

otro campo vectorial $B_\mu(\vec{x}, t)$, que es el portador del cacho de la interacción débil que tiene que ver no con el 'isospín débil' I_3 (que se refiere al factor $SU(2)$), sino con la hipercarga Y .

Pero si los factores $SU(2)_I \times U(1)_Y$ se refieren ambos a la fuerza débil, ¿cómo no deberían de existir 4 en vez de 3 partículas mensajeras para esta fuerza, que correspondan a $W_\mu^{12}, W_\mu^{21}, W_\mu^{11} = -W_\mu^{22}$, y B_μ ??

En efecto, estas 4 partículas existen en la naturaleza: se trata de W^+, W^-, Z^0 ¡y el fotón A !

Los campos que las describen son

$$W_\mu^+ \equiv W_\mu^{12}, \quad W_\mu^- \equiv W_\mu^{21}, \quad Z_\mu \equiv \cos\theta_w W_\mu^{11} - \sin\theta_w B_\mu,$$

y $A_\mu \equiv \sin\theta_w W_\mu^{11} + \cos\theta_w B_\mu$!! 'ángulo de Weinberg', $\cos\theta_w = m_W/m_Z$

En otras palabras, la interacción débil y electromagnética son en realidad 2 distintas manifestaciones de 1 misma fuerza básica, que llamamos interacción electrodébil.

Este es un ejemplo de lo que llamamos 'unificación' de interacciones (un ejemplo más antiguo es electromagnetismo \supset electricidad + magnetismo).

Y es por esto que desde el principio dijimos que en el Modelo Estándar hay 2, y no 3, interacciones básicas: fuerte (inciso 2 en nuestra lista) y electrodébil (incisos 1 y 3).

Pero, ahora que entendemos que W^+ , W^- , Z^0 y A son parientes muy cercanos, ¡se vuelve aún más urgente la pregunta de por qué tienen propiedades (y en particular masas) tan distintas!

El Modelo Estándar explica este hecho experimental postulando la existencia de un ingrediente adicional, que podría considerarse otro 'ladrillo' básico de la materia (y como tal debería ir en el apartado I de nuestra tabla de ingredientes), pero juega un papel distinto a los demás, y en particular viene acompañado de nuevas interacciones (lo cual lo pondría quizás en el apartado II):

III) Campo de Higgs - campo escalar

(y \therefore bosónico) con 2 componentes complejas

$$H(\vec{x}, t) \equiv \begin{Bmatrix} {}^1 H(\vec{x}, t) \\ {}^2 H(\vec{x}, t) \end{Bmatrix},$$

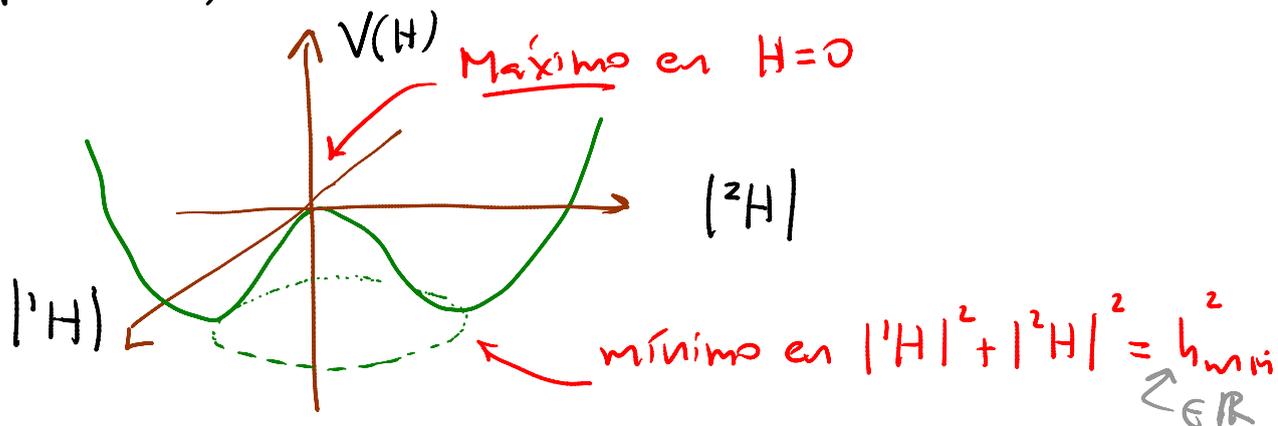
que se mezclan entre sí bajo $SU(2)_I$ de manera idéntica a $\begin{Bmatrix} u \\ d \end{Bmatrix}$ ó $\begin{Bmatrix} \nu_e \\ e \end{Bmatrix}$,

$$H(\vec{x}, t) \rightarrow H'(\vec{x}, t) = \underline{U}(\vec{x}, t) H(\vec{x}, t),$$

