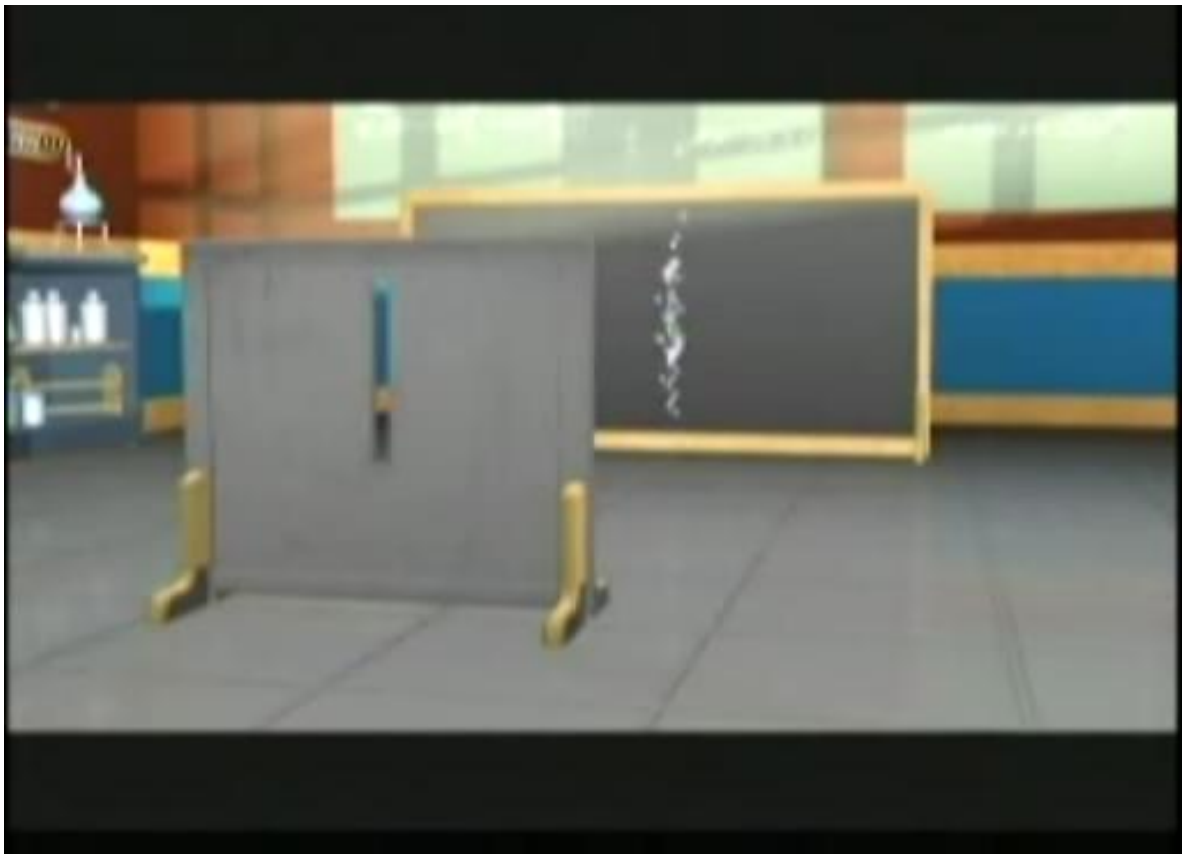
$$\left(\frac{G\,h}{c^3} \right)^{1/2} \cong 10^{-33} \text{ cm.}$$

10^{-33} cm. es la distancia que recorre la luz en 10^{-45} seg.
A estos valores las partículas no producen efecto de campo, pero si se producen fluctuaciones cuánticas causando transformaciones topológicas del espacio-tiempo. El espacio, el tiempo y la energía no se pueden subdividir de forma indefinida, puede hablarse entonces de cuanto de espacio, cuanto de tiempo y cuanto de energía.
El espacio sería como una espuma gelatinosa en la cual se producen burbujas, túneles, hendiduras, etc., que cambian de forma y posición millones y millones de veces por segundo. El espacio es un continuo de energía en movimiento.
Se propuso que esta espuma fue la estructura del universo cuando el mismo tenía una edad de 10^{-33} segundos, luego vino la hiper-expansión del universo, creando un super-espacio donde había una cantidad infinita de espacios con diversas leyes físicas, todas las geometrías posibles e imaginables. En algunos de esos universos la vida sería posible y en otros no.

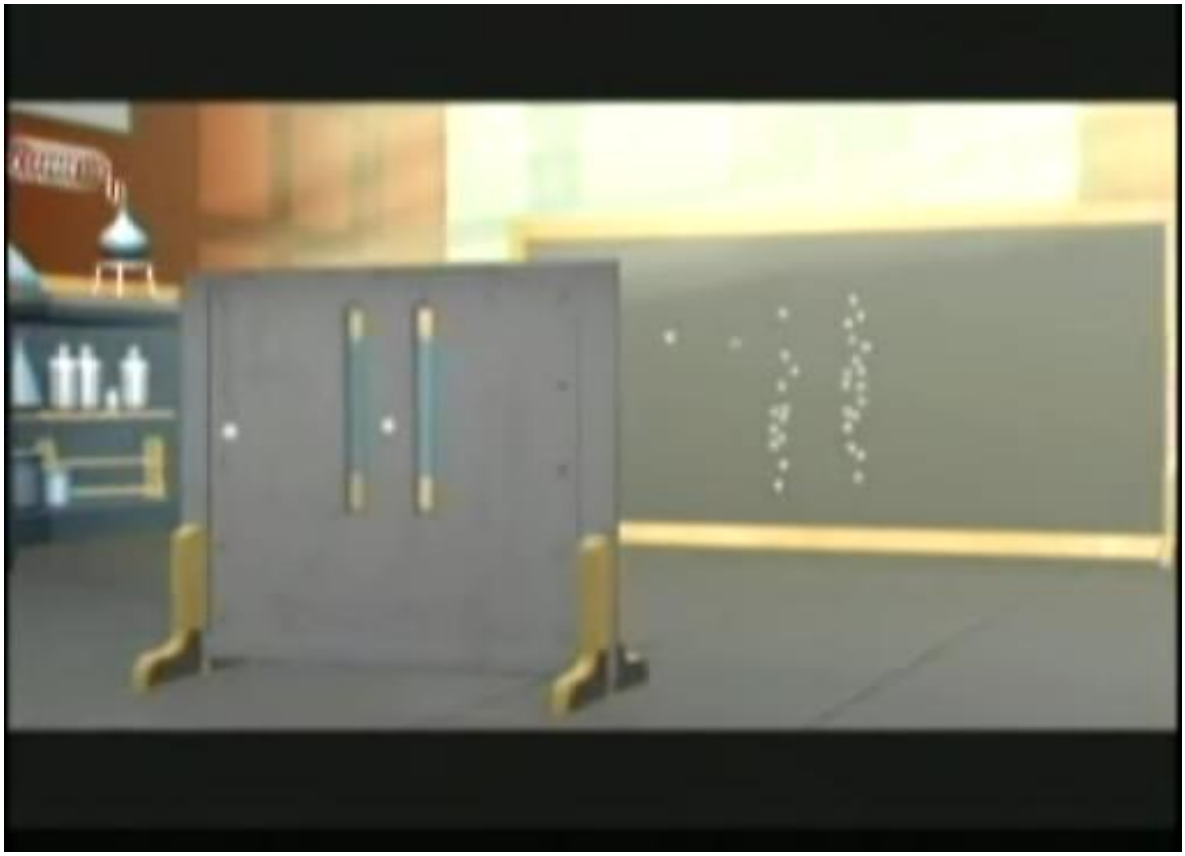
Tomado de internet:

00:00
La animación comienza explicando qué patrón deja un chorro de partículas de tamaño

apreciable (en este caso, bolas de mármol) al atravesar una rendija. La respuesta es evidente, golpearían la pared posterior en un área rectangular, de forma idéntica a la rendija (este sería el caso **1a**). Si en lugar de una rendija ponemos dos, conseguiremos obtener dos áreas, cada una relacionada con una de las rendijas. Esto es, cada partícula atraviesa una y solo una rendija, golpeando en una y solo una de las regiones de la pared posterior (caso **1b**).



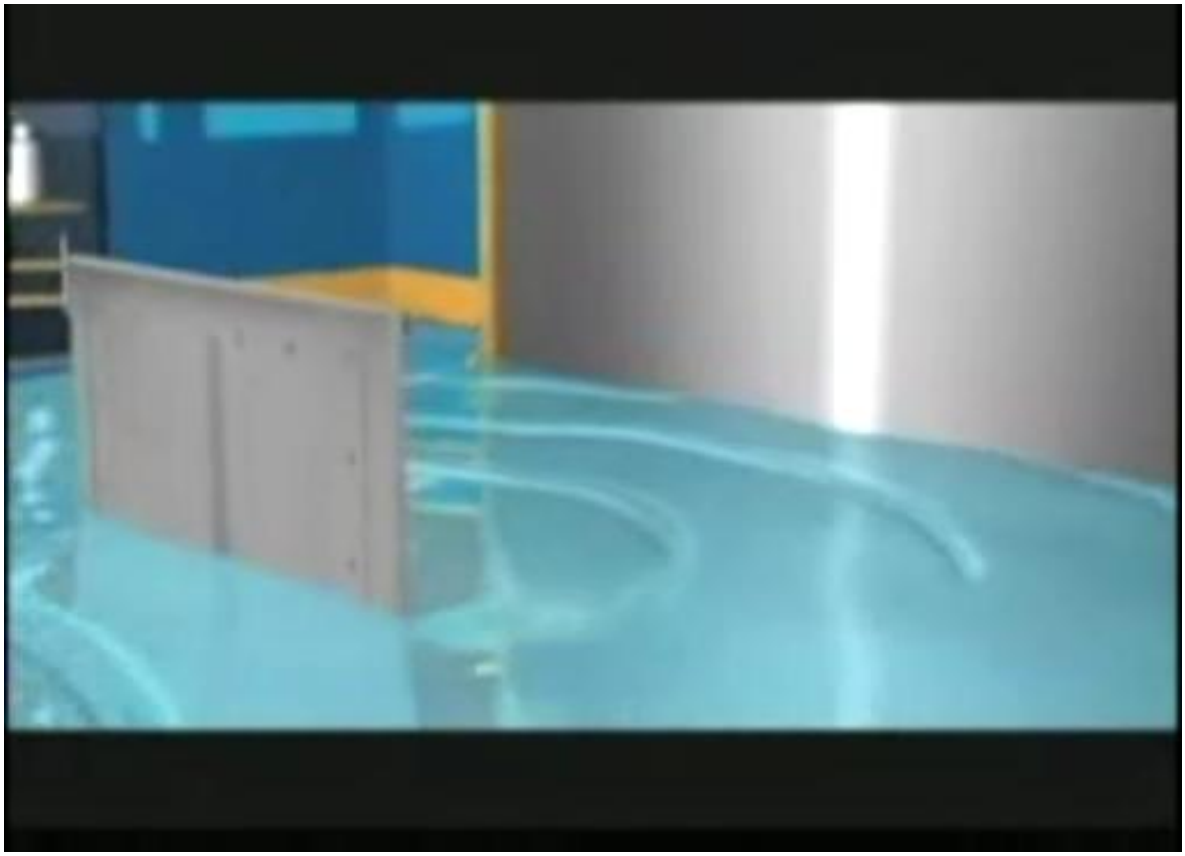
*Caso **1a**, donde se lanzan bolas de mármol contra una rendija*



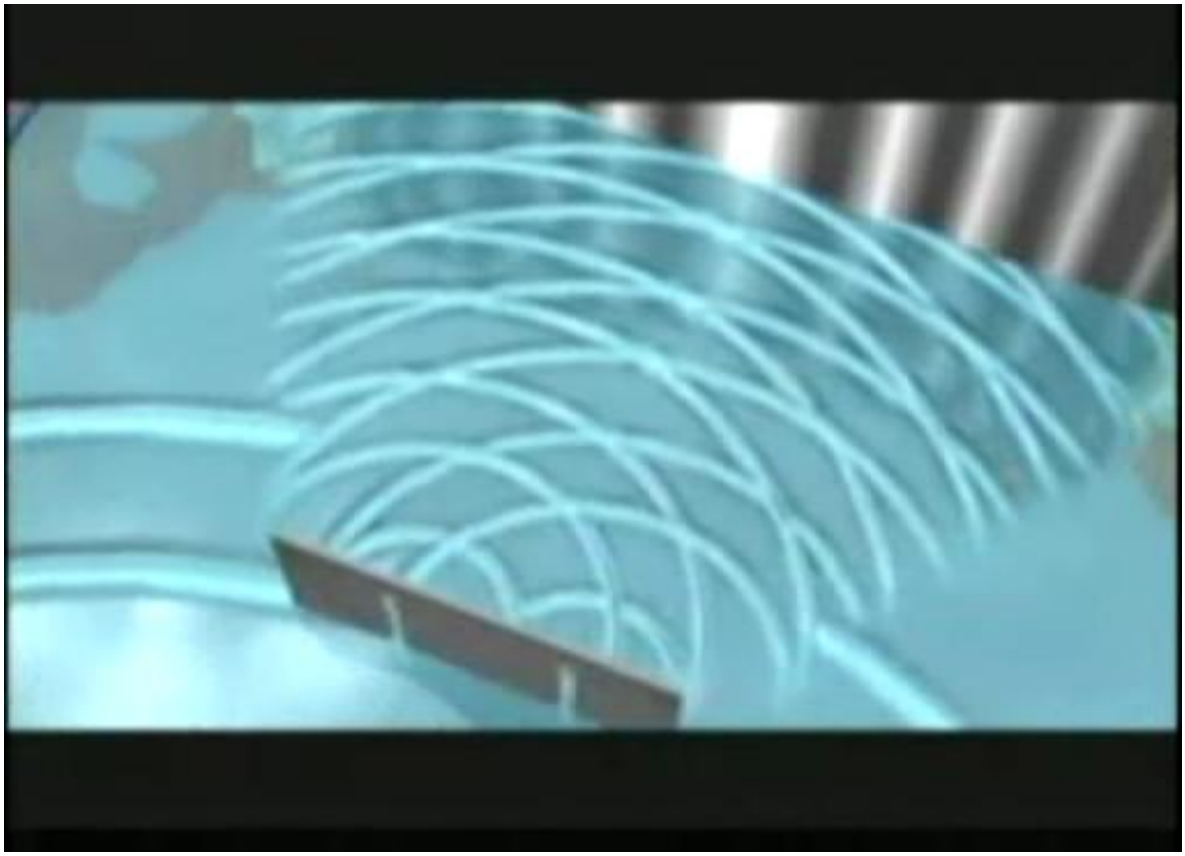
*Caso **1b**, donde se lanzan las mismas bolas de mármol contra dos rendijas.*

01:20

Este experimento puede repetirse con ondas. Por ejemplo, las de cualquier líquido, como es el caso del agua. Cuando las ondas se enfrentan con un muro en el que se ha perforado una rendija (caso **2a**), al atravesarla y golpear un muro posterior dejan una huella análoga a la que dejaron las partículas en el primer caso (caso 1a). Si en lugar de una rendija las ondas se enfrenta a dos (caso **2b**), no se reproduce el patrón del caso 1b, sino que aparece un patrón de interferencia. Éste consiste en numerosas bandas paralelas de intensidad decreciente, que se produce porque las ondas interfieren unas con otras y dan lugar a cancelaciones (donde no se observa señal) y refuerzos de la señal.



*Caso **2a.** Aquí se utilizan las ondas producidas en un líquido, que atraviesan una rendija*



*Caso **2b**. Similar al anterior, pero con el líquido atravesando dos rendijas y produciendo un patrón de interferencia*

02:00
Sin embargo, el mundo de la Física Cuántica, de lo muy pequeño (en realidad la Física Clásica es una aproximación que describe adecuadamente el mundo macroscópico, pero la Física Cuántica se aplica también a todo lo que vemos y tocamos) es diferente, paradójico en apariencia; subyugante.

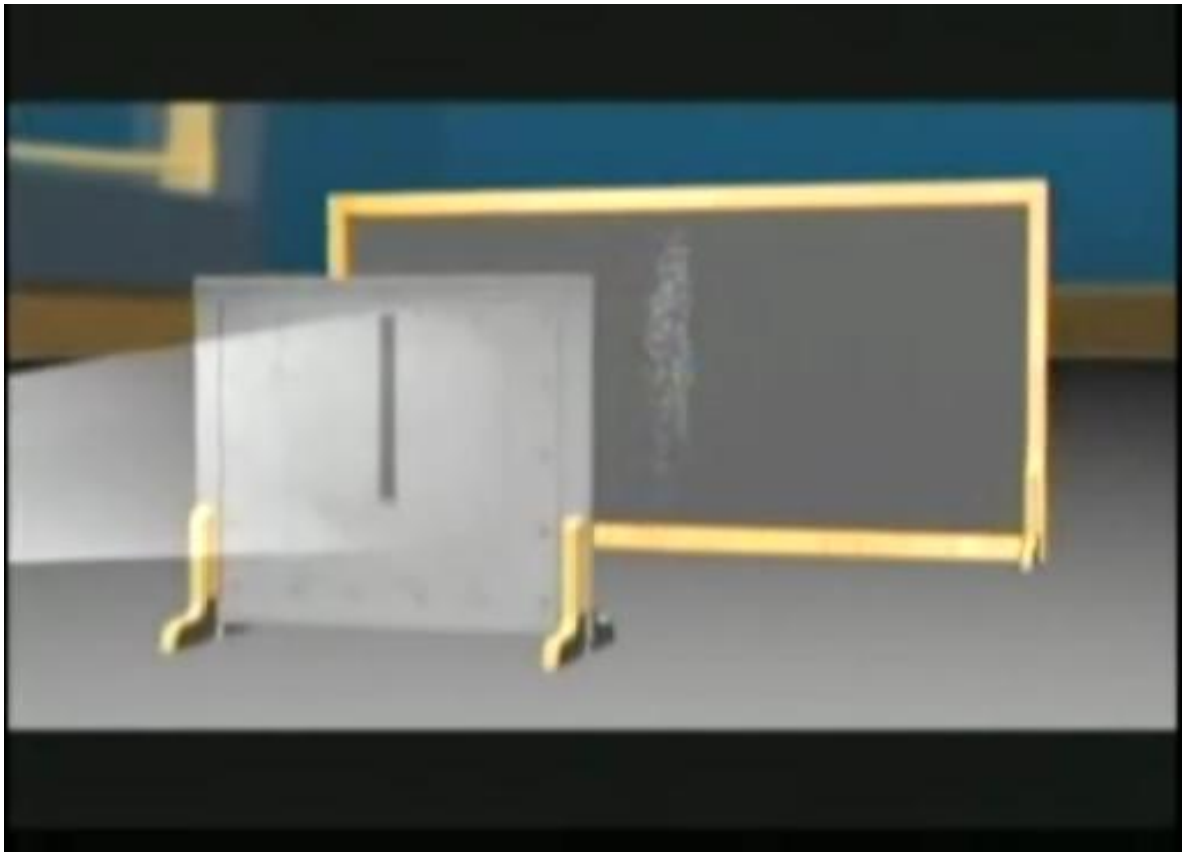
Aquí el experimento se realiza con electrones, partículas subatómicas de carga negativa y masa muy reducida (las corrientes eléctricas comunes están formadas por flujos de electrones). Al atravesar los electrones una rendija (caso **3a**), se reproduce un patrón de señales análogo a los casos 1a (partículas de mármol) y 2a (ondas de un líquido). Pero si en lugar de una rendija el muro tiene dos (caso **3b**), lo que se obtiene es un patrón de difracción similar al que se obtuvo con ondas (2b), y no lo que esperaríamos en principio, el patrón que dejan las partículas de mármol (1b).

¿Qué ocurre?¿Cómo es que las partículas microscópicas, en este caso electrones, se comportan como ondas?¿Sería posible que los electrones estuvieran interactuando entre ellos, interfiriéndose y dando lugar al patrón de interferencia que observamos en el muro?

