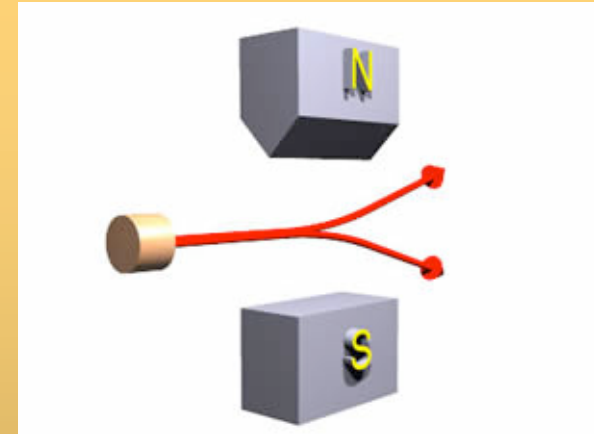


FISICA ATOMICA

Experimento Stern-Gerlach

Una partícula con momento dipolar magnético μ en un campo magnético B tiene una energía potencial $V=\mu B$

Si el campo B es inhomogéneo $B(x)$, la partícula experimenta una fuerza $F=\mu dB/dx$ que depende del signo de μ
Este efecto se superpone a la fuerza de Lorentz $F= q v \times B$



Principio de exclusión de Pauli e impenetrabilidad de la materia

La imagen de Rutherford de un átomo esencialmente vacío induce a pensar que se puede interpenetrar la materia. Esto es engañoso: los electrones de un átomo están tan cerca como les permite el principio de incertidumbre de Heisenberg y el principio de exclusión de Pauli. Si un electrón de mi mano intenta interpenetrar los átomos de una mesa, se violaría el principio de exclusión: el electrón intenta ocupar órbitas ya ocupadas por los electrones de la mesa.

MASA

¿En relatividad, qué se entiende por “masa de una partícula”?

La masa es una medida de la inercia de una partícula (p.ej. su “resistencia” a acelerarse cuando se le aplica una fuerza.

En relatividad se distingue entre la “masa en reposo de una partícula” (la masa medida en el sistema de referencia en el que está en reposo)

Y la “masa relativista” de una partícula, que incluye toda su energía, incluida la cinética

Toda forma de energía contribuye a la masa

Esto nos permite responder a otra pregunta

¿Por qué el protón tiene más masa que la suma de las masas
De los quarks que lo constituyen?

Los quarks dentro de un protón tienen una energía cinética gigantesca.

Esta energía cinética contribuye a la masa en reposo del protón

de hecho, la mayor parte de la masa del protón se debe a la energía cinética de sus constituyentes

ELECTRODINÁMICA CUÁNTICA, ETC

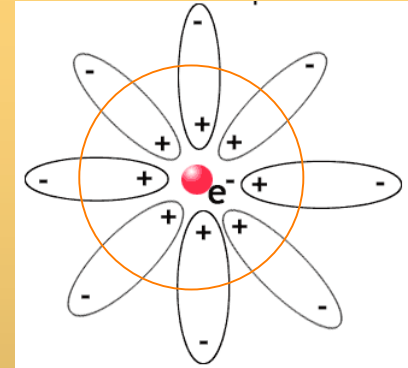
¿Por qué el vestido cambia la carga del electrón?

La palabra clave es “apantallamiento”

Recordemos la ley de Coulomb en un medio material

Los dipolos del medio apantallan la carga de modo que la fuerza de Coulomb es más débil (coeficiente dieléctrico)

La producción de pares virtuales hace que el vacío apantalle la interacción de forma similar



¿Por qué la carga del electrón vestido es igual que la del protón vestido?

La cantidad de polarización del vacío solo depende de la carga desnuda de la partícula. Por tanto, el electrón y el protón tienen un “vestido” idéntico

¿Cómo afecta la variación de la carga “vestida” a los procesos atómicos, p.ej. el enlace químico?

La variación de la carga con la escala de distancia/energía a la que se observe es una variación muy pequeña.

A efectos prácticos, a energías del orden de unos pocos eV, la carga del electrón tiene un valor prácticamente fijo, $q=1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$

¿Existe el antifotón?

La antipartícula tiene igual masa que la partícula, pero todas sus cargas (electromagnética, color, ...) son opuestas

El fotón no tiene cargas. La antipartícula del fotón es otro fotón

¿Qué pasa si un fotón emitido por un electrón no encuentra otra carga que lo absorba?

- 1) Puede ser absorbido por la misma carga que lo emitió (con lo que se interpretaría como uno de los fotones virtuales que crean el campo eléctrico alrededor de una partícula)
- 2) Puede escapar y ser observado como un fotón real (¡aunque esto quiere decir que ha sido absorbido por un electrón en nuestra retina/detector!)