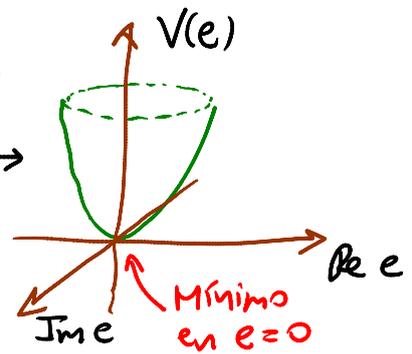
y tiene hipercarga $Y = +1/2$, lo cual implica que bajo el grupo de simetría local $U(1)_Y$ transformas de acuerdo con

$$H(\vec{x}, t) \rightarrow H'(\vec{x}, t) = e^{i\frac{1}{2}\lambda(\vec{x}, t)} H(\vec{x}, t).$$

Este campo tiene una energía potencial $V(H)$ muy peculiar, con forma de 'sombrero mexicano':



Esto es muy diferente a lo que sucede para $e, \nu_e, \dots, u, d, \dots$, cuyo potencial es del tipo \rightarrow ocasionando que, en promedio, $e = \nu_e = \dots = 0$.



El potencial del Higgs es función solo de $H^\dagger H = H^{*1}H + H^{*2}H$, y es por tanto invariante bajo $SU(2)_I \times U(1)_Y$.

Pero, justo como una canica colocada al centro de un tazón con esta forma, el campo H prefiere abandonar el único punto simétrico $H=0$ y "rodar" hacia un punto donde minimice su energía potencial.

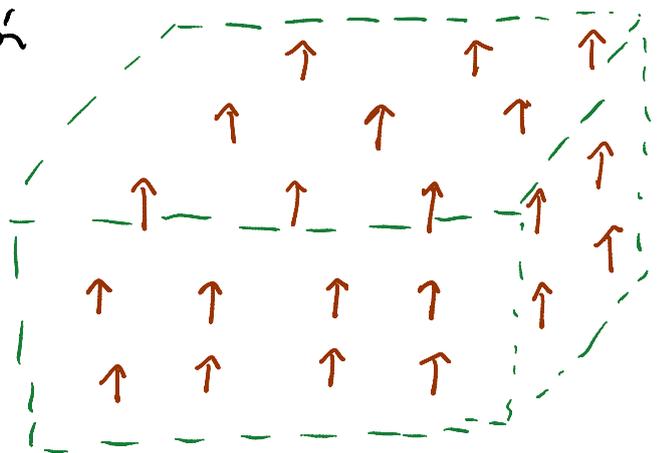
El conjunto de mínimos, $\{H \mid H^\dagger H = h_{\min}^2\}$ es invariante bajo $SU(2)_I \times U(1)_Y$, pero al "rodar" hacia abajo H debe escoger uno en particular, pej., $H = \begin{pmatrix} 0 \\ h_{\min} \end{pmatrix}$, y esta elección "rompe" entonces la simetría $SU(2)_I \times U(1)_Y$ (justo como la canica ubicada en un mínimo del tazón rompe la invariancia bajo rotaciones), dejando como simetría residual solo $U(1)_{EM}$ (que no es evidente en el dibujo).

En otras palabras, por razones energéticas el estado actual del universo tiene en promedio (es decir, ignorando las pequeñas fluctuaciones que representan a las partículas) $e = \nu_e = \dots = u = d = \dots = A_\nu = G_\nu = \dots = 0$, pero $H \neq 0$,

y es este último valor, $H = \begin{pmatrix} 0 \\ h_{\min} \end{pmatrix} \neq 0$, el que rompe (esconde) la simetría electrodébil, estableciendo una distinción entre, p.ej., ${}^1D = u$ (que no apunta en la dirección de H) y ${}^2D = d$ (que sí lo hace), ${}^1E = \nu_e$ y ${}^2E = e$, W^\pm y Z^0 y A_ν , etc.

Según el Modelo Estándar, entonces, debemos imaginarnos que vivimos permanentemente inmersos en esta gelatina o mar de Higgs, que podemos visualizar como una olección

de flechitas que apuntan en una dirección particular en el espacio abstracto de valores de campos



65a

lunes, 05 de septiembre de 2011
03:28 p.m.

