

¿De qué estamos hechos?

Partículas e interacciones elementales

Carlos Pena



Plan

- Introducción: escalas de espacio y de energía en Física Fundamental.
- Física Cuántica y Relatividad Especial.
 - Las preguntas revolucionarias.
 - Dirac y la Mecánica Cuántica Relativista.
 - Las interacciones nucleares débil y fuerte: neutrinos y mesones.
- Interludio: diagramas de Feynman.
- Teoría Cuántica de Campos.
 - Efectos cuánticos y fuerzas fundamentales.
 - Infinitos y Guerras.
 - La Edad de Plata: Electrodinámica Cuántica y leyes fundamentales.
- Simetrías: la Edad de Oro.
 - El Camino Óctuple: Quarks.
 - La interacción electrodébil: corrientes neutras.
 - Más infinitos.
 - El Modelo Estándar de la Física de Partículas.

Plan

- **Introducción: escalas de espacio y de energía en Física Fundamental.**
- Física Cuántica y Relatividad Especial.
 - Las preguntas revolucionarias.
 - Dirac y la Mecánica Cuántica Relativista.
 - Las interacciones nucleares débil y fuerte: neutrinos y mesones.
- Interludio: diagramas de Feynman.
- Teoría Cuántica de Campos.
 - Efectos cuánticos y fuerzas fundamentales.
 - Infinitos y Guerras.
 - La Edad de Plata: Electrodinámica Cuántica y leyes fundamentales.
- Simetrías: la Edad de Oro.
 - El Camino Óctuple: Quarks.
 - La interacción electrodébil: corrientes neutras.
 - Más infinitos.
 - El Modelo Estándar de la Física de Partículas.

El sentido de la pregunta: escalas de longitud

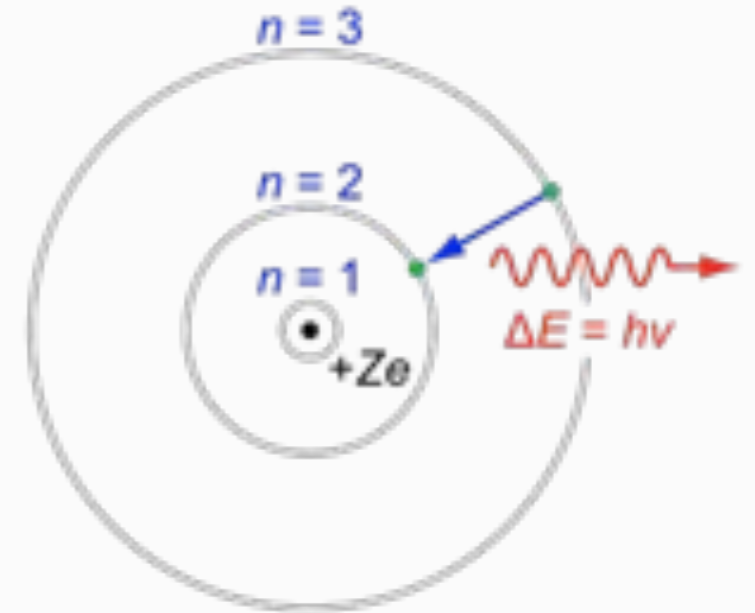


El sentido de la pregunta: escalas de energía



$$E_{\gamma} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Planck / Einstein: cuantización de la luz