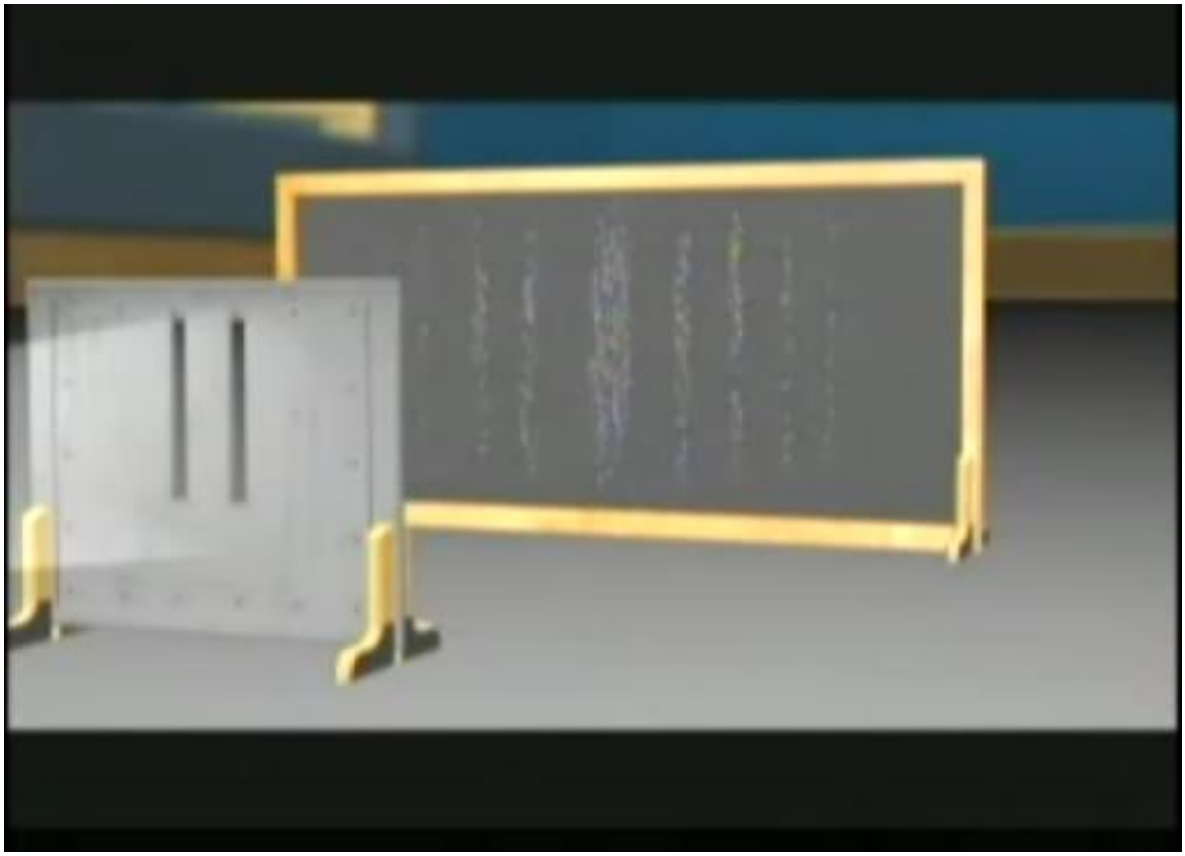
03:00
Para comprobar esta posibilidad, lanzamos electrón a electrón. Sorprendentemente, ¡el patrón de difracción se vuelve a producir! Esto quiere decir que cada electrón, cuando tiene que cruzar un par de rendijas, interfiere consigo mismo y da lugar a la señal observada. En realidad, tiene asociada lo que los físicos denominan una función de onda, con una probabilidad de cruzar cada una de las rendijas. Los electrones (y no sólo ellos) se comportan en ocasiones como ondas y otras como partículas, existe una dualidad en su comportamiento.

¿Y si quisiéramos "engañar" al electrón, mirar con detalle por donde pasa?

03:50
Para ello desarrollamos un dispositivo que observa las rendijas y determinaría por cual ha cruzado. Ahora sabemos que ha entrado por una cualquiera de las rendijas y no por la otra. Sin embargo... lo que observamos es que el patrón de interferencia no se ha producido en esta ocasión. Lo que se observa en el muro posterior es un patrón tipo partícula macroscópica (1b).



*Caso **3a**. Física Cuántica, con los electrones cruzando una rendija*



*Caso **3b**. Física Cuántica, con los electrones produciendo un patrón de interferencia, similar a las ondas del caso 2b, al cruzar dos rendijas*

Esto es, el hecho de observar con detalle ha cambiado lo que ha sucedido. La función de onda del electrón ha colapsado, eliminando correlaciones que antes sí estaban presentes. Y este fenómeno es probablemente una de las consecuencias más importantes de la Física Cuántica: el observador no es algo objetivo que está fuera de lo observado, que es independiente de él; forma parte del sistema y por tanto tiene que ser estudiado con juntamente.

VEINTISIETE: Teoría sobre los primeros momentos después del Big Bang

La Teoría Standard que nos habla del universo en expansión se apoya en 4 hechos derivados de la observación:

1) El movimiento general de recesión de las galaxias.
2) La composición química del universo.
3) El fondo de microondas (radiación isotrópica de microondas).
4) El fondo de radiación infrarroja.

Se acepta que los mecanismos que obraron en la producción de la materia, tal como la vemos actualmente, fueron de lo más simple a lo más complejo. Así, siempre hubo una progresión hacia un futuro más complejo que el pasado. 14.000 millones de años después del origen del universo surge la estructura más compleja, un ser vivo capaz de pensarse a sí mismo y a lo que lo rodea.

Si miramos hacia atrás debemos concluir que todo lo visible estuvo concentrado en un estado de alta densidad y altísimas temperaturas. Al expandirse el universo se fue enfriando, esto provocó a su vez el cambio de la estructura de la materia y la forma de la energía. Estos cambios duraron apenas unos pocos minutos y determinaron la historia posterior del universo.
Para analizar ese pequeño lapso se deben respetar dos principios:

1) las leyes que gobiernan el comportamiento de la materia son las mismas que existieron en un principio.
2) no se pueden postular condiciones especiales, creadas ad-hoc para explicar los sucesos acaecidos.

Sólo se puede hablar con alguna seguridad de lo que ocurrió después del primer centésimo de segundo, de lo que ocurrió previamente no, porque no se sabe cómo se comportaban las partículas en condiciones tan especiales. Luego del primer centésimo de segundo empezaríamos con una temperatura de 10^{11} K y una densidad de 3.8 x 10^{17} mayor que la densidad del agua. De antes del primer centésimo de segundo sólo puede especularse. Hasta 10^{-45} (era de Planck) los teóricos suponen un universo muy sencillo. Un solo tipo de partículas interactuando entre sí a través de una fuerza (la superfuerza, que incluye como aspectos particulares a las 4 fuerzas conocidas). El universo era, en ese momento, supersimétrico. Esa estructura de la materia y ese comportamiento de la energía cambiaron con la expansión y el consecuente enfriamiento.

10^{-45} seg.: La temperatura descendió hasta 10^{33} K (10^{19} Gev) y la densidad era de 10^{94} gramos (densidad de Planck). El modelo standard postula que todo comenzó con una singularidad, y una singularidad implica el cese de las leyes de la física conocidas. Se carece además de la herramienta matemática apta para aplicar juntas las leyes de la Relatividad General y de la Mecánica Cuántica.
En algún momento anterior la gravedad se separa de la superfuerza. Así, desde muy temprano la gravedad comenzó a hacer sentir sus efectos. Esto implicó que se acabara el reinado de la superfuerza y el estado de supersimetría.

Se materializaron bosones (spin entero, portadores de energía) y fermiones (spin semi-entero, portadores de masa) que se intercambiaban entre ellos. A los bosones se los llama bosones X y bosones $\overline{X}$ (partículas y antipartículas).
La violenta expansión hizo que la temperatura siguiera bajando, lo que causó que los bosones dejaran de materializarse, por lo que comenzaron a anularse entre ellos.

10^{-35} seg. : La temperatura baja a 10^{19} K, esto hizo que se separara la fuerza nuclear fuerte. En ese momento actúan entonces 3 fuerzas distintas, la gravedad, la fuerza nuclear fuerte y la fuerza electrodébil (remanente de la superfuerza). A este lapso se lo conoce como Era de los Quarks. Los quarks se materializaban a partir de la energía, y se comportaban como partículas libres (actualmente sólo se los encuentra formando otras partículas, protones, neutrones, etc.). Los quarks se unen cuando cae nuevamente la temperatura (proceso de confinamiento de los quarks). Se van formando estructuras cada vez mayores, es el proceso de formación de la materia tal cual la conocemos actualmente. Aparecen así los protones y los neutrones. Se supone que algún quark puede haber quedado libre, navegando por el universo.
Los protones y neutrones se intercambiaban, interactuando entre sí con gran violencia (cosa que no puede reproducirse en los laboratorios actuales ya que no puede llegarse al nivel de energía requerido).
El universo está compuesto, en ese momento, por fotones, electrones, protones, neutrones y neutrinos (más sus correspondientes antipartículas). En ese momento se formaba igual cantidad de materia que de antimateria.

0,01 seg. (primer centésimo de segundo) : La temperatura es de 10^{11} K. El universo sigue siendo un plasma en equilibrio térmico, pero ya no se materializan piones. Esto permite que utilicemos, para analizarlo, la herramienta matemática llamada mecánica estadística. Ella dice que los protones y neutrones aun no pueden unirse. Chocan violentamente entre sí, por ejemplo, un neutrón (n) más un neutrino (μ) se transforman en un protón (p) y un neutrino, y a la inversa. Se supone que había un protón o un neutrón (nucleón) por cada 10^9 millones de electrones y neutrinos.

3 minutos 3 seg. : Continúan las interacciones entre partículas, la temperatura ha bajado muchísimo (3.10^9 K), lo que impide la materialización de electrones y positrones, por lo cual comienzan a aniquilarse mutuamente lo que ya existen (se calcula que por segundo desaparecía el 10 % de los electrones y positrones del universo). A su vez, como los protones fuera del núcleo se aniquilan en 15 minutos, derivando en un protón, un electrón y un neutrino electrónico (μ e), estos también comienzan a desaparecer.

3 minutos 46 seg. : Era de la nucleosíntesis. La menor energía permite que los protones y los neutrones se unan gracias a la fuerza nuclear fuerte, formando los núcleos atómicos.
1 p + 1 n = H^2 (deuterio)
H^2 + 1 n = H^3 (hidrógeno)
H^3 + 1 p = He^3 (helio 3)
H^3 + 1 p = He^4 /helio 4)
Aparecen el hidrógeno y el helio.

3 min. 41 seg. : Quedan igual número de electrones que de protones.

A partir de aquí no ocurre nada importante en el universo hasta que tenga **380.000 años**. La expansión continúa, la temperatura es de 3.000 K. Con esta temperatura cesan todas las interacciones entre partículas, ya hay átomos y partículas, cada núcleo de H y He capta sus electrones (H, 1 electrón por protón – He, 2 electrones por protón). Así, no quedan electrones libres y ya no pueden anularse con los fotones. Los fotones pueden entonces comenzar a recorrer todo el universo en cualquier dirección (el universo ya no es 'opaco' para ellos), el universo se hace 'transparente' para los fotones.
El universo es 1.000 veces más pequeño que ahora, 3.000 veces más caliente y 1.000.000 de veces más denso, pero los átomos ya son como los conocemos. Comienza lo que se llama:

Edad oscura: No hay estrellas que emitan radiación. Esto dura hasta la aparición de las primeras estrellas (**500 millones de años** después).

De un universo gobernado por la radiación y la energía pura se pasa a un universo gobernado por la materia. Se desacoplan materia y energía. Comienza la formación de estrellas y galaxias. La composición del universo era de 73 % de H y 27 % de He.

Todas las partículas siempre se presentan junto con su antipartícula (misma masa, mismo spin, distinto signo de carga). Al comenzar el universo se formó igual cantidad de materia que de antimateria, pero actualmente no se encuentran anti-átomos. Esto plantea un problema, ya que no se puede explicar de dónde viene esta asimetría.
Una posible respuesta es que la bola de fuego original formó sólo partículas, pero para sostener esto hay que dar explicaciones ad-hoc, por lo que lo más lógico es que al principio se haya formado igual cantidad de materia que de antimateria, rompiéndose luego la simetría.
La simetría que gobierna las interacciones entre partículas es la simetría CPT. Antes se pensaba que esta simetría siempre se cumplía, pero luego se demostró que puede ser violada.
Si la simetría fuera absoluta entre materia y antimateria, toda la materia se hubiera aniquilado con la antimateria generando fotones de alta energía (ley de la conservación de la energía). Si hubiera sido así, en el universo habría sólo fotones (radiación pura).
La teoría dice que cuando la edad del universo era de 10^{-35} seg. había igual número de partículas que de antipartículas. Supongamos que un bosón genera 2.000 millones de quarks y 1.000 millones de antiquarks, y otro bosón genera 1.000 millones de quarks y 2.000 millones de antiquarks. Esto llevaría a la aniquilación mutua y a la inexistencia de la materia.
Pero en ese momento se produjo una violación de la simetría, así, la desintegración de los bosones X produce 1.000 millones + 1 quarks y 1.000 millones de antiquarks, con los anti-bosones igual. Esto llevó a la aniquilación, pero por cada bosón quedó un quark. Esto formó el universo, y explicaría la ausencia de antimateria en él.

La materia entonces formó estrellas, donde, gracias a las reacciones nucleares, se formaron elementos más pesados. Esto fue aumentando la complejidad del universo.

Para aclarar todo lo anterior, recomiendo remitirse al libro electrónico situado en:

http://www.astrocosmo.cl/h-foton/h-foton_00.htm

Allí podrán buscar eso y mucho más.

FOTOCOPIAS:

Edad	Temp.(K)	Densid.	Suceso
Big Bang	Infinito	Infinita	Condiciones desconocidas
10^{-48} s	10^{33} (10^{19} Gev)	10^{94} gr	Superfuerza. Supersimetría. Bosones y fermiones en interacción (era de Planck) - Desacople de la gravedad. Fotones, electrones, neutrinos
10^{-35} s	10^{26} (10^{15} Gev)	?	Igual condición. Bosones X y $\bar{X}$ Separación de la fuerza nuclear fuerte
10^{-10} s	109	?	Era de los quark y confinamiento. Protones y neutrones. Desacople electradébil
0,01 s	10^{11}	$3,8.10^{7}$ > agua	Fotones, electrones, neutrones, protones, neutrinos Un nucleón por cada 10^{9} fotones, electr. y neutrinos
1,10 s	10^{10}	$3,1.10^{6}$	Cesan las interacciones de los neutrinos Protones 76%. Neutrones 24%
3m 03s	3.10^{9}	—	Desintegración de los neutrones Protones 86% Neutrones 14%
3m 46 s	$0,9.10^{9}$	—	Era de la nucleosíntesis Protones 87% Neutrones 13%
34m 41s	3.10^{8}	9,9	Desaparición de los positrones
380.000 años	3000	+	Cesan todas las interacciones. Átomos neutros Desacople de la materia y la radiación Universo diáfano para la radiación Hidrógeno 75%. Helio 27% (H^2, Li^3). Era oscura
Menos de 10^{9} años		—	Formación de las primeras galaxias
3.10^{9} años		—	La mayoría de las galaxias ya formadas (Vía Láctea)
$13,8.10^{9}$		$4,5.10^{-30}$	Sistema solar formado.

VEINTIOCHO: RADIACIÓN ISOTRÓPICA DE FONDO

La cosmología se hace cada vez más precisa y menos especulativa gracias a los instrumentos de última generación. Esto estrecha los lazos entre la cosmología y la física. Una importante diferencia entre ambas es que la física trata con 'sistemas aislados', objetivos que pueden definirse y limitarse con exactitud (óptica, fluidos, partículas, termodinámica, etc.). La cosmología en cambio, trata de todo el universo, de la totalidad de las cosas. Por esto no tiene un límite definido, no se pueden hacer comparaciones para facilitar los análisis. Esto obligó a fijar un punto de partida, basado en los postulados de simetría.

Principio cosmológico: Fluctuaciones aparte, el universo debe verse siempre de la misma manera desde cualquier lugar que se lo observe.

Pero el universo evoluciona, lo que implica cambios. Para que se mantenga el principio cosmológico deben efectuarse las observaciones en forma simultánea, lo que se contradice con la Teoría de la Relatividad Especial. Para salvar este problema, hacia 1956 se propuso el llamado Principio Cosmológico Perfecto, que dice que, en gran escala, los rasgos distintivos del universo siempre son los mismos, no sólo desde el punto de vista del espacio sino también desde el punto de vista del tiempo.

En 1948 se efectuaban análisis sobre la 'muerte térmica' del universo a la luz de la 2° Ley de la Termodinámica. Se propuso entonces que el continuo aumento de la entropía podría ser compensado por un orden nuevo. Este fue el nacimiento de la Teoría del estado continuo. Según ella, el universo no tuvo principio ni tendrá fin, lo que se observa ahora es lo mismo que se observó antes y lo mismo que se observará siempre.
¿Cómo se condice esto con la expansión del universo? La Teoría del estado continuo dice que a medida que la expansión disminuye la densidad de la materia, se crea nueva materia que compensa la disminución (se calculó que se debe crear un átomo de H por Km^3 por siglo, o sea 10^{-24} gramos de materia por cm^3 por segundo). Esta nueva materia se crea de la nada.

Esta teoría se adaptaba muy bien a los datos proporcionados por la observación de ese entonces, tanto que se convirtió en rival de la teoría del Big Bang. Pero, la teoría del estado continuo empezó a tambalear al descubrirse los primeros cuásares. Los cuásares son muy lejanos, a medida que se observa más allá en el espacio su número aumenta y luego comienza a disminuir (formando como una nube, sería la 'edad de oro de los cuásares', que ocupó los primeros 2.000 millones de años del universo). Esto demostraría que no todo es siempre igual en el universo, algo cambió.

La teoría del estado continuo recibió el golpe de gracia en la década de 1950. En ese momento se estaba estudiando la nucleosíntesis de los elementos. Se concluyó que la energía necesaria para que se diera la misma existió sólo en un momento, luego la energía disminuyó rápidamente con la expansión. En 1964, nuevas investigaciones confirmaron los resultados. En 1965 se demostró que la energía de la bola de fuego original varió de tal manera que actualmente su frecuencia debería tener 4 características:

1) Estar confinada en el rango de las micro-ondas (en la banda de radio, entre 1 mm y 1 cm.)
2) La radiación debe llenar todo el universo, por lo que debe poder recibirse desde todas las direcciones del espacio.
3) La curva de dicha energía debe seguir la curva teórica descripta por Planck (radiación de un cuerpo negro).
4) La temperatura estaría unos pocos grados por arriba del cero absoluto (K).

En 1964, técnicos de la Bell Telephonic trabajaban en una antena para mejorar las comunicaciones por satélite. Esta antena era utilizada también para estudiar la radio-energía proveniente del espacio. En los registros aparecieron contaminaciones, una señal de 4080MHs con una longitud de onda de 7,35 cm.
Luego de descartar que la contaminación proviniera de fuentes terrestres, se llegó a la conclusión de que dicha radiación correspondía a una temperatura de 2,725 (+ - 0,01) K. La densidad de radiación sería de 10^{-12} gramos por cm^3 (menos que la que se recibe desde una galaxia).

Apuntando la antena en diversas direcciones la radiación en cuestión aparecía siempre. La energía corresponde a la que habría que esperar si el universo hubiera aumentado 1.000 veces de tamaño desde el momento en que su energía era lo suficientemente alta para que estuviera formado por materia y radiación interactuando violentamente entre sí millones de veces por segundo, o sea, en perfecto equilibrio térmico. Estas conclusiones avalaron el origen del universo en una explosión. Se descartó entonces la teoría del estado continuo, el universo no fue siempre igual, tuvo un comienzo (BB).

Las condiciones físicas imperantes en el universo primigenio permitían que la materia (partículas) y la radiación (fotones) interactuaran millones de veces por segundo. El universo era un plasma opaco en equilibrio térmico.

Opacidad: Actualmente el universo es muy transparente, puede verse hasta 13.000 millones de años luz de distancia. Al lapso que mediaba, en los instantes iniciales del universo, entre una interacción y otra, se lo llama 'tiempo medio libre', y era 100 veces menor que lo que tardaba el universo en aumentar su radio un 1% (a lo que se llama 'tiempo de expansión característico'). Las partículas estaban interactuando de manera tal que no se podían desplazar, así, los fotones no podían alcanzar al espacio que aumentaba a tanta velocidad. Los fotones no podían llevar información a través del universo, el universo era opaco.

Equilibrio térmico: Había colisiones en forma caótica millones de veces por segundo, pero los fotones estaban en equilibrio, ya que la cantidad de fotones y partículas que estaban interactuando en determinado momento era igual a la cantidad de fotones y partículas que se encontraban en el 'tiempo medio libre'. Esta es la condición necesaria para llegar a la situación descripta con las fórmulas de Planck (cuerpo negro).

Al expandirse el universo también se va enfriando. Si una partícula y una antipartícula se encuentran se aniquilan mutuamente, perdiendo su masa pero compensando esta pérdida con emisión de fotones. Esto significa que el enfriamiento del universo no se daba a la velocidad que correspondería de acuerdo a su expansión. La temperatura del universo era (en los momentos iniciales) proporcional a la inversa del radio del mismo.

$$\Delta T = \frac{1}{R}$$

Al tener el universo 380.000 años, la temperatura bajó a 3.000 K (temperatura que no permite las interacciones entre partículas). Existían entonces protones libres (uno para el hidrógeno, 2 para el deuterio y el helio). Cada núcleo tomó entonces los electrones que corresponde (uno para el H, 2 para el deuterio y el helio), formando los primeros átomos. No quedaron entonces electrones libres. Esto hizo que los fotones ya no interactuaran con los electrones y pudieran recorrer libremente el universo. Esto sucedió durante lo que se llama la 'edad oscura del universo', sólo existía gas de H y He y nada más (no había estrellas ni radiación suficiente para que el gas se excitara y brillara). El universo era totalmente oscuro.
Ya no había compensación entre la baja de temperatura del universo con respecto a la expansión del mismo, por lo que el universo comienza a enfriarse más rápidamente, de manera inversamente proporcional al cuadrado del radio.

$$\Delta T = \frac{1}{R^2}$$

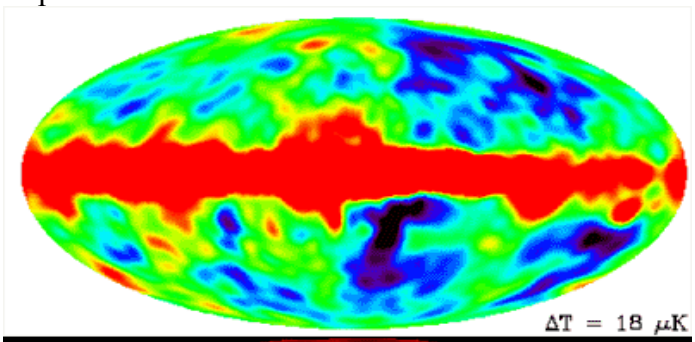
Los fotones siguen portando la información del universo que tenía interacciones, y aún la portan. Los cálculos dicen que cuando había equilibrio térmico la longitud de onda de los fotones era de 10.000 A°(Armstrong) y la densidad del universo era de 1.000 millones de veces mayor que la actual, y la separación entre fotón y fotón también era de 10.000 A°. Al expandirse el universo aumentó la longitud de onda de los fotones y también la separación entre ellos, en igual proporción (el aumento de la longitud de onda es el corrimiento cosmológico al rojo). Así, los fotones están mostrando que provienen de un universo en equilibrio térmico, un universo formado por plasma. Esto avala la teoría del BB. Cuando el universo duplique su radio actual la temperatura será de 1,35 K. La radiación de fondo es un fósil del universo primigenio.
Con los telescopios actuales puede verse más allá de 12.000 millones de AL de distancia, la penetración del radiotelescopio es mayor, ya que llega a antes de que el universo tuviera 380.000 años.

