Partículas Elementales y sus Interacciones

María José Herrero
Universidad Autónoma de Madrid

Centro de Ciencias de Benasque

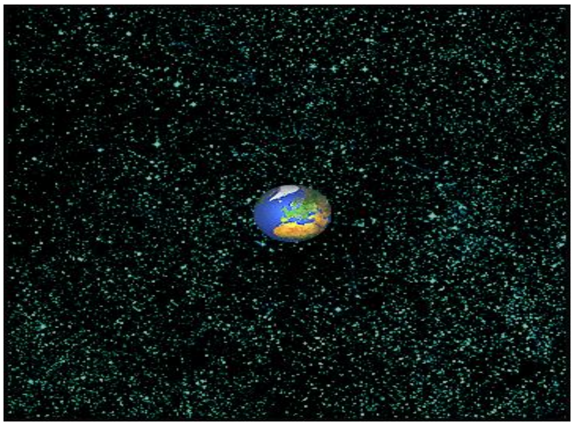
Benasque, 11-16 de Julio, 2004

Macrocosmos en potencias de 10

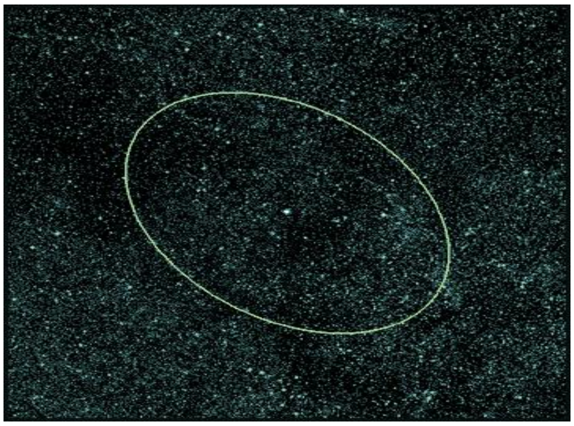
10^0 metros

10^3 metros

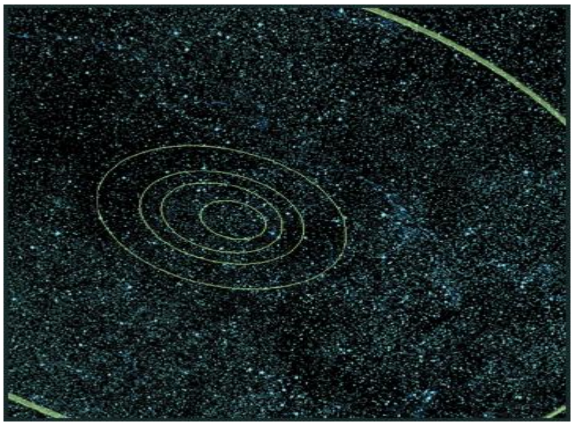
10^6 metros



10^8 metros

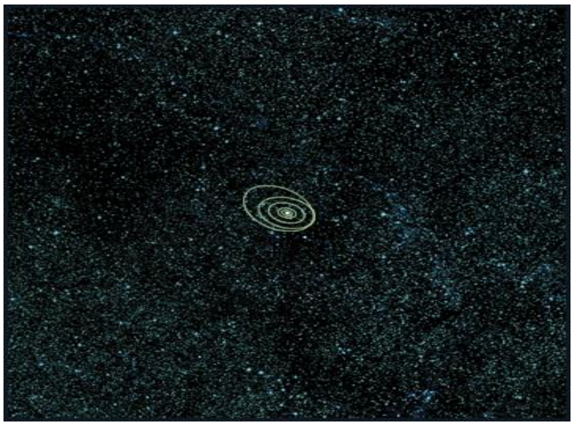


10^9 metros

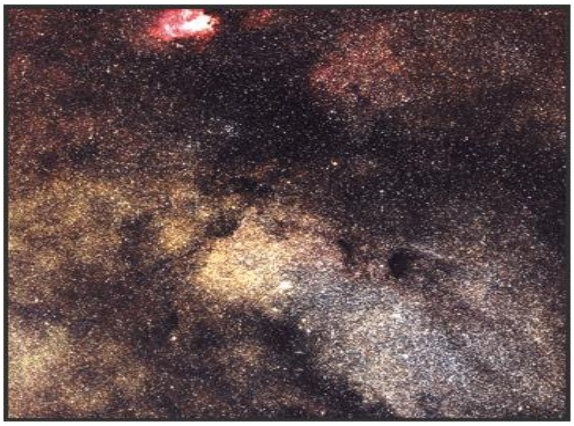


10^{12} metros

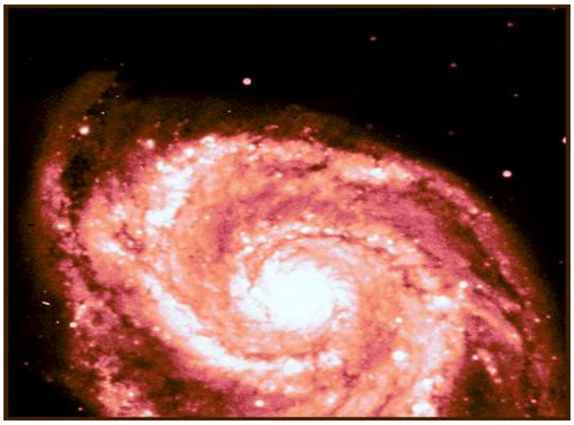
Macrocosmos en potencias de 10



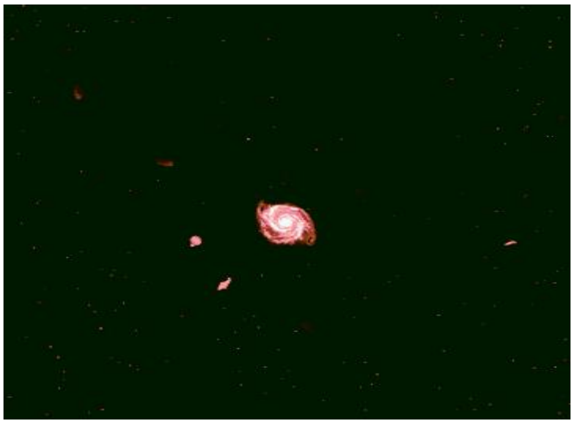
10^{15} metros



10^{20} metros

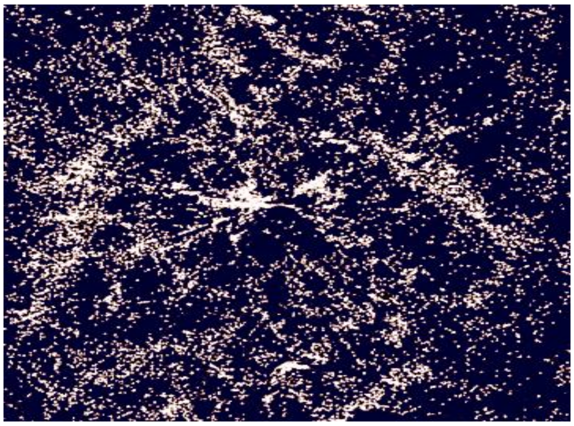


10^{21} metros



10^{22} metros

10^{23} metros



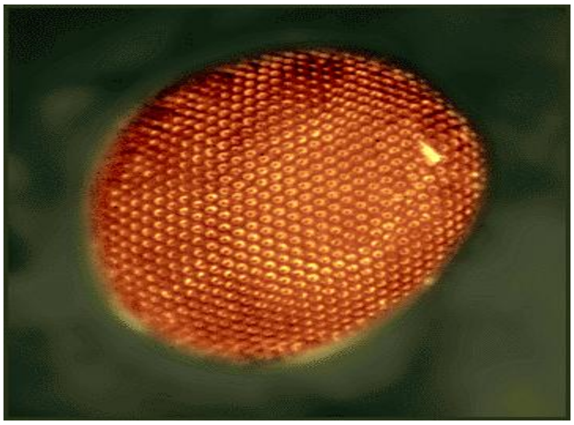
10^{26} metros

Microcosmos en potencias de 10

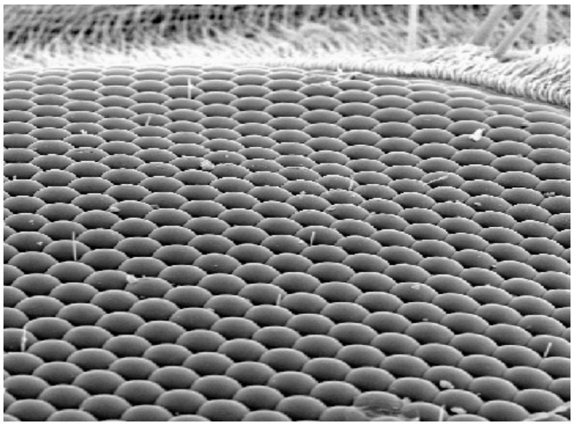
10^{0} metros

10^{-1} metros

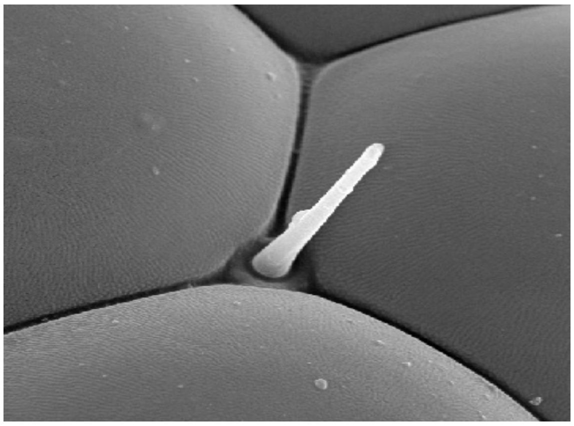
10^{-2} metros



10^{-3} metros

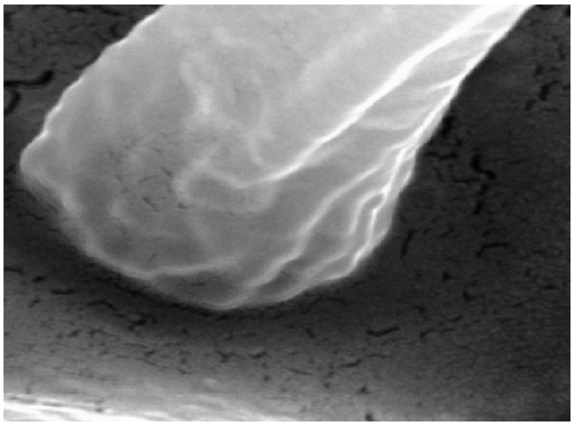


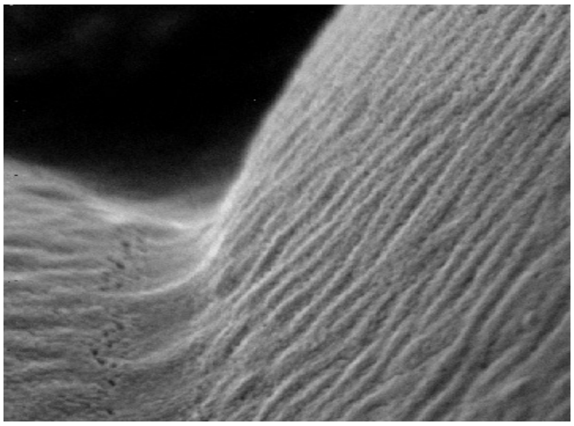
10^{-4} metros



10^{-5} metros

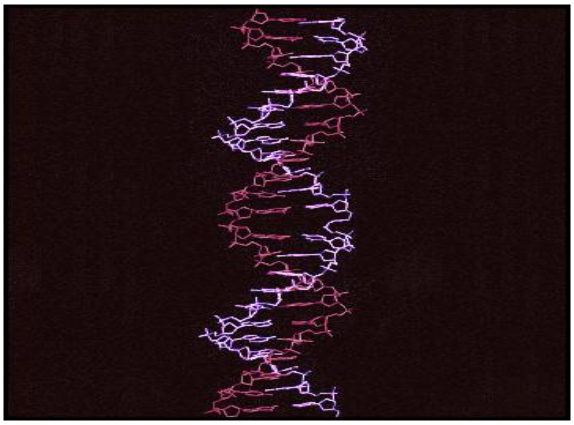
Microcosmos en potencias de 10

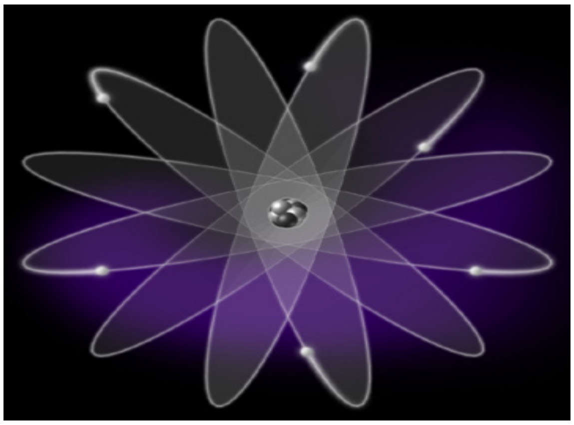




10^{-6} metros

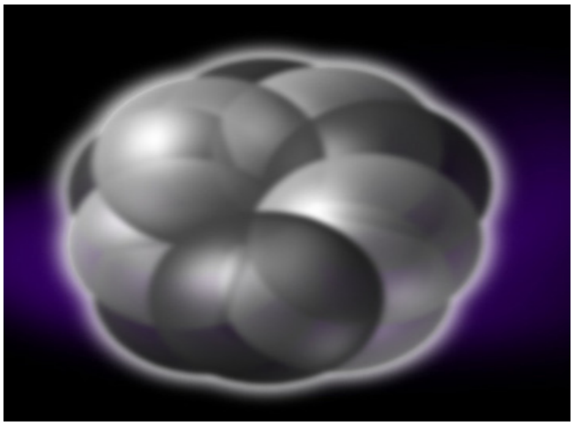
10^{-7} metros

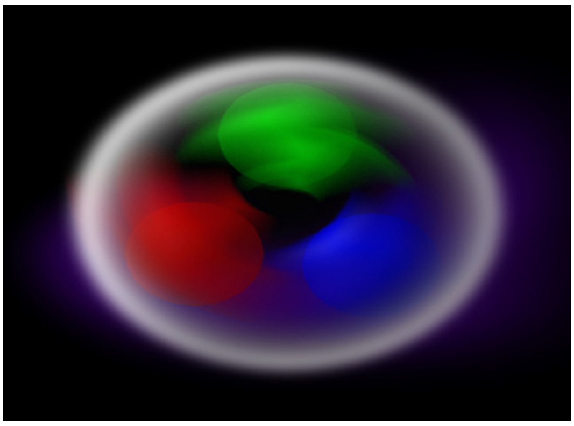




10^{-9} metros

10^{-10} metros





10^{-14} metros

10^{-15} metros

¿Que son las Partículas Elementales?

Constituyentes básicos de la materia que no tienen subestructura conocida hasta los límites explorados $10^{-18} - 10^{-19}$ metros

⋆ **Leptones** l

- electrones e^- (Thomson 1897)