Energía \Leftrightarrow 1/Longitud

$$(\Delta E) (\Delta x) \approx \hbar c$$



$$\lambda = \frac{h}{p}$$



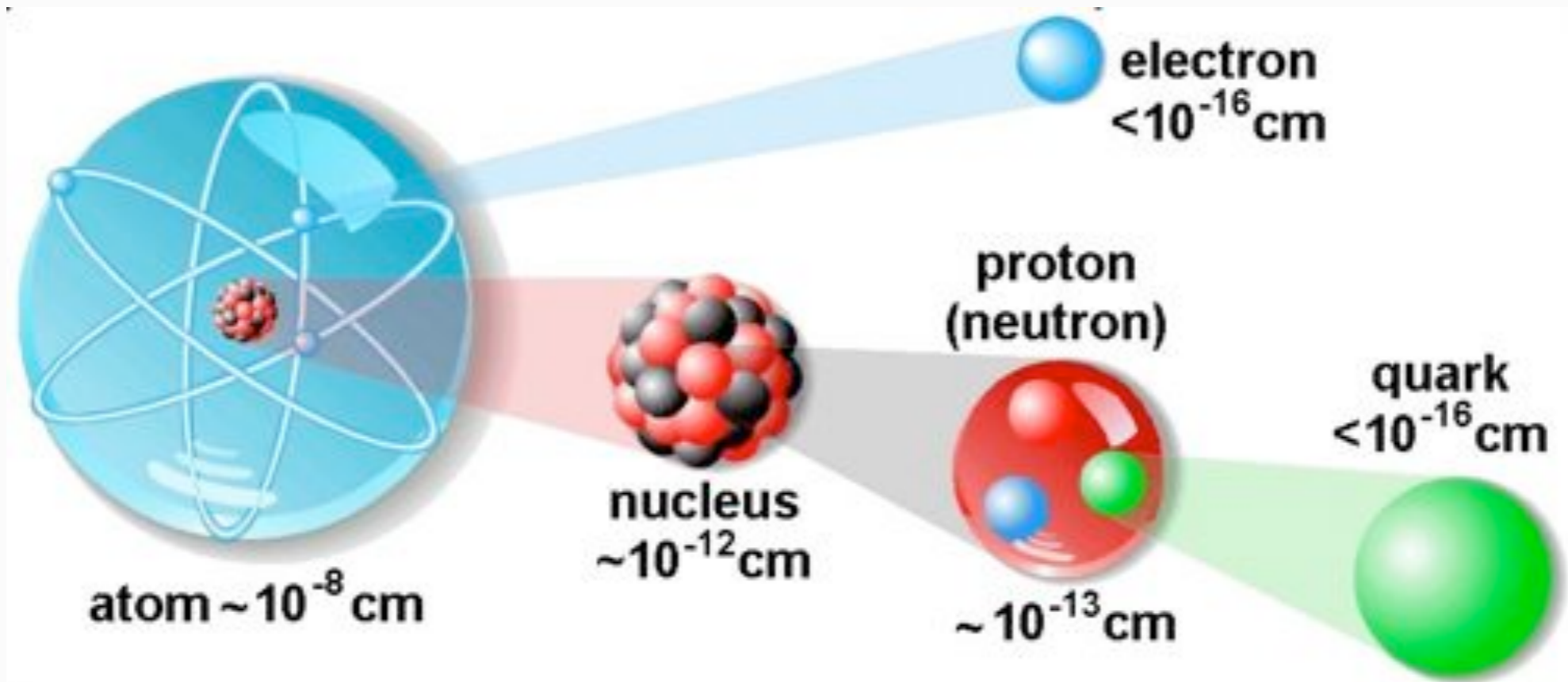
de Broglie: dualidad onda/partícula

El sentido de la pregunta: escalas de longitud y energía

$10 \text{ keV}/(hc)$

$100 \text{ MeV}/(hc)$

$\gtrsim 1 \text{ GeV}/(hc)$

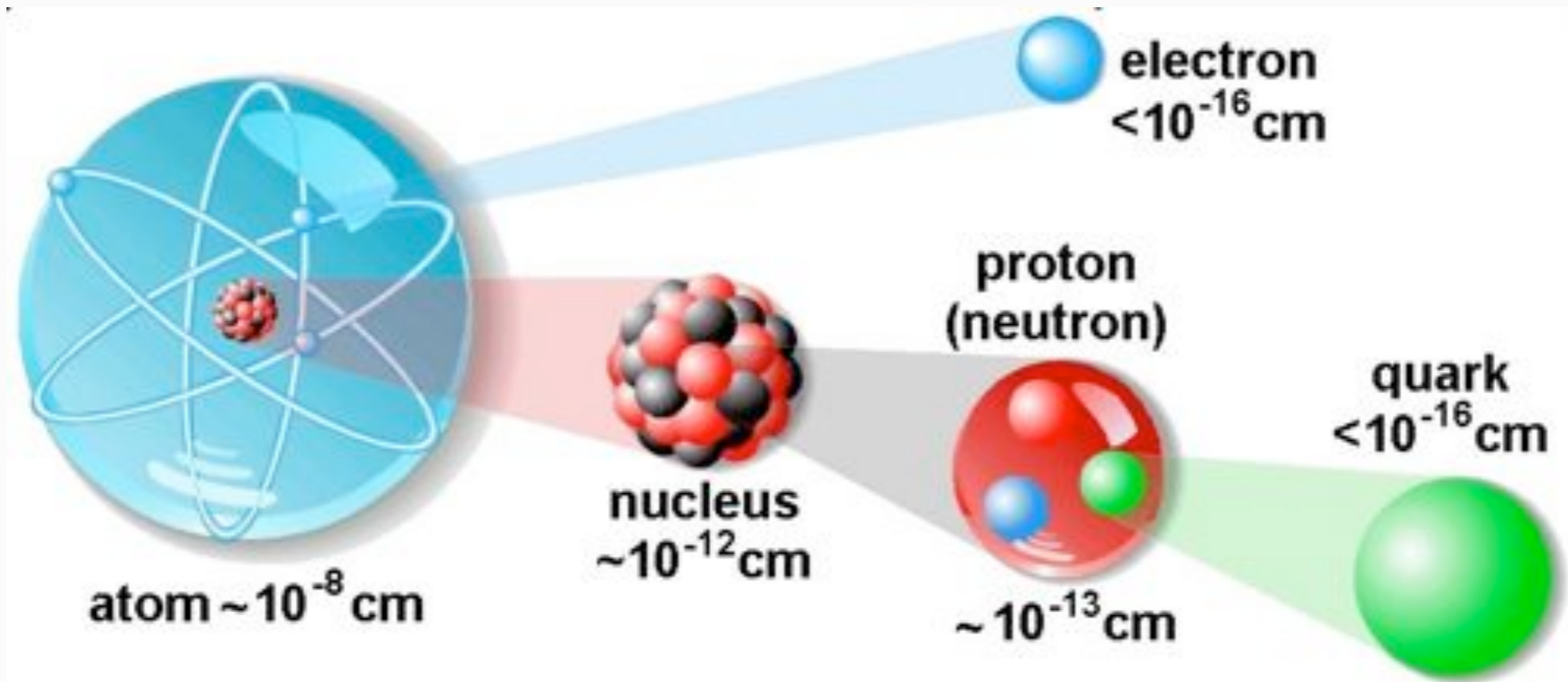


El sentido de la pregunta: escalas de longitud y energía

$10 \text{ keV}/(hc)$

$100 \text{ MeV}/(hc)$

$\gtrsim 1 \text{ GeV}/(hc)$



↑
Electromagnetismo

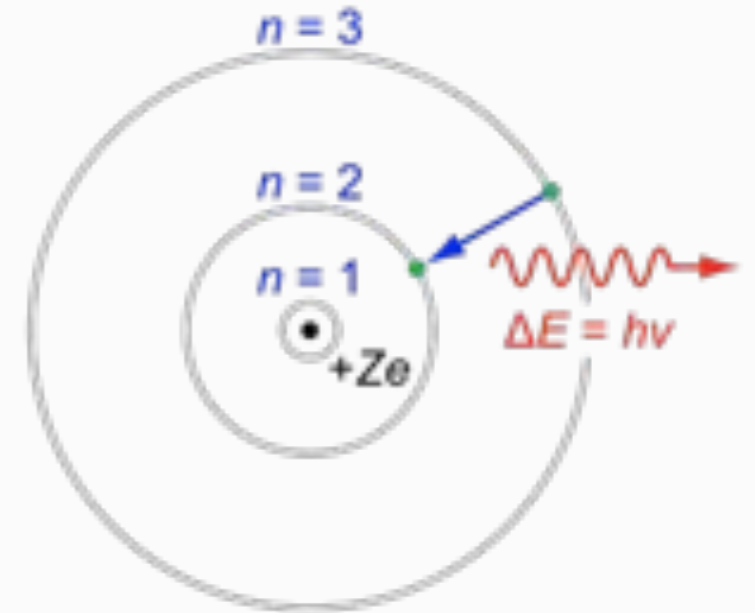
↙ ↘
Interacciones nucleares
débil y fuerte

El sentido de la pregunta: escalas de energía



$$E_{\gamma} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

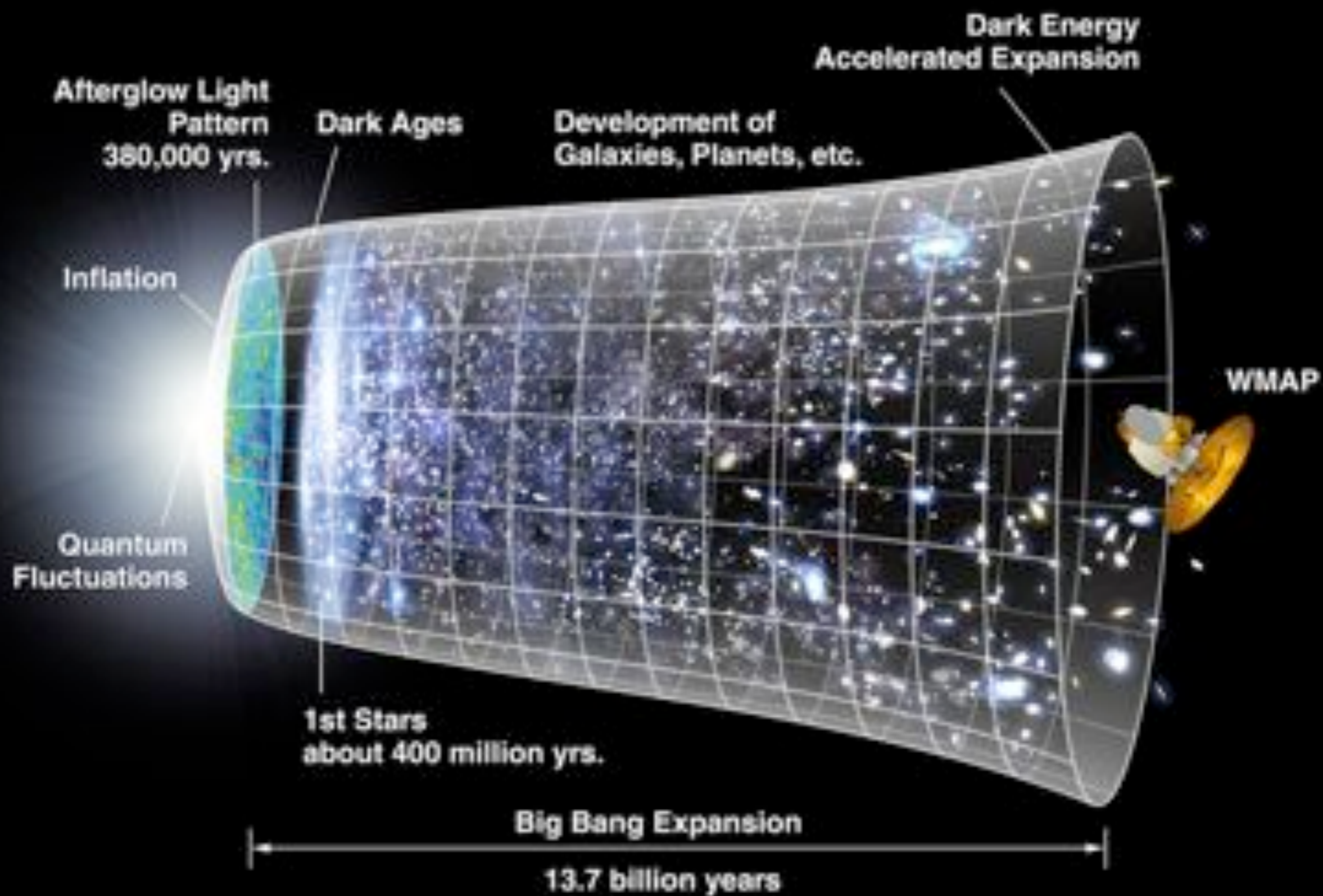
Planck / Einstein: cuantización de la luz