(análoga a un campo magnético uniforme, cuya presencia rompe también una simetría, la simetría bajo rotaciones/Lorentz, la cual por supuesto no es una simetría interna como $SU(2)_I \times U(1)_Y$).

La presencia ubicua de este campo de Higgs, que (a diferencia de todos los otros campos) está siempre 'encendida', además de darnos el mecanismo de ruptura de la simetría electrodébil, resuelve otro problema importante: así como dijimos que la existencia de una masa para el fotón (un término $m^2 A_\mu$ en su ec. de mov.) está prohibido por la simetría $U(1)_{EM}$, resulta ser el caso que la simetría $SU(2)_I \times U(1)_Y$ asociada a la fuerza electrodébil prohíbe la existencia de masas para los quarks, leptones, W^\pm y Z^0 . Es decir, si no existiera el Higgs (o similar), ¡NINGUNA partícula podría tener masa!

Según el Modelo Estándar, el valor $H \neq 0$

hace que las partículas parezcan tener masa, aún cuando en sentido estricto no la tienen.

P.ej., W^\pm, Z^0 logran tener masas $m_W, m_Z \neq 0$ porque en sus respectivas eqs de mov. aparecen términos de interacción con el Higgs del tipo

$$\underbrace{g_D^2}_{\substack{\text{cte. de acoplamiento} \\ \text{débil}}} H^\dagger H W_\mu = \underbrace{g_D^2 h_{\min}^2}_{\equiv m_W^2} W_\mu$$

(que sí están permitidos por $SU(2)_I \times U(1)_Y$).

Mas en general, los distintos valores de las masas de las diversas partículas son consecuencia directa de la manera en que los campos correspondientes se acoplan al campo de Higgs: t, W^\pm, Z^0 son las partículas más pesadas porque sus campos son los que más fuertemente se acoplan a H ; ν_e, ν_μ, e son las más ligeras porque sus campos se acoplan solo levemente a H .

Intuitivamente, si recordamos que la masa de una partícula indica cuánta energía cuesta crearla, lo que estamos diciendo es que con $H=0$ el costo sería cero, pero la presencia de $H \neq 0$ 'estorba' el proceso de creación y aumenta el costo en distinta medida para cada tipo de partícula.

Con esto entendemos por fin todas las diferencias entre las interacciones débil y fuerte, y más aún, identificamos al campo de Higgs H como el origen de las distintas masas de las partículas elementales.

Para terminar con esta historia, notemos que si en verdad existe el campo de Higgs, entonces deben existir también sus partículas asociadas, que representen pequeñas onditas por encima de su valor promedio:

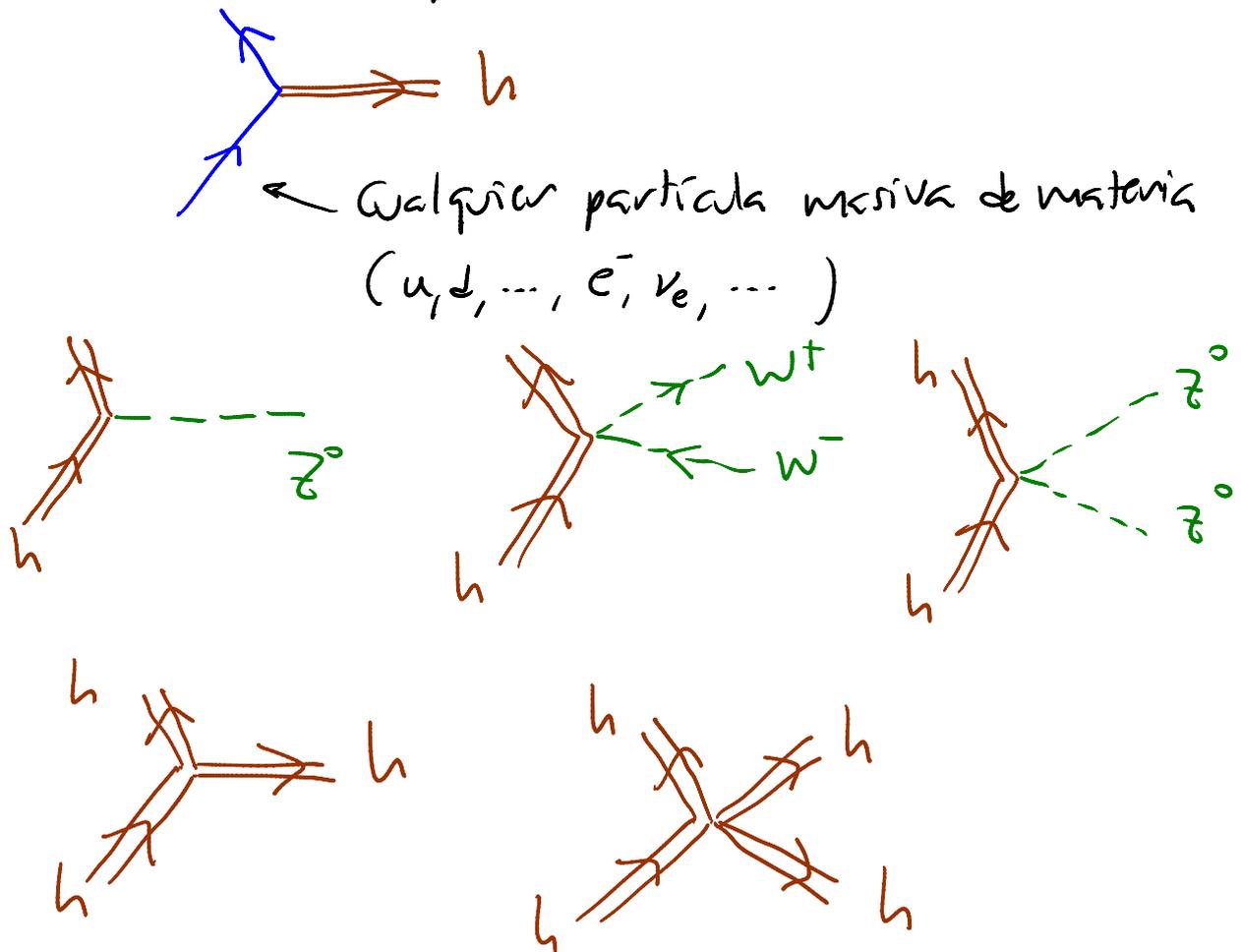
$$H(\vec{x}, t) = \begin{pmatrix} 0 \\ h_{\min} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ h(\vec{x}, t) \end{pmatrix}$$

L01/09

"valor de fondo" \rightarrow \uparrow fluctuación: partículas

La partícula en cuestión se conoce como el bosón de Higgs, y tiene $m \neq 0$, $q = 0$ y $s = 0$.

Dada la manera en que $H(\vec{x}, t)$ se acopla a todos los campos masivos (justamente para darles masa a través del valor de $\langle \phi \rangle$), el bosón de Higgs le habla a todas las partículas correspondientes a través de nuevos procesos de interacción:



Irónicamente, no conocemos la masa del Higgs (aunque debería ser $m_h \sim 200,000$), ¡porque es la única partícula del Modelo Estándar que nos falta por descubrir!

Con esto hemos terminado por fin con nuestro resumen del Modelo Estándar, aunque por supuesto hemos omitido varias sutilezas. [Podemos mencionar brevemente 2: i) Resulta que para hablar con precisión de la acción de $SU(2)_I$, en realidad tenemos que separar cada campo espinorial en 2 'mitades' ($e = e_I + e_D$, $u = u_I + u_D$, etc.) que se intercambian entre sí si intercambiamos izquierda por derecha (paridad). Solo las mitades "izquierdas" forman parte de los paquetes débiles $\{:\}$ (las mitades "derechas" son neutras), lo cual tiene como consecuencia que la fuerza débil distingue entre la derecha y la izquierda (decimos que viola la simetría de paridad).

ii) Resulta además que los campos d, s, b y ν_e, ν_μ, ν_τ que figuran en los paquetes débiles $\{:\}$ no son directamente los campos $\tilde{d}, \tilde{\nu}_e, \dots$ asociados a partículas con masas definidas, sino combinaciones lineales especificadas a través de las matrices de Cabibbo-Kobayashi-Maskawa y Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata.

El Modelo Estándar es un enorme logro de la humanidad, que funciona admirablemente bien: sus predicciones han sido verificadas por miles de mediciones experimentales realizadas en las últimas 3 décadas. Pero, a pesar de sus numerosos éxitos, hoy en día sabemos que definitivamente No puede ser la última palabra respecto a la estructura microscópica de nuestro universo, porque cuenta con limitaciones de varios tipos:

I) "Problemas" Estéticos

- 1) ¿Por qué tiene ~ 20 parámetros libres (masas, acoplamientos, etc.)? ¿Por qué estos parámetros tienen los valores que tienen (p.ej., $\frac{m_u}{m_t} \sim 10^{-5}$, ó $\theta_{Q_{60}} \leq 10^{-9}$ -problema de CP fuerte). Quisiéramos menos parámetros, y/o una explicación de sus valores...
- 2) ¿Por qué ~ 26 (ó 10) campos? ¿Por qué 3 generaciones? Quisiéramos menos ingredientes básicos...