Se encuentran en las capas externas de los átomos

- neutrinos ν (Pauli 1930, Fermi 1932)

Se producen en las desintegraciones β del neutrón

$$n \to p e^- \bar{\nu}$$

⋆ **Quarks** q (Gell-Mann 1964)

quarks de distintos sabores: up u , down d

Se encuentran en el interior de los protones y neutrones

$$p \sim uud\,, \quad n \sim ddu$$

Interacciones Fundamentales

⋆ Interacciones Electromagnéticas:

- Responsables de la atracción entre los núcleos atómicos y la nube electrónica
- Mantienen unidos a los átomos que forman las moléculas
- Mantienen unidas a las moléculas (Fuerzas de Van der Waals etc)
- Son responsables de las reacciones químicas y en última instancia de los procesos Biológicos
- Todas las partículas elementales con carga eléctrica no nula experimentan la interacción electromagnética: electrones, quarks

⋆ Interacciones Débiles

- Su intensidad es menor que la de las int. electromagnéticas
- Son responsables de la desintegración del neutrón, de las desintegraciones beta de los nucleos y de las de otras partículas no elementales de vida media larga.
- Todas las partículas elementales experimentan las interacciones débiles: electrones, quarks y neutrinos

⋆ Interacciones Fuertes

- Su intensidad es la mayor de todas las interacciones
- Mantienen unidos a los protones y neutrones en el interior del núcleo atómico, pese a la repulsión electrostática de los protones
- Mantienen unidos a los quarks en el interior de los nucleones, pese a la repulsión electrostática de los quarks