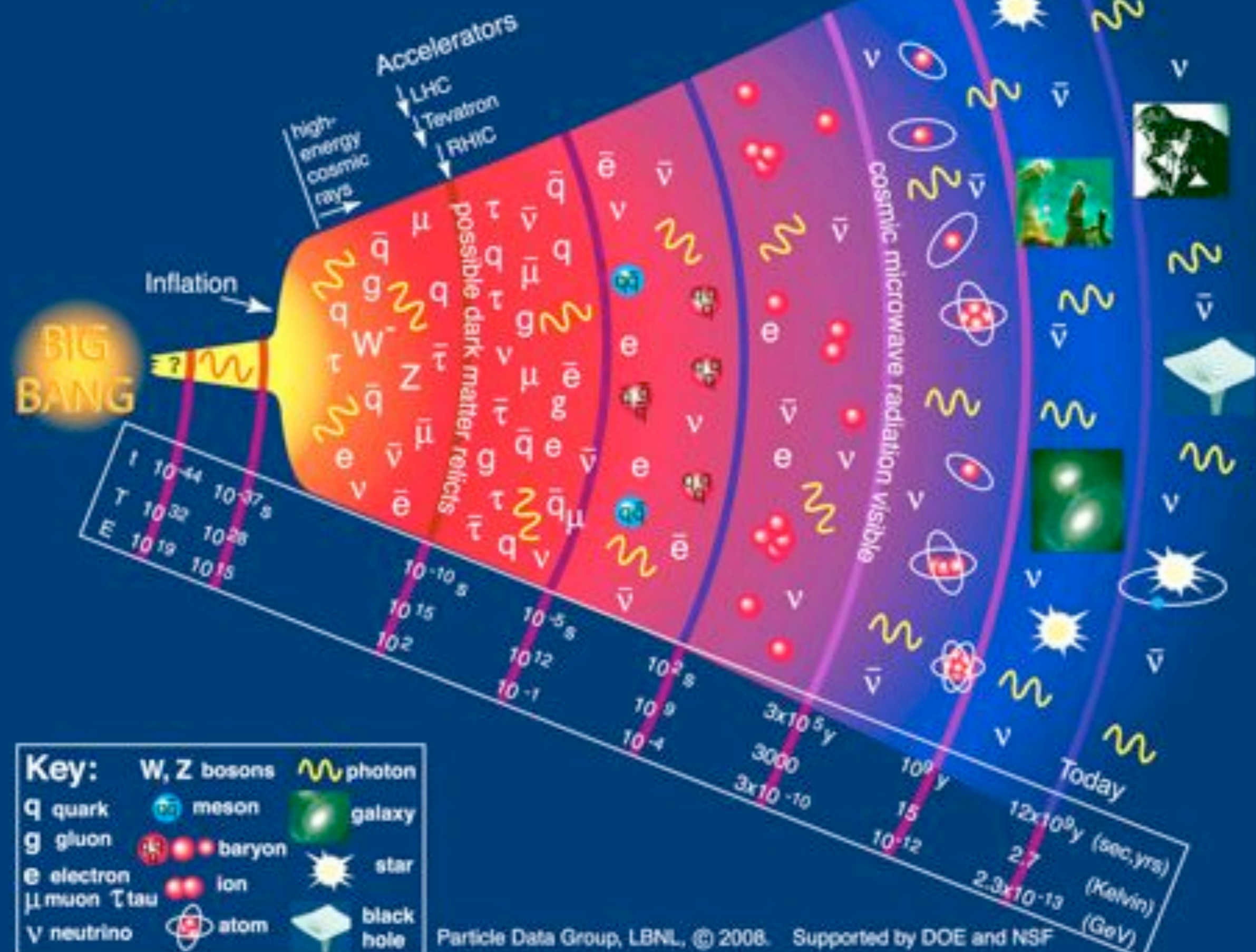
$$\lambda = \frac{h}{p}$$



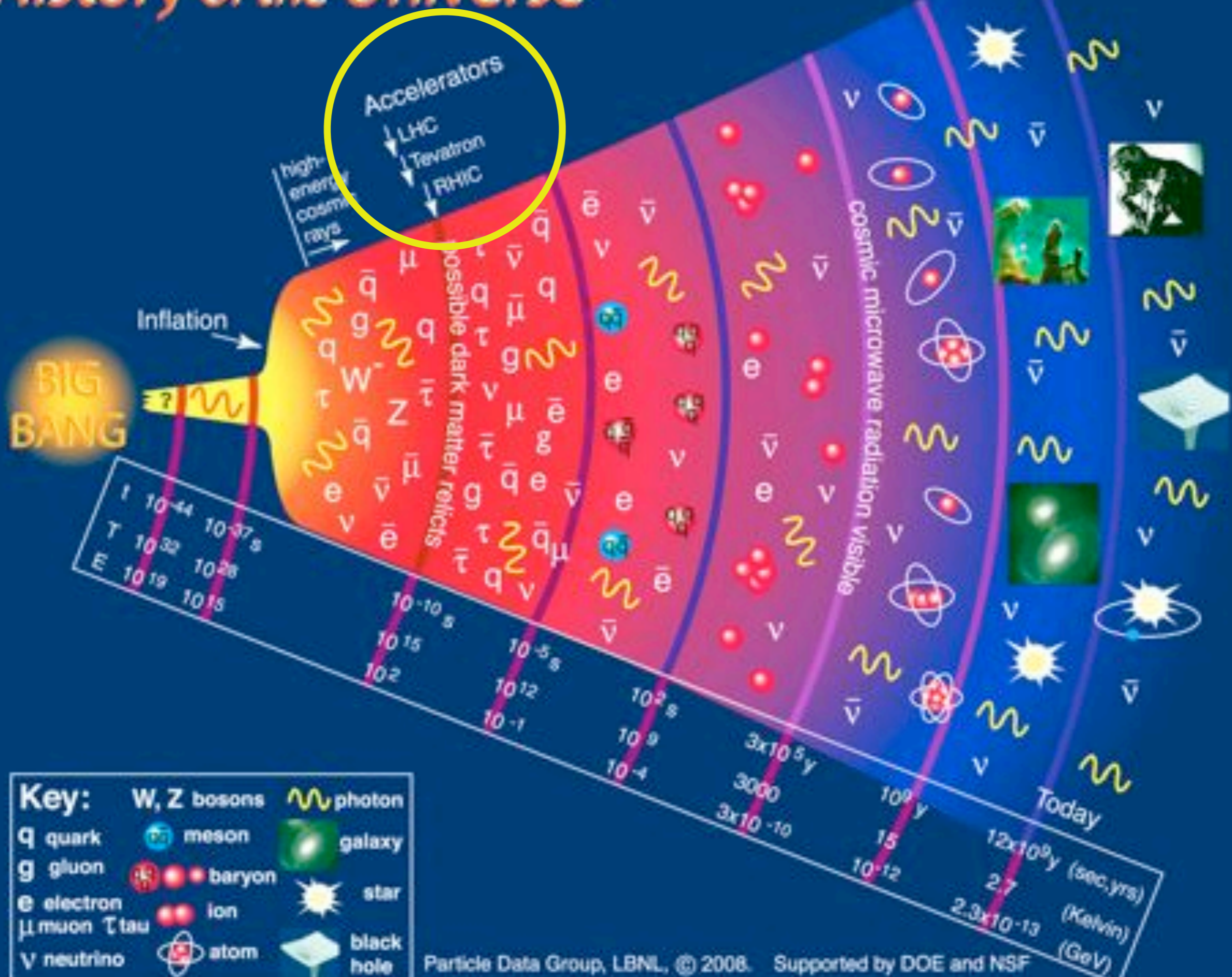
de Broglie: dualidad onda/partícula



History of the Universe



History of the Universe

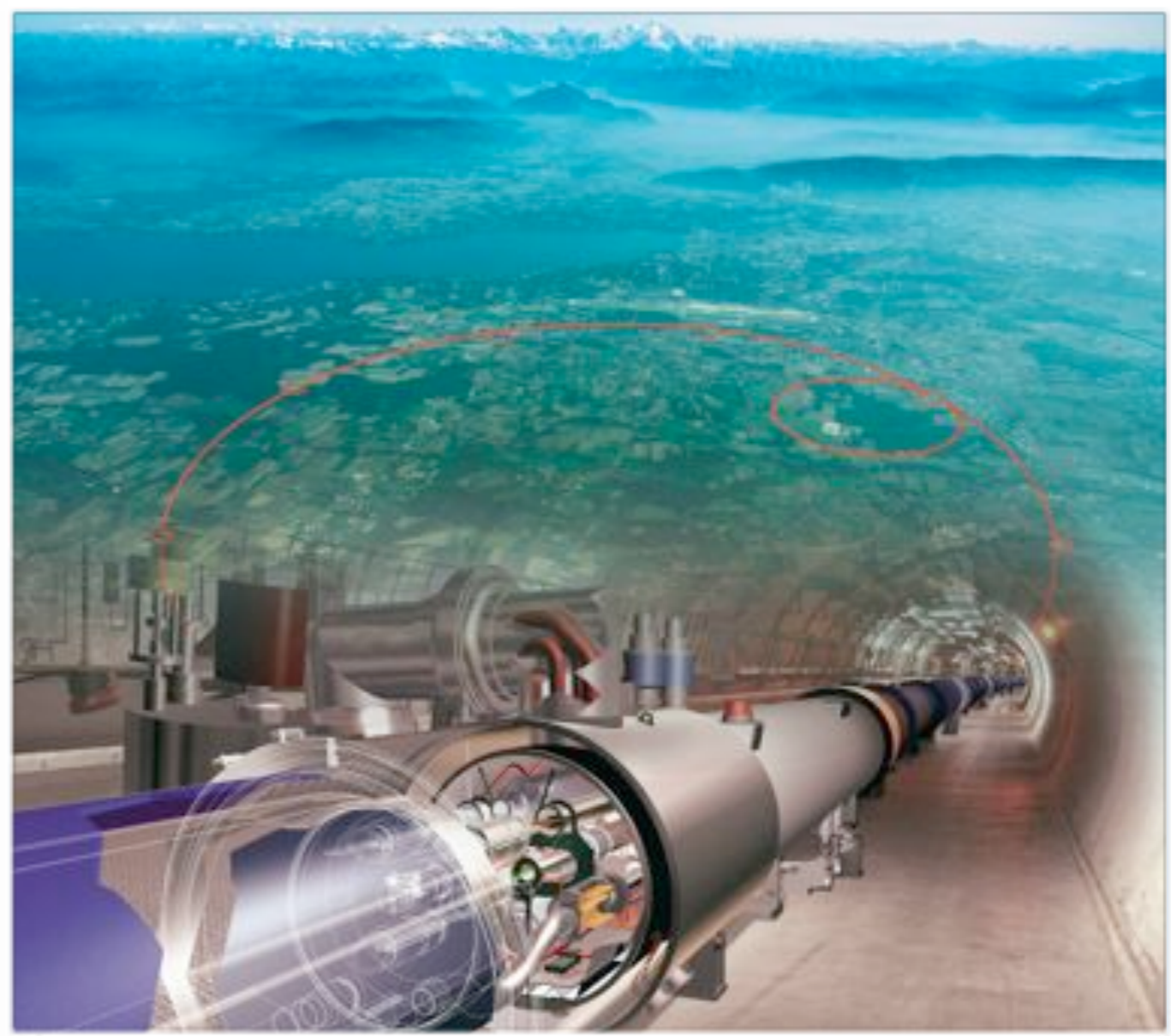


History of the Universe



Key:

W, Z bosons		photon	
q quark		meson	
g gluon		baryon	
e electron		ion	
μ muon τ tau		atom	
ν neutrino		black hole	
		galaxy	
		star	

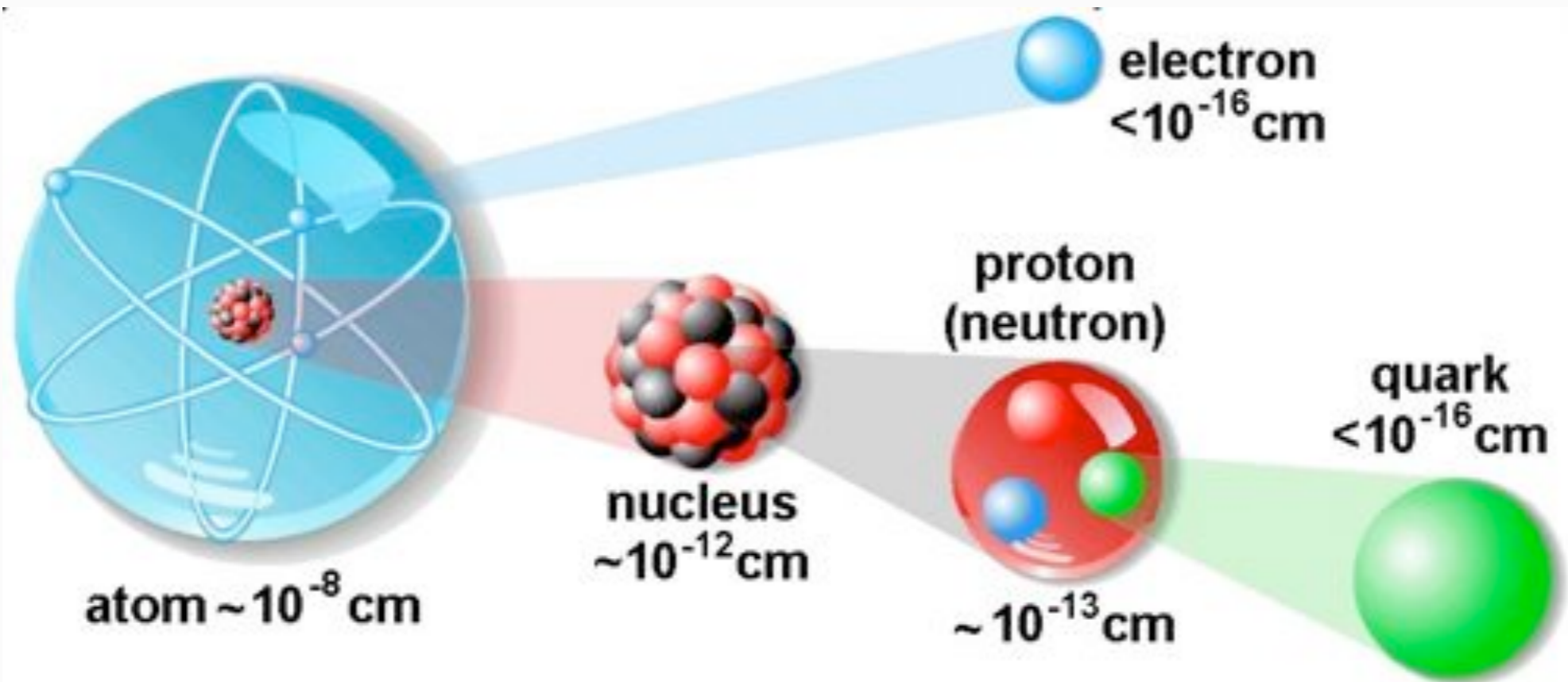


El sentido de la pregunta: escalas de longitud y energía

$10 \text{ keV}/(hc)$

$100 \text{ MeV}/(hc)$

$\gtrsim 1 \text{ GeV}/(hc)$



Electromagnetismo

Interacciones nucleares
débil y fuerte

Mecánica Clásica,
Teoría Cinética,
Termodinámica

Boltzmann

Maxwell

Newton

Partículas

Campos

Universo

Tecnología

Electromagnético Débil Fuerte

Detectores Aceleradores

1895

1900

1905

1910

1920

1930

1940

1950

1960

1970

1980

1990

2000

2010

e^-

Átomo

Núcleo

p^+

e^+

n

μ^-

π

τ^-

p^-

ν_e

u d s

ν_μ

c

τ^-

b

ν_τ

Movimiento Browniano

Fotón

Radioactividad

Relatividad especial

Mecánica Cuántica
Onda / partícula
Fermiones / Bosones

Dirac
Antimateria

Desintegración beta

Mesones de Yukawa

QED

Violación de P, C, CP

Higgs

Bosones W
Unificación electrodébil

Gran unificación?
Supersimetría?

Supercuerdas?