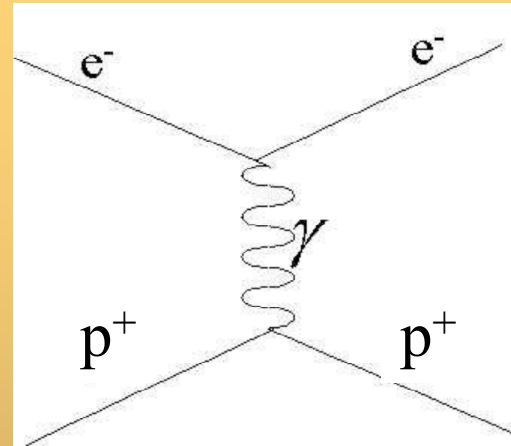
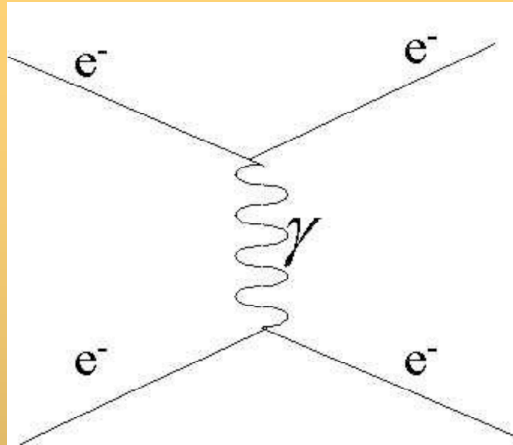
¿Cómo emerge una partícula virtual a real?

Se llama virtual a una partícula emitida y absorbida dentro del proceso que se estudia

Se llama real a una partícula que escapa hasta los detectores del que estudia el proceso

(La distinción es hasta cierto punto semántica/humana)

Interpretación de los diagramas de Feynman



Un diagrama de Feynman ilustra la manera en que se ha podido producir un Proceso físico. La Mecánica Cuántica nos obliga a sumar sobre todas las maneras en que un proceso se ha podido producir (como en la doble rendija)

¿Qué es el vacío?

Matemáticamente se define como el estado de mínima energía del sistema. En Mecánica Cuántica, sabemos que incluso el estado de mínima energía tiene fluctuaciones (p.ej. un electrón en el orbital de energía mínima no tiene un valor fijo de su posición radial)

El estado de mínima energía de un campo tiene fluctuaciones que corresponden a la creación y aniquilación de pares virtuales partícula/antipartícula

INTERACCIONES DIVERSAS

¿Es lo mismo “Fuerza” e “Interacción”?

Sí, pero hay un matiz:

En general, “fuerza” tiene la connotación de cambiar el movimiento de una partícula... pero no su naturaleza (el tipo de partícula)

La fuerza/interacción débil puede cambiar la naturaleza de las partículas.

Por tanto se tiende a utilizar el término “interacción”

¿Qué rige la interacción de las partículas?

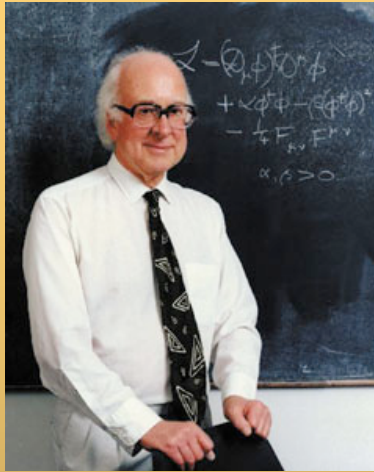
No se sabe por qué cada partícula es capaz de sentir ciertas interacciones.

Es decir, por que un quark siente todas las interacciones (color, débil, electromagnetismo, gravedad) mientras que el neutrino sólo siente dos (débil, gravedad)

Es un hecho experimental que incorporamos en nuestro modelo teórico

Es posible que exista una explicación más fundamental de estas propiedades p.ej. en teorías de gran unificación, etc, pero no están comprobadas experimentalmente.

Campo de Higgs y partícula de Higgs



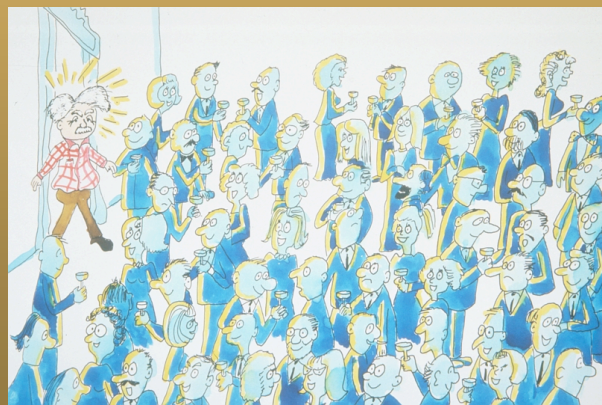
Sir Peter Higgs

El campo de Higgs es un campo escalar con un valor no nulo en el vacío

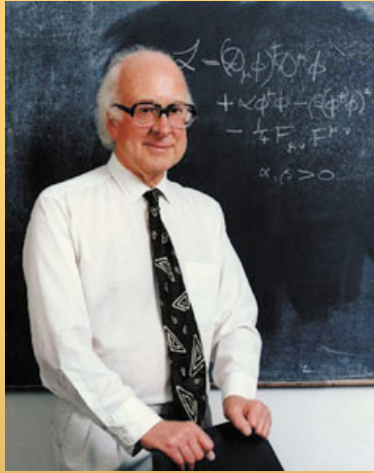
Este valor rompe la simetría electrodébil y dota de masas a las partículas W/Z y a los quarks y leptones