- Dan lugar a las reacciones nucleares (fusión y fisión) y a desintegraciones de partículas no elementales de vida media corta. Son responsables de la energía producida en el interior del Sol y las estrellas
- Todas las partículas con carga de color no nula experimentan la interacción fuerte: quarks

⋆ Interacciones Gravitatorias

- Son las más débiles de todas las interacciones
- Determinan la evolución del universo a gran escala
- Producen la condensación de la materia en estrellas, cúmulos y supercúmulos
- Son responsables del movimiento planetario y de que estemos confinados en la superficie terrestre
- No son relevantes en la Física de Partículas que se estudia en los experimentos actuales

Tipos de partículas elementales

Partículas de materia: fermiones de espín 1/2

$\longrightarrow$ **Quarks:**

$\star$ Número cuántico de sabor (flavour):

u(up), d(down), s(strange), c(charm), b(bottom), t(top)

Jerarquía de masas: $m_u < m_d < m_s < m_c < m_b < m_t$

Cargas eléctricas fraccionarias:

$$Q_u = Q_c = Q_t = \frac{2}{3}e\,,\; Q_d = Q_s = Q_b = -\frac{1}{3}e$$

$\star$ Número cuántico de color: $q_i\,,\; i = 1, 2, 3$

El color no se observa en la naturaleza:
quarks confinados en hadrones: $p(uud), n(ddu), \pi^+(u\bar{d})$..

$\longrightarrow$ **Leptones:**

$\star$ sabor leptónico: $e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$

Jerarquía de masas: $m_e < m_\mu < m_\tau$, Y los neutrinos?

$$Q_e = Q_\mu = Q_\tau = -e\,,\; Q_{\nu_e} = Q_{\nu_\mu} = Q_{\nu_\tau} = 0$$

Partículas de Interacción: bosones de espín 1

$\star$ Int. electromagnéticas: fotón, $Q_\gamma = 0$,$m_\gamma = 0$

$\star$ Int. fuertes: gluones g_α, $\alpha = 1, ..8$,

$Q_g = 0$, $m_g = 0$, confinados.