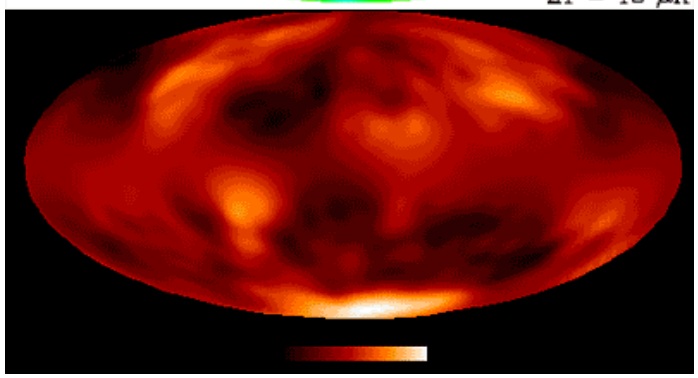
En 1941 la radiación había sido detectada por los astrónomos ópticos (analizando el espectro de la estrella Z Ofiuco se vieron líneas que no correspondía que estuvieran allí, sino que provenían de átomos ubicados entre la estrella y la Tierra. La línea en cuestión está dividida en 3 componentes –que corresponden a la molécula de cianógeno-, uno de los componentes corresponde al estado más bajo de energía de los electrones del átomo de H, y los otros 2 componentes corresponden al estado más alto. Se calculó que esto se debía a C y Ni sometido a una energía que correspondía a 2,7 K. Pero nadie pensó que esto correspondía a una temperatura de fondo del universo).

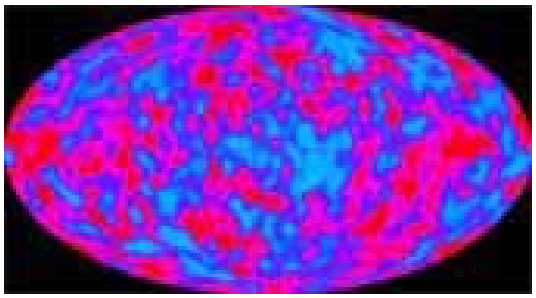
Esta es la radiación isotrópica de fondo (iso=igual,tropos=cambio). En cualquier dirección en que se apunte la antena de un radiotelescopio la temperatura es la misma, aunque no es absolutamente homogénea. Hay lugares donde es un poco mayor, lugares de anisotropía. Hay dos satélites (primero se lanzó el COBE y luego el WMAP) que estudian esta radiación. Permiten ver que en el universo hay lugares más calientes que el resto.

El universo primigenio estaba en un estado térmico casi perfecto, pero había fluctuaciones de la densidad, a mayor densidad correspondía mayor temperatura. De esta manera puede conocerse el tamaño de las fluctuaciones cuánticas que tenía el universo primigenio (la isotropía en el universo es de 1/100.000).-

Imágenes formadas a partir de los datos del COBE:







La polarización de la radiación cósmica de fondo

por Alejandro GANGUI

del Instituto de Astronomía y Física del Espacio (IAFE), CONICET
Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA.

(El presente artículo apareció en la revista argentina CIENCIA HOY Nº 74, Vol. 13, abril-mayo 2003, pp. 56-61, que edita la Asociación Civil Ciencia Hoy, por cuya cortesía lo insertamos aquí)

'Los acontecimientos borran a los acontecimientos; inscripciones grabadas sobre otras inscripciones, hacen las páginas de la historia de los palimpsestos.'

–François Auguste René, Vizconde de Chateaubriand. Memorias de Ultratumba, Libro I, Cap. 4 (1812)–.

La radiación cósmica de fondo nos llega como un vestigio del universo primordial. Fue descubierta por azar en 1964 y es hoy considerada una de las evidencias más sólidas del modelo del Big Bang. En 1992, el descubrimiento de 'anisotropías' en su temperatura efectiva (variaciones dependientes de la dirección de observación), nos mostró las tan ansiadas pequeñas perturbaciones cosmológicas germinales en el plasma primordial, que luego de eones de evolución devendrían en las grandes estructuras galácticas que vemos hoy. Más tarde, otras observaciones con mayor resolución angular permitieron a los científicos deducir la geometría a gran escala de nuestro universo. Los resultados mostraron que, de todas las geometrías permitidas por la relatividad general, los fotones de la radiación de fondo habían viajado por un espacio físico que los matemáticos llaman euclídeo, esto es, exento de curvatura espacial (o sea, un universo 'plano'). En el mes de septiembre del año 2002, miembros de la colaboración DASI (por Degree Angular Scale Interferometer, o Interferómetro de escala angular de un grado) anunciaron un nuevo descubrimiento mayor: la radiación de fondo posee una pequeña 'orientación', o sea está polarizada. Este es un efecto de

suma importancia y se venía buscando desde 1968, año en el que el astrofísico inglés Martin Rees predijera su existencia.

Pero la radiación cósmica de fondo deviene polarizada solo si existe una 'dinámica' particular en estas diminutas semillas primordiales a la base de la formación de las galaxias. Es por ello que su importancia mayor radica en que no solo es una muestra de las pequeñas inhomogeneidades presentes cuando el universo contaba, digamos, con unos 100.000 años de vida, sino que, además, nos informa sobre la manera en que dichos grumos primordiales 'se movían' durante esas épocas remotas. Este es un nuevo hallazgo que reafirma el marco teórico donde se sustenta la cosmología actual.

La mayor parte de la luz que nos rodea es no polarizada. Este tipo de radiación está constituido por trenes de ondas electromagnéticas que oscilan en planos perpendiculares al de propagación y donde cada plano está distribuido al azar. Sin embargo, la luz no polarizada puede adquirir una orientación de oscilación privilegiada cuando se transmite o refleja en un medio, como cuando atraviesa la lente de un par de anteojos de sol o se refleja en la superficie de un lago. En estos casos, la radiación incidente es reemitida mayoritariamente en forma de ondas que oscilan todas en un mismo plano. Designamos a este tipo de radiación con el nombre de luz
linealmente polarizada.

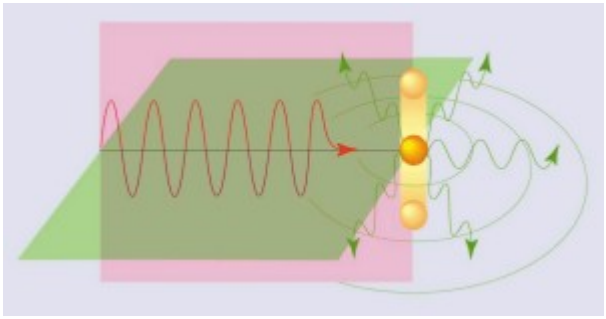


Figura 1. Una onda electromagnética (en rojo) polarizada linealmente oscila en un plano dado (en rosa). Cuando alcanza a un electrón (representado como una esferita naranja) la onda le imprime un movimiento oscilatorio que provoca la emisión de la onda difundida (en verde). Esta onda resultante se concentra esencialmente en el plano perpendicular al movimiento del electrón (plano verde) y está polarizada como la onda incidente.

Con la expansión y enfriamiento del universo, la radiación se desacopla de la materia neutra y es en ese preciso momento que, según las predicciones del Big Bang, la radiación de fondo debió adquirir un pequeño nivel de polarización. Pese al optimismo inicial de los cosmólogos, debieron pasar más de treinta años para lograr detectar esta nueva señal. Y no es extraño que esto fuese así, ya que el nivel de la polarización es de apenas un 10 por ciento del de las ya pequeñas anisotropías en la temperatura. Esto es, la polarización de la radiación de fondo tiene una amplitud no mayor que unos pocos microkelvins, un verdadero desafío experimental.

¿Cuáles son los mecanismos responsables de la polarización? En primer lugar, debemos saber que cuando una onda electromagnética incide sobre una partícula cargada eléctricamente -un electrón libre en el caso que nos interesa ahora, por ejemplo-, el campo eléctrico de la onda

incidente imprime a la partícula un movimiento oscilante en la misma dirección. Esta carga en movimiento emite entonces un tipo de radiación llamada radiación dipolar. Esta radiación dipolar se concentra, esencialmente, en el plano ortogonal a la dirección de oscilación. Segundo punto importante, el campo de radiación resultante de la interacción con el electrón, estará polarizado de idéntica manera que la onda electromagnética incidente (figura 1).

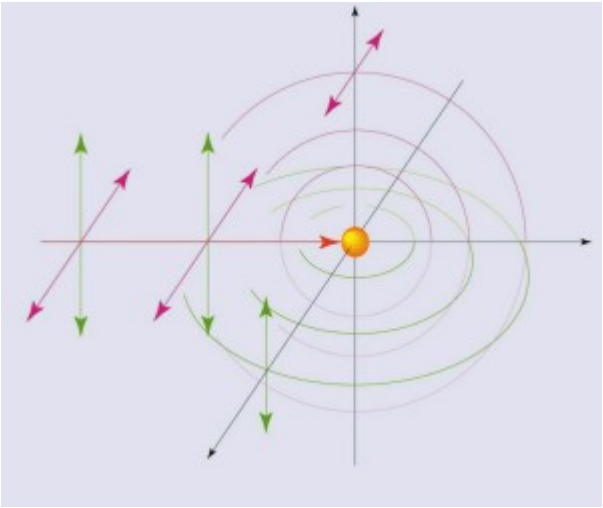


Figura 2. Si la onda electromagnética incidente es no polarizada, puede de todas maneras ser representada como la suma de dos ondas linealmente polarizadas, una a lo largo de la línea de visión (en rosa), la otra a lo largo de la dirección perpendicular (en verde). La radiación difundida inducida por la primera componente está contenida en el plano perpendicular a la línea de visión y no puede ser detectada. Solo llegará al observador la segunda componente (en verde) de la radiación incidente, y polarizada como esta.

Bien, estas dos reglas simples nos permitirán comprender el origen de la polarización impresa en la radiación de fondo en el momento de su última difusión contra la materia, cuando en esta comenzaban a formarse los primeros átomos neutros, y estos últimos se hicieron 'transparentes' a la radiación.

Este momento tan especial en la historia de nuestro universo, es conocido en la jerga como el período de 'la recombinación' de la materia neutra, a pesar de ser la primera vez que los iones positivos (esencialmente protones) y los electrones se 'combinan' para formar átomos neutros. Antes de la recombinación, la radiación de fondo no estaba polarizada.

Una onda no polarizada puede describirse como la suma de dos ondas polarizadas en direcciones perpendiculares entre sí (figura 2). Consideremos la llegada de dicha onda sobre un electrón, descomponiéndola en una primera onda polarizada según nuestra línea de visión hacia el electrón (flechas rosas) y en una segunda onda en dirección perpendicular (flechas verdes). La componente polarizada a lo largo de la línea de visión del observador (flechas rosas) generará una oscilación del electrón a lo largo de esta misma línea de visión. Como lo explicamos más arriba, la radiación dipolar difundida por este movimiento estará casi totalmente contenida en el plano perpendicular a la línea de visión, y en consecuencia no será detectada por el observador.

Solo será observable la componente resultante de la radiación inducida por la otra componente de la onda incidente (flechas verdes), puesto que esta imprime al electrón un movimiento perpendicular a la línea de visión. Así, para el observador, todo sucede como si él recibiese de parte del electrón una luz difundida inducida solo por la componente polarizada perpendicularmente a la línea de visión (las flechas verdes). En virtud de la segunda regla que mencionamos más arriba, la radiación resultante debe poseer la misma dirección de polarización. En conclusión, el observador solo recibe una parte de la radiación incidente sobre la partícula cargada (las flechas verdes) y esta fracción está linealmente polarizada.

Primer año de observaciones con el satélite WMAP

El observatorio norteamericano Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP o Sonda de Anisotropías de Microondas Wilkinson) fue lanzado al espacio en junio de 2001. Luego de unos meses de tránsito, WMAP se ubicó en una región gravitatoria semiestable alineada con el Sol y la Tierra, que sigue a la Tierra en su órbita, y que está alejada de esta en unas cuatro veces la distancia que nos separa de la Luna (denominada punto de Lagrange L2 y alineada en la forma Sol-Tierra-L2). Allí, WMAP comenzó a recoger datos de la radiación de fondo en cinco frecuencias distintas, algo necesario para la efectiva sustracción de las señales espurias inherentes a las mediciones del fondo de microondas, y con una resolución angular treinta veces superior a la de su antecesor, el satélite COBE (ver figura I).

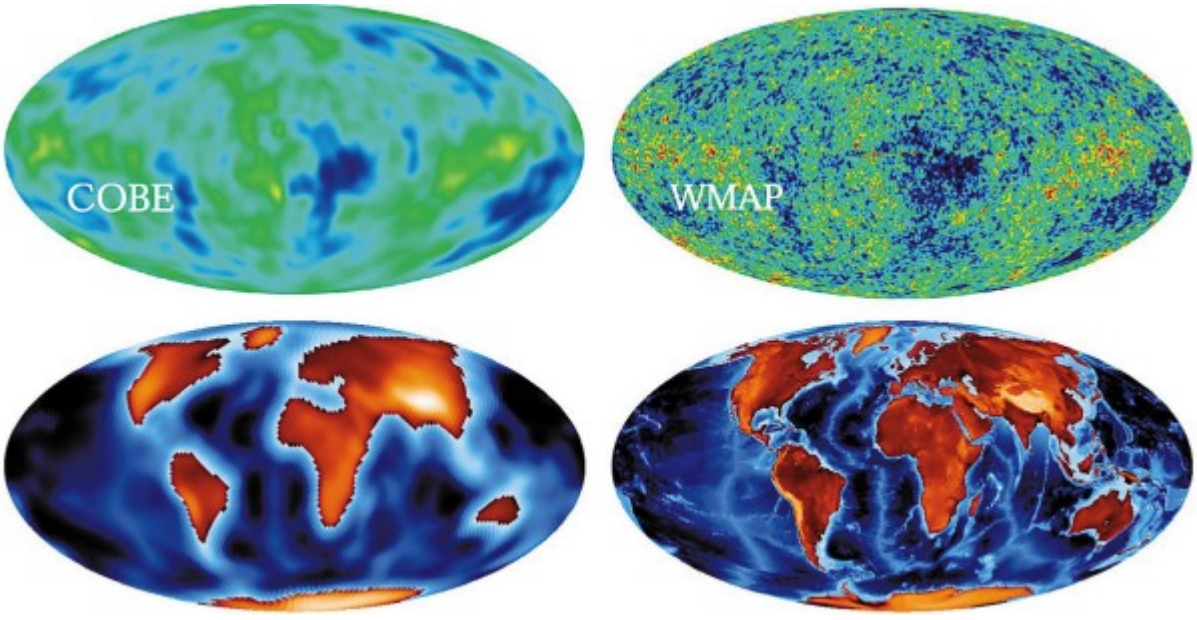


Figura I. La Tierra vista por COBE y por WMAP. Los mapas superiores muestran el cielo de microondas en decenas de microkelvins de temperatura efectiva, como fuera detectado por el satélite COBE en 1992, el primero en descubrir las anisotropías primordiales a la base de las grandes estructuras de nuestro universo (imagen izquierda), y por el satélite WMAP, más de 10 años más tarde (imagen derecha). La resolución angular de los detectores de COBE es de unos 7 grados y la imagen inferior izquierda nos muestra cómo se vería la Tierra con esa resolución (recuérdese que el diámetro aparente de la Luna llena

es de medio grado, o sea unas 14 veces más allá de la capacidad de COBE). Los 'ojos' de WMAP, por el contrario, 'miran' con una resolución de unas 20 centésimas de grado angular y son por ello más de 30 veces más agudos que los de su antecesor. La imagen inferior derecha nos muestra la superficie de la Tierra vista con estos nuevos ojos. El futuro proyecto de satélite Planck Surveyor, de la Agencia Espacial Europea, prevé una resolución angular incluso varias veces mejor. (Imágenes cortesía de COBE, WMAP, E Hivon y K Gorski).

El pasado mes de febrero, miembros de la colaboración WMAP anunciaron los resultados del análisis del primer año de observaciones de anisotropías en la temperatura y en la polarización de la radiación de fondo, confirmando y mejorando la precisión de varias otras experiencias previas, incluyendo a DASI, el primer experimento que detectara la polarización del fondo cósmico (ver nota central).

Pero WMAP fue aún más lejos, pues logró una cobertura total del cielo (solo posible mediante el empleo de satélites) y midió la polarización en un rango muy amplio de escalas angulares sobre el cielo de microondas. Esto último le permitió 'cruzar datos' entre las anisotropías en la temperatura y aquellas en la polarización, lo que condujo a descubrir un exceso notable en la intensidad de la radiación presente en escalas angulares muy grandes.

Este exceso a grandes escalas en la 'correlación cruzada' (como se llama en la jerga a esta señal) era en cierta forma algo que los cosmólogos esperaban encontrar. Y su explicación teórica más simple es adjudicarla a la existencia de una etapa de 'reionización' global del universo en épocas posteriores a la recombinación. Ahora bien, ¿qué mecanismo astrofísico habría podido inyectar la cantidad suficiente de energía como para volver a ionizar a la mayoría de la materia neutra (esencialmente hidrógeno) de nuestro universo?

La explicación más plausible es que hayan sido las primeras estrellas que se 'encendieron' en nuestro universo. De ser así, estos nuevos datos nos permiten deducir la época de su formación, y los miembros de la colaboración WMAP obtuvieron un tiempo de aproximadamente 200 millones de años luego del Big Bang. Este sería, entonces, 'el comienzo del fin' de las llamadas 'eras de oscuridad' de nuestro universo.

VEINTINUEVE: TEORÍA DEL MODELO INFLACIONARIO

El modelo estándar se basa en 5 premisas fundamentales:

1) Las leyes fundamentales de la naturaleza son invariables.
2) El universo primigenio estaba constituido por un plasma en equilibrio térmico en un estado de expansión.
3) La Teoría de la Relatividad describe correctamente los efectos gravitatorios.
4) La expansión modificaba a la energía y a la materia por igual y en la misma proporción.
5) Los cambios en la energía y la materia fueron lo suficientemente suaves para no modificarlas totalmente.

Estos 5 presupuestos permitieron aceptar que:

1) A medida que el universo se expande las galaxias se alejan con velocidades proporcionales a la distancia entre ellas.
2) La núcleo-síntesis primitiva se dio en los primeros 3 minutos de la existencia del universo.
3) El universo está lleno de radiación (radiación isotrópica de fondo).

Pero, con el paso del tiempo, nuevos estudios y reflexiones llevaron a cuestionar el modelo estándar. Por ejemplo:

1) El Modelo Estándar plantea que el universo comenzó con una explosión, pero no explica porqué fue así.
2) La gravitación fue la primera fuerza que se separó de la Superfuerza (al final de la edad de Planck). Si esto fue así, ¿porqué se produjo una explosión en contra de los efectos gravitatorios? ¿Porqué la inmensa masa, acumulada en tan pequeño espacio, no quedó como un agujero negro?
3) La radiación de fondo indica que la temperatura del universo primigenio era homogénea (en la actualidad se registran 2,7 K). El Modelo Estándar dice que todas las regiones del universo se expandieron a tal velocidad que no pudo haber contacto entre ellas (como para homogeneizar la temperatura). ¿Cómo se explica esta contradicción? (problema del horizonte).
4) En el principio, según la teoría, se formaron los monopolos (partículas muy pesadas). Tendrían tanta masa y serían tantos que el universo debiera haber colapsado por autogravitación.
5) Una explosión es un proceso caótico, sin embargo los efectos del Big Bang fueron muy homogéneos (en el universo actual el corrimiento cosmológico al rojo es uniforme en todas las direcciones).

En 1980 apareció la 'nueva cosmología'. Alan Guth, un físico de partículas, negó el quinto presupuesto (el de los cambios suaves) y dio origen a las teorías basadas en un universo inflacionario. Según esta teoría:

1) El universo es plano (hasta el límite de la visibilidad).
2) La distribución actual de la materia (galaxias, grupos de galaxias, cúmulos, etc) es consecuencia de fluctuaciones cuánticas que se dieron cuando el universo tenía 10^{-35} seg.
3) El universo está lleno de ondas gravitatorias, consecuencia de las fluctuaciones.