W Z

g

3 familias

Masas de neutrinos

Rayos cósmicos

Relatividad General

Galaxias ; Universo en expansión; modelo del Big Bang

Materia oscura

Fusión nuclear

Nucleosíntesis cosmológica

Fondo de radiación de microondas

Inflación

Inhomogeneidades del fondo de microondas

Energía oscura

Geiger

Cámara de niebla

Ciclotrón

Sincrotrón

Cámara de burbujase

Aceleradores e^+e^-

Cámara de hilos

Enfriamiento de haces

Online computers

Detectores modernos

Aceleradores p^+p^-

WWW

GRID

Mecánica Clásica,
Teoría Cinética,
Termodinámica

Boltzmann

Maxwell

Newton

Partículas

Campos

Universo

Tecnología

Electromagnético Débil Fuerte

Detectores Aceleradores

1895

1900

1905

1910

1920

1930

1940

1950

1960

1970

1980

1990

2000

2010

e^-

Átomo

Núcleo

p^+

e^+

n

μ^-

π

τ^-

p^-

ν_e

u d s

ν_μ

c

τ^-

b

ν_τ

t

Masas de neutrinos

Movimiento Browniano

Fotón

Radioactividad

Relatividad especial

Mecánica Cuántica
Onda / partícula

Fermiones / Bosones

Dirac
Antimateria

Desintegración beta

Mesones de Yukawa

QED

Violación de P, C, CP

Higgs

Bosones W

Unificación electrodébil

Gran unificación?

Supersimetría

Supercuerdas

W

Z

g

3 familias

Rayos cósmicos

Relatividad General

Galaxias ; Universo en expansión; modelo del Big Bang

Materia oscura

Fusión nuclear

Nucleosíntesis cosmológica

Fondo de radiación de microondas

Inflación

Inhomogeneidades del fondo de microondas

Energía oscura

Geiger

Cámara de niebla

Ciclotrón

Sincrotrón

Cámara de burbujase

Aceleradores e^+e^-

Enfriamiento de haces

Online computers

Detectores modernos

Aceleradores p^+p^-

WWW

GRID

Zoo de partículas

MODELO ESTÁNDAR

Plan

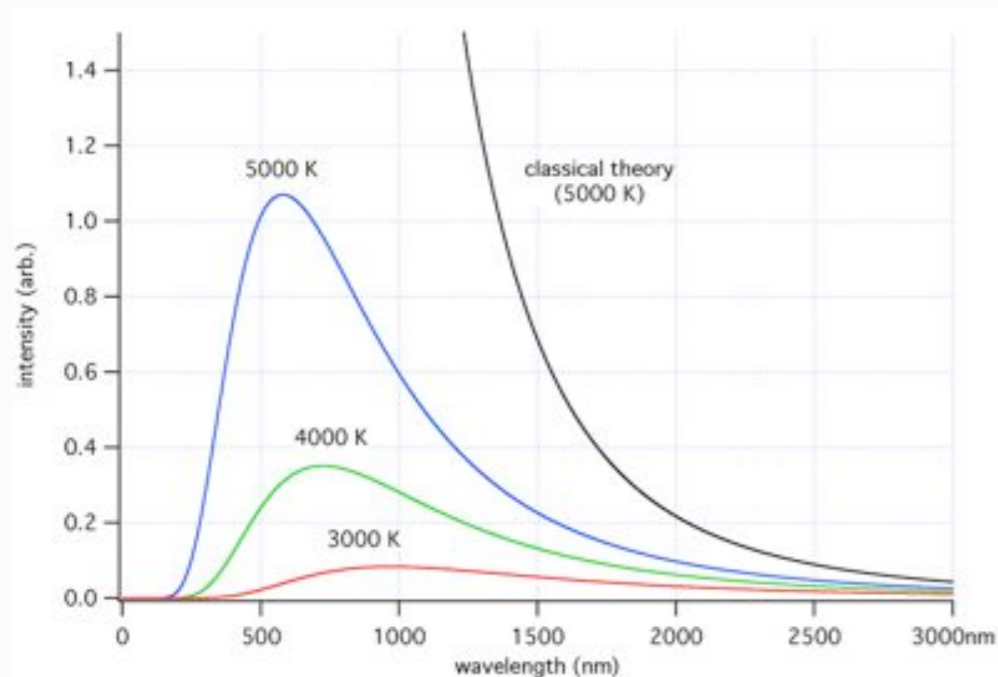
- Introducción: escalas de espacio y de energía en Física Fundamental.
- Física Cuántica y Relatividad Especial.
 - Las preguntas revolucionarias.
 - Dirac y la Mecánica Cuántica Relativista.
 - Las interacciones nucleares débil y fuerte: neutrinos y mesones.
- Interludio: diagramas de Feynman.
- Teoría Cuántica de Campos.
 - Efectos cuánticos y fuerzas fundamentales.
 - Infinitos y Guerras.
 - La Edad de Plata: Electrodinámica Cuántica y leyes fundamentales.
- Simetrías: la Edad de Oro.
 - El Camino Óctuple: Quarks.
 - La interacción electrodébil: corrientes neutras.
 - Más infinitos.
 - El Modelo Estándar de la Física de Partículas.

Mecánica Cuántica y Relatividad Especial

Las revoluciones cuántica y relativista se desarrollan en paralelo durante 30 años.

Mecánica Cuántica y Relatividad Especial

I. ¿Cómo se explica el espectro de un cuerpo negro?



Catástrofe UV: la ley de Rayleigh-Jeans genera intensidades infinitas a alta frecuencia.

Planck: cuantización de niveles de energía en una cavidad resonante

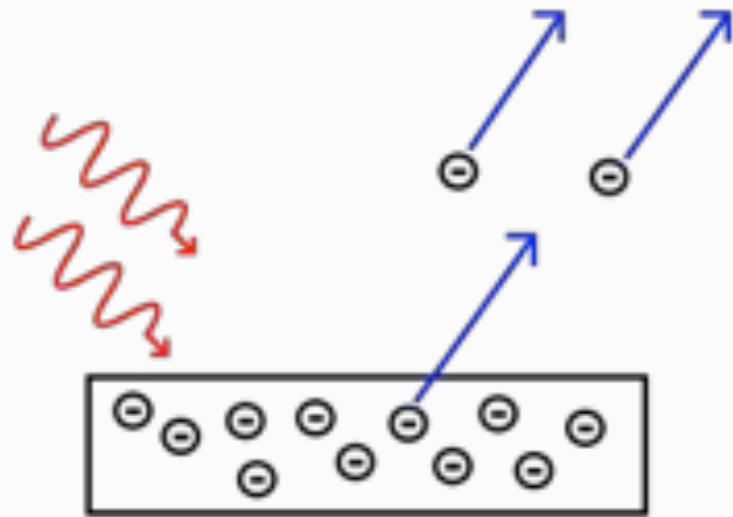


$$E = h\nu$$
$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

Planck, 1901

Mecánica Cuántica y Relatividad Especial

2. ¿Cómo explicar el efecto fotoeléctrico?



Descubrimiento del electrón.
¿Interacción radiación-materia?

Cuantización de la luz: fotones

Cada cuanto de luz es un oscilador cuántico independiente.