3) ¿Por qué $\mathcal{G} = SU(3) \times SU(2) \times U(1)$?

Quisiéramos mayor unificación de fuerzas...

P.ej., se ha propuesto que en realidad el grupo de simetría local pudiera ser más grande:

$$SU(5), SO(10), E_8, \dots \supset SU(3) \times SU(2) \times U(1)$$

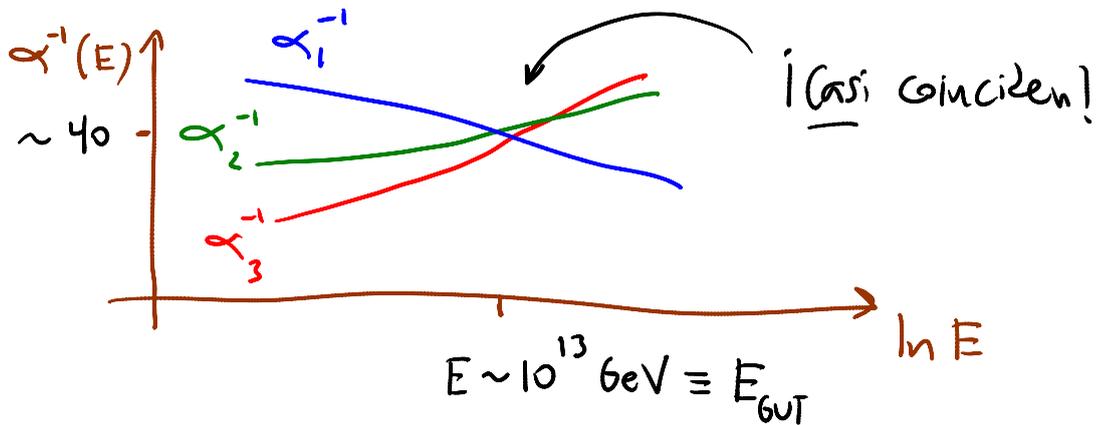
En estas teorías de gran unificación (GUT) existen simetrías adicionales que mezclan quarks con leptones (lo cual haría al protón inestable), pero que están rotas (análogamente a la simetría electrodébil).

Si esta idea fuera correcta, las constantes de acoplamiento del Modelo Estándar g_3, g_2, g_1 no serían independientes. P.ej. en $SU(5)$,

$$g_5 = g_3 = g_2 = \sqrt{\frac{5}{3}} g_1 \quad \text{a la escala } E = E_{\text{GUT}}.$$

Tomando en cuenta la manera en que estos acoplamientos 'corren' con E , concluiríamos entonces que $g_3(E) > g_2(E) > g_1(E) \quad \forall E < E_{\text{GUT}}$, cosa que coincide con lo que observamos.

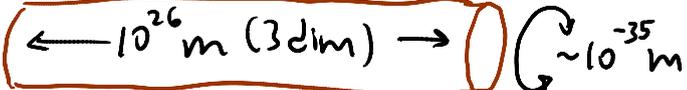
Más aún, incorporando las contribuciones virtuales de las partículas conocidas encontramos que la dependencia es



En cualquier caso, el modelo $SU(5)$ más sencillo está descartado experimentalmente, porque el protón decaería "demasiado rápido" (i.e. $\sim 10^{31}$ años!)

Si somos más ambiciosos, buscaríamos unificar también con la interacción gravitacional, cuya energía característica es (por análisis dimensional) la escala de Planck $E_P \sim \frac{1}{\sqrt{G_N}} \sim 10^{19}$ GeV.

Hace 80 años Kaluza y Klein mostraron que es posible unificar a la gravedad con el electromagnetismo ¡suponiendo que nuestro universo tiene dimensiones adicionales!! En esta propuesta, nuestro universo sería adicional!!

Como una manguera:  $\leftarrow 10^{26} \text{ m (3 dim)} \rightarrow$ $\updownarrow \sim 10^{-35} \text{ m}$

Regresaremos a esta idea más adelante...