La teoría inflacionaria se basa en dos fenómenos:

Efecto de Túnel Cuántico: Si imaginamos un recipiente semi-esférico sobre una superficie plana y dejamos caer una bolita por uno de los bordes del mismo (punto a) ésta pasará por el punto medio (la base del recipiente, punto b) y subirá por la otra pared (punto c).
En (a) y (c) la bolita posee energía potencial, y en (b) energía cinética (de movimiento).
En los puntos intermedios entre a – b y b – c tiene una combinación de ambas energías dependiendo de su posición. El movimiento de la bolita será cada vez menor hasta que quede parada sobre la base, quedando entonces en el nivel más bajo de energía (nivel fundamental).
Si este mismo experimento pudiera llevarse a cabo sin rozamiento y sin resistencia del aire, el movimiento de la bolita continuaría indefinidamente. La curva que dibujaría la bolita es la curva de su energía.
Si pasamos a la microfísica, podemos considerar al núcleo atómico de un elemento radiactivo como un recipiente donde se encuentran encerradas las partículas que potencialmente obran a partir de la desintegración del átomo (por ejemplo, partículas alfa).

Este potencial que mantiene a la partícula encerrada en el núcleo es un obstáculo infranqueable para ella (igual que las paredes del recipiente para la bolita, salvo que la misma reciba un empuje adicional). Pero siempre existe una cierta posibilidad de que la partícula se escape ya que, según la mecánica cuántica, puede recibir energía externa.

$$\Delta E \ \Delta t \geq \hbar \qquad \text{y} \qquad \Delta P \ \Delta t \geq \hbar$$

De acuerdo con el principio de incertidumbre, la incertidumbre con respecto a la energía o a la posición de la partícula por la incertidumbre en cuanto al tiempo (de medición) es aproximadamente igual a la constante de Planck.
Según esto, la partícula alfa puede pedir prestada energía, escapar del núcleo y luego devolver el préstamo. El lapso que dura el préstamo es tan corto que no se puede medir (de esta manera no se viola el principio de conservación de la energía). Cuanto mayor sea la energía de la partícula más posibilidades tendrá de escapar, y cuanto mayor sea la masa de la partícula menor es el lapso que puede durar el préstamo (Este mecanismo puede darse a la inversa para la unión de dos partículas, por ejemplo en las reacciones de fusión).
La partícula real toma un estado virtual, desaparece, y vuelve a aparecer fuera del núcleo, nuevamente como real. Nadie sabe porqué no cómo sucede esto. Es el efecto de túnel cuántico.

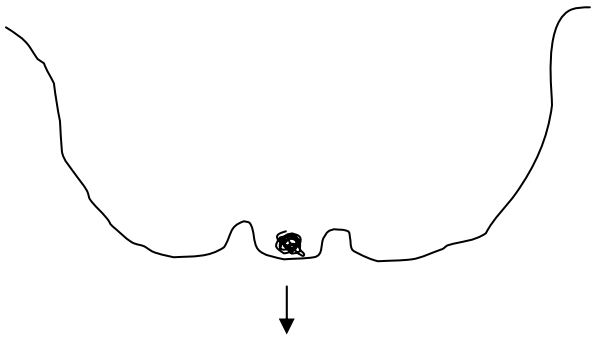
Falso Vacío: Este fenómeno implica considerar el concepto de simetría. Las simetrías no sólo son espaciales, pueden ser conjuntos (simétricos) de diversos elementos. Por ejemplo, los números palindrómicos (capicúas) son simétricos con respecto a la cifra central; composiciones musicales que son iguales si se tocan al derecho que al revés, etc.
Mucha de la física cotidiana se basa en el concepto de simetría, ya que se acepta que las cantidades dinámicas fundamentales del universo derivan de simetrías naturales. Por ejemplo, la conservación de la energía, la conservación del momento, se deben a que las leyes físicas son invariables a pesar de las traslaciones temporo-espaciales (o sea, que las leyes fueron, son y serán iguales en cualquier lugar del universo).

Se dice que un sistema es simétrico cuando si sobre él se efectúa una operación no sufre un cambio susceptible de medición (por ejemplo, si se rota 90 ° una cruz de brazos de igual largo, un círculo, una esfera).

Las 4 fuerzas de la naturaleza, ¿son simétricas? Sí.

1) Gravitación. En la interacción entre dos cuerpos lo único que interesa es la distancia que los separa, no importan los posiciones relativas.
2) Electro-magnetismo. La repulsión actúa exactamente igual entre 2 protones que entre 2 electrones.
3) Fuerza nuclear débil. En la interacción entre un neutrón y un neutrino no importa cual de ellos emite la partícula mensajera del cuanto de campo.
4) Fuerza nuclear fuerte. En la interacción entre los protones en el núcleo (o los quarks en un protón) no importa cual de ellos emite el gluón que los aglutina.

El concepto de simetría puede aplicarse también al universo. Durante la era de Planck (que duró 10^{-45} seg.) las 4 fuerzas estaban unidas en una, la Super-fuerza (un solo tipo de partículas interactuando a través de una sola fuerza). El universo era entonces super-simétrico (la supersimetría desapareció con la expansión).
Un imán es una barra de hierro cuyos átomos (en realidad, los átomos se organizan en dominios y son los dominios los que se orientan en una u otra dirección) apuntan todos en la misma dirección. Se lo considera un 'sistema ordenado'. Este orden puede destruirse calentando el hierro a altas temperaturas. La energía calorífica hace que las partículas se agiten y comiencen a vibrar cada vez mas, apuntando en consecuencia en cualquier dirección. Pasa entonces a ser un sistema con mayor nivel de energía y altamente simétrico (desde cualquier lado que se lo mire se verá lo mismo). Es por esto que el agua es más simétrica que el hielo y el vidrio más simétrico que el diamante (a menor orden mayor simetría). Al enfriarse la barra de hierro los dominios de la misma tomarán la posición que tenían antes, la barra perderá simetría y recuperará sus propiedades magnéticas. Sin embargo, entre el máximo y mínimo de energía (calor, frío) hay un pequeño nivel de energía que se mantiene en la barra. Se le llama 'falso estado fundamental'.
A la edad de 10^{-35} seg. el universo cayó en un nivel de potencial llamado 'falso vacío', quedó encerrado entre 2 barreras de potencial infranqueables. Esto fue estudiado por Higgs (el del bosón).



Campo de Higgs, energía no nula

A los 10^{-35} seg. regían las leyes cuánticas, el universo escapo por efecto túnel. La energía que poseía quedó liberada de golpe, lo que produjo una inflación del espacio a gran escala.

El universo aumentó su radio desde 10^{-33} cm. hasta el tamaño de un pomelo (el volumen de cada región del universo aumentó según un factor 10^{100}, lo que duró hasta los 10^{-32} seg., en los 14.000 millones de años restantes el universo aumentó según un factor 10^{4}).
Así, según el modelo estándar el Big Bang fue el comienzo de todo, según el modelo inflacionario el Big Bang empezó 10^{-35} seg. después del comienzo. El universo perdió sus características de supersimetría y la energía del campo escalar se transformó en partículas (se puede teorizar hasta 10^{-35} seg., no hasta 10^{-45} seg.).

Entonces, ¿porqué se produjo la expansión a pesar de la gravedad? Por la hiper-expansión, cuyo empuje no pudo ser frenado.
¿Porqué el universo visible es plano? Se ve como plano porque es un espacio pequeño en relación a la totalidad del mismo.
¿Porqué la radiación de fondo es isotrópica? Porque hubo un momento en que las diferentes regiones del espacio pudieron comunicarse entre sí, intercambiando su temperatura.
La teoría del estado inflacionario intenta explicar las preguntas hechas a la teoría estándar.
Siguen capítulos del libro 'A horcajadas en el tiempo'.

06.21

Al Principio Del Tiempo

La singularidad y la era cuántica o era de Planck

Según el modelo estándar, en el momento cero el universo tenía (por definición), densidad material infinita, curvatura infinita y temperatura infinita: estado conocido como «singularidad». La singularidad es uno de los conceptos de la física que para la generalidad de los individuos que no se encuentran insertos dentro del mundo de los estudiosos de ella parece poco digerible, algo más bien monstruoso, misterioso incluso. Pero si nos ceñimos a los resultados que nos arrojan las matemáticas, ellos demuestran que en condiciones muy generales (por ejemplo, que el universo, considerado como un gas de partículas, tuviese siempre presión y densidad de masa positivas), toda solución a las ecuaciones de Einstein debe acabar en una singularidad (un estado en que el universo se ha colapsado en un punto matemático), resultado conocido como «teorema de la singularidad». Lo anterior, no significa que con ello quede absolutamente demostrado que estas condiciones extremas se dieran realmente en el principio de los tiempos, pero el modelo estándar satisface sin duda las exigencias que demanda el «teorema de la singularidad». Esto significa que si adoptamos las ecuaciones de Einstein junto con ciertas condiciones generales sobre la materia del universo, la singularidad es inevitable.

Casi no es discutible el hecho de que la aparición de una singularidad de este género es un buen motivo para rechazar de plano el modelo estándar del origen del universo. Pero esto no significa que no proporcione una buena descripción de las interacciones de partículas bastante después del origen mismo, cuando la densidad de la materia tiene un valor elevado pero finito.

En las matemáticas que se aplican en el campo de la física teórica, las singularidades aparecen sin ambigüedad, pero ¿existen realmente en la naturaleza? En la práctica, ni los físicos clásicos se han podido desprender de ellas en sus descripciones matemáticas de la naturaleza. Por ejemplo, una partícula puntiforme con carga eléctrica tiene densidad energética infinita en el campo eléctrico del punto. Pero, de todas manera, la experiencia nos indica que la presencia de singularidades sólo reflejan una visión física incompleta. La aparición de singularidades matemáticas en la descripción de la naturaleza es realmente un reto para que los físicos elaboren una descripción matemática mejor basada en leyes físicas más profundas que eviten la aparición de ellas. Lo último, a lo mejor es un desafío que se encuentra más allá de la capacidad humana, ya que de por sí, el universo es mucho más que singular, pero ello no implica dejar de intentarlo. La singularidad en el origen del universo que comportan algunos modelos debería considerarse un reto, no una más de las inquietantes ignorancias que suelen esconderse debajo de una alfombra tras la cual es mejor no mirar.

El principio del universo, desde la singularidad en t = 0, se extiende hasta el tiempo extremadamente corto de t = 10^{-43} [s], el cual se denomina tiempo de Planck. En el instante t = 0 del modelo estándar, toda la materia del universo, como ya lo dimos a entender, está concentrada en un pequeñísimo punto que correspondía a la totalidad del espacio que se había logrado configurar desde el inicio, por lo que su densidad y fuerzas gravitacionales son infinitas. Ello, implica también que la curvatura debe tender a infinito. Lo anterior, es lo que hace concurrir a que el instante inicial del universo sea una singularidad. En otras palabras, nace el universo en un «lugar» que tiene prácticamente cero volumen, con toda la masa del cosmos. Allí se origina el gas radiante de que hemos hablado, en el cual cohabitan las partículas másicas que ya se han generado en los primeros instantes, así como los rayos de la radiación que coexisten con esas partículas. También, se trata del «lugar» donde comienza el tiempo y el espacio para un gas radiante y particulado. En cierto modo, la singularidad es un borde del espaciotiempo, ya que la coordenada tiempo comienza allí.

El efecto de la singularidad se generaliza a todos los observadores, porque todos los lineamientos del universo se originan en ella. En este sentido está en el pasado de todos los eventos del cosmos, que están enlazados con ella por las propias líneas de universo, directamente o por medio de líneas de otras partículas. Pero esta singularidad, no está envuelta en un horizontes de sucesos, como anteriormente vimos que ocurría con los agujeros negros. Al contrario, desde todos los eventos del universo sería posible, en principio, recibir señales de ella y, eventualmente, observar lo que ocurre allí. En la práctica, las condiciones para la propagación de las señales lo impiden.

Por otra parte, lo que pasó con la materia en esos instantes donde se da la singularidad, es muy difícil saberlo ya que corresponde a una época muy desconocida, en la cual los modelos matemáticos nos dan como resultados solamente guarismos caóticos y en cuanto a experimentaciones estas todavía se encuentran en un tiempo cosmológico lejano a ese momento. Lo que podemos decir es que la densidad, mayor que 10^{94} [g/cm^3] y la temperatura del orden de 10^{32} °K, son significativamente atroces, muy por encima de las que jamás se han estudiado. *Está dentro del rigor señalar que las condiciones físicas son de tal naturaleza que sobrepasan todas las teorías conocidas*. En este sentido, la situación física es similar a la que ocurre en las singularidades en los centros de los agujeros negros. La diferencia sólo estriba en que estas últimas «se engullen» el espacio y el tiempo de las líneas de universo que osan llegar allí, mientras que la singularidad en el inicio del tiempo general el espaciotiempo.

Ahora bien, de pronto el universo se expandió. En los instantes subsecuentes a t = 0,. El espacio creció muy rápidamente lo que constituye una verdadera explosión. Antes del 10^{-43} [seg], el tamaño del horizonte del universo, como ya hicimos mención de ello, es tan pequeño que corresponde a dimensiones menores que una más que diminuta partícula. Pero entonces, en un instante, adquiere un tamaño de un centenar de octillones [10^{50}] de veces mayor y se enfrió hasta el cero absoluto. Este monstruoso crecimiento es conocido como «inflación cósmica». Comparado el propio Big Bang con el panorama que se debió dar en esos momentos del comienzo del universo, aparece tan poco espectacular como la explosión de una granada que ha sido lanzada en medio de una guerra nuclear. Este fenómeno inflacionario comienza en un período del universo primitivo, en el cual la curvatura es tan grande que, a nosotros, los físicos matemáticos, se nos hace imprescindible contar para recurrir a su descripción con un modelo que combine la teoría cuántica de las partículas elementales y la teoría de la relatividad, una teoría «gravitatoria cuántica», que todavía no se ha podido desarrollar a plena satisfacción y rigurosidad. Por lo tanto, una parte de lo que hemos descrito en este párrafo, si bien son conclusiones teórico-matemáticas, en ningún caso confiables y rigurosas, ya que no tenemos un modelo válido para describir la estructura de la materia y del espaciotiempo en las condiciones del inicio del universo.

No obstante lo anterior, podemos señalar que los físicos si contamos con teoremas matemáticos que, partiendo de tiempos posteriores a 10^{-43} [seg], permiten predecir la existencia de una singularidad a partir de la teoría relativista, de igual forma que prueban la existencia de una singularidad en los agujeros negros. Cuando se logre estructurar o descubrir la nueva teoría que unifique la relatividad y la mecánica cuántica, ella deberá ser el instrumento medular para ayudarnos a resolver el problema de la configuración de la singularidad y entregarnos más y mejores argumentos sobre el inicio del universo.

Ahora bien, la inflación desapareció tan rápidamente como había empezado, y entonces la temperatura volvió a subir. El universo en su juventud contenía tanta energía que no sabía que hacer con ella, por lo que entró en un periodo de inestabilidad. En el tiempo que va desde una diezsextillonésima a una diezmilquintillonésima [10^{-37} y 10^{-34}] del primer segundo tras el Big Bang, se produjo la inflación cósmica. El resultado final fue no sólo un universo un centenar de octillones [1050] de veces mayor sino también la aparición de numerosos pares de partículas-antipartículas y la creación de la enorme cantidad de materia que actualmente llena el universo. En sí, la inflación soluciona muchos problemas que arrastraba la original teoría del Big Bang, como ser por qué el universo es tan grande y uniforme, por qué las fuerzas actúan en su interior actualmente, y de dónde surgió la enorme cantidad de materia que contiene.

Por otro lado, y retomando el modelo estándar, tras la singularidad inicial, la densidad material y la temperatura del universo son enormes pero finitas. A medida que el universo se expande van descendiendo ambas rápidamente. El gas radiante de partículas cuánticas interactuantes se compone de gluones, leptones y quarks que interactúan todos con una energía inmensa que les permite convertirse unos en otros libremente, ajustándose siempre a las leyes de conservación. Los gluones coloreados se convierten en pares quarks-antiquarks, que se aniquilan casi de inmediato convirtiéndose de nuevo en gluones. Los gluones débiles se convierten en pares leptón-antileptón, etc. Un enorme panorama de creación y destrucción de todos los cuantos del modelo estándar.

Sin embargo, y pese al panorama que hemos descrito en el párrafo anterior, en realidad, la descripción corresponde a un universo simple y sin, prácticamente, estructura, en la cual su espacio se asemeja a una caldera llena de un un gas absolutamente caótico y muy uniforme. Debido a esa sencillez puede describirse matemáticamente con cierta facilidad. En el modelo estándar del universo no sucede gran cosa de interés hasta que la temperatura desciende a unos 10^{15} ° K. Sigue siendo una temperatura altísima, muy superior a la del interior de una estrella. Pero 10^{15} ° K corresponde a

una masa-energía igual a la de los bosones débiles W y Z, la escala de mayor masa del modelo estándar y el primer umbral energético que cruzaremos. A esta temperatura, el universo tiene aproximadamente una décima de una décima de milmillonésima de segundo.

El Umbral de Ruptura de la Simetría Electrodébil: 10^{15} °K

Cuando las temperaturas superan a los 10^{15} °K, los gluones débiles y electromagnéticos interactúan simétricamente. Al descender la temperatura por debajo de unos 10^{15} °K, se rompe la simetría y se hace patente la diferencia entre estas dos interacciones: los bosones débiles, W y Z, pierden su equilibrio con respecto a las otras partículas de la sopa cuántica, debido a que su masa es excesiva para que puedan ser creados, mientras que los fotones persisten porque carecen de masa y se forman fácilmente.

Por otra parte, la diferenciación que se puede distinguir entre la interacción electromagnética y la débil es consecuencia, en parte, de una simetría rota espontáneamente. Como ejemplo de esa simetría rota, podemos concurrir a describir el alineamiento de todos los pequeños elementos magnéticos de un imán que produce un campo magnético neto: el ferroimán de Heisenberg. Pero, si calentamos un imán ordinario, sus elementos magnéticos se agitan y desorientan y empiezan a alinearse al azar. A cierta temperatura crítica, el imán entero pierde completamente toda huella de magnetismo, debido a que sus elementos no se alinean ya en una dirección preferente: se ha restaurado la simetría rotatoria original en la que no hay ninguna dirección preferente. Este ejemplo revela una propiedad importante de las simetrías rotas espontáneamente: a determinada temperatura, se restauran.

Por otro lado, la simetría espontáneamente rota de la teoría de Weinberg-Salam no es ninguna excepción; se restaura, al igual que la del imán, a una temperatura crítica, como destacaron por primera vez los físicos rusos D. A. Kirzhnits y Andrei Linde. Pero esta temperatura, a diferencia de la del ferroimán, es tan elevada [10^{15} °K] que sólo podría haberse alcanzado antes del primer nonasegundo del Big Bang. Por encima de esa temperatura crítica, carece de vigencia la distinción entre la interacción electromagnética y la débil. Los gluones débiles W y Z se convierten prácticamente en cuantos sin masa, como los fotones, los gluones coloreados y otras partículas. La transición hasta la situación simétrica a la temperatura crítica es bastante suave. Como en el caso del imán, al aumentar la temperatura se advierte una disminución progresiva de simetría rota hasta que, a la temperatura crítica, desaparece del todo y se restaura la simetría original.

Aquí, nos aparece un hecho que es notable de parte de la teoría moderna del origen del universo: en la medida que vamos retrocediendo en el tiempo, más cálido es el universo y van restaurándose en él las simetrías rotas. El universo y todas sus interacciones de partículas van haciéndose cada vez más simétricos a medida que se penetra en el Big Bang. Lo anterior, es lo que invita a pensar, más allá de una esperanza, de que el universo se haga más simple, más simétrico y manejable en su historia más primitiva, pensamiento al que se aferran los físicos en su elaboración de modelos.

Ahora, si lo hacemos a la inversa y avanzamos hacia delante en el tiempo, observaríamos que, a medida que la temperatura desciende, las simetrías perfectas se rompen. Con lo que se hacen patentes las diferencias físicas entre las diversas interacciones (fuerte, débil y electromagnética).

El universo, en el cual cohabitamos Ud. lector y yo, con una edad aproximada de unos 15.000 millones de años, con su temperatura relativamente baja, es el residuo congelado del Big Bang. Igual que un cristal de hielo formado por la congelación de vapor de agua uniforme, tiene mucha estructura: las galaxias, las estrellas y la propia vida. Pero según el punto de vista moderno, hasta los protones y neutrones (la sustancia misma de la materia) son fósiles congelados del Big Bang. También se formaron al bajar la temperatura. Tal acontecimiento se denomina «hadronización», que será el tema que trataremos en nuestra subsiguiente sección, después que dediquemos algunas líneas más a la «inflación cósmica».

06.22

La Expansión

En la sección anterior ya enunciamos lo que llamamos «inflación cósmica». Aunque sobre ese tema vamos a ahondar más adelante –en capítulos y secciones posteriores– aquí, en esta, intentaremos describir sucintamente alguno de los conceptos que manejan los cosmólogos sobre los posibles sucesos que pudieron acontecer en los inicios expansivos del universo cuando emitía sus primeros «llantos de vida».