El campo de Higgs da una masa (inercia) a las partículas “fricción en el vacío”

La masa de una partícula es proporcional a su acoplamiento con el campo de Higgs



Las partículas adquieren masa mediante su interacción con el campo de Higgs

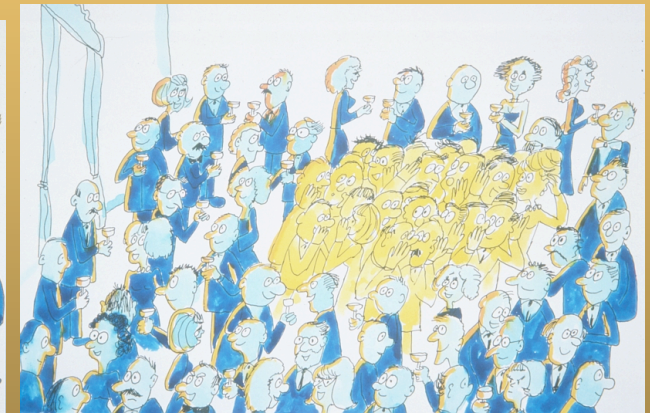
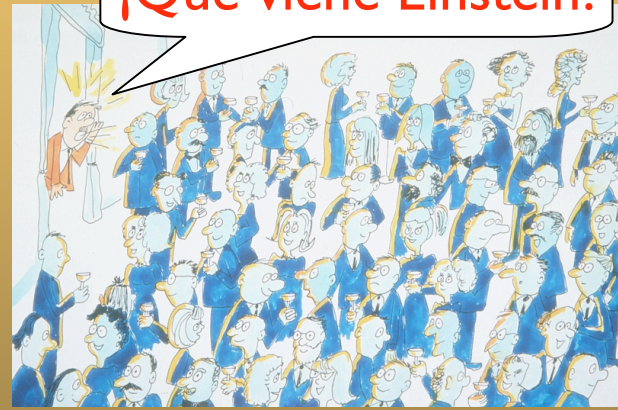


Sir Peter Higgs

La partícula de Higgs

La partícula de Higgs es el cuanto asociado al campo de Higgs

Es una excitación del campo de Higgs, una fluctuación en el valor del campo en un punto



El modelo de Higgs predice las propiedades de la partícula de Higgs
Si existe, se descubrirá en el LHC en CERN

¿Por qué es importante?

Proporcionará una nueva luz a preguntas como ¿Por qué el muón es 200 veces Más pesado que el electrón? ¿Por qué el top es tan pesado?¿...?

¿Cambiará nuestras vidas?

Desafortunadamente tendremos que seguir pagando la hipoteca
Pero será un paso más en responder a la pregunta “¿de qué están hechas Las cosas?” o “¿Cómo funciona el mundo?” preguntas eternas en la curiosidad innata del ser humano

¿Por qué hay 8 gluones y no 9?

Es debido a la estructura de la simetría del “espacio de color”

Un espacio con 3 coordenadas complejas (x,y,z) y sus conjugadas (colores y anticolores)

Un grupo de simetría actúa mediante rotaciones en este espacio y describe las interacciones fuertes (cambio de color)

Los gluones forman una matriz color/anticolor

$$\begin{pmatrix} x\bar{x} & x\bar{y} & x\bar{z} \\ y\bar{x} & y\bar{y} & z\bar{y} \\ z\bar{x} & z\bar{y} & z\bar{z} \end{pmatrix}$$

Esto son 9 grados de libertad, pero la combinación

$$x\bar{x} + y\bar{y} + z\bar{z} = |x|^2 + |y|^2 + |z|^2 = r^2$$

Es la distancia radial en el espacio de color. Es invariante bajo rotaciones de color. Por tanto, no está asociada a la interacción fuerte.

¿Hay que considerar los quarks en el enlace químico?

No...

A las escalas atómicas y moleculares, incluso el núcleo se comporta como puntual

(De hecho, llevó mucho tiempo y esfuerzo darse cuenta de que el núcleo estaba compuesto, y posteriormente darse cuenta de que los protones y neutrones están compuestos)

¿Tiene los quarks estructura interna?