$\star$ Int. débiles: bosones débiles $W^\pm, Z$

$Q_{W^\pm} = \pm e, Q_Z = 0$, $m_{W^\pm, Z} \neq 0$

Explorando el Microcosmos

$\longrightarrow$Para explorar distancias pequeñas necesitamos grandes energías

* Rayos X

* Microscopio electrónico

$\longrightarrow$Relación entre distancia y energía en el mundo cuántico del microcosmos:

$$\lambda = \frac{h}{|\vec{p}|} \qquad \text{L. de Broglie (1923)}$$

λ =longitud de onda; $\vec{p}$ =momento
h =cte de Planck (1900) $= 6.62 \times 10^{-34}$ Julios.s

Relación Energía/Momento $\begin{cases} E = \sqrt{\vec{p}^2 c^2 + m^2 c^4} & \textbf{relativista} \\ E = \frac{\vec{p}^2}{2m} & \textbf{no relativista} \end{cases}$

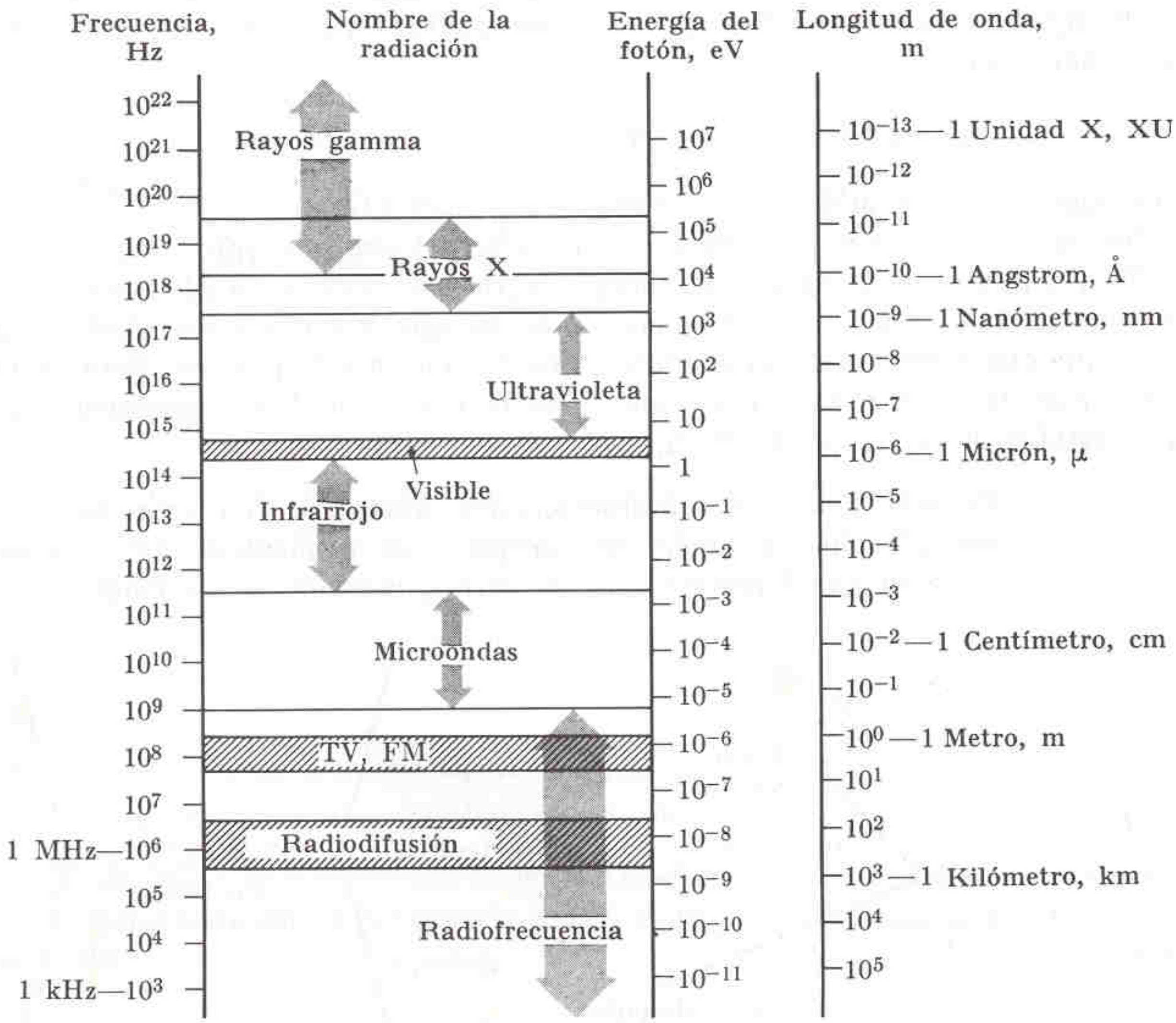
Relación Energía/Frecuencia $E = h\nu$

Dualidad onda-corpúsculo: $(\lambda, \nu) \leftrightarrow (p, E)$

$\longrightarrow$ Un electrón muy energético que colisiona con un protón puede escrutar sus quarks componentes

$m_e \sim 10^{-30}\text{Kg},\ m_p \sim 2 \times 10^{-27}\text{Kg},\ E_e = 1\ GeV = 10^9 eV = 1.6 \times 10^{-10}\text{Julios} \rightarrow v_e \simeq c = 3 \times 10^8 m/s \rightarrow \lambda \simeq 10^{-15} m$

De lo Micro a lo Macro



Observando el Microcosmos a muy alta energía también estudiamos el comportamiento del Universo en sus orígenes

Relación Energía/Temperatura:

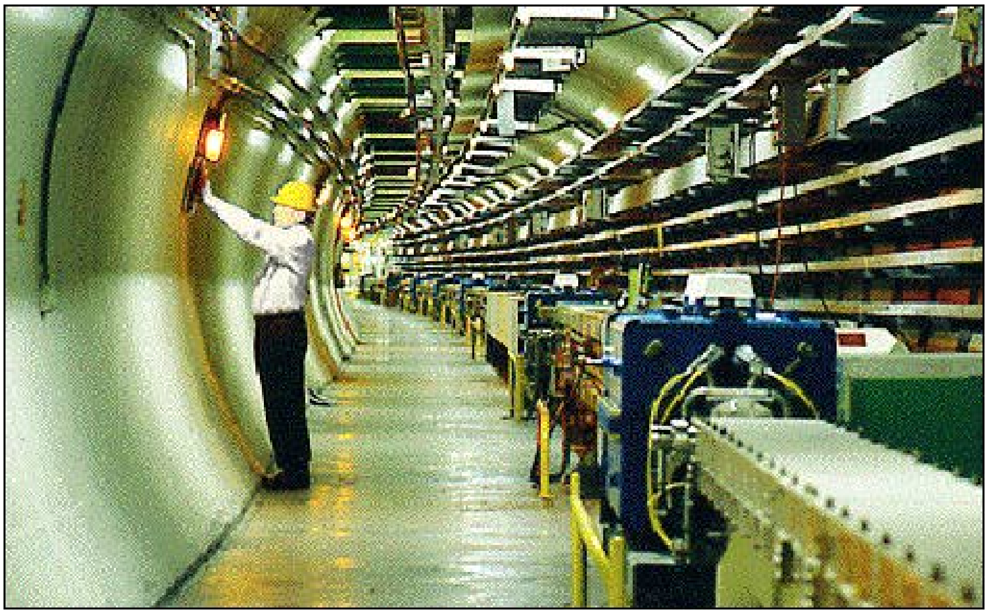
$$< E > \simeq \kappa T \; ; \kappa = \text{cte de Boltzmann} = 1.38 \times 10^{-23} \text{Julios}/{}^o K$$