4) Problema de Jerarquía: ¿cómo se explica

la enorme diferencia entre la escala de rompimiento de la simetría electrodébil,

$E_{ED} \sim 10^2 \text{ GeV}$, y la escala de gran unificación,

$E_{GUT} \sim 10^{13-18} \text{ GeV}$, o la escala de Planck $E_P \sim 10^{19} \text{ GeV}$,

que en principio son más fundamentales?

Más técnicamente, el problema se manifiesta en la relación entre la masa 'desnuda' y la masa 'renormalizada' del bosón de Higgs (la única partícula con espín $s=0$ en el Modelo Estándar):

$$m_h^2(E \lesssim E_{ED}) = m_h^2(E = E_P) + \delta m^2$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{masa}^2 \text{ física del Higgs: } \sim (10^2 \text{ GeV})^2} = \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{masa}^2 \text{ del Higgs 'pelón': } \sim (10^{19} \text{ GeV})^2?} + \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{corrección por nube de partículas virtuales } \sim (10^{19} \text{ GeV})^2?}$

¿Cómo explicar esta cancelación tan delicada?

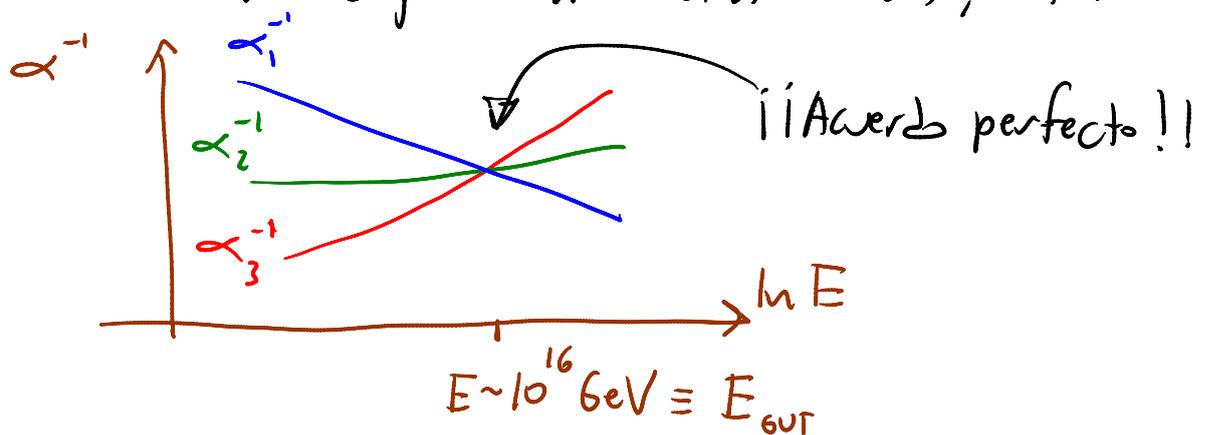
Destacan 2 propuestas:

i) Supersimetría: propone la existencia de una nueva simetría espaciotemporal (global), que relaciona bosones con fermiones, de tal manera que por cada bosón / fermión que conocemos existiría un fermión / bosón que no hemos descubierto aún, que llamamos su 'superpareja'. P.ej. para el electrón ($s=1/2$) tendríamos el selectrón ($s=0$), para el quark arriba ($s=1/2$), el squark arriba ($s=0$), para el fotón ($s=1$), el fotino ($s=1/2$).

Cada bosón b y su superpareja fermiónica f formarían parte de un nuevo 'paquete' $\begin{pmatrix} b \\ f \end{pmatrix}$, y las leyes de la física serían invariantes bajo rotaciones (globales) que mezclan b con f . Esto implicaría de entrada que b y f deberían tener la misma masa y las mismas interacciones. Como esto claramente no es cierto (puesto que no hemos descubierto aún a las superparejas), la supersimetría, de existir,

debe estar nota de alguna manera. Pero si la energía característica asociada a esta ruptura es $E_{\text{susy}} \lesssim 10 E_{E_0} \sim 10^3 \text{ GeV}$, entonces la supersimetría resuelve el problema de jerarquía, porque resulta haber cancelaciones muy precisas entre la contribución de cada tipo de partícula a m_h^2 y la contribución de su superpareja ($\Rightarrow \delta m^2 \sim E_{\text{susy}}^2$)