Hasta las energías más altas, o distancias más cortas, experimentadas, los quarks se comportan como partículas puntuales, y no muestran estructura interna

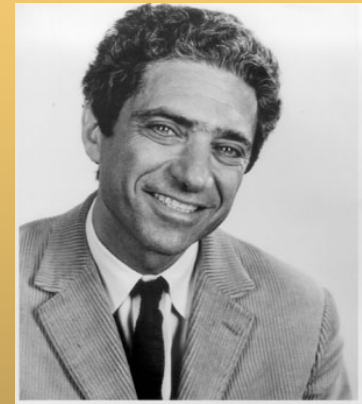
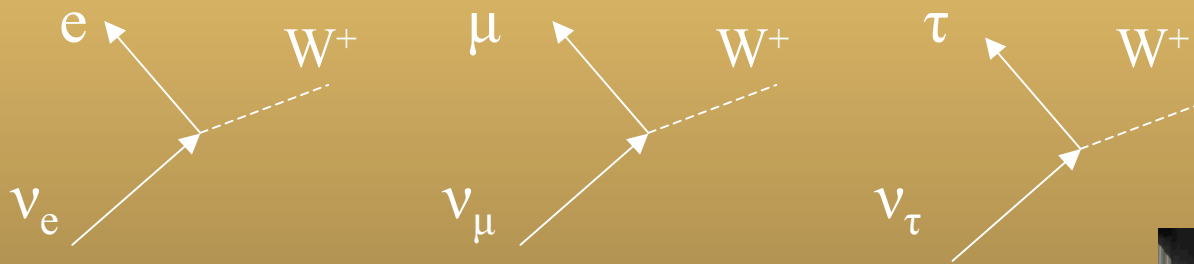
El LHC explorará distancias más cortas y será capaz de determinar si Los quarks son elementales o compuestos hasta escalas de 10^{-19}m

NEUTRINOS

¿En qué se diferencian los 3 tipos de neutrinos?

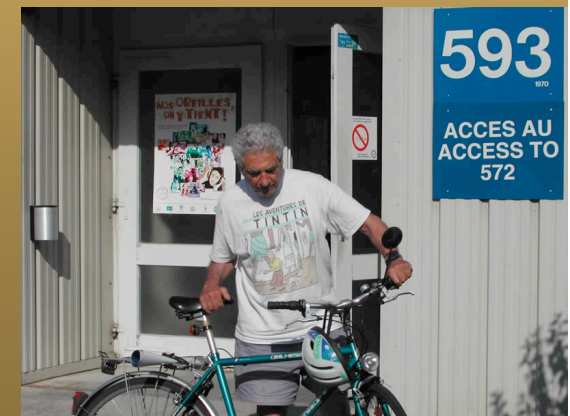
Se diferencian en el tipo de interacciones que tienen.

- Neutrino electrónico se puede convertir en un electrón emitiendo una partícula W^+ , es decir $\nu_e \rightarrow e + W^+$
- Neutrino muónico $\nu_\mu \rightarrow \mu + W^+$
- Neutrino tauónico $\nu_\tau \rightarrow \tau + W^+$



Jack Steinberger

¿Y los antineutrinos?



¿Son los neutrinos partículas masivas? ¿Cuál es su masa?

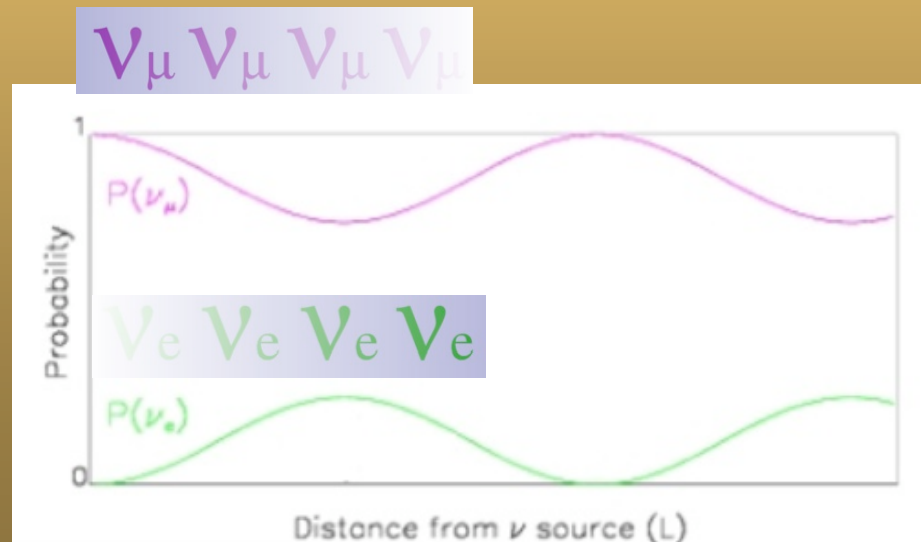
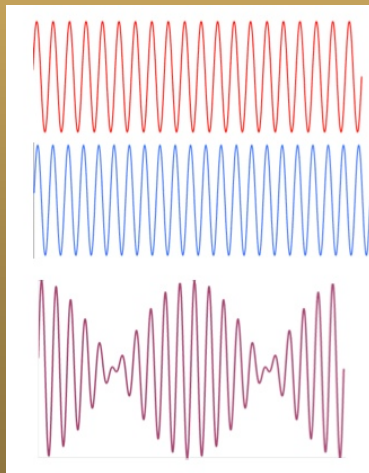
Oscilaciones (conversión) de neutrinos