Ej: $T \sim 3^o K \;\; (0^o C = 273^o K) \rightarrow E \sim 4 \times 10^{-4} eV$, Rad. cósmica de fondo de micro-ondas (emitida hace 4×10^5 años)

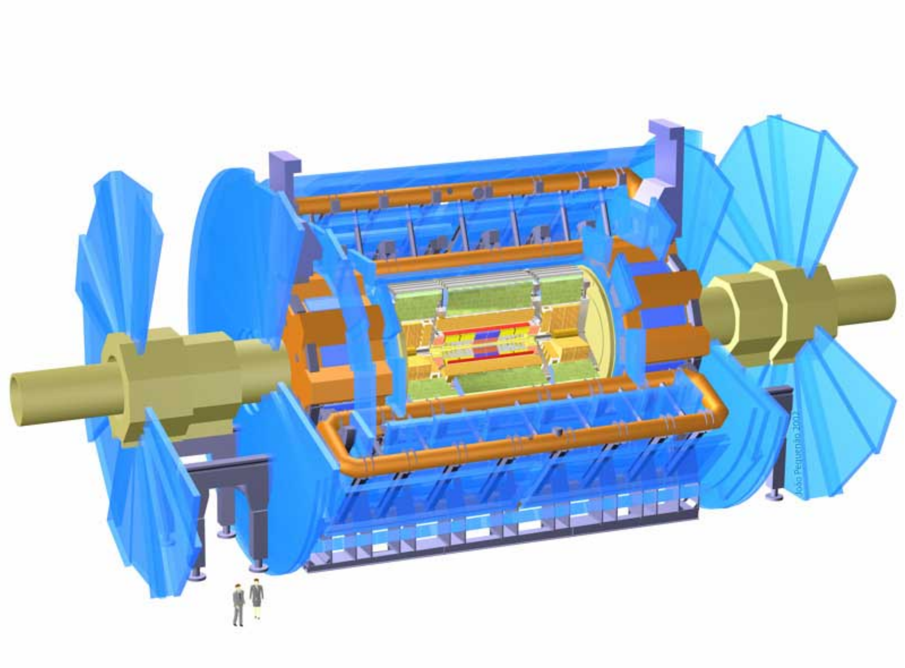
Teoría del Big-Bang, edad del Universo 1.37×10^{10} años

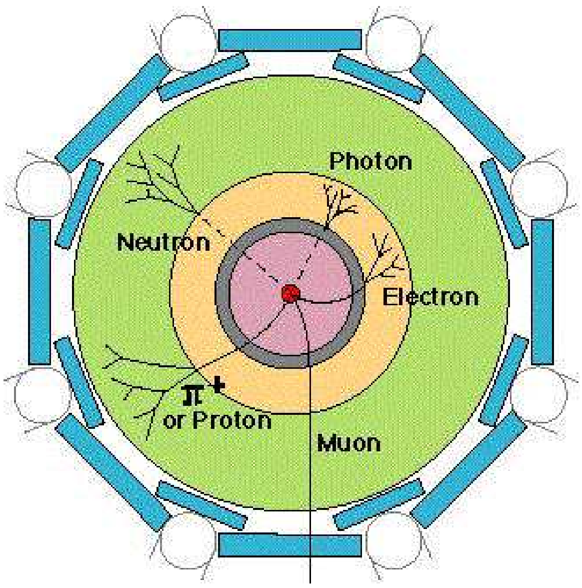
Colisionador LHC (Large Hadron Collider)

Lab. CERN (Centre Européen pour la Recherche Nucléaire) Frontera Franco-Suiza, cerca de Ginebra. Colisiones protón-protón. Long. tunel: 27 Km; Prof: decenas metros; Energía: 14000 GeV. Fecha: 2007-8. Otras creaciones: www, GRID



ATLAS: Un detector del LHC





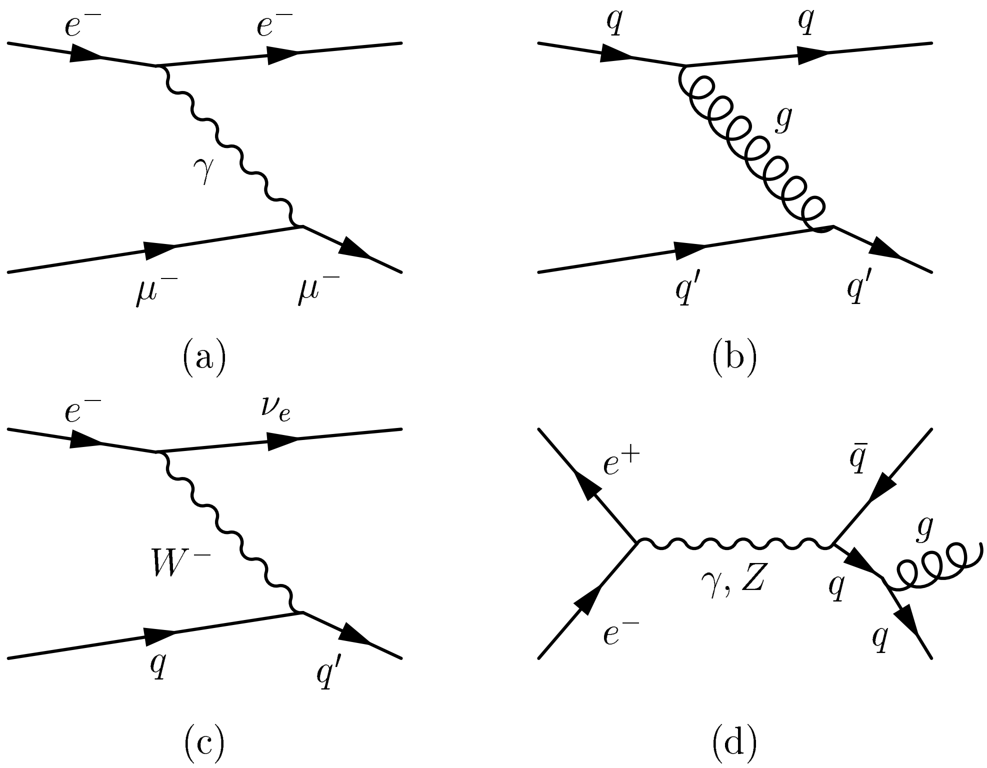
Cada partícula deja una traza diferente en las distintas capas del detector: calorímetros internos, cámaras externas, etc. Esta información se procesa mediate códigos informáticos, que luego se utilizan para reconstruir/visualizar 'el suceso'