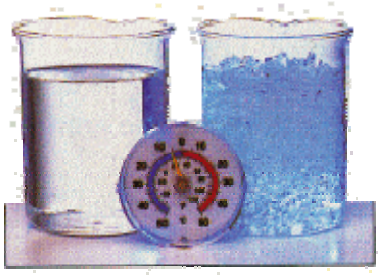
Cuando el universo era una guagua (bebé), como dirían en mi país, Chile, contenía tanta energía que, en la práctica, no sabía que hacer con ella, por lo que entró en un periodo de inestabilidad. En el tiempo que va desde una diezsextillonésima a una diezmilquintillonésima [10^{-37} y 10^{-34}] del primer segundo tras el Big-Bang, se produjo la inflación cósmica. Ello, originó no sólo un universo sustancialmente más grande, del orden de un centenar de octillones [10^{50}] de veces mayor sino también la creación de la enorme y variada cantidad de materia que actualmente llena el universo.

Recordemos que al principio, el universo estaba vacío de materia y tenía un tamaño reducido. De repente, en muy breve tiempo, creció descomunadamente. Esta comparación nos da una idea de la magnitud de la expansión: una región más pequeña que una partícula se amplía hasta un tamaño mayor que el de una galaxia. Por eso, algunos físicos piensan que el término Big Bang calza mucho mejor para este periodo que cuando empezó todo.

Ahora bien, durante el breve periodo de inestabilidad que se dio en el universo durante la inflación, ésta funcionó como si fuera una fuerza antigravitatoria, separando unas cosas de otras. Pero, igualmente, durante todo este tiempo, aparecieron espontáneamente partículas y antipartículas virtuales, que desaparecían al instante al aniquilarse unas a otras.

Finalmente, al terminar este periodo inflacionario cósmico, una oleada de energía permitió que partículas y antipartículas pudieran tener una existencia independiente. Fue prácticamente la inflación cósmica la que creó toda la estructura másica actual del universo.

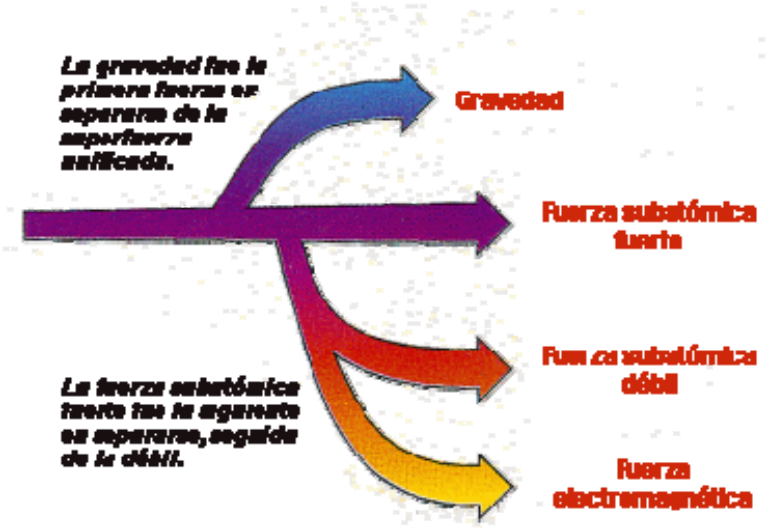
Por otra parte, antes del avenimiento del periodo inflacionario del universo, éste tenía dos fuerzas interactuando: la gravedad y la superfuerza unificada, que llenaba las regiones de vacío. Cuando la temperatura descendió a los 10^{28} °K, la superfuerza debió haberse desagregado, pero fue el propio vacío el que lo impidió, de forma semejante a como puede mantenerse en estado líquido el agua aunque se enfríe muy por debajo de su temperatura de congelación. Fue, este inestable estado el que indujo al universo a vivir una inflación incontrolada.



Es posible enfriar agua por debajo de la temperatura de congelación, permaneciendo ésta en estado líquido...

... pero cuando el agua superfría se congela, emana energía de ella.

Actualmente, la materia que encierra el universo está sometida a cuatro fuerzas distintas, pero, antes de la inflación cósmica, tres de ellas estaban unificadas como una sola. Cuando empezaron a separarse, se desprendió una gran energía que se materializó en forma de partículas. De este modo, la separación de las fuerzas creó la primera materia.



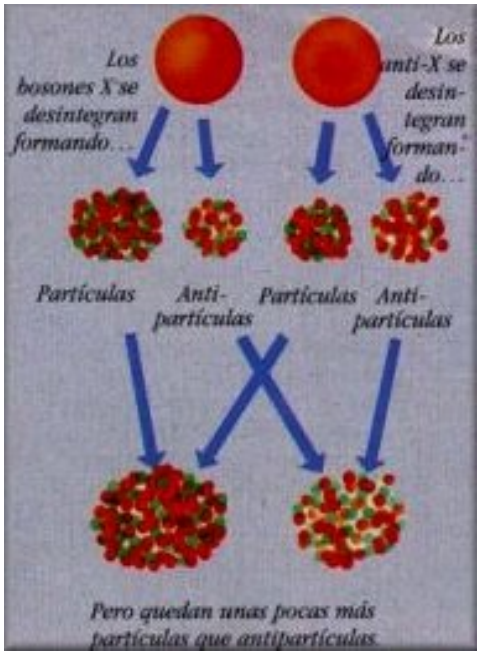
Cuando ya habían transcurrido los 10^{-32} [seg.], la separación de las fuerzas había impulsado de nuevo la temperatura desde casi el cero absoluto hasta unos 10^{28} °K, llenando el universo otra vez de energía. Así, cuando las parejas de partículas y antipartículas se formaron, no necesitaban desprenderse de la energía que habían adquirido mediante su aniquilación sino que fueron quedando libres para tomar derroteros separados. De este modo, las partículas virtuales se convirtieron en reales, y la masa del universo se incrementó desde 1 Kg. hasta las aproximadas 10^{50} toneladas que contiene en la actualidad.

Espoleado por la multiplicidad de interacciones que se dieron en la etapa de la inflación, el universo comenzó a vivir el periodo más frenético de su historia. Alimentado por la tremenda fuente de energía liberada, se transformó en una poderosa máquina creadora de materia. Muchas de las partículas que se generaron en esos instantes cósmicos no existen en la actualidad. En esta temprana fase, cuando no habían transcurrido más de una milésima de sextillonésima de segundo [10^{-33}], el universo

experimentó una exótica orgía de creaciones particuladas en la cual cada una de sus partículas rápidamente se desintegraron convirtiéndose en otras distintas. Fue éste un periodo cósmico de gran ebullición, y la escena pudo parecer a un enjambre de pececillos enloquecidos encerrados en un gigantesco acuario.

Si se pudiera contar con una amplia instantánea del universo post inflación, los estudios de los físicos hacen que la mayoría de éstos estén convencidos que la gran fotografía revelaría una especie de sopa de partículas y antipartículas muy calientes en ebullición. Ahora, no todos los ingredientes particulados de esta sopa son ubicables hoy. Quarks, leptones, WIMPs, cuerdas cósmicas y agujeros negros primores o primordiales se estrellaban unos con otros como minúsculas bolas de billar. Gluones, bosones W y Z y gravitones (que se encuentran actualmente como partículas mensajeras de las diferentes fuerzas) existían como partículas reales.

Nos cabe consignar que la energía de la inflación creó exactamente la misma cantidad de materia que de antimateria. Pero en esto aparece una incógnita: ¿por qué entonces no se destruyeron por igual? Los físicos la han despejado cuando los cálculos hicieron aparecer los bosones X y los anti –X. Según se enfrió el universo, ambos se desintegraron formando partículas más ligeras (quarks y leptones) y sus antipartículas. Pero esta operación favoreció ligeramente a la materia: por cada cien millones de quarks y leptones sólo se crearon 99.999.999 de antiquarks y antileptones. Y, fue gracias a ello, que se pudo generar la materia que forma las estrellas, los planetas y las galaxias del universo actual.



Por último, una última acotación antes de ir a la siguiente sección, donde hablaremos de la era hadrónica. Las cuatro fuerzas de la naturaleza que existen actualmente tienen un alcance muy diferente y afectan a distintas partículas. La gravedad es, con mucho, la más débil e influye en todas las partículas, mientras que la más poderosa, la subatómica fuerte, actúa sólo dentro del núcleo atómico. A elevadas energías, la fuerza fuerte se debilita, mientras que la electromagnética y la débil se hacen más poderosas. Tal como ya anteriormente lo hemos mencionado, lo más probable es que todas ellas formaban una sola fuerza a excepción de la gravedad, lo que da cabida para predecir la existencia de bosones X , cuerdas cósmicas y también las supercuerdas como estudiaremos más adelante.

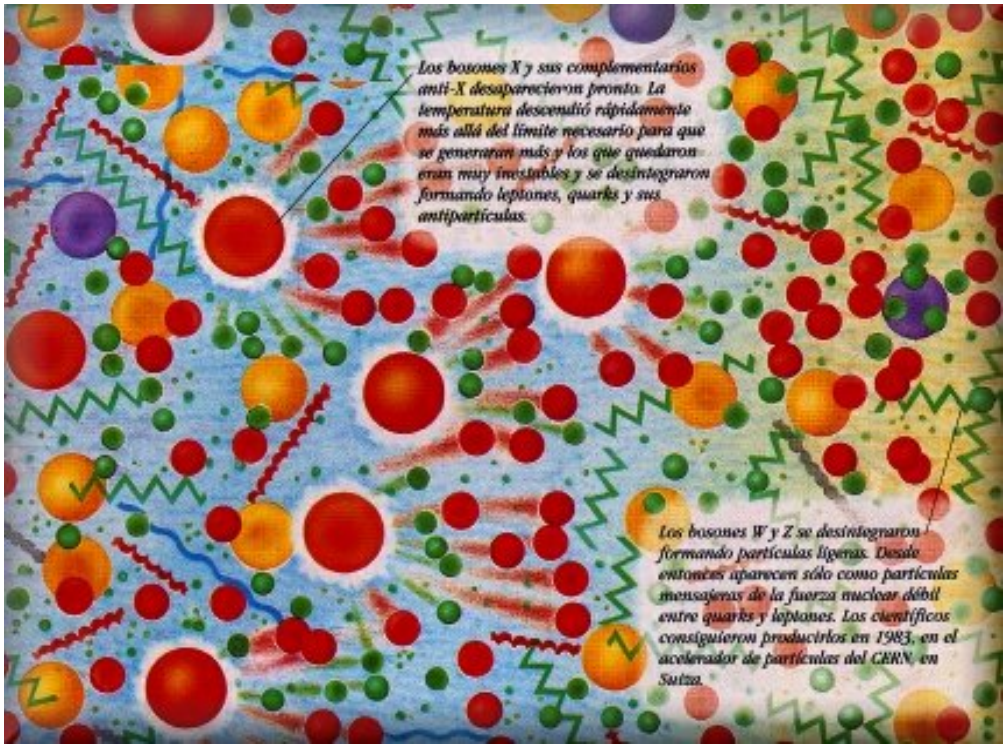
06.23

La Era Hadrónica

A los 10^{-34} [seg.] después del principio, cuando termina el periodo inflacionario, la gravedad había empezado a frenar la expansión del universo. La temperatura se mantenía a 10^{26} °K; las densidades cósmicas, aunque descendiendo, todavía eran lo suficientemente grandes como para que una masa equivalente a la de Júpiter pudiera caber en el interior de una pelota de fútbol. Los bosones Higgs X, que habían hecho su estreno al finalizar la inflación, completaron la separación de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza, dividiendo la superfuerza en las fuerzas electromagnética y nuclear débil. En el proceso, leptones y antileptones evolucionaron a variantes como electrones y positrones, que son

sensibles al electromagnetismo, y neutrinos y antineutrinos, que responden a la fuerza nuclear débil.

Con la expansión controlada y temperaturas inferiores, las colisiones fueron mucho menos energéticas de lo que había sido durante el periodo inflacionario, lo cual dio como resultado cada vez menos masivas partículas. Los choques aniquiladores entre materia y antimateria produjeron fotones, portadores de fuerza electromagnética, que se descompusieron en parejas electrón-positrón casi sin masa.



Después de haber puntualizado algunas cosas que quedaron en el tintero sobre la inflación y, que me interezaba describir en esta parte de este libro, retomemos nuestro trabajo computacional y entremos a estudiar lo que es la «hadronización» y la correspondiente «era hadrónica».

Hadronización: 10^{14} °K

Quedamos en la sección 06.21, que cuando en el universo primigenio desciende la temperatura desde los 10^{15} °K se rompe la simetría electrodébil. Al provocarse esa ruptura, el universo está formado por un gas de un número aproximadamente igual de electrones, quarks, sus antipartículas, gluones coloreados y fotones, que se crean y destruyen continuamente. De hecho, los quarks andan volando libremente de un lado a otro e interactuando con las otras partículas... un breve período de libertad con más de algunas restricciones.

Recordemos que la cromodinámica cuántica (la teoría relativista del campo cuántico que expresa las interacciones de quarks y gluones coloreados) tiene la propiedad de la «libertad asintótica». A niveles de alta energía, la fuerza de acoplamiento del gluón coloreado se debilita, disminuye la fuerza adhesiva de los gluones. Alta energía equivale a alta temperatura, y a temperaturas superiores a 10^{14} °K, la fuerza de acoplamiento disminuye tanto, que la interacción fuerte se vuelve débil. A esas temperaturas elevadas, los hadrones se despegaron, literalmente, y los quarks escaparon del confinamiento al cual estaban sometidos formando junto con los gluones un estado de la materia conocido como plasma «una sopa de quarks y gluones». Este estado de la materia, aunque la teoría lo predecía y los computadores ratificaban el pronóstico, recientemente ha sido corroborado en experimentos en el acelerador de partículas empotrado en los laboratorios del CERN. Con ello, ahora los físicos sabemos como podía ser la materia del universo cuando este tan sólo contaba con diez microsegundos de vida.

Sin embargo, cuando la temperatura descendió por debajo de los 10^{14} °K y el universo continuó expandiéndose, se formaron alrededor de los quarks cárceles gluónicas (las bolsitas que llamamos hadrones) que los aprisionaron para

todo el futuro. Esta transformación del gas de partículas cuánticas, que pasa de ser un gas de quarks libres y gluones coloreados a componerse de quarks ligados o hadrones, es lo que se denomina hadronización, señalando con ello el principio de la era hadrónica.

La Era Hadrónica: De 10^{32} °K a 10^{12} °K

La era hadrónica comprende el período transcurrido entre 10^{-43} y 10^{-4} segundos, mientras la temperatura desciende desde 10^{32} a 10^{12} °K y la densidad lo hace desde 10^{94} a 10^{14} [g/cm^3]. Ahora bien, cuando la temperatura baja hasta un nivel inferior a los 10^{14} °K y la edad del universo es algo superior a los diez microsegundos, los quarks están atrapados en los hadrones y, estos últimos, ya forman parte de la sopa cuántica constituida en un solo cocimiento por quarks, antiquarks, leptones y sus antipartículas, así como fotones, todos en equilibrio con densidades numéricas similares. Por supuesto, que los quarks libres y los gluones coloreados ya no se ven por ahí ni siquiera de muestra. Es como si una película en color (los gluones y quarks coloreados) pasara a ser de pronto en blanco y negro (los hadrones). No obstante, se ha especulado que en los primeros momentos de esta era pueden haber existido otras partículas y estructuras más exóticas, las que darían origen a los quarks.

Los hadrones son las partículas cuánticas asociadas con la fuerza subatómica fuerte que mantiene unido e integrado el núcleo atómico. Los primeros hadrones que descubrieron los físicos fueron los nucleones: el protón y el neutrón. Luego vinieron los piones (partículas de espín cero, de vida mucho más corta que el neutrón y con una masa próxima a un séptimo de la del electrón) y luego se hallaron muchísimos otros hadrones similares. Hoy se considera a todos estos hadrones detectados experimentalmente corno sistemas de quarks unidos de modo permanente.

A las elevadas temperaturas de la era hadrónica, los fotones y, otras partículas del gas de partículas cuánticas tienen energía suficiente para producir pares hadrón-antihadrón. Estas partículas comparten con las demás partículas la energía total disponible. Debido a ello, aunque salgan a escena nuevas partículas, el número total de ellas, que es proporcional a la entropía, se mantiene constante. Dado que las diversas partículas, incluidos todos los hadrones, comparten la energía disponible a una temperatura dada, esto significa que hay un número aproximadamente igual de cada tipo distinto de partículas.

Por ejemplo, cuando al iniciarse la era hadrónica, la temperatura es suficiente para crear piones, hay aproximadamente tantos piones como fotones, electrones, positrones, muones, etc. Cuando la temperatura es suficiente para crear nucleones (unos 10^{13} °K), llegamos a la conclusión de que el número de nucleones y antinucleones es aproximadamente el mismo que el de cada una de las demás partículas; en particular, el número de nucleones es aproximadamente igual al número de fotones. Esto es realmente notable, si tenernos en cuenta que los fotones superan hoy en número a los nucleones en una proporción aproximada de 400 millones a uno. Por tanto, al final de la era hadrónica, todos aquellos nucleones «extra» se aniquilaron con antinucleones, dejando sólo una pequeña fracción de protones y neutrones supervivientes, que han perdurado hasta hoy. ¿Por qué sobrevivieron?

El modelo estándar tiene una ley de conservación del número bariónico rigurosa, según la cual en cualquier interacción de partículas el número de bariones menos el de antibariones es constante. Dado que los nucleones, el protón y el neutrón, son los bariones más ligeros, todos los demás bariones pueden desintegrarse convirtiéndose en ellos, transmitiendo su número de carga bariónico. El neutrón puede descomponerse luego en un protón y pasarle su número bariónico. Pero este proceso de desintegración del neutrón dura unos mil segundos, período prolongado si se compara con la duración total de la era hadrónica. Eso se debe a que el neutrón es prácticamente estable durante este período.

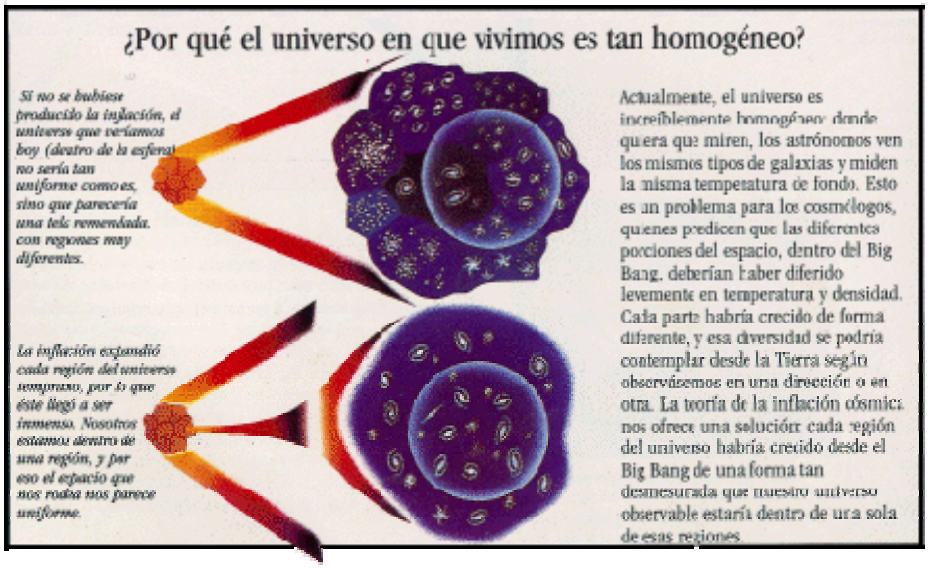
La ley de conservación exacta del número bariónico exige, pues, que si terminamos la era hadrónica con un pequeño exceso de bariones sobre antibariones, esa diferencia haya tenido que existir desde un principio, desde mucho antes de la era hadrónica. Este pequeño exceso se refleja hoy en la gran entropía específica del universo: el exceso del número de fotones sobre el de nucleones. La existencia de nucleones, la materia visible de las estrellas y de la galaxia, parece un accidente, un residuo afortunado de una era anterior del universo.

Simplificando lo que hemos querido explicar, es más que aceptable considerar que durante la era hadrónica se fija el contenido bariónico y la preponderancia de la materia sobre la antimateria. Claro, que también se encuentran presente la existencia de una serie de otros enigmas que tienen su respuesta en los eventos de esa era, incluyendo las causas de la homogeneidad e isotropía, la causa y naturaleza de la constante cosmológica (si no es nula), y aún, el origen de las semillas para la formación de las galaxias que se desarrollan más tarde.

Pero, pese a intento simplificador que quisimos otorgarle al contenido del párrafo anterior, siempre nos queda en el aire el por qué del pequeño exceso de materia nuclear sobre la antimateria que justamente debió producirse en esa época del universo. Los físicos en sus tentativas de comprender el cosmos, generalmente parten del supuesto de que éste comenzó en un estado simétrico, en el que el número bariónico era, en realidad, cero. Pero si el modelo estándar es correcto y el número bariónico se conserva, éste sería hoy también cero: un desastre, porque entonces no habría en el universo materia visible. ¿Qué se ha hecho? Bueno, apelar a la GTU que va más allá del modelo estándar y que parte del supuesto de que el número bariónico no se conserva. Una consecuencia de las GTU es que el fotón puede desintegrarse... y si puede desintegrarse es que también puede crearse. Otra consecuencia, apuntada por el físico ruso Andrei Sajarov, antes incluso de que se inventasen las GTU, es que el pequeño exceso de bariones puede crearse realmente a partir de un universo de número bariónico cero, siempre que el gas de partículas cuánticas interactuantes tenga propiedades especiales. Estas ideas nos llevan bastante más allá del modelo estándar. Volveremos a ellas en una sección de otro capítulo.