Relación oscilación/masa: Intuitivamente, la conversión "frena" la propagación -> masa

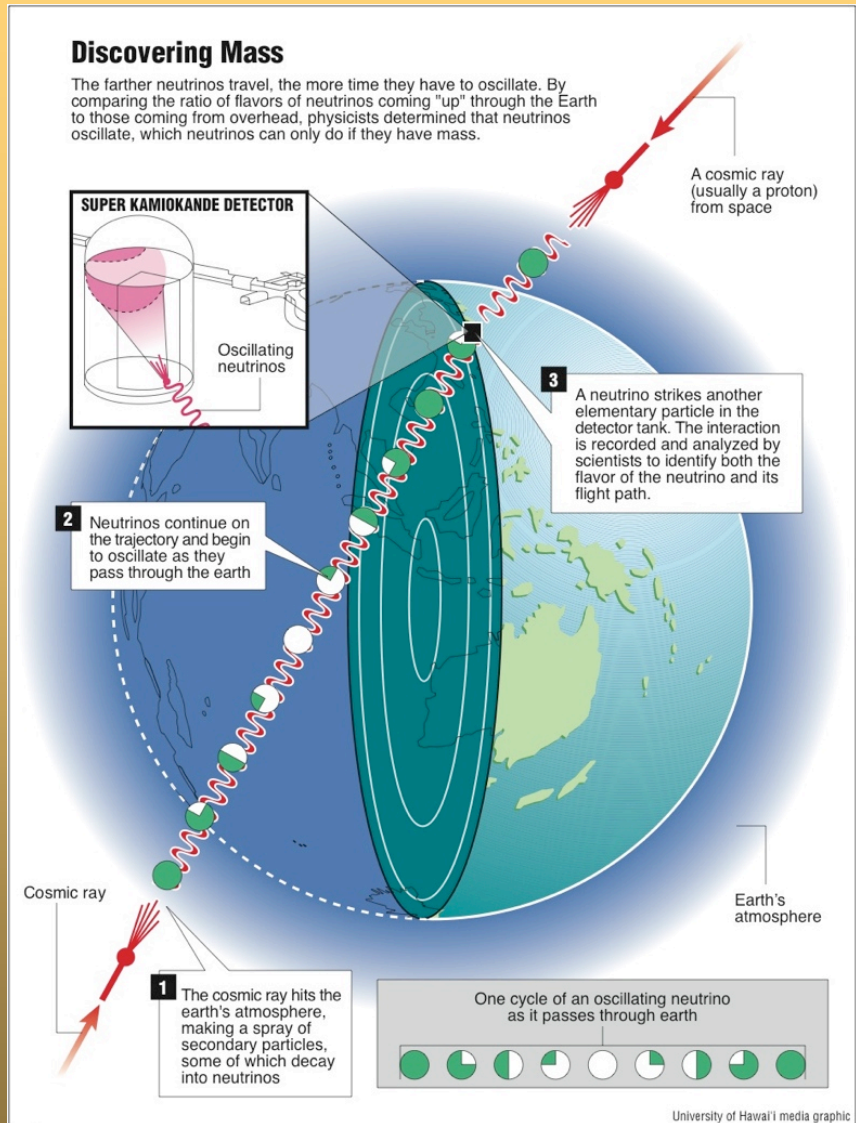


Se combinan
... como notas musicales



Descubrimiento de las oscilaciones de neutrinos

1998-99



Los rayos cósmicos producen neutrinos muónicos en la atmósfera superior

Se observa un número significativamente menor de neutrinos muónicos provenientes de abajo (50% del número de neutrinos muónicos provenientes de arriba)

-No explicable por absorción en viaje a través de la Tierra

-Explicable mediante oscilación de neutrinos: Una fracción de los neutrinos muónicos han mutado a electrónicos a lo largo de los 12000km extra (diámetro terrestre)

¡Los neutrinos tienen masa!