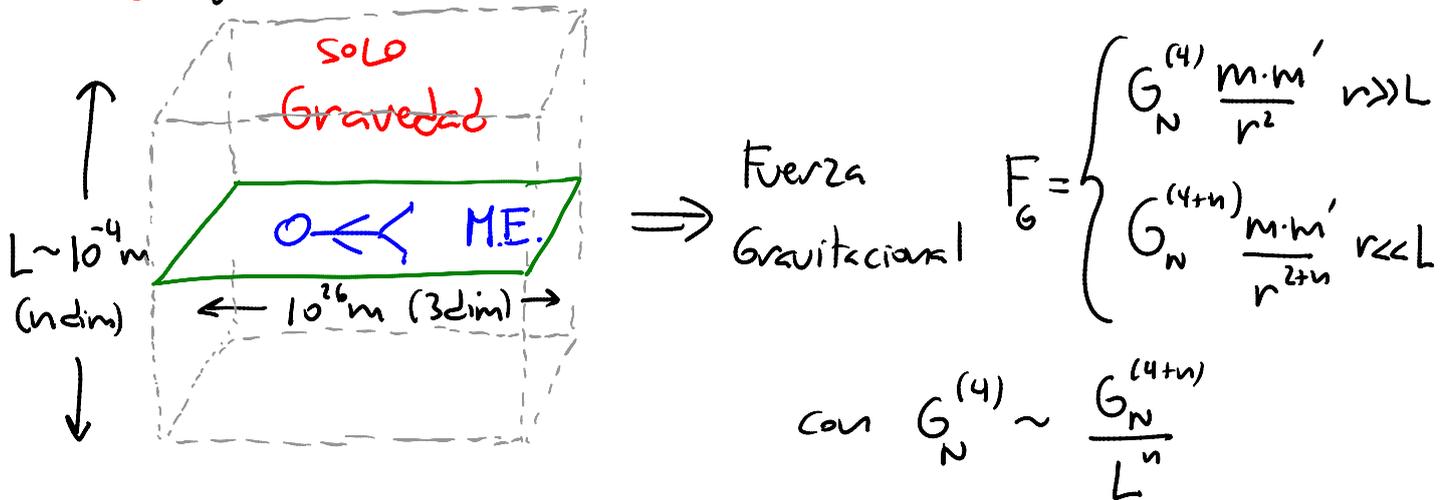
Como regalo adicional, en la versión supersimétrica del modelo de gran unificación $SU(5)$, obtenemos



(Y el decaimiento del protón puede ser suficientemente lento.)

ii) Mundo Bran: propone que el universo que vemos a nuestro alrededor es una especie de 'hoja' (3-dim) que flota en un espacio más grande, que tiene

n dimensiones adicionales 'grandes' en las que solo se propaga la gravedad:



En este escenario, la constante gravitacional fundamental sería $G_N^{(4+n)}$ en lugar de $G_N^{(4)}$, y para L suficientemente grande ($L \sim 10^{-4} \text{ m}$ si $n=1$), la verdadera escala de Planck sería $E_p \sim 10^3 \text{ GeV}$ en lugar de 10^{19} GeV !

En este caso el problema de jerarquía no existiría, ¡y podríamos quizás detectar las dimensiones adicionales y efectos de gravedad cuántica en LHC !!

LF: 06/09

Esto condice nuestra lista de "problemas" estéticos. Vale

la pena resaltar que todos ellos pudieran ser no más que buenos deseos, porque 1)-4) pudieran no tener respuesta...

II) Problemas Prácticos

1) ¿Cómo entendemos QCD a bajas energías?

Recordemos que QCD es asintóticamente libre ($\alpha_s(E) \rightarrow 0$ cuando $E \rightarrow \infty$) y \therefore está perfectamente bien definida a distancias pequeñas. Pero tiene acoplamiento fuerte a energías bajas ($\alpha_s(E) \gtrsim 1$ para $E \gtrsim \Lambda_{\text{QCD}} \sim 200 \text{ MeV}$), lo cual implica en particular el confinamiento de los grados de libertad básicos:

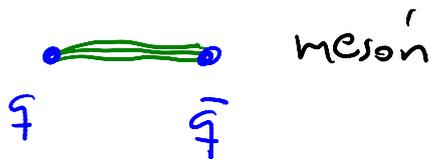
Quarks, Gluones \rightarrow Mesones, Bariones, Gluonios, ...

Imposibilitador para dar un tratamiento perturbativo, ¿cómo podemos describir esto cuantitativamente?