En mi opinión, para poder dilucidar el problema que representa lo expuesto precedentemente, los físicos no tienen, por ahora, más que hacerse de mucha paciencia, ya que las energías o temperaturas envueltas en los procesos de esta era hadrónica, los conocimientos de ellos dependen en gran medida de los progresos realizados en física de las partículas elementales y, para alcanzar mayores logros, las inversiones de capital son altísimas. La capacidad instalada mundial de aceleradores de partículas, incluido el Relativistic Heavy Ion Collider o el proyectado para el año 2005, llamado Large Hadron Collider, no cuentan con la potencia de investigar energías como las que se debieron dar en esta era. Es por lo anterior, que no corresponde más que invertir el proceso. Hoy muchos físicos de partículas se interesan en los procesos cosmológicos para intentar confirmar las predicciones de las teorías propuestas sobre las partículas, como veremos más adelante. Así, el universo primitivo se ha transformado en un verdadero laboratorio de partículas, en el cual conviven la teoría de lo más pequeño, la cuántica, y la teoría de lo más grande, la de la relatividad general. La conexión necesaria con el estado actual del universo radica, por un lado, en conseguir las condiciones que llevan a la nucleosíntesis con los

resultados conocidos (que veremos en una próxima sección) y, por otro, a la gran homogeneidad e isotropía que el universo tiene en la época de recombinación y posterior formación de estructuras.



Ahora bien, cuando la era hadrónica estaba cerca de su final se da un proceso más que relevante. La acción de las fuerzas gluónicas entre quarks y antiquarks produjeron la unión de éstos, confinándolos y formando los nucleones comunes que hoy conocemos: neutrones y protones. Ello se dio así, como consecuencia de los altos efectos energéticos que se dieron en ese periodo de la era. Este proceso de «confinamiento de los quarks» ocurre cuando la edad del universo es de $t = 10^{-6}$ [seg] y su temperatura 10^{13} °K.

Al bajar la temperatura durante la era hadrónica, se cruzan varios umbrales energéticos, correspondientes a las masas de diversos hadrones. Algunos hadrones dejan de estar en equilibrio con las otras partículas, a menos que lo impida una ley de conservación. Cuando la energía térmica decreciente de la radiación llega a ser menor que la energía correspondiente a la masa del hadrón más ligero, el mesón π, se habrán aniquilado la mayoría de los hadrones más pesados (exceptuados neutrones y protones), lo que se produce cuando el universo tiene una temperatura del orden de 10^{12} °K y una edad de alrededor de 10^{-4} [seg]; hallándonos, entonces, en el umbral de la era leptónica.

06.24

La Era Leptónica y Los Neutrinos

S e llama así a la era que se extiende $t = 10^{-4}$ hasta aproximadamente unos 10 [seg.] de vida del universo. En esta época, la temperatura desciende desde 10^{12} °K hasta 10^{10} °K y la densidad desde 10^{14} a 10^{4} [g/cm3]. La sopa cuántica cósmica se compone de una mezcla formada por un número aproximadamente igual de fotones, electrones, neutrinos electrónicos, muones, neutrinos de muón y algunas otras partículas como los piones (reliquias hadrónicas de masa ligera de la era anterior) y sus antipartículas, más una «contaminación» relativamente pequeña de igual número de protones y neutrones que ya no están en equilibrio con las otras partículas. Pero el pequeño número de protones y neutrones continúa interactuando con las otras partículas. Por ejemplo, cuando un protón interactúa con un electrón, se convierte en un electrón más un neutrino de electrón. Cuando interactúan con positrones, los neutrones se convierten en protones y

neutrinos de antielectrón. Aunque el número total de protones y electrones es muy pequeño (uno por cada cien millones de las otras partículas, aproximadamente), protones y neutrones se transforman unos en otros muy deprisa, debido a sus interacciones con los leptones. Naturalmente, los fotones son numerosos y forman un mar de radiación homogéneo. Debido a la alta temperatura, los leptones con masa dominan a los nucleones y a la radiación de fotones, manteniendo un caldo de neutrones y neutrinos que interactúan por medio de las fuerzas débiles.

Al bajar la temperatura por debajo del valor que tenía al principio de la era leptónica, se cruza el umbral de producción de muones. Todos los muones y antimuones se desintegran ahora convirtiéndose en electrones, positrones y neutrinos de muón y de electrón. El exceso de carga de los muones puede pasar a los electrones (el electrón es, como se recordará, la partícula cargada más ligera y no cuenta con ninguna otra partícula más ligera a la que pasar su carga). Por tal razón, no hay muones que sobrevivan a la matanza muónica. Pero los neutrinos de muón, dado que llevan el número leptónico de muón (cantidad conservada) deben seguir existiendo, aunque dejen ya de interactuar con las demás partículas. Además, su densidad numérica es aproximadamente igual a la de los fotones, puesto que es la que era inmediatamente antes de dejar de interactuar. Hay ya un gran número de neutrinos muónicos que vagan libremente por el universo sin interactuar apenas, lo mismo que hacen hoy los fotones.

Como se estima que el universo debería ser eléctricamente neutro, el número de electrones y el de protones tiene que ser igual. De forma que, si se supuso en el modelo estándar un número bariónico no nulo, ello comporta un número leptónico electrónico igual. Por otro lado, si se consigue evitar lo primero con las teorías unificadas, también debería esperarse lo mismo para el número leptónico electrónico del universo.

Asimismo, a una temperatura aún más baja, los neutrinos de electrón dejan de estar en equilibrio con los electrones y los positrones. Entonces, se unen a los neutrinos muónicos junto a los neutrinos tauónicos (que se desequilibran antes incluso que los muónicos) y vagan por el universo sin interactuar significativamente con nucleones o leptones, en un gas no interactuante. Como el universo sigue expandiéndose, la longitud de onda de esos neutrinos se desplaza hacia el rojo y, como sucede con los fotones, desciende su temperatura. La temperatura de los neutrinos hoy corresponde a unos 2 °K y su número alrededor de 10^9 por nucleón, similar a los fotones. La causa de esta temperatura algo más baja es que los neutrinos dejaron de interactuar antes de que electrones y positrones se aniquilaran formando fotones. Este proceso de aniquilación calienta el gas fotónico aproximadamente un treinta por ciento más que el de neutrinos.

Si esta descripción es correcta, ¿por qué no detectan los científicos el gas de neutrinos? Desafortunadamente, neutrinos de tan baja energía prácticamente no interactúan con la materia y es imposible detectarlos con la tecnología actual, la que sería necesario incrementar su capacidad no por diez sino por millones. Pero los físicos estudian este problema y puede que algún día se de con un ingenioso método que permita captar una cantidad importante de esos neutrinos residuales. Se estima que, de mil millones de neutrinos que atraviesan la Tierra, sólo uno tiene chance de interactuar con algún átomo de ella. Es evidente que si estas ideas son correctas la masa principal de la entropía actual del universo reside no sólo en el gas de fotones sino también en el de neutrinos. Su descubrimiento, con la temperatura predicha, sería otra confirmación de la validez de la teoría del Big Bang.

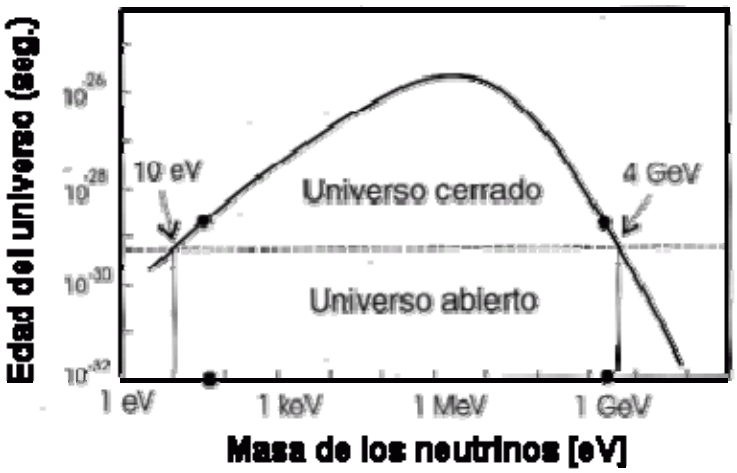
Suelen concebirse esos neutrinos como libres viajeros del espacio, atravesándolos a la velocidad de la luz y desprovistos de masa, salvo que le diéramos crédito a las teorías recientes. Una posibilidad intrigante es que en realidad posean una pequeña masa. Si así fuera, el gas residual de neutrinos podría ser la materia oscura que cerrase el universo. Los físicos experimentales han intentado medir la masa del neutrino electrónico y han llegado a la conclusión de que no puede ser lo bastante grande como para formar la materia oscura. Pero, en lo referente a las masas del neutrino tautónico y del neutrino muónico los límites experimentales son mucho menos restrictivos y quizás esos neutrinos sirvan para el mismo fin.

Pero supongamos que las teorías recientes están en lo cierto y que los neutrinos tendrían una pequeña masa. Si los neutrinos electrónicos tuvieran una masa de 1 [eV/c^2] su contribución sería mayor que la masa en bariones, o sea, la materia usual de estrellas, planetas y humanos. Recordemos que 1 [eV/c^2] es sólo 1/500.000 de la pequeña masa del electrón, la que a su vez es 1/1836 la del protón. Por otro lado, si su masa es de 10 [eV/c^2] los neutrinos podrían contribuir a un parámetro de densidad Ω ›1, lo que corresponde a un universo cerrado (fig. inserta más abajo). Son frecuentes los anuncios desde laboratorios sobre medidas de la masa de los neutrinos, pero, de todas maneras, lo más recomendable es esperar confirmaciones estadísticas más duras, dada las dificultades que encierran las mediciones. No obstante, si los neutrinos realmente comportan masa, ésta debería ser aproximadamente no más de 50 [eV/c^2] (no podría ser mayor, pues, en tal caso, la densidad del gas de neutrinos sería mayor que el límite observado de la densidad media de masa del

universo), podríamos demostrar que la atracción gravitatoria mutua entre ellos tendería a formar cúmulos gigantescos con una masa muy similar a la de los supercúmulos de galaxias actuales. Las medidas cosmológicas mismas implican lo anterior, en vista del límite para el parámetro de aceleración de q^0 ‹2, lo que corresponde a una densidad promedio superior a 2 x 10^{-29} [g/cm^3], que es lo ya medido en galaxias. Aflora así, espontáneamente, una manera de explicar la formación de supercúmulos. Los neutrinos de gran masa, liberados durante la era leptónica, comienzan a acumularse gravitatoriamente, formando masas de neutrinos del tamaño de los supercúmulos de galaxias, Más tarde, concluido el Big Bang, el hidrógeno y el helio caerían gravitatoriamente en esas gigantescas masas de neutrinos, formando objetos en forma de hojuelas. Esas «hojuelas», del tamaño de supercúmulos de galaxias, mediante complejas interacciones relacionadas con el gas de hidrógeno, se fragmentan luego en objetos del tamaño de las galaxias. Esto sucede en el período comprendido entre un millón y diez millones de años después del Big Bang, la era de formación galáctica. Ya analizamos en un capítulo anterior algunas de las consecuencias de esta interpretación de la formación de las galaxias y de los supercúmulos.

Sea o no correcta la imagen de las láminas, vemos aquí un ejemplo excelente de la cooperación de las ideas de la física de partículas y de la astronomía. Las estructuras mayores (supercúmulos de galaxias) pueden ayudarnos a entender las estructuras más pequeñas (los neutrinos y las propiedades del universo antes de que éste tuviera un segundo). Todo el universo se convierte en campo de experimentación de la física cuántica fundamental.

Pero también podrían existir otras partículas leptónicas pesadas con propiedades similares a los neutrinos, pero masas mayores que los nucleones y de una cantidad que podría ser significativa. Estas serían partículas masivas que sólo tienen interacciones débiles y gravitacionales. El límite inferior de masa de estas hipotéticas partículas ha sido estimado en el orden de 2 [GeV]. De comprobarse la existencia de las láminas de neutrinos o de los leptones pesados, ello acabaría con el enigma de la materia oscura, que puede llegar a cantidades suficientes para cerrar el universo. Lo anterior, no significa que no le doy crédito a la posibilidad de que el universo sea plano, por consiguiente, abierto, como se extrae de las conclusiones preliminares, muy difundidas periodísticamente en los momentos que escribo estas líneas, elaboradas por los científicos agrupados en el proyecto Boomerang; ahora, en el mismo periodo, también ha habido noticias sobre evidencias sólidas pero no concluyentes sobre espacios de existencia de materia oscura. En fin, se trata de una cuestión que va a seguir siendo materia de discusión y muy difícil de dilucidar en un plazo breve.



Se estima la cantidad de neutrinos en una cifra aproximada de 10^9 por nucleón. Si ellos llegaran a tener masa dominarían la densidad del universo. Según sea esa masa, se obtienen modelos de universos abiertos o cerrados. También pueden existir leptones pesados, que podrían jugar un rol similar. Los puntos indican los límites existentes de masa: a) superior a 50 [eV] para la masa de los neutrinos y b) inferior a 2 [GeV] para los leptones pesados.

Cualesquiera sea el veredicto final que nos depare la naturaleza sobre si el universo es abierto o cerrado, sería un resultado sorprendente encontrar que partículas tan fantasmales como los neutrinos determinaran si el universo se expandirá hasta llegar a un universo frío y vacío o se contraerá hasta un estado de calor inimaginable.

La era leptónica, al margen de dejar liberados para siempre a los neutrinos, determina la proporción neutrón-protón de dos neutrones por cada diez protones, relación importante para establecer la cantidad total de helio que se forma en la era siguiente: la era radiactiva. Al principio de la era leptónica hay igual número de protones y de neutrones porque se convierten libremente unos en otros. Pero el neutrón tiene una masa algo mayor que el protón (0, 14 por ciento aproximadamente) y puede desintegrarse en un protón, un electrón y un neutrino de antielectrón. Al final de la era leptónica la temperatura había descendido lo suficiente para que la pequeña diferencia de masa entre el protón y el neutrón significase una diferencia importante en sus cantidades relativas. Debido a esta pequeña diferencia de masa, pasa a ser más probable que un neutrón se convierta en un protón que viceversa. Después de cálculos detallados, se ha llegado a la conclusión de que al final de la era leptónica, en que la temperatura ha descendido a 10^{10} °K, sólo hay ya dos neutrones por cada diez protones.

Algunos físicos teóricos que han efectuado estos cálculos de forma detallada y minuciosa subrayan que esta proporción neutrón-protón depende básicamente del número de los diversos tipos de neutrinos. Y puesto que la cantidad de helio que se forma depende directamente de esta proporción, ésa depende también del número de los diversos neutrinos. Según los cálculos, si existiesen más de cuatro neutrinos, se habría producido demasiado helio (porcentaje algo mayor que el observado). En este momento, al igual que en el modelo estándar, sólo hay tres neutrinos diferenciados (el electrón, el muón y el neutrino tauónico), de modo que los cálculos que aceptan el modelo estándar dan la cuantía de helio observada. Otros físicos creen que las incertidumbres de los cálculos y de la cuantía estimada de helio primordial observado hoy en el universo indican que una conclusión rigurosa que limite severamente el número de especies de neutrinos carece de base. Sin embargo, estos cálculos indican de nuevo

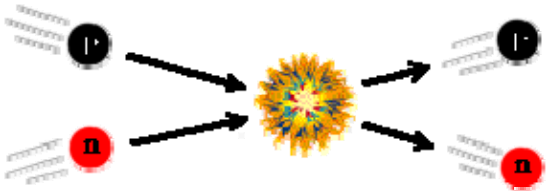
la estrecha relación que existe entre las propiedades del universo observado (la cuantía de helio) y la física cuántica fundamental (el número de especies de neutrinos).

06.25

La Era Radiactiva y la Nucleosíntesis Primordial

A l final de la era leptónica han desaparecido todos los tauones, muones y leptones pesados, y recorren el universo de punta a cabo hordas de neutrinos; pero ya no interactúan con nada. Los únicos hadrones sobrevivientes son pequeñas contaminaciones de protones y neutrones con diez protones por cada dos neutrones. Fotones, electrones y antielectrones siguen aún en equilibrio, creándose y destruyéndose entre ellos. Cuando la temperatura desciende por debajo del umbral de producción de pares electrón-positrón, casi todos esos pares se desintegran en fotones (recalentando levemente el universo). Este umbral de temperatura señala el inicio de la era radiactiva. Los positrones desaparecen de la sopa por aniquilación, y el pequeño número de electrones de carga negativa que subsiste es igual al número de protones de carga positiva (suponiendo que la carga eléctrica total del universo, cantidad conservada, fuese inicialmente cero). Dado que hay sólo un protón por cada 400 millones de fotones aproximadamente, sólo habrá un electrón por cada cuatrocientos millones de fotones. El universo está ahora dominado por la radiación de fotones (por ello se le suele llamar también a esta época del cosmos era fotónica) y, la materia, tiene una mezcla de nucleones y electrones, que forman un ligero polvo en un océano de luz radiante y viscoso.

En el primer segundo (que marca el inicio de la era radiactiva que se prolongará entre 200.000 años y 300.000 años), la temperatura es de 10^{10} °K pero comienza a bajar hasta 3.000 °K y la densidad desde 10^{4} hasta 10^{-21} [g/cm^3]. Todo el universo está a punto de convertirse en un gigantesco reactor termonuclear. Entre uno y los quince minutos siguientes, y a una temperatura entre 1.000 y 20 millones de grados Kelvin se produce un acontecimiento crucial en la historia cósmica: la nucleosíntesis primordial**. En este proceso se constituyen los núcleos de los átomos de elementos ligeros por fusión de protones y electrones. Las fuerzas de la interacción nuclear fuerte entre esas partículas y sus interacciones débiles, que transforman protones en neutrones y viceversa, determinan la velocidad de las reacciones que forman los núcleos. El factor que controla la tasa de las reacciones es la rápida expansión del universo, lo que implica un descenso continuo de temperatura y densidad de partículas. Lo último es equivalente a aumentar la distancia entre ellas, lo que dificulta más y más que las partículas se encuentren para reaccionar. Antes de esta época, los choques eran demasiado violentos para formar núcleos estables. Después, la energía de las partículas incidentes no es suficiente para vencer la repulsión electrostática entre protones. Esto implica que hay algo de tiempo, pero no mucho, para que ocurran las reacciones termonucleares que producen los núcleos de los elementos químicos, como ocurre normalmente en el centro de las estrellas, donde hay un tiempo más que suficiente para que ello se lleve a cabo. No obstante, en los cien segundos, aproximadamente, que transcurren desde el inicio de la era radiactiva se forma casi todo el helio que vemos hoy, como consecuencia de la combustión del hidrógeno.**



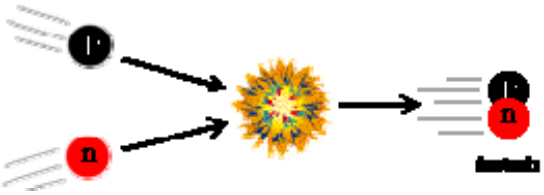
Mientras no se desencadenó la nucleosíntesis en el universo primitivo, con anterioridad, no se produjeron núcleos debido a la alta densidad que comportaba la energía. Para que se cree un núcleo es necesario que se produzca una colisión entre nucleones y que éstos permanezcan enlazados. En el universo primitivo, la reacción clave fue la colisión de un protón y un neutrón para formar un núcleo de deuterio (isótopo del hidrógeno). Las colisiones entre protones y neutrones habían estado ocurriendo desde «el principio», pero sus energías eran demasiado alta para permitirles enlazarse y formar un núcleo de deuterio.

Las estrellas, que se formaron bastante después del Big Bang, convierten también hidrógeno en helio mediante combustión, pero lo hacen a un ritmo mucho más lento. Desde hace 10.000 millones de años, época en que aparecieron las primeras estrellas, éstas, con su combustión, sólo han convertido en helio del dos al tres por ciento del hidrógeno del universo. Sin embargo, el 25 por ciento de toda la materia visible del universo es helio que se formó en unos minutos durante el Big Bang. La fusión del hidrógeno para producir helio liberó energía como una bomba de hidrógeno. Pero incluso la aportación de esa inmensa energía a la densidad energética total que ya había en el gas fotónico fue minúscula y no recalentó significativamente el universo.