Teoría Cuántica de Campos

La Física de Partículas utiliza como herramienta matemática la Teoría Cuántica de Campos

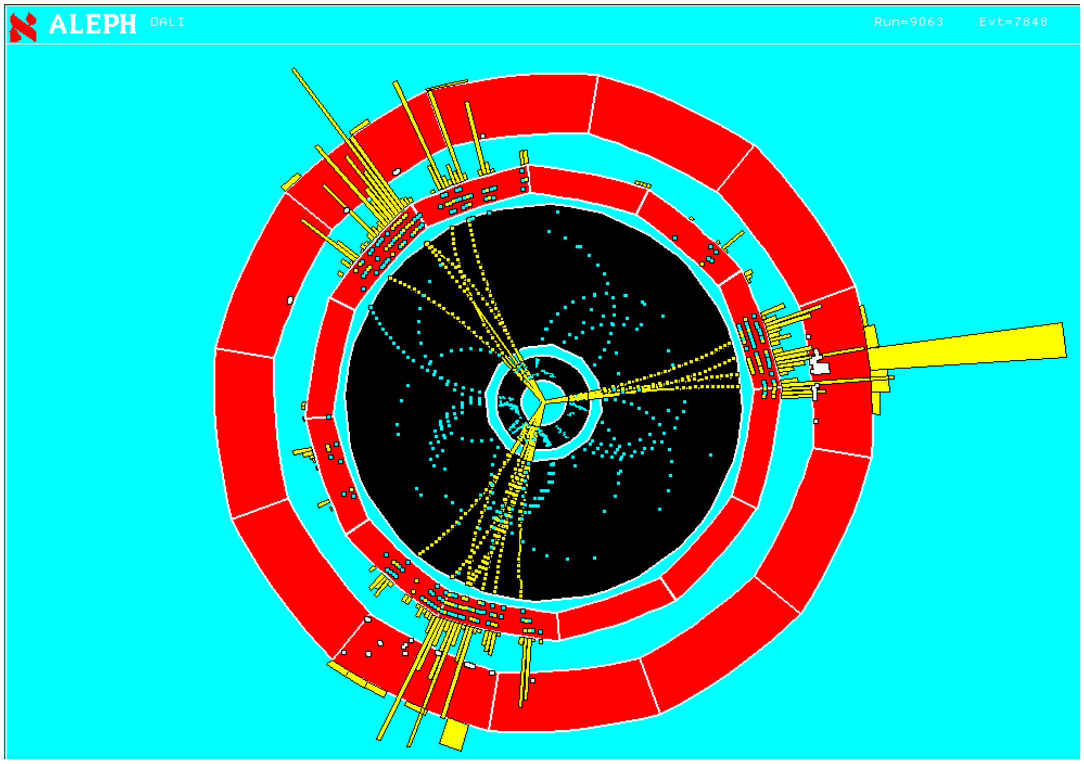
- Las partículas elementales son puntuales
- Las partículas (estados) se describen con campos cuánticos (operadores)
- Las interacciones entre partículas se entienden como el intercambio de otra partícula: Las interacciones también se describen con campos cuánticos
- El rango de la interacción es inversamente proporcional a la masa de la partícula intercambiada
- Las interacciones son locales/puntuales, desaparece el concepto de acción a distancia
- En las interacciones se conserva la energía y el momento, pero no el número de partículas
- Se incorpora la noción de antipartícula de la Mecánica Relativista y la interpretación probabilística de la Mecánica Cuántica

Diagramas de Feynman



- ⋆ Estado inicial→ Estado final
- ⋆ Las interacciones son puntuales/locales
- ⋆ Las partículas intercambiadas en la interacción también se incluyen en el diagrama: Bosones intermediarios, γ, g, $W^{\pm}$, Z
- ⋆ Las partículas en las patas externas son reales
- ⋆ Las partículas en las lineas internas (propagadores) son virtuales
- ⋆ En los vértices se conservan la energía, el momento y la carga eléctrica

Visualización del suceso $e^+e^- \to q\bar{q}g$



El quark, el antiquark y el gluón se infieren a partir de los jets (chorros) de hadrones (piones, protones, neutrones, etc)

Simetrías en Física de Partículas

⋆ Simetrías discretas:

- Conjugación de Carga C :
  partícula $\longrightarrow$ antipartícula
- Paridad P : $\vec{x} \longrightarrow -\vec{x}$
- Inversión Temporal T : $t \longrightarrow -t$
- Las int. em y fuertes invariantes bajo C, P, y T. Las int. débiles violan C, P y T. Todas invariantes CPT.

⋆ Simetrías continuas:

- Simetrías Espacio-Temporales:
  Rotaciones, Traslaciones.
- Simetrías Internas: Cambia unos estados en otros, sin cambiar la posición en el espacio-tiempo. Ej: Simetría de sabor $u \leftrightarrow d$
- Simetrías Gauge: simetrías internas locales.
  La transformación que pasa de un estado a otro es distinta en cada punto x.
  Ej: Simetría de color $q_i(x) \to U_{ij}(x) q_j(x)$
  Grupo de color:$SU(3)_C = \{U, UU^+ = 1, detU = 1\}$

Simetría Gauge del Modelo Estándar

$SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$

Glashow, Weinberg, Salam (1967)

Simetría espontáneamente rota a $SU(3)_C \times U(1)_{em}$

Mecanismo de Higgs (1964)

Glosario de Partículas en el Modelo Estándar
$SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$

I.- Constituyentes de la materia

Partícula	Símbolo	Carga (e)	Masa (GeV)
Familia 1			
Electrón	e^-	–1	0.511×10^{-3}
Neutrino Electrónico	ν_e	0	$< 3 \times 10^{-9}$
Quark down	d	–1/3	$5 - 8.5 \times 10^{-3}$
Quark up	u	2/3	$1.5 - 4.5 \times 10^{-3}$
Familia 2			
Muón	μ^-	–1	0.106
Neutrino Muónico	ν_μ	0	$< 0.19 \times 10^{-3}$
Quark extraño	s	–1/3	$0.080 - 0.155$
Quark encantado	c	2/3	$1.0 - 1.4$
Familia 3			
Tau	τ^-	–1	1.78
Neutrino Tauónico	ν_τ	0	< 0.018
Quark bottom	b	–1/3	$4.0 - 4.5$
Quark top	t	2/3	174.3 ± 5.1