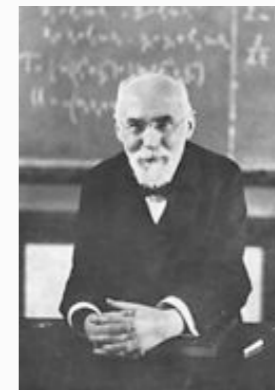
$$E_{\gamma} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Einstein, 1905

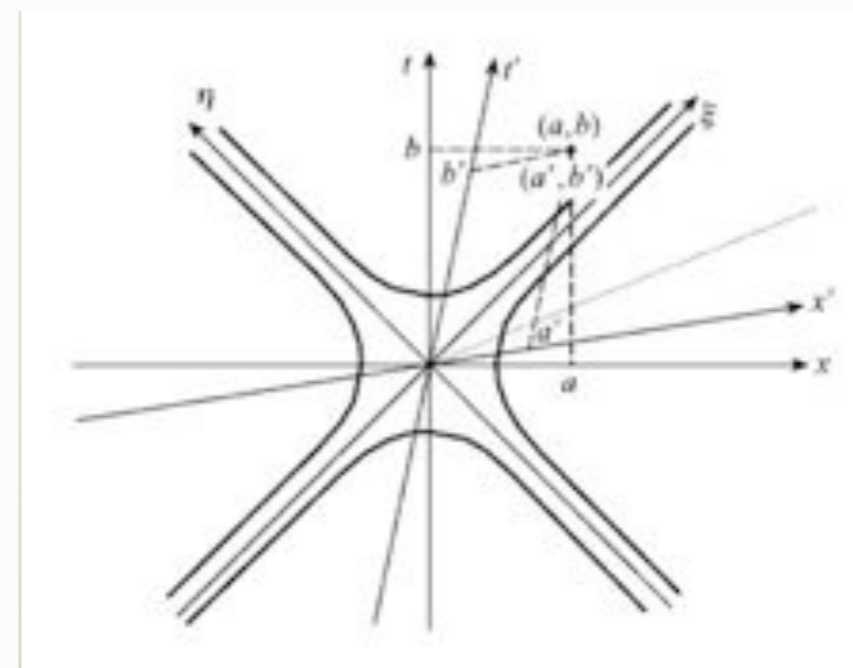
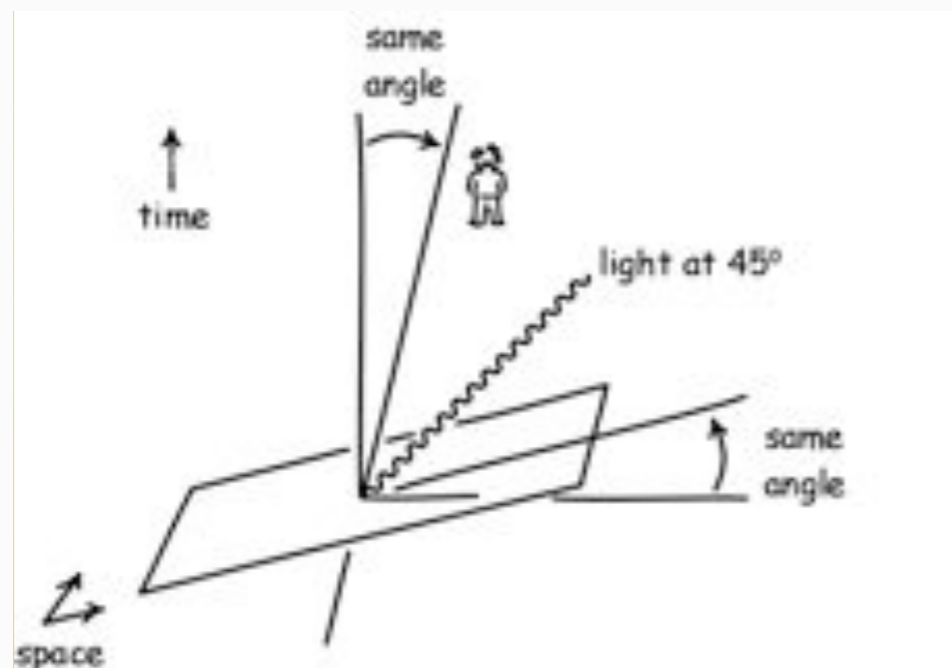
Mecánica Cuántica y Relatividad Especial

3. ¿Son compatibles el electromagnetismo de Maxwell y la mecánica de Newton?

No: relatividad especial.



Einstein, Lorentz c. 1905
Expt. Michelson-Morley



Cambio sistema referencia = rotación en el espaciotiempo

Mecánica Cuántica y Relatividad Especial

4. ¿Son compatibles las leyes de la Física Clásica con la estabilidad del átomo?

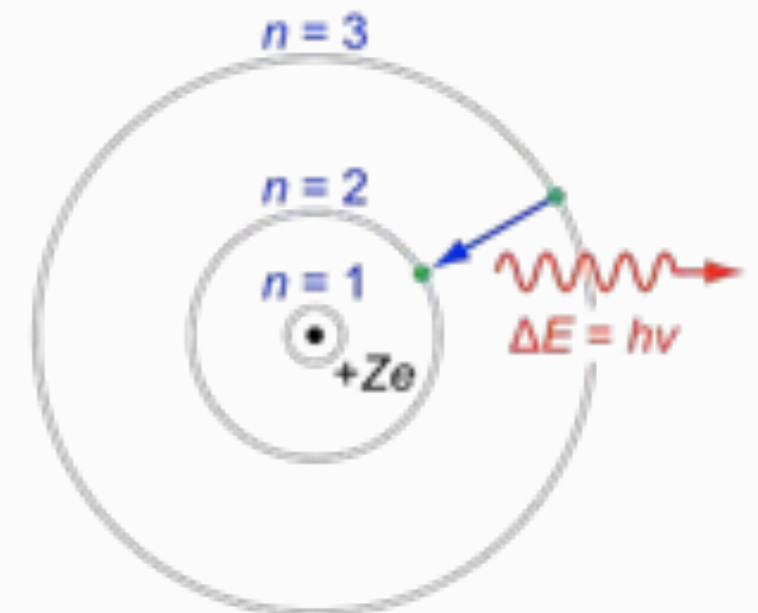
Un electrón en movimiento circular pierde energía en forma de radiación EM \Rightarrow colapso de las órbitas



Cuantización de los niveles de energía.



Bohr, 1913



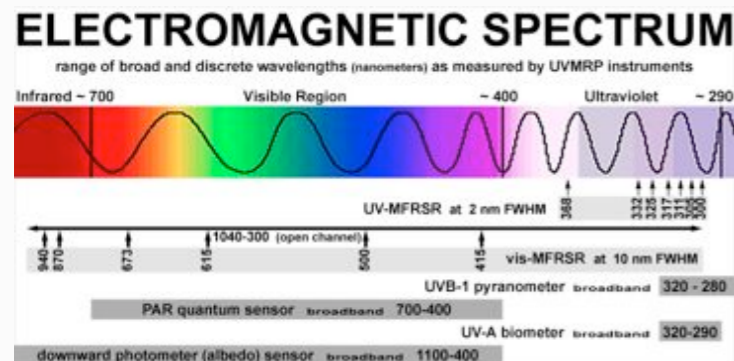
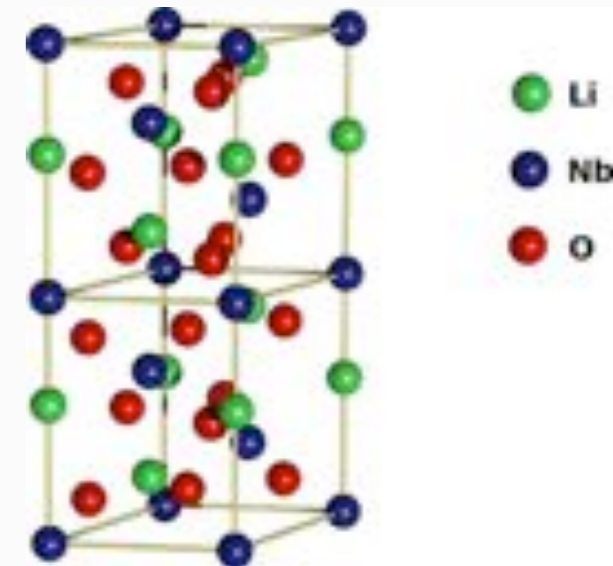
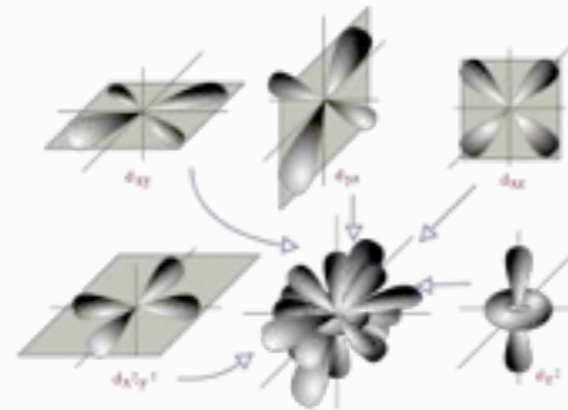
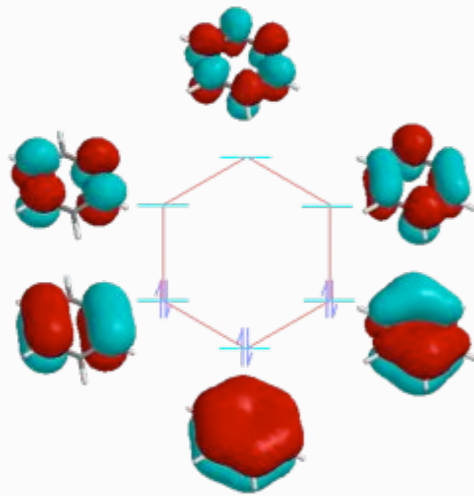
Mecánica Cuántica y Relatividad Especial

5. ¿Cómo unir las ideas de Planck, Einstein y Bohr en una única estructura, consistente con la mecánica clásica?