El proceso de producción de núcleos atómicos, constituidos de protones y neutrones, es un proceso competitivo y algo contaminante donde se encuentran también presente los neutrones en el espeso fluido de luz pura: los restos de la sopa de partículas cuánticas. Protones y neutrones se bombardean entre sí constantemente y bombardean a los fotones. Por esta razón, muchos procesos lentos no tienen tiempo de realizarse antes de que la expansión aleje las partículas o les quite la energía necesaria para interactuar. Al colisionar protones y neutrones pueden formar un núcleo de «deuterio »,

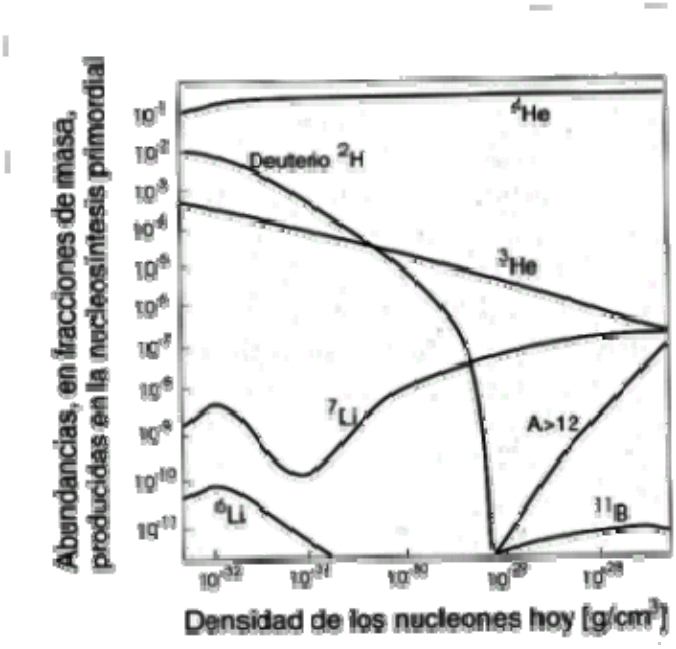
mediante la unión de un solo protón y un solo neutrón (un isótopo de H).. El deuterio tiene un núcleo con poca adhesión: el protón y el neutrón se liberan fácilmente cuando los golpean los omnipresentes fotones, a menos que la temperatura descienda lo suficiente, cuando la abundancia de deuterio crece. El deuterio tiene, en esas condiciones, tiempo de reaccionar con otros protones para formar «tritio» (otro isótopo del H) y luego, «helio$_3$», por transformación de un protón en neutrón. Finalmente, se forma el «helio$_4$», elemento sumamente estable.

A diferencia del núcleo del deuterio, el del helio, formado por la unión de dos protones y dos neutrones, tiene gran adherencia; es precisa mucha energía para disgregar el núcleo de helio. Una vez formado, resulta bastante estable. Se puede formar un núcleo de helio con dos deuterones que choquen y se unan. El problema que plantea la formación de helio por fusión del deuterio durante los primeros segundos es que el deuterio es muchísimo menos estable, se descompone al mismo ritmo que se forma, y por eso no hay mucho deuterio. Este es el «cuello de botella del deuterio» en la formación del helio.



El impedimento que imposibilita la creación de núcleos atómicos se denomina con el nombre de «cuello de botella». Ello se da cuando un medio intermedio es un enlace débil en un proceso de síntesis global. Una vez este «cuello de botella » es superado, las reacciones restantes pueden llevarse a cabo. En el universo primitivo, cuando el «cuello de botella del deuterio» fue superado, las trazas cada vez más estables de éste pudieron producir reacciones nucleares que llevarían a la formación del helio.

Así, los núcleos atómicos que se forman son los más sencillos: fundamentalmente hidrógeno y helio. Este proceso se da así, dado el hecho que al bajar la temperatura a mil millones de grados Kelvin, los fotones no tienen energía suficiente para descomponer a los deuterones cuando se forman. Pero un neutrón, si está libre y no ligado a un núcleo, como suele pasar casi siempre en esta fase, se descompone en un protón, un electrón y un neutrino antielectrónico en unos mil segundos, período de tiempo sólo diez veces mayor que la edad del universo en este punto. Así pues, algunos neutrones (en principio, dos por cada diez protones) han tenido ya una oportunidad de desintegrarse en protones cuando el universo cuenta cien segundos. Por consiguiente, de cada dieciséis partículas nucleares, catorce son ahora protones y dos son neutrones. Los dos neutrones pueden formar dos núcleos de deuterio uniéndose con dos protones. Ahora que la temperatura del universo ha descendido, desaparece el cuello de botella del deuterio y éste es ya suficientemente estable para chocar y formar helio. Casi todo el deuterio se fusiona rápidamente en helio, y cuando el universo tiene unos 200 segundos se completa el proceso de combustión por fusión. De las dieciséis partículas nucleares de un principio, cuatro, dos neutrones y dos protones, están unidas formando helio, mientras que las doce restantes son protones. Vemos que cuatro de las dieciséis partículas nucleares, es decir, el 25 por ciento de la materia nuclear del universo, forman helio (isótopo normal He4), y la mayor parte de la restante es hidrógeno. Esto es exactamente lo que se observa hoy: resultado de los primeros minutos del universo y una sólida confirmación de la teoría del Big Bang.

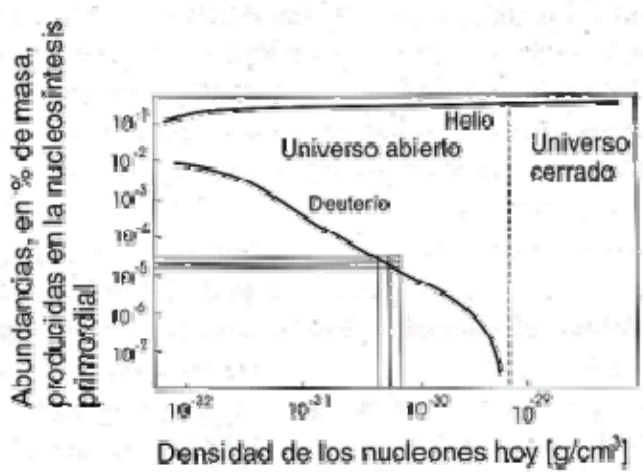


La nucleosíntesis del modelo estándar predice una generación de los elementos más livianos como función de la cantidad de materia bariónica en el universo, medida por la densidad de materia normal.

Podemos concluir que la cantidad de helio producida depende primordialmente de la proporción inicial protón-neutrón que hay al principio de la era radiactiva y también del ritmo al que baja la temperatura. No influye demasiado en esta cuantía la relación entre el número de fotones y el de partículas nucleares, la entropía específica del universo.

Pero una pequeña cantidad de deuterio, aproximadamente un 0,01 por ciento de todo el hidrógeno (proporción que hoy se observa) es evidente que escapa. No se funde en helio.Esta pequeña cantidad residual de deuterio depende bastante directamente de la entropía específica, de la relación entre el número de fotones y el número de partículas nucleares. Si el número de partículas nucleares es relativamente elevado (baja entropía específica) hay más deuterones que pueden chocar entre sí y sobreviven pocos al holocausto termonuclear. Pero si el número de partículas nucleares es relativamente reducido (elevada entropía específica) habrá menos neutrones que choquen para formar helio y sobrevivirán más. Cuanto menor es el número de partículas más deuterio elude la combustión.

Aquí nos encontramos motivados a señalar que la física de esta época es bastante rutinaria y sencilla y se inserta dentro de un dominio experimental bastante conocido y docentemente muy recurrente. Las predicciones precisas son más que posibles. La abundancia que se predice para el He4 varía muy poco con la densidad presente de los nucleones a diferencia de la abundancia del deuterio, que es muy sensible a ella (fig. siguiente) y que disminuye si aumenta esa densidad. La razón, como ya lo expusimos, son las colisiones que desintegran los frágiles deuterios. En consecuencia, la densidad de deuterios es un excelente medio de medición de la densidad de nucleones universal. Adicionalmente, el deuterio no se forma en las estrellas, ya que son destruidos por ellas.



Las cantidades de deuterio y de helio dependen de forma muy distinta de la densidad de nucleones del universo. La abundancia del

deuterio es muy sensible a ella, de forma que su medida puede entregar una precisa estimación de la cantidad de materia normal. Los rangos indicados muestran las observaciones más confiables.

El que la abundancia relativa de deuterio observada sea alta (un 0,01 por ciento es mucho) indica una entropía específica alta: unos 400 millones de partículas fotónicas por partícula nuclear. Parte del deuterio formado en el Big Bang puede destruirse, como ya lo mencionamos, al caer dentro de las estrellas en la evolución posterior del universo. Así que es posible que en el Big Bang se produjera más deuterio del que hoy observamos.

Debido a todas estas incertidumbres, casi todos los físicos y astrofísicos creen que la cantidad de deuterio hoy observada es inferior a la que se formó durante la era radiactiva. De ser así, llegamos a la conclusión de que el valor de la entropía específica entraña una densidad actual de materia nuclear visible correspondiente a un parámetro cósmico Ω = '/10... que no basta para cerrar el universo. Si queremos un valor más alto de Ω, tiene que existir en materia oscura, posiblemente neutrinos de gran masa, u otras partículas exóticas de las cuales se tiene cierta certeza, pero cuya abundancia descubierta hasta ahora sumada a la materia nuclear visible sólo llega al setenta por ciento de la masa crítica, lo que nos inserta en un pronóstico tétrico para un final del universo. He aquí un nuevo ejemplo de cómo la física del micromundo (la producción de deuterio en la era radiactiva) tiene implicaciones cosmológicas: el valor del parámetro Ω.

Es importante notar que en el modelo estándar se obtienen las proporciones observadas de los elementos mencionados si la masa en bariones (materia normal) está limitada entre el 2% y 16% de la masa total del universo.

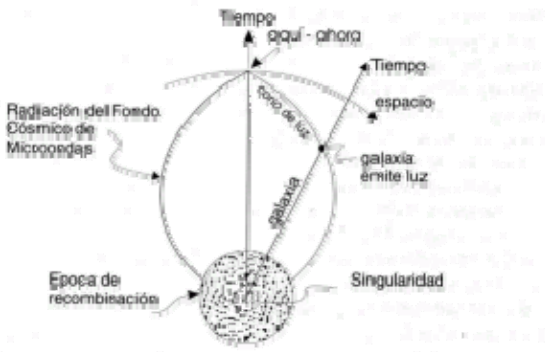
Ahora bien, transcurridos los primeros minutos, el inmenso reactor nuclear que es el universo se apaga. La nucleosíntesis se ha completado; la temperatura sigue bajando; el universo se expande. Está formado ya por un gas de fotones, electrones, protones, y núcleos de elementos ligeros como el helio y el deuterio. En este estado plasmático (similar al del interior de una estrella) no sucede gran cosa hasta que transcurren unos 300.000 años y la temperatura alcanza los 3.000 °K. En este punto sucede algo espectacular: el Universo se hace transparente. Este fenómeno se denomina «recombinación».

06.26

Recombinación y Fin del Big Bang

Durante sus primeros 200.000 a 300.000 años, el universo era un ardiente mundo de oscuridad; era opaco a la transmisión de la luz. Era similar al interior del Sol, que también es opaco (no puede verse directamente a través del Sol). Si algunos electrones se uniesen con protones o núcleos de helio para formar hidrógeno o helio atómicos serían destruidos de inmediato por los fotones energéticos. En consecuencia, los fotones no tienen que desplazarse mucho para interactuar. Esta es la causa de que los telescopios no vean jamás luz de acontecimientos anteriores a unos 300.000 años, al igual que no pueden ver el interior del Sol.

Ahora bien, la era radiactiva termina cuando los fotones cesan de interactuar con la materia. Ello ocurre cuando la temperatura baja de 3.000 °K, y los electrones se unen a los núcleos y forman verdaderos átomos (éste es el fenómeno de la «recombinación o desacoplamiento»), dando como resultado una materia neutra, a diferencia del plasma anterior. La radiación se desacopla de la materia o esta se recombina, debido a que los fotones ya no tienen energía suficiente como para separar a los átomos en sus choques con ellos. Los fotones al dejar de interactuar vuelan libres de un lado a otro, a la velocidad de la luz. Así, la fase de recombinación marca el fin de la era radiactiva. Pero de pronto, el universo se vuelve transparente, lo baña una brillante luz amarilla, el color que corresponde a la materia a 3.000 °K. La luz más antigua nos puede llegar desde esa época, después de atravesar la mitad del universo visible. Este acontecimiento señala, por acuerdo convencional, el fin del Big Bang, y la expansión sin estructuras del universo; pronto empezarán a surgir las estructuras (las protogalaxias).



La radiación luminosa más antigua que nos puede llegar proviene del instante cuando ocurre la fase de recombinación o desacoplamiento, recorriendo la mitad del universo visible.

Pero también en el mismo periodo del universo que estamos describiendo y conocido como el de la recombinación, ocurre otro acontecimiento importante: la densidad energética de la materia en forma de helio e hidrógeno atómicos supera la densidad energética de los fotones. El Universo pasa a estar dominado por la materia y no por la radiación, característica que conservará hasta el día de hoy, en que hay en él mil veces más densidad de materia que de radiación.

Claro está, que la recombinación o desacoplamiento no es un hecho que se haya generado masivamente en un corto instante de la curiosa y enigmática vida del universo, ya que cuando comienza esta era los electrones tenían aún suficiente energía para que el proceso de recombinación no ocurriera de forma masiva hasta que transcurrieran unos 700.000 años. La captura de los electrones para formar los átomos tuvo una consecuencia importantísima: sin electrones libres, la radiación electromagnética (los fotones) ya no tenían con quién interactuar y el universo se volvería transparente al paso de ésta. Esto significó que los fotones serían capaces de expandirse junto con el universo. Esos fotones que acabaron por ser libres tenían energías altísimas que se traducía en longitudes de onda muy cortas. Pero la expansión del universo causó el alargamiento de esta longitud de onda. Esos fotones de longitud de onda alargada debida a la expansión son a los que nos referimos cuando hablamos de «la radiación de fondo cósmico de microondas». Ello, sin duda, para la generalidad de nosotros los físicos, es un remanente del Big Bang, que hemos sido capaces de cuantificar su intensidad, y que se ajusta con mucha precisión a lo que se predecía en los cálculos teóricos. Ésta ha sido una de las evidencias más duras y rotundas a favor de la imagen del universo que proporciona el modelo del Big Bang.

Pero poco después del comienzo de la recombinación, algo así como unos 300.000 años transcurridos desde el inicio del universo, comienza a embrionarse la época que se le suele llamar como «transparente». La temperatura comienza a bajar desde los 3.000 °K hasta los 2,73 °K que tiene hoy la ya mencionada radiación del fondo cósmico. El color del universo pasa del amarillo al naranja, luego al rojo, luego al rojo intenso y luego a la oscuridad del espacio profundo. Al cabo de unos 10 millones de años, según nuestro computador, la densidad de la materia era de un millón de veces mayor que la de hoy, que es de aproximadamente de un átomo de hidrógeno por centímetro cúbico. Entonces, en realidad, la densidad de la materia de todo el universo era equivalente a la densidad de la materia que hay hoy en las galaxias. Esto implica que no podrían haber existido galaxias semejantes a las actuales cuando el universo sólo tenía diez millones de años: porque habrían estado unas apiladas encima de las otras. Por ello, es que se supone que las galaxias comienzan a formarse cuando la recombinación baja la presión de la radiación más de mil millones de veces, permitiendo a la gravedad operar entre las regiones que tienen ligeras diferencias de densidad. En cierto sentido, las primeras fases de esta época han sido totalmente desconocidas hasta ahora.

Los telescopios e instrumentos satelitales hoy sólo han percibido objetos hasta un corrimiento al rojo de z = 6,68. La radiación del fondo cósmico nos trae información de z = 1.000 a 2.000. Pero aún no podemos observar nada de la región intermedia, pese a los grandes logros que se han alcanzado en materia observacional al haberse distinguido una posible galaxia que se encontraría a una distancia por confirmar de z = 10,56. Por otro lado, se espera lanzar satélites que detectarán los detalles más finos de la radiación del fondo cósmico, que nos darán información sobre la estructura detallada en la época de recombinación, a partir de la cual se podrá deducir su evolución posterior. Por otra parte, los detalles de esta radiación podrían ser afectados por la región intermedia que tiene que atravesar, como una luz que la ilumina desde atrás, y en ella se podrían perfilar las primeras estructuras. Es la esperanza de los observadores.

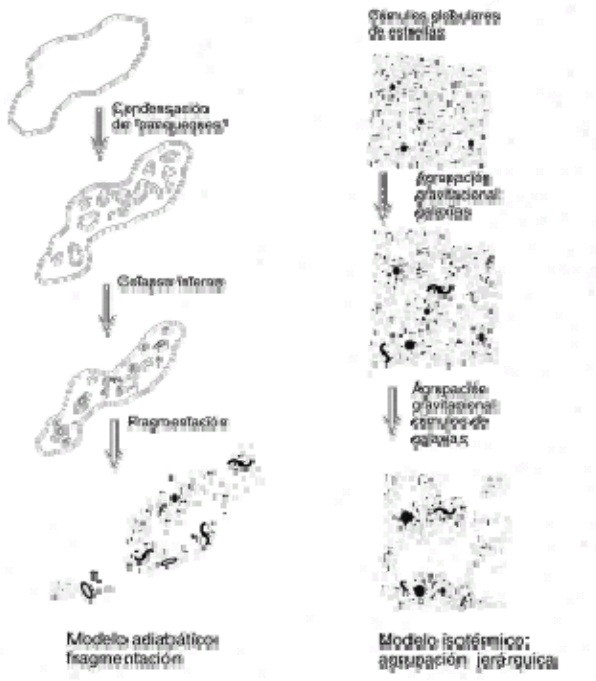
Gran parte de la visión de estas épocas, anteriores a z = 6,68, son el resultado de cálculos teóricos, guiados por los principios de la física. Por ello, creemos que las galaxias o protogalaxias probablemente se formaran entre los primeros cien millones de años y los primeros mil millones, cuando los átomos de hidrógeno y helio cayeron en los grumos de materia oscura invisible preexistente. No deja de ser paradójico pensar que conocemos con mucho mayor precisión lo que ocurre en los primeros 100.000 años del universo (salvo antes de 10^{-6} segundos), que la información que tenemos entre los 100.000 y 1.000.000.000 de años de su vida.

Han circulado varios modelos teóricos sobre la formación de estructuras y galaxias, pero desarrollemos uno con nuestro computador y veamos que nos depara. Si accionamos nuestra maquinita hacia adelante en el tiempo, a partir del primer millón de años (cuando la materia del universo era un gas uniforme de hidrógeno y helio) hasta llegar a los primeros mil millones de años, podemos ver formarse las galaxias. Del gas uniforme se formaron grumos inmensos de gas de hidrógeno y helio. Debían ser del tamaño de supercúmulos (según el modelo «hojuela») o justo del tamaño de las propias galaxias individuales (según los otros modelos que expusimos en una de las secciones de un capítulo anterior). Quizá se formasen entonces las estrellas tipo Población III (estrellas compuestas de helio e hidrógeno puro, sin elementos pesados), Las de gran masa se consumirían rápidamente,

colapsándose en agujeros negros o en estrellas de neutrones; esto provocaría ondas de choque en el gas residual, que lo comprimirían, creando las condiciones para la formación de nuevas estrellas. En los núcleos de las galaxias pudieron quizá formarse gigantescos agujeros negros que consumían estrellas y emitían enormes cantidades de luz. los primeros quásares. El universo iba ya camino de crear estructuras cada vez más complejas: galaxias, estrellas, planetas y, más tarde, la vida. Los habitantes del Jardín Cósmico.

Pero para no quedarnos con una sola visión computacional sobre la formación de las estructuras cósmicas, veamos también otros dos escenarios que han emergido de otros modelos configurados en computadores distintos al que hemos usado en el trabajo que hemos estado presentando. Ambos, se sostienen en ideas que dependen del tipo de las irregularidades del contenido materia y de las radiaciones que han ocurrido antes de la fase de recombinación.

El primero de estos modelos, supone perturbaciones en presión y energía sin que pueda existir la oportunidad para que ésta fluya endógena o exógenamente de cada una de las irregularidades. En lenguaje técnico se llaman «perturbaciones adiabáticas» y son muy semejantes a las ondas del sonido en el aire, que son lo suficientemente rápidas como para que no emitan calor desde el volumen de aire comprimido que acompaña a cada onda. O sea, la temperatura alcanza a subir o bajar ligeramente en esos volúmenes, suficientemente rápidos. En el caso del universo, en el interior de cada perturbación la temperatura se modifica. En este caso, por razones mecánicas, la radiación borra las irregularidades cuyos tamaños sean menores que las de una escala correspondiente a los grandes cúmulos de galaxias (unos 20 Mpc o mayores) y masas de unos 10^{15} , que corresponden al tamaño del horizonte en esa época. Después de la recombinación la acción de la propia gravedad de estas estructuras permite que crezcan, atrayendo más masa externa y contrayéndose al mismo tiempo. Se formarían unas enormes nubes más densas que el ambiente, una suerte de panqueque cosmológico, que luego se fragmentarían dando origen a las galaxias. Expresado de otra manera, según esta visión las estructuras de grandes escalas se formarían primero, derivando por fragmentación las más pequeñas.



Modelos adiabáticos e isotermal de la formación de estructuras y galaxias en el universo

Ahora, hablando del segundo modelo que hemos enunciado describir, está basado en la suposición que las irregularidades antes de la recombinación sean de tipo «isotermal», o sea, que haya tiempo para que fluya el calor y la temperatura sea constante. En ellas, la densidad sería mayor, con una más lenta evolución. El tamaño inicial de estas perturbaciones que pueden sobrevivir a la época de radiación sería sólo del orden de 10^{6} . Después de la recombinación, por fragmentación estas masas deberían producir cúmulos de estrellas. Luego, ellos se atraen entre sí, formando galaxias cada vez más grandes. La lenta

asociación gravitacional de éstas dará origen a estructuras cada vez de mayores dimensiones, como grupos, cúmulos y supercúmulos de galaxias. En esta teoría, estas dos últimas formas de asociaciones se estarían formando en la época presente, hecho que parece corroborado por las observaciones. Un aspecto aún incierto en esta teoría es que las primeras perturbaciones tienen que ser generadas por partículas con masa que no sufran interacciones electromagnéticas para evitar que las borre la presión de la radiación. Estas partículas podrían ser los leptones masivos, que, como vimos, pueden contribuir a la densidad del universo. Asimismo, observaciones de galaxias cercanas necesitan de la presencia de grandes cantidades de masa oscura (sin interacciones electromagnéticas) en sus alrededores, que también puede ser consecuencia de la existencia de esos leptones masivos. Todo ello permite ser optimista en este campo.