- El universo conocido está en su mayoria constituido por partículas de la primera familia
- Las familias 2 y 3 son copias de la familia 1 pero con masas superiores.
  Jerarquía de masas: $m_1 < m_2 < m_3$
- Todos los constituyentes de la materia son fermiones de espín $\frac{1}{2}$
- Todos los quarks tienen color y su carga eléctrica es una fracción de la carga del electrón

II.- Partículas Mediadoras de las Interacciones

Partícula	Símbolo	Carga (e)	Masa (GeV)
Bosones Vectoriales *Gauge*			
Fotón	γ	0	0
Bosones W	$W^{\pm}$	± 1	80.42 ± 0.04
Bosón Z	Z^0	0	91.188 ± 0.002
Gluones	g_α	0	0

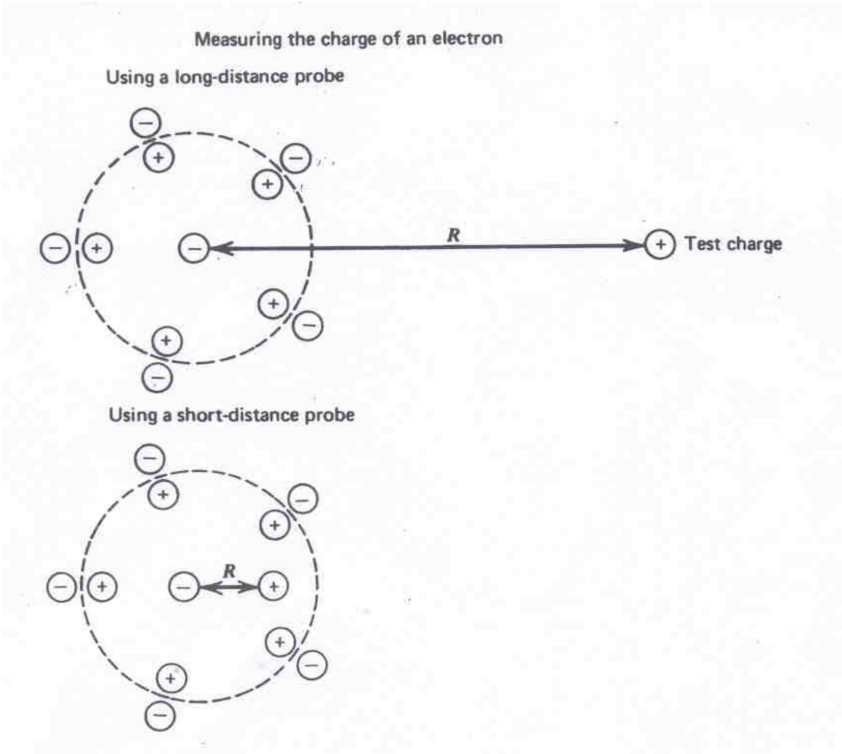
- Todas los mediadores de las interacciones son Bosones Vectoriales de espín 1: Bosones Gauge
- Los gluones tienen color: $g_\alpha, \ \alpha = 1, .., 8.$ Interaccionan consigo mismos. Están confinados.
- Las int. em son de largo alcance, $M_\gamma = 0.$ Las débiles de corto alcance, $M_{W,Z} \neq 0.$ Las fuertes de corto alcance, $M_g = 0$, debido a confinamiento.

III.- Partícula generadora de masas

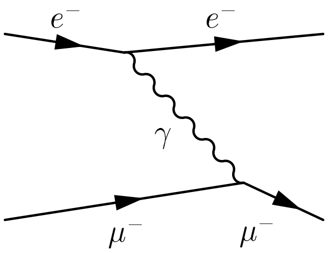
Partícula	Símbolo	Carga (e)	Masa (GeV)
Bosón de Higgs	H	0	$> 114.3 (95\%)$

- El Bosón de Higgs H es un escalar de espín 0
- La interacción de H con el resto de las partículas les proporciona sus masas:
  Pieza clave (Ad hoc) del ME
- No descubierto todavía.
  Grandes esperanzas en LHC.

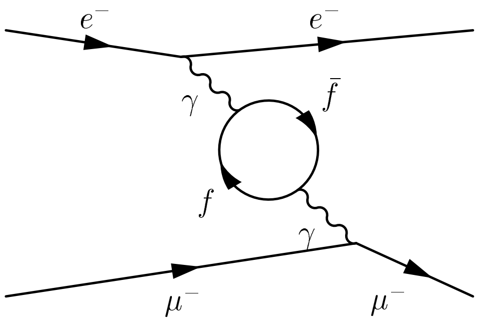
Apantallamiento de la carga Eléctrica



La carga eléctrica parece menor cuando se mide a mayor distancia (menor energía): Apantallamiento