Desarrollo de la Mecánica Cuántica



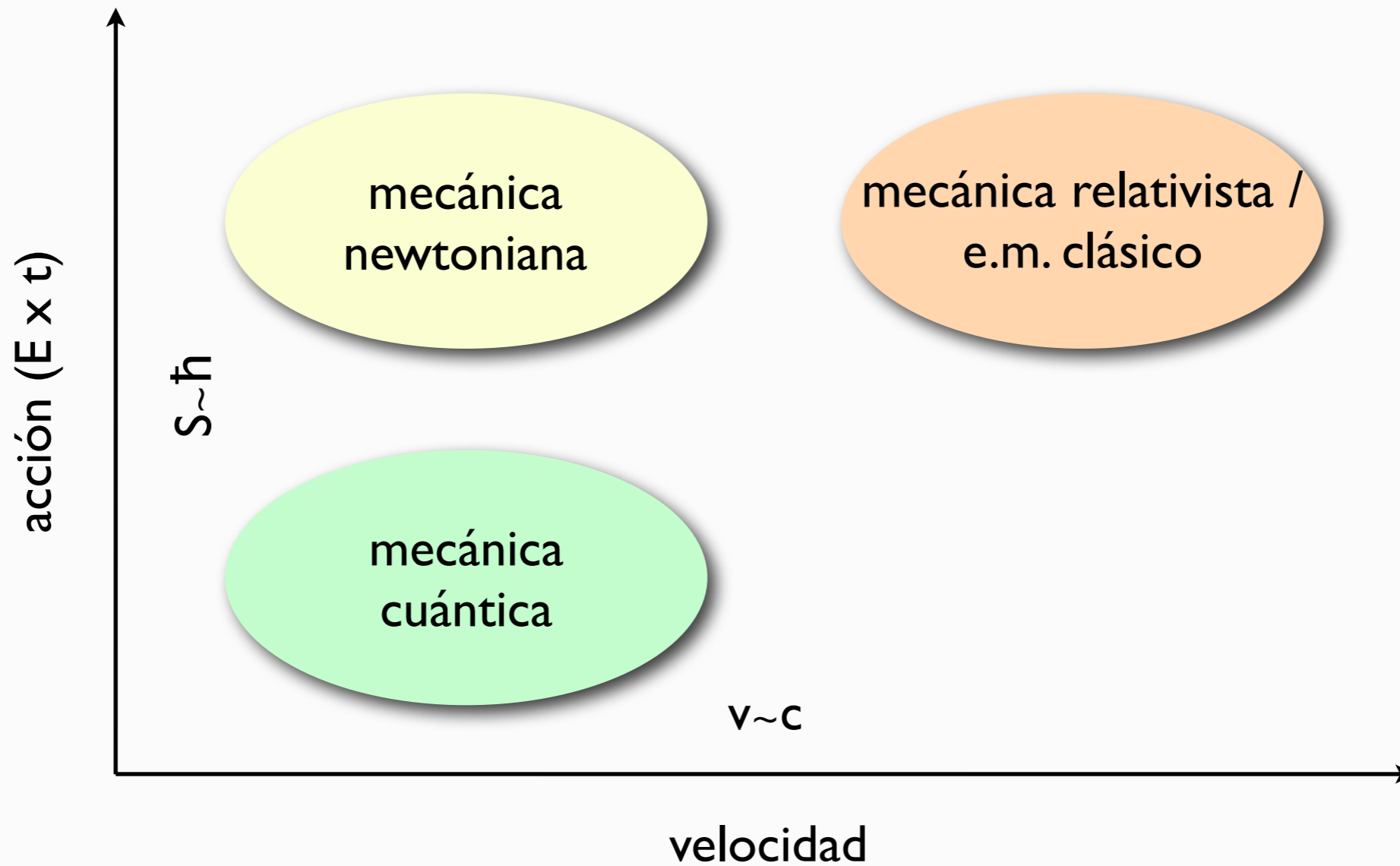
Bohr, Heisenberg, Pauli, Schrödinger, ...
c.1915-1930



Explicación de la estructura de la materia a nivel atómico y molecular

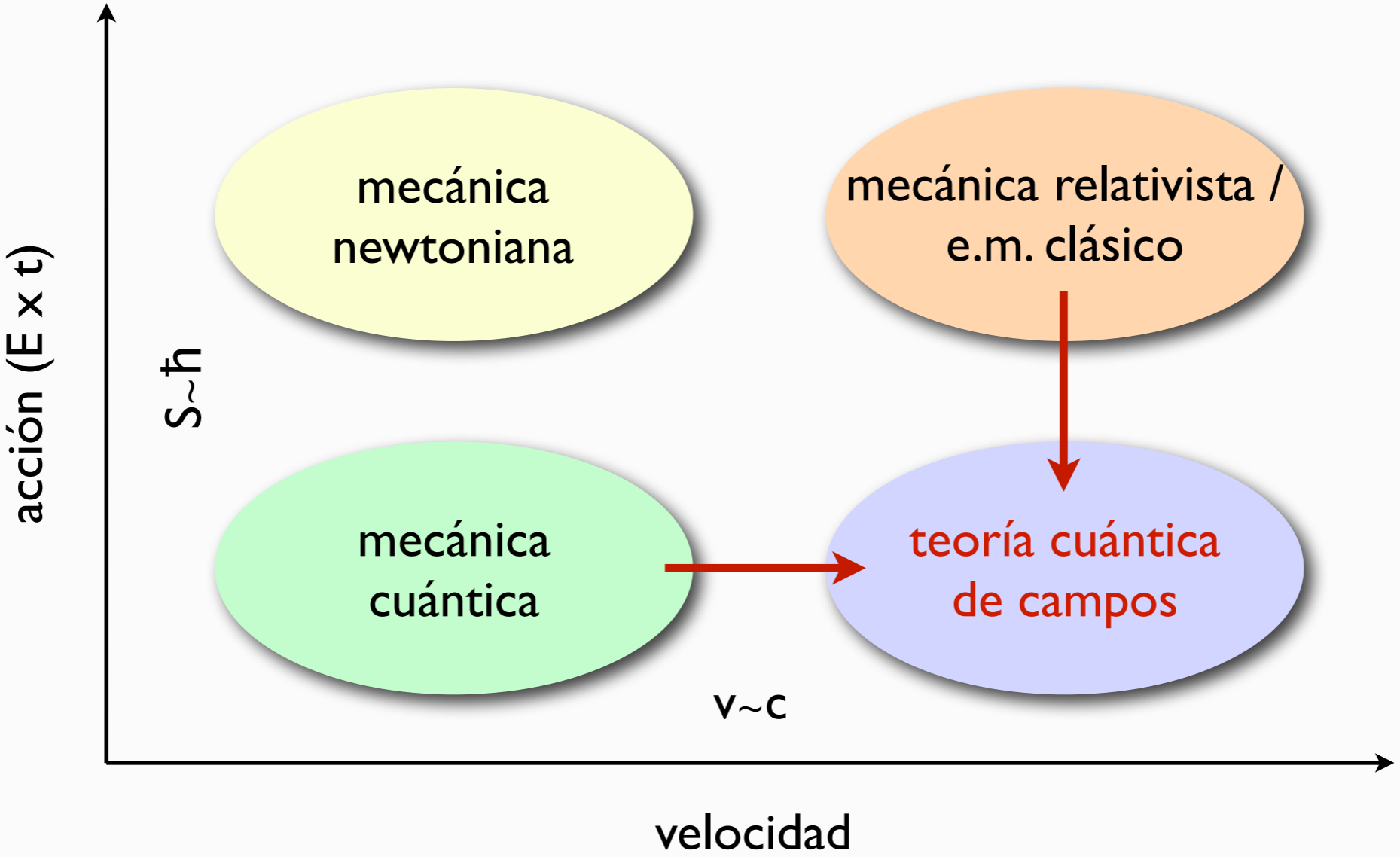
Mecánica Cuántica y Relatividad Especial

6. ¿Cómo hacer compatibles la mecánica cuántica y la relatividad especial?