Los experimentos de oscilaciones de neutrinos sugieren una masa para los neutrinos en el rango $\sim 0.01 - 0.1$ eV

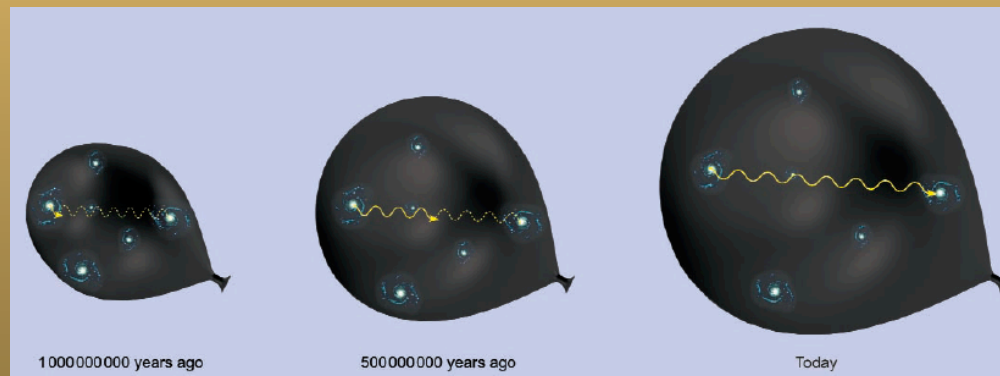
COSMOLOGIA

¿Por qué las galaxias se alejan unas de otras por la expansión, pero las estrellas dentro de una galaxia no se alejan?

Dentro de una galaxia existen fuerzas gravitacionales que mantienen unidas y cercanas a las estrellas que la componen. Esta fuerza es más poderosa que la de la expansión del Universo.

La expansión del Universo se produce a gran escala. Localmente, las regiones pequeñas no se expanden.

Por ejemplo, la expansión no hace que mis pies se separen de la superficie de la Tierra. La gravedad de la Tierra es bastante más poderosa.



Evolución de distancias para partículas que experimentan un movimiento libre en un Universo en expansión. Las estrellas dentro de una galaxia serían análogas a motas de polvo unidas con pegamento. No se separan aunque el globo se hinche.

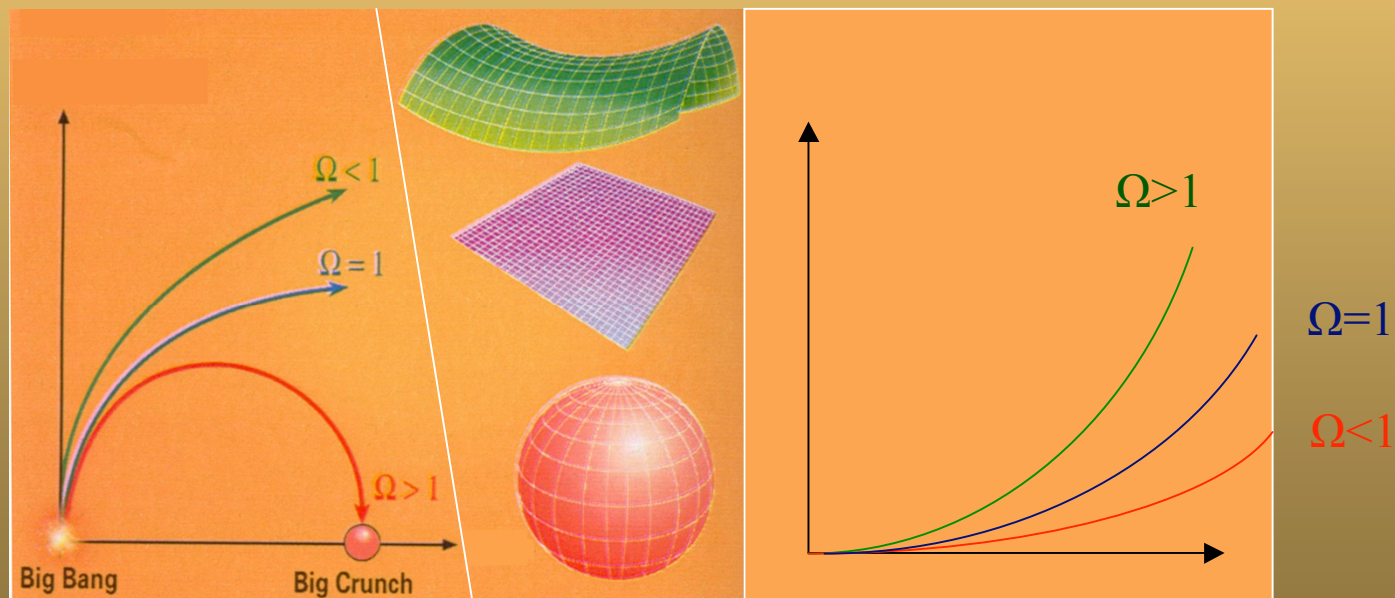
¿Es el Universo plano o como una silla de montar?

Es plano, al menos hasta la precisión que nos permiten las observaciones (p.ej. CMB).

A pesar de eso, se expande de forma acelerada, debido a la influencia de la energía oscura

(Muchos libros, anteriores al descubrimiento de la energía oscura (2003!)