nivel arbol



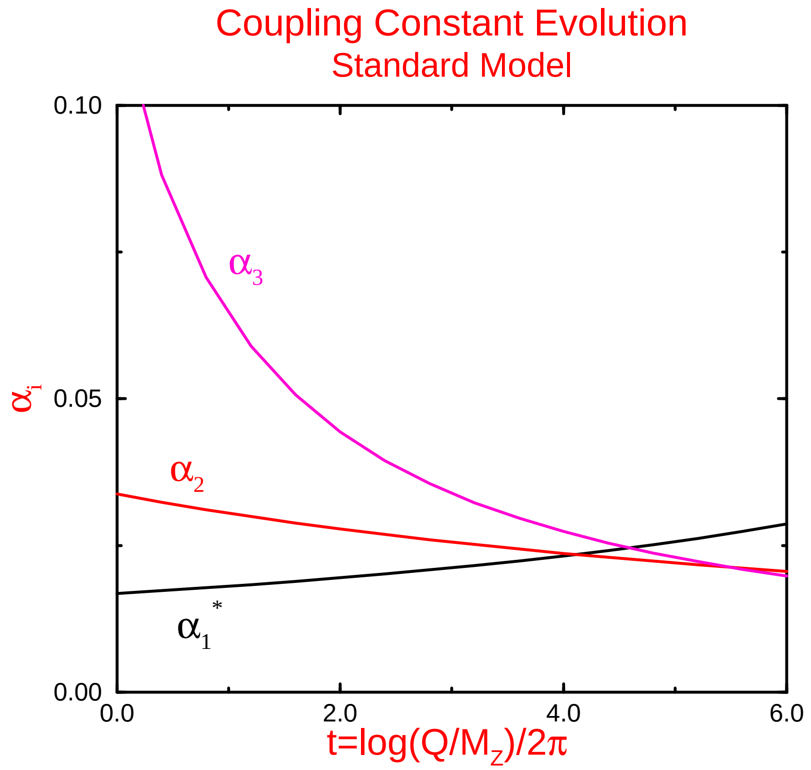
1-loop

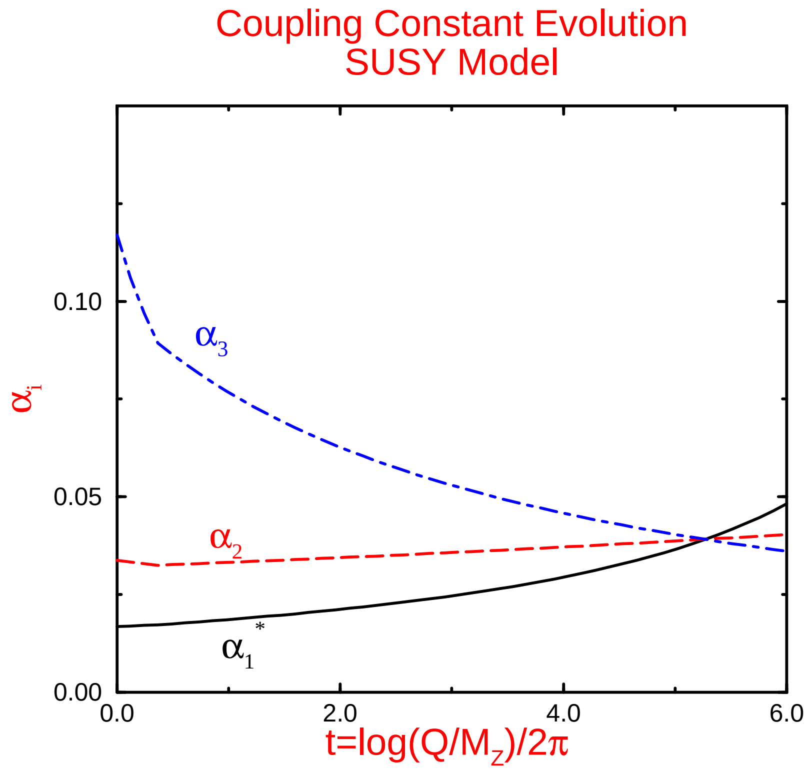
QED, U(1): nivel arbol + 1-loop (Renormalización)

$$\alpha_1 \equiv \frac{e^2}{4\pi},\ \alpha_1(Q) = \frac{\alpha_1(q)}{1 - \frac{\alpha_1(q)}{3\pi}\log\left(\frac{Q^2}{q^2}\right)},\ Q > q,\ \alpha_1(Q) > \alpha_1(q)$$

Constante de Acoplamiento Corredora

¿Se unifican las interacciones a altas energías?





$$Q_{SUSY-GUT} \sim 10^{16} GeV$$

¿Es el ME la teoría final de la Física de Partículas?

⋆ Exitos del ME:

La mayoría de las predicciones del ME se han confirmado experimentalmente, incluyendo efectos cuánticos (loops), con una precisión espectacular. Caben destacar el descubrimiento de los bosones W y Z (CERN, 1983), del quark top (Fermilab, 1994), y las medidas de precisión de LEP (CERN, 90's).

⋆ Limitaciones del ME:

- El ME predice masas cero para los neutrinos, en clara contradicción con las recientes observaciones de oscilaciones de neutrinos.
- El Bosón de Higgs no ha sido descubierto. Aunque se encontrara habría que entender cual es su origen. El Mecanismo de Higgs es un ingrediente que se mete 'a mano' en el ME, para generar las masas de las partículas. No existe ningún principio de simetría que lo justifique.
- No incluye las interacciones gravitatorias.
- No es compatible con una posible unificación de todas las interacciones

Ideas/Modelos que se investigan en el siglo XXI

⋆ Gran Unificación:

Se busca una simetría gauge más grande $G \supset SU(3) \times SU(2) \times U(1)$: Unificación de todas las interacciones. Problema: Predice la desintegración del protón

⋆ Supersimetría:

Se postula una nueva simetría: Fermiones $\Longleftrightarrow$ Bosones. Predice la existencia de nuevas partículas (compañeros supersimétricos): selectrón, sneutrino, squarks (bosones de espín 0), gluino, fotino, wino, zino (fermiones de espín 1/2). Los Bosones de Higgs aparecen de manera natural: El modelo más sencillo tiene cinco.

⋆ Supergravedad:

Es la Teoría Gauge (local) de la Supersimetría. El grupo de simetría incluye al grupo de Lorentz SO(1,3) $\Rightarrow$ Contiene a la Gravitación. Compañero supersimétrico del gravitón (bosón de espín 2): gravitino (fermión de espín 3/2). Problema: Tiene divergencias no renormalizables.

⋆ Modelos de Kaluza-Klein:

Suponen la existencia de más de tres dimensiones espaciales. Las dim. extra están compactificadas en tamaños muy pequeños (Escala de Planck, $10^{-33}cm$), por tanto no observables. La simetrías gauge son consecuencia de las simetrías del espacio de las dimensiones extras.

⋆ Teorías de Cuerdas:

El objeto fundamental no es puntual sino extenso (cuerda). Las partículas son los modos normales de oscilación de las cuerdas. Son teorías finitas (sin divergencias). Incluyen a las Teorías Gauge, Gravitación, Supersimetría, Supergravedad, Gran Unificación y dimensiones extra a la Kaluza-Klein. Son las únicas teorías consistentes con gravedad cuántica. Sólo existen 5 teorías de cuerdas.

⋆ Teoría M:

Pretende ser la teoría final. Representa la fusión de las cinco 5 teorías de cuerdas, relacionadas entre sí mediante unas nuevas simetrías llamadas dualidades. Ademas de cuerdas, contiene otros objetos extendidos llamados branas, todos ellos inmersos en 11 dimensiones. ¿Es nuestro universo una 3-brana?. ¿Existirán efectos observables de las dimensiones extra en el futuro LHC?

La Física de Partículas nos depara grandes sorpresas en el futuro. Probablemente descubriremos nuevas simetrías y/o nuevas partículas y/o nuevas dimensiones cuyos efectos podrán apreciarse en los futuros experimentos: LHC, Colisionadores lineales, exp. de neutrinos, etc. La comprensión de la naturaleza en su nivel más elemental será siempre un excitante reto para la Ciencia