Los computadores, para ambos modelos, matemáticamente permiten reproducir de manera coincidente las estructuras observadas. Sin embargo, todavía queda camino que recorrer para que se pueda llegar a un pronunciamiento sobre cuál de las teorías es la que se corresponde mejor con las observaciones, lo que se irá dando en la medida en que se siga mejorando en profundidad y detalles.

Más Allá De La Síntesis Electrodébil

Al recorrer examinando todo el periodo de vida del universo podemos concluir que la parte que mejor comprenden los cosmólogos sobre el Big Bang que da inicio al cosmos va desde los nueve microsegundos (cuando se rompe la simetría electrodébil) a los primeros 300.000 años (la época de la recombinación). No se entiende demasiado bien el proceso ni antes ni después de ese periodo. Por ejemplo, ha sido difícil estudiar el periodo de formación de las galaxias debido a su complejidad. Recién en los últimos años se han logrado, aunque insuficientes todavía, avances al respecto, gracia a el HST. Sólo la utilización a su plena capacidad de los nuevos grandes telescopios que se encuentran todavía en etapa de montaje, y la postura en órbita de uno espacial más poderoso que el Hubble, podrán proporcionarnos en el futuro los datos científicos necesarios para adentrarnos en esta era tan compleja. Las temperaturas y energías son tan altas antes de que se produzca la ruptura de la simetría electrodébil, que no han podido reproducirse aún en ningún laboratorio de física de alta energía. Lo que pasa en ese período primordial es un juego de conjeturas para los teóricos de la física de campos.

Supongamos que retrocedemos en el tiempo hasta los nueve primeros microsegundos y que, utilizando nuestro computador, dejamos que el tiempo corra hacia atrás, y que aumente la temperatura. ¿Qué pasa? Según el modelo estándar, no mucho. El gas radiante compuesto por el plasma de quarks-gluones y de leptones sigue contrayéndose y su temperatura aumenta. Como la densidad y la presión de este gas plasmoso se ajustan a las condiciones del sistema de singularidad de Penrose-Hawking, acabamos encontrando en el origen mismo del universo la singularidad y nuestro computador lanza números infinitos... garabatos y delirios. Para elaborar una imagen del universo antes de los primeros nueve microsegundos, tenemos que ir más allá del modelo estándar de las partículas cuánticas y pasar a un modelo nuevo. ¿Cómo elaborar un nuevo modelo? ¿Qué condiciones tendría que reunir?

El modelo estándar ha tenido mucho éxito y se considera como base para entender la estructura actual del universo. Sus principales fundamentos observacionales son la detección de la radiación del fondo cósmico, la expansión del universo, la homogeneidad y la isotropía global, la abundancia relativa de los elementos químicos primordiales y el número del tipo de neutrinos existentes, entre otras. Sin embargo, como hemos visto en distintas secciones de este capítulo sobre el universo primitivo, hay áreas donde quedan detalles oscuros o totalmente desconocidos. Pero más aún, propugna algunas consideraciones teóricas que no coinciden con ideas generales sobre las simetrías, que suelen ser correctas en otros dominios, como las simetrías partícula-antipartícula, entre números leptónicos y otras de orden cuántico. Adicionalmente, quedan insolubles ciertos problemas lógicos y más de alguna paradoja.

Pero, que tiene méritos, los tiene. El modelo estándar de quarks, leptones y gluones, tiene la ventaja de haber sido, cuando recién transcurren los primeros meses del siglo XXI, bastante comprobado en laboratorios de alta energía. Si queremos superarlo y adentrarnos en la situación de aún mayor energía anterior a los primeros nueve microsegundos, hemos de abandonar el terreno seguro, verificado y estudiado en los laboratorios, y aventurarnos en lo desconocido, dejándonos guiar por la imaginación y, ello, aunque se cuente operativamente con los grandes aceleradores como el «The Relativistic Heavy Ion Collider» o el «The Large Hadron Collider». Pero no sólo por la imaginación. Podemos enfocar también el asunto de modo racional. Antes del noveno microsegundo, tuvieron que suceder importantes acontecimientos que propiciaron las condiciones precisas para que el universo evolucionase hasta llegar a ser como lo vemos hoy. Sí no tenemos cuidado, los vuelos de la imaginación nos dejarán pronto inmovilizados en tierra.

Podría parecer, en principio, bastante fácil elaborar un modelo nuevo, que incluyera el modelo estándar, y al mismo tiempo, lo superase. Pues bien, no lo es. La dificultad estriba en que si no tenemos muchísimo cuidado, el nuevo modelo predecirá un estado del universo actual que no coincidirá en absoluto con los hechos.

El estado actual del universo depende decisivamente de determinadas cantidades físicas que oscilan en una gama de valores muy precisa. Ya he mencionado una cantidad física de este género, la entropía específica de 400 millones de fotones por partícula nuclear. Si esa cantidad fuese muy distinta de su valor actual, no existiría el universo tal como lo observamos. En el modelo estándar del universo primitivo, el valor de la entropía especifica es un dato: corresponde a la cantidad inicial de carga del número bariónico del universo. Otros modelos que fueran más allá del modelo estándar podrían determinar la entropía específica, pero desgraciadamente podrían resultar en un valor erróneo, conduciéndonos a un universo inexistente. Los creadores de modelos ambiciosos han de tener mucho cuidado.

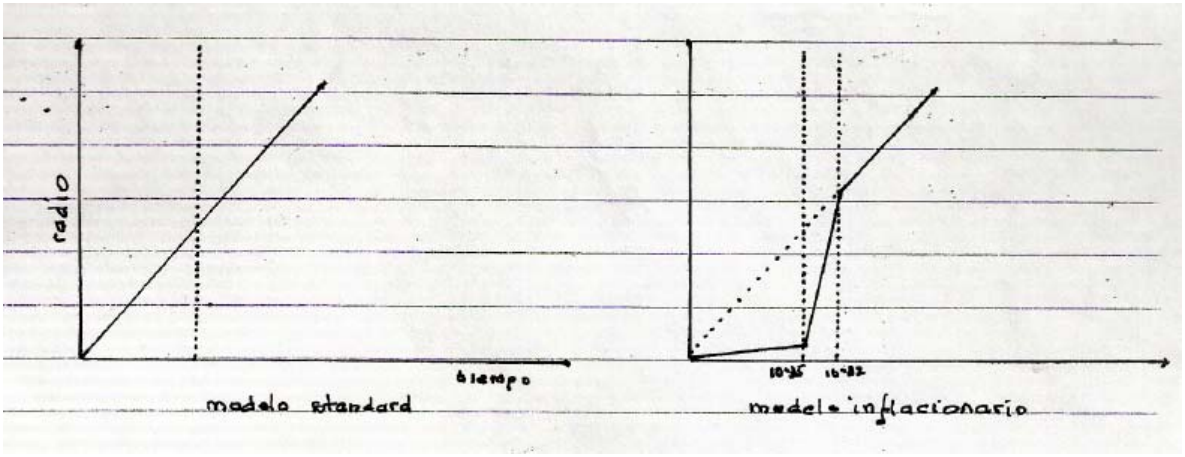
Otro ejemplo de esas cantidades físicas críticas son los valores de las masas cuánticas. Por ejemplo, el quark *d* tiene una masa más pesada que el *u*, y por tal razón el neutrón, que contiene más quarks *d* que el protón, es más pesado que éste. Esto implica que un neutrón libre puede desintegrarse en un protón y liberar energía. Pero si, por el contrario, el

quark *u* fuese más pesado que el *d*, el nucleón estable sería el neutrón y no el protón. Pero entonces no podría existir el átomo de hidrógeno, porque su núcleo es un solo protón que se desintegraría en un neutrón. Aproximadamente el 75 por ciento del universo visible es hidrógeno, y no existiría, claro, si el valor de las masas quárquicas fuese ligeramente distinto.

Hay muchos ejemplos de cantidades físicas de este género que no pueden exceder un ámbito limitado de valores, pues, de hacerlo, el universo no sería como es, no existirían las estrellas ni las galaxias ni la vida. Desde el punto de vista del modelo estándar, simplemente se supone que tales cantidades tienen sus valores observados. Son datos que damos a nuestro computador y, lógicamente, podrían tener otros valores. Pero los físicos quieren entender el valor de esas constantes observadas, en base a una teoría física general y no limitarse a aceptarlas como datos. Esa teoría general, si existe, va sin duda más allá del modelo estándar, pues debería, lógicamente, fijar con exactitud esas constantes. Esa teoría cumpliría plenamente el sueño de Einstein de que «no hay constantes arbitrarias».

Para conseguir realizar ese sueño, los físicos teóricos ambiciosos estudian muchísimas otras nuevas ideas. Ideas, que si bien no han sido confirmadas ni refutadas por experimentos, por ahora sólo engruesan el número de páginas de «***La Historia Sin Fin...*** ». No obstante, son ideas que se hallan en la frontera de la investigación actual, pueden hablarnos del periodo que transcurre antes del noveno microsegundo y desvelar quizás el acto mismo de la creación. Su campo de experimentación es todo el universo. Dejando a un lado toda prudente cautela, examinaremos más adelante tales ideas.

FOTOCOPIAS:



TREINTA: EL DESTINO DEL UNIVERSO:

De acuerdo a la masa que tenga el universo dependerá su geometría y también tendrá uno u otro final. Según la Teoría de la Relatividad la masa equivale a la energía, o sea que al analizar la masa también estamos analizando la energía. Hasta los años 70 se creía que el universo era esférico, cerrado, finito y en expansión. Éste fue el modelo adoptado por Einstein. En los años 80 se pensaba que no era esférico sino plano (hasta los límites de la visibilidad). El universo entonces era plano, abierto y en expansión continua, expansión que se iba frenando muy lentamente (con un valor tendiente a 0). Para el año 2000 se llevaron a cabo diversos análisis de las supernovas lejanas (tipo 1A) para verificar las distancias. Resultado de estos análisis fue la conclusión de que la expansión del universo se acelera. La pregunta entonces es si el universo colapsará por autogravitación o si la expansión continuará indefinidamente y cual será su evolución en cada caso.

Colapso gravitatorio: Si la masa del universo es la suficiente como para frenar la expansión la misma se detendrá e invertirá su dirección. Para realizar los cálculos de cómo terminaría el universo en este caso puede suponerse que la masa es el doble de la actual. El valor actual de la velocidad de expansión es de 72 Km/seg. (la constante de Hubble). A este ritmo la expansión duraría unos 50.000 millones de años mas.
Durante el período expansivo el Sol evolucionará hacia una gigante roja, su radio abarcará y destruirá hasta Marte inclusive. Esto ocurrirá aproximadamente dentro de 5.000 millones de años. Antes de esto, dentro de aproximadamente 3.000 millones de años (más-menos 1.000 millones de años) la galaxia M31 Andrómeda (velocidad de acercamiento: 120 Km/seg.) chocará contra la Vía Láctea, formando ambas una gigantesca galaxia esferoidal (con más o menos la suma de la masa de ambas).
Para ese momento podrán verse dos tipos de galaxias: con corrimiento hacia el rojo (las más lejanas y, por tanto, las más antiguas, galaxias que veremos que aún se alejan, con movimiento radial positivo) y con corrimiento al azul (las más cercanas, con corrimiento radial negativo, movimiento que delatará que ya empezó el colapso del universo). El radio del universo será el doble del actual y, correspondientemente con ello, el fondo de microondas tendrá un valor de 1,31 K (la mitad del actual).
En este universo en colapso, si bien de acuerdo a las leyes físicas la energía siempre se conserva, la energía aumentará (el universo será más caliente que en el período de expansión). Supongamos que el Sol emite un fotón, de acuerdo a la Teoría de la Relatividad, para conservar la energía el Sol perderá una pequeña porción de su masa. El fotón aumentará progresivamente su longitud de onda (disminuyendo su frecuencia, corrimiento cosmológico hacia el rojo) perdiendo así energía. Pero al comenzar el colapso será al revés, el fotón acorta su longitud de onda, se calienta, aumentando su energía. Así, el fotón irá ganando energía y llegará el momento en que tendrá más energía que cuando el Sol lo emitió. Todo el universo ganará energía que no se compensará con pérdida de masa, el universo será más caliente al caer sobre sí mismo.
Al comenzar el colapso, y durante miles de millones de años, no pasará nada importante. Sólo se empezarán a notar diferencias cuando el universo alcance la décima parte del radio actual. La temperatura del cielo nocturno aumentará hasta los 300 K (27° C, la temperatura media de la Tierra al mediodía).

70 millones de años después la temperatura continuará aumentando, llegando un momento en que las moléculas de todo el universo se disociarán y luego todos los átomos se ionizarán. El universo estará compuesto entonces por núcleos, electrones y neutrinos.
70.000 años mas tarde la temperatura habrá alcanzado los 10.000.000 K, desapareciendo todos los objetos (la temperatura del universo será más alta que la de las estrellas).
22 días después la temperatura será de 100.000 millones de K, anulándose simétricamente la nucleosíntesis primitiva (los núcleos se escindirán, quedando los nucleones sueltos, al revés de lo que sucedió a los 3 m. 46 seg. del origen del universo).
Volverán a aparecer las incertidumbres cuánticas de los primeros segundos. Al llegar la temperatura a 10^{33} K no se sabe que puede suceder, ya que la física actual no tiene parámetros para explicarlo. Se calcula que el universo desaparecería, resumiéndose sobre sí mismo.
En algún momento se alzó, contra esta teoría, la idea de que el aumento de la energía frenaría el colapso y el universo volvería a expandirse. Fue la llamada Teoría del universo oscilante, con ciclos de contracción y expansión. Sin embargo, se conoce bastante bien la relación entre fotones y nucleones (se conoce bastante bien el número de cada uno, 400 fotones por cm^3). Si en cada ciclo oscilatorio aumenta ligeramente esta relación, el número de fotones debería ser infinito, pero no lo es. Por otra parte, está demostrado que no existe ningún mecanismo plausible para producir un rebote del universo, ya que cuando el universo empezó la densidad ya era mucho mayor que la necesaria para producirlo.

Universo en continua expansión: Se han hecho predicciones provenientes de diversos campos de estudio, todas tienen en común que van cubriendo lapsos cada vez más prolongados hasta llegar a un futuro inmensamente lejano.

1) Las estrellas agotarán toda sus reservas energéticas. La formación de estrellas implica consumo de materia difusa, consumo que es compensado, en parte, por la expulsión de materiales pesados desde las estrellas a través del viento estelar y diversos procesos explosivos. Por otro lado, las galaxias captan materia difusa del espacio intergaláctico gracias a su desplazamiento a través del mismo. Sin embargo, con el tiempo dicha materia se agotará. Se calcula que todas las estrellas, las que existen y las que podrán formarse, agotarán todas las reservas energéticas cuando el universo tenga 10^{14} años (100 billones de años). Para comparar, cuando el Sol tenga 10^{11} años será una enana negra.
2) Todas las estrellas que tengan planetas los perderán (ya se han detectado entre 12 y 14 planetas que viajan por el espacio a la deriva, sin relación con ninguna estrella). Los planetas pueden perderse por destrucción de la estrella alrededor de la cual giran o por la acción de una estrella intrusa (esto último será especialmente efectivo si la estrella intrusa penetra en el cilindro que el planeta dibuja en su traslación

alrededor de la estrella madre). En el último caso los planetas saldrían disparados por el espacio (las dos estrellas comenzarán a girar una alrededor de la otra y se producirá un efecto parecido al de una honda, gracias al cual tanto las estrellas como sus planetas saldrán disparados en distintas direcciones). El tiempo promedio para uno de estos encuentros entre dos estrellas depende de a) el área encerrada por la órbita del planeta, b) de la densidad estelar y c) de las velocidades relativas de cada estrella. En la Vía Láctea hay una estrella por cubo de espacio de un pársec (3,26 AL) de arista, con una velocidad promedio de 50 Km./seg. y un radio planetario promedio de 100 millones de Km. El encuentro entre dos estrellas se producirá cuando el volumen de espacio del cilindro dibujado por el planeta en su movimiento iguale al volumen donde se encuentra una estrella. Con estos datos puede calcularse que un hecho de este tipo se produce cada 10^{15} años. Así, todas las estrellas habrán perdido a sus planetas después de 100 encuentros, esto es, 10^{17} años.

3) Se desintegrarán las galaxias. Cuando dos estrellas se aproximan lo suficiente se produce un intercambio entre ellas (las estrellas comienzan a girar alrededor de un centro de masas), durante el cual una de las dos gana energía de momento (lo mismo que pierde la otra, conservación del momento angular). Si la estrella que alcanza energía (velocidad) lo hace en grado suficiente puede salir disparada al espacio intergaláctico. El Sol se desplaza a 230 Km./seg., si aumenta hasta una velocidad de 370 Km./seg. abandonaría la Vía Láctea (junto a todos sus planetas). Las estrellas que pierdan energía (velocidad) quedarán más aferradas al centro de la galaxia, acomodando su órbita de acuerdo a los efectos gravitatorios del mismo. Los encuentros seguirán ocurriendo, y estas estrellas continuarán perdiendo velocidad hasta caer hacia el agujero negro central, engrosándolo. Cuando la galaxia haya perdido el 90 % de su masa todo este proceso se acelerará. La materia restante tomará mayor velocidad en su viaje al centro galáctico. Esta enorme masa en movimiento emitirá ondas gravitatorias, perdiendo así más energía. Sólo quedarán entonces los agujeros negros centrales de cada galaxia (10^{18} años, un trillón de años).

4) Los protones se desintegrarán. Las dos leyes principales que gobiernan la desintegración de una partícula son: a) la ley de la conservación de la energía (los productos de una desintegración no pueden tener una masa superior a la partícula desintegrada) y b) la ley de la conservación de la carga (los productos de una desintegración no pueden variar la carga original). El protón puede desintegrarse en diversas combinaciones, por ejemplo $P \longrightarrow e^+$ (un positrón) + un pión positivo + un pión negativo. Se considera al protón como una partícula estable, ya que hay muy pocas probabilidades que se desintegre. La desintegración deriva de un cuanto de campo (partícula mensajera) cuya probabilidad de materialización es de 1 cada 10^{30} años. El protón está formado por 2 quarks arriba (uu) y un quark abajo (d). La desintegración lleva a que uno de los quark arriba se transforme en un anti-quark arriba, un anti-quark abajo y un e^+ (positrón). Para que esto ocurra se necesita la materialización de un bosón X (lo que se daría una vez cada $10^{30/31}$ años). Si los cálculos son correctos, el universo se quedaría sin protones cuando tenga 10^{32} años.

5) Los electrones se desintegrarán. El número de electrones es igual al número de protones, pero los protones se desintegrarán, produciendo positrones, quedando entonces un positrón por cada electrón. Uno es la antimateria del otro. Se aniquilarán entre ellos produciendo energía. El universo entonces estará compuesto por fotones, neutrinos, agujeros negros y los electrones y positrones que no se hayan encontrado. Esto sería alrededor de los 10^{32} años.
6) Desaparición de los agujeros negros. Los agujeros negros emiten partículas (radiación de Hawking), perdiendo masa en el proceso. Esta emisión se hace más rápida cuanto más pequeño es el agujero negro. Al emitir en cantidad, los agujeros negros brillarán. El universo agonizante será iluminado por los agujeros negros que están por estallar (al estallar emitirán destellos de rayos gamma). Se calcula que todos los agujeros negros habrán desaparecido evaporados cuando el universo tenga 10^{100} años. Quedarán entonces fotones, neutrinos, positrones y electrones, todos con bajísima energía. El universo será muy grande, muy oscuro, muy vacío y muy frío. Se acabará todo tipo de reacciones, la entropía será máxima.

¿Cómo se explica que la expansión se esté acelerando? Cuando Einstein creó su modelo de universo esférico lo vio estático y, por lo tanto, capaz de derrumbarse sobre sí mismo. Agregó entonces a su teoría una fuerza de expansión, la constante cosmológica para evitar la contracción del universo. Luego la dejó de lado, pero actualmente se piensa que hay que reactivar la idea de esta constante para explicar la expansión.
Hay otros que piensan que el impulso inflacionario (universo inflacionario) no fue un proceso único, sino que ocurre de continuo. Sería entonces posible que la llamada ‘esfera de Hubble’ (el universo visible) esté empezando un nuevo proceso inflacionario.
Otros piensan en una fuerza (llamada la quinta-esencia en recuerdo de la idea de los griegos de una forma de la materia que llenara el espacio para, entre otras cosas, evitar que la Luna cayera sobre la Tierra) que sería una propiedad del espacio que lo impulsara a acelerarse (esta quinta-esencia variaría levemente con el transcurso del tiempo).
Otros piensan que nada de esto existe, lo que sucedería es que la Teoría de la Relatividad tiene una falla cuando dice que la influencia de la gravedad disminuye a cortas distancias.
Teorías, teorías, teorías.