(Ej., ¿cómo calcular m_p, m_n, m_π, \dots ?)

i) Numéricamente (con supercomputadoras): discretizando el espacio tiempo, obtenemos QCD en la red, un sistema con un número finito (aunque todavía enorme) de grados de libertad, donde integrales realizadas numéricamente nos permiten obtener resultados no perturbativos (ej., masas con precisión de $\sim 10\%$).

ii) Análiticamente: a través de modelos "efectivos", que capturen física de QCD a bajas energías. P.ej., en 1974 't Hooft notó que al reemplazar $SU(3)$ con $SU(N)$ y tomar $N \gg 1$, la expansión perturbativa sugiere una descripción con cuerdas abiertas y cerradas,



que podría ser válida cuando el acoplamiento es fuerte.

A partir del descubrimiento en 1977 de la llamada correspondencia norma/gravedad, la teoría de cuerdas ha avanzado bastante en esta dirección (en primas de QCD).

2) ¿Cómo incorporar las recientemente descubiertas masas de los neutrinos? El Modelo Estándar original tenía $m_{\nu_e} = m_{\nu_\mu} = m_{\nu_\tau} = 0$. ¿Qué valores experimentales arrojan las mediciones de "oscilaciones" de neutrinos? ¿Podrían existir un cuarto neutrino? ¿Es relevante un "mecanismo de sube-y-baja" que sugiere que $m_{\nu_e} \sim \frac{m_e^2}{M_{GUT}}$?

3) ¿Existe en realidad el campo de Higgs? ¿Es un campo escalar fundamental o compuesto? ¿Hay uno o varios (como p.ej. en modelos supersimétricos)? De no existir, ¿cuál es el mecanismo de ruptura de la simetría electrodébil y generación de masas? (P.ej., "tecnicolor").
Esto concluye nuestra lista de problemas prácticos.

Vale la pena notar que 1) no pone en duda la validez del Modelo Estándar, y, al menos hasta el día de hoy, 2) y 3) no parecen tampoco presentar dificultades insuperables (en el peor de los casos, quizás podrían resolverse con modificaciones relativamente menores).

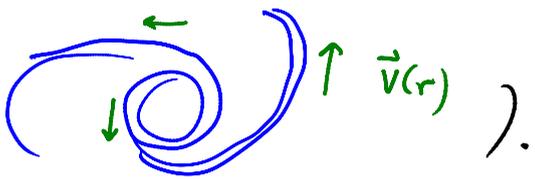
III) Problemas Fundamentales

1) ¿Cómo entender a la teoría U(1) y a altas energías?

Recordemos que el acoplamiento $\alpha_1(E)$ no es asintóticamente libre, sino lo contrario ("asintóticamente esclavizado"):

crece con la energía, de modo que para distancias muy pequeñas la teoría se vuelve fuertemente acoplada. ¿Está en realidad bien definida a nivel no perturbativo?

2) ¿Qué es la Materia Oscura ?

Podemos deducir la cantidad de materia que contienen las galaxias y cúmulos de galaxias a través de su influjo gravitacional (p.ej., a través de las curvas de rotación galácticas ).

Sorprendentemente, ¡solo alrededor de la quinta parte es materia visible (y \therefore ordinaria, "bariónica")!

El resto, $\sim 24\%$ del contenido energético total del universo, es materia oscura "fría" (= no relativista).

No puede tratarse de partículas del Modelo Estándar (p.ej. neutrinos). Lo más probable es que se trate de un nuevo tipo de partículas masivas que solo sienten la interacción débil — WIMPs (p.ej., "neutralinos", superparejas estables del fotón- Z^0 -Higgs en modelos supersimétricos), o "axiones" (solución al problema de CP fuerte), o neutrinos "estériles" (pesados y sin interacciones débiles). Solo un muy pequeño porcentaje puede ser MACHOs (estrellas de neutrones, enanas café, agujeros negros, etc.).

Otra posibilidad, No muy socorrida, es que el déficit de materia que arrojan nuestros cálculos se deba no a la existencia de materia oscura, sino a que la interacción gravitacional se comporta de manera distinta a lo que Newton/Einstein predicen (modelos "MOND" en versión Newtoniana, o p.ej. "TeVeS" a nivel de relatividad general).

3) ¿Qué es la Energía Oscura?

Alrededor del 72% de la densidad de energía ρ_{tot} del universo no se debe a 'materia' (presión ~ 0) ni a 'radiación' (presión $= \rho/3$), sino a algún tipo de fluido con presión negativa, lo cual tiene el curioso efecto de provocar que la expansión del universo se está acelerando!! No sabemos aún si esta 'energía del vacío' mantiene su valor en el tiempo ("constante cosmológica" Λ) o si evoluciona lentamente. Desde el punto de vista de la física de partículas, el 'vacío' no