Asocian expansión acelerada con curvatura negativa. Esto es cierto sólo si el Universo no contuviera energía oscura)



Universos sin
energía oscura

Universos con
energía oscura

¿Puede el Universo llegar al cero absoluto de temperatura?

No, el Universo obedece la tercera ley de la termodinámica, que dice que un sistema no puede alcanzar nunca el cero absoluto. Cuanto más frío está un sistema, más cuesta enfriarlo todavía más.

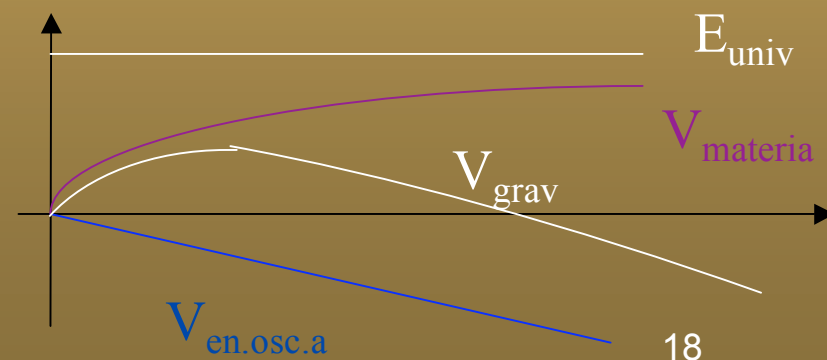
El Universo continuará su expansión y su temperatura (p.ej. La temperatura del fondo de microondas) seguirá bajando, pero sin alcanzar $T=0K$ exactamente

¿Qué pasa con la conservación de la energía durante la expansión del Universo?

Punto de vista más intuitivo: energía cinética y potencial

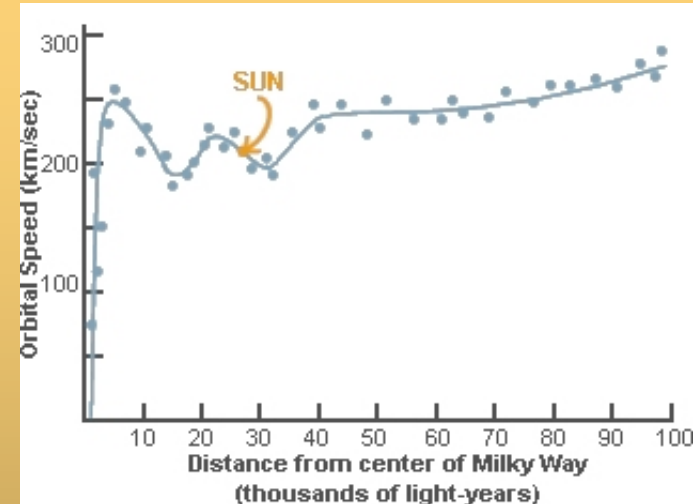
Sin energía oscura: La energía que se pierde por la dilución de densidad de energía, en realidad se transforma en energía potencial, como una piedra lanzada hacia arriba

Con energía oscura: El Universo transforma energía potencial en cinética al expandirse, como una piedra en un muelle comprimido, resultando una expansión acelerada.



Evidencia de la existencia de materia oscura a partir de las curvas de rotación de galaxias

Curvas de rotación: Velocidad orbital vs. distancia radial
(Usando la masa visible se predice una dependencia $r^{-1/2}$)



¿Qué es la materia oscura?

¿Qué se sabe de ella?

Es una densidad de energía asociada a materia que no emite luz.

Existen objetos oscuros en el Universo, como agujeros negros, o “Júpiteres”
Que contribuyen un poco a la densidad de materia oscura.

Sin embargo se estima que la mayoría de la materia oscura del Universo se compone de un nuevo tipo de partículas, con acoplamiento muy pequeño con la materia visible, que forma halos alrededor de las galaxias

- Existen experimentos que intentan la detección directa de partículas de materia oscura (DAMA, etc)

- ¡Es muy posible que el LHC sea capaz de crear partículas de materia oscura!

¿Cómo se formaron los elementos más pesados que el hierro?

En el corazón de las estrellas, no por fusión nuclear, sino por captura de Neutrones, en etapas de colapso gravitatorio muy violentas (altísima densidad de núcleos y neutrones en el corazón de la estrella).

Al ser núcleos menos estables, es más improbable que se creen (no es energéticamente favorable) pero aún así sucede.

Por tanto se genera una pequeña fracción de este tipo de elementos

Ref:

http://tufts.edu/as/wright_center/cosmic_evolution/docs/fr_1/fr_1_stel.html

LHC

¿Qué se espera del LHC?

- Que aclare el mecanismo de ruptura de simetría electrodébil (masas de Z, W), y las masas de los fermiones, encontrando la **partícula de Higgs**
- Que explore la Física de partículas en un régimen de energías no explorado anteriormente, y contraste con el experimento diversas teorías existentes
 - > Superimetría
 - > Dimensiones extra
 - > ...
- Que se produzca y detecte la partícula que compone la **materia oscura** del Universo (p.ej. partículas supersimétricas)
- Que aclare la razón de que en el Universo haya materia pero no antimateria (violación de la simetría CP, es decir **asimetría materia-antimateria**)
 - Que estudie las propiedades del **plasma de quarks y gluones**

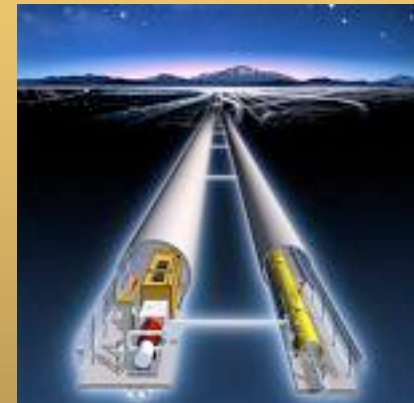
¿Hay vida después de LHC?

Sí. En el mundo de la Física experimental, donde el desarrollo de un proyecto involucra trabajo durante décadas, es necesario planear con mucha antelación.

Dos líneas complementarias/alternativas

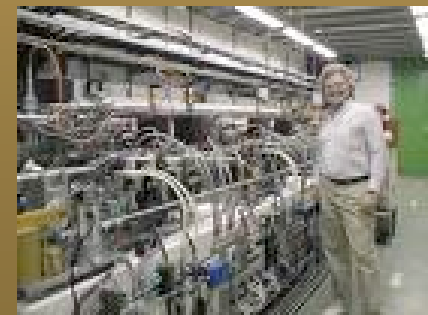
- ILC “international linear collider”:

Acelarador lineal electrón-positrón de muy alta energía, destinado a medidas de precisión de la nueva Física que descubra el LHC



-CLIC “compact linear collider”:

Acelarador lineal con nueva tecnología de dos haces, en desarrollo a nivel de prototipos en CERN



PEDAGOGIA

¿Cómo integrar las partículas en la docencia?

-Actualizando el curriculum a la Física Moderna:

Quarks, 4 fuerzas fundamentales, 3 familias

- Utilizando sistemas físicos en problemas de Mecánica o Cinemática
(electrones lanzados contra positrones en vez de trenes de Madrid a Barcelona)

-Sesiones “divertidas” de series/libros de ciencia-ficción (análisis científico de Star Trek)

¿Y los fenómenos ondulatorios?

-Actualizando el curriculum a la Física Moderna:

La luz como onda electromagnética, fotones, ...

Análisis histórico de la controversia onda-corpúsculo

... ¿Qué enseñar en secundaria?

-Hay vida más allá del electrón, protón neutrón: quarks, etc

- 4 fuerzas, 3 familias, ...

- Rudimentos de cuántica y de relatividad

-Universo en expansión,

-la Física no está terminada

¿Bibliografía?

- Los tres primeros minutos del Universo, S. Weingerg
- Frank Close
- Feynman lectures on Physics, R. Feynman (tercer tomo, fantástica introducción a Mecánica Cuántica)
- Cualquier otro libro de Feynman (un maestro en pedagogía)
- Historia del tiempo (S. Hawking), El Universo Elegante (B. Green), Warped Passages (L. Randall), etc, con cierta “precaución” (últimos capítulos tienden a ser especulativos)

MISCELANEA

¿Existe el tiempo? ¿Es fundamental?

- El tiempo existe (y el de esta clase se está terminando)
- No sabemos si es fundamental. En ciertas teorías que involucran gravedad cuántica podría ser un concepto derivado, no fundamental. Pero conceptualmente es muy difícil hacer Física sin tiempo... (poco progreso)

¿Los agujeros negros se “comen” la entropía?

- Hawking demostró que los agujeros negros poseen entropía, y ésta es Proporcional al área del horizonte. Cuando un sistema cae dentro de un agujero negro, su horizonte aumenta, y su entropía también. De modo que la entropía total siempre aumenta y se obedece la segunda ley de la Termodinámica

¿Qué son las supercuerdas?

La teoría de (super)cuerdas propone que las partículas elementales son objetos extensos, cuerdas, de tamaño extremadamente diminuto
 $L \sim 10^{-35} \text{m}$

Las diferentes partículas (de materia y de fuerzas, incluyendo el gravitón)
Son diferentes modos de vibración de un único tipo de cuerda

La teoría reconcilia la gravedad con la Mecánica Cuántica, pero necesita que el espacio-tiempo tenga 9+1 dimensiones (consistencia matemática)

Las 6 dimensiones que no percibimos son “compactas”, tienen una geometría de tamaño finito. Analogía con la superficie de un cilindro muy largo y estrecho, a distancias grandes (bajas energías) parece tener sólo una dimensión, cuando en realidad tiene dos. La dimensión “está enrollada en un círculo”

Una teoría fascinante, pero sin una prueba experimental... de momento