Mecánica Cuántica y Relatividad Especial

6. ¿Cómo hacer compatibles la mecánica cuántica y la relatividad especial?

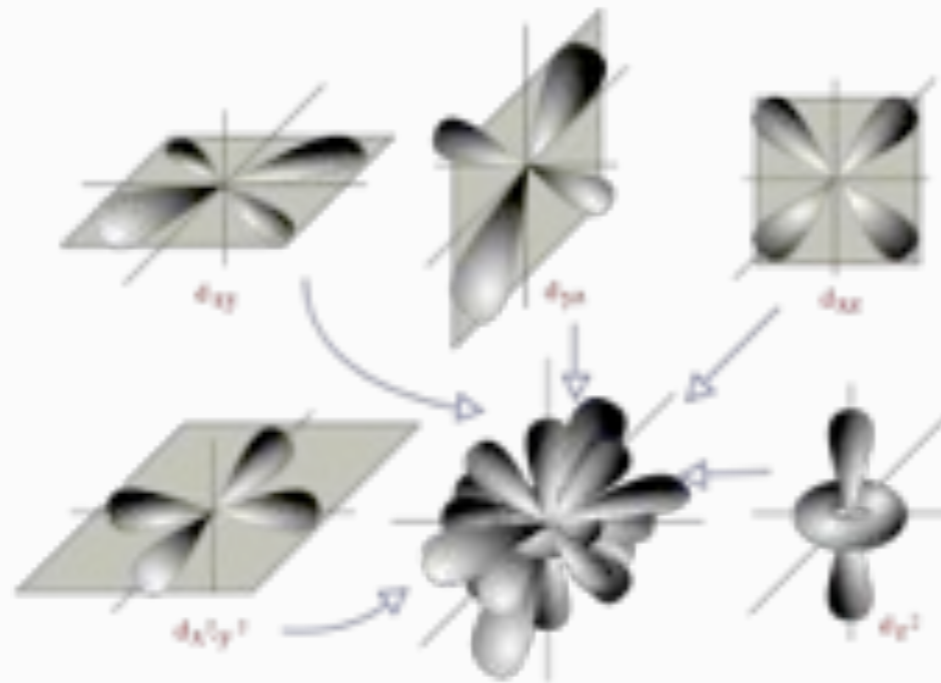


Energía \Leftrightarrow 1/Longitud:
Física Fundamental

Dirac: la Mecánica Cuántica Relativista

La ecuación de Schrödinger no es invariante Lorentz.

$$\hat{H} \Psi = i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} \qquad \hat{H} = \frac{\hat{\mathbf{p}}^2}{2m} + \hat{V}(\mathbf{x})$$



Dirac: la Mecánica Cuántica Relativista

La ecuación de Schrödinger no es invariante Lorentz.

$$\hat{H} \Psi = i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}$$

$$\hat{H} = \frac{\hat{\mathbf{p}}^2}{2m} + \hat{V}(\mathbf{x})$$

Energía cinética no relativista, descripción válida para $v \ll c$

Dirac: la Mecánica Cuántica Relativista

La ecuación de Schrödinger no es invariante Lorentz.

$$\hat{H} \Psi = i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad \hat{H} = \frac{\hat{\mathbf{p}}^2}{2m} + \hat{V}(\mathbf{x})$$

Energía cinética no relativista, descripción válida para $v \ll c$

¿Cómo construir una ecuación de tipo Schrödinger que respete $E^2 = p^2 + m^2$?

$$\left(i\gamma_\mu \frac{\partial}{\partial x_\mu} - m \right) \Psi = 0$$

$$E^2 = p^2 + m^2 \rightarrow E = \pm(\alpha \cdot p) + \beta m$$

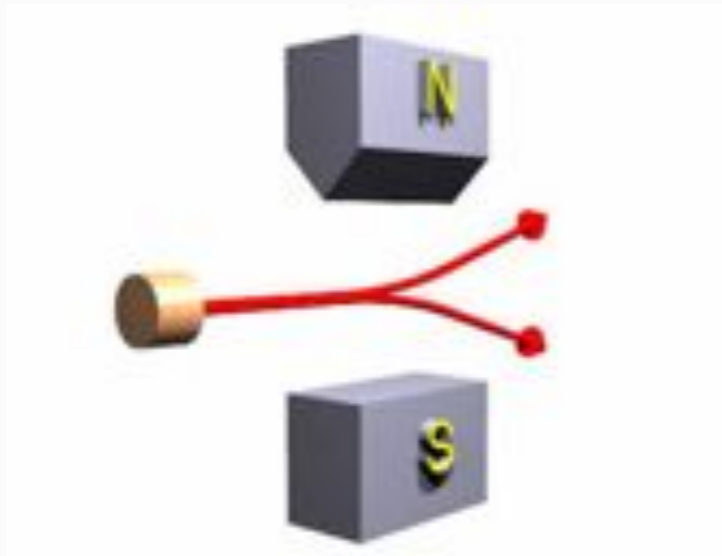


Dirac 1928

Matemáticamente consistente sólo si Ψ es un vector de **4 componentes**.

Dirac: la Mecánica Cuántica Relativista

Spin: el electrón tiene dos componentes.



Pauli 1924

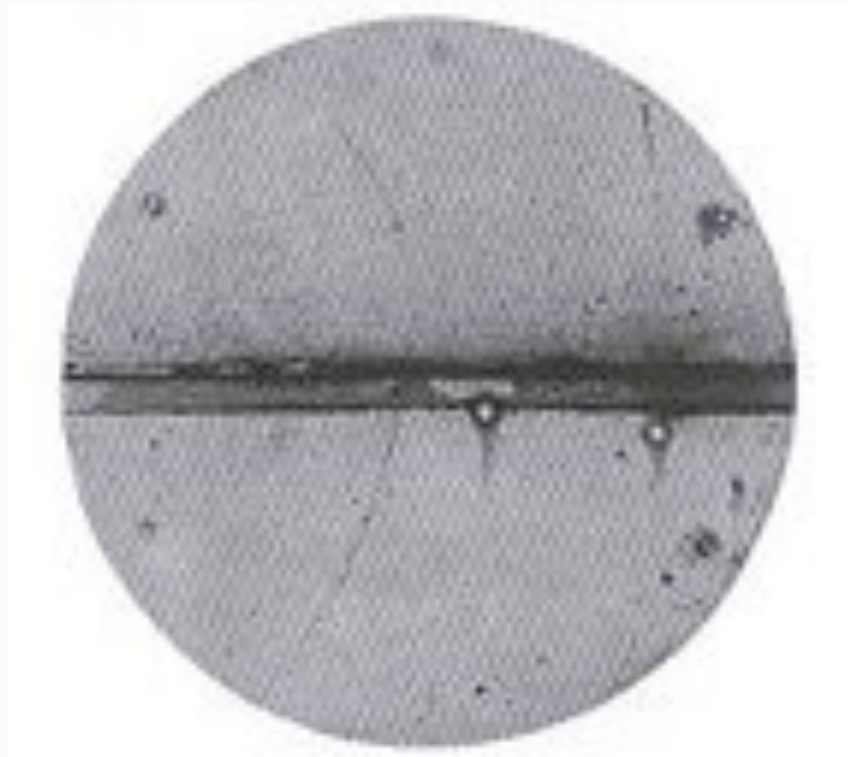
Kronig, Uhlenbeck, Goudsmit 1925

Factor 2 adicional: electrón con energía negativa, i.e. **antipartículas**.

$$E^2 = p^2 + m^2 \rightarrow E = \pm(\alpha \cdot p) + \beta m$$



Descubrimiento de la antimateria



Anderson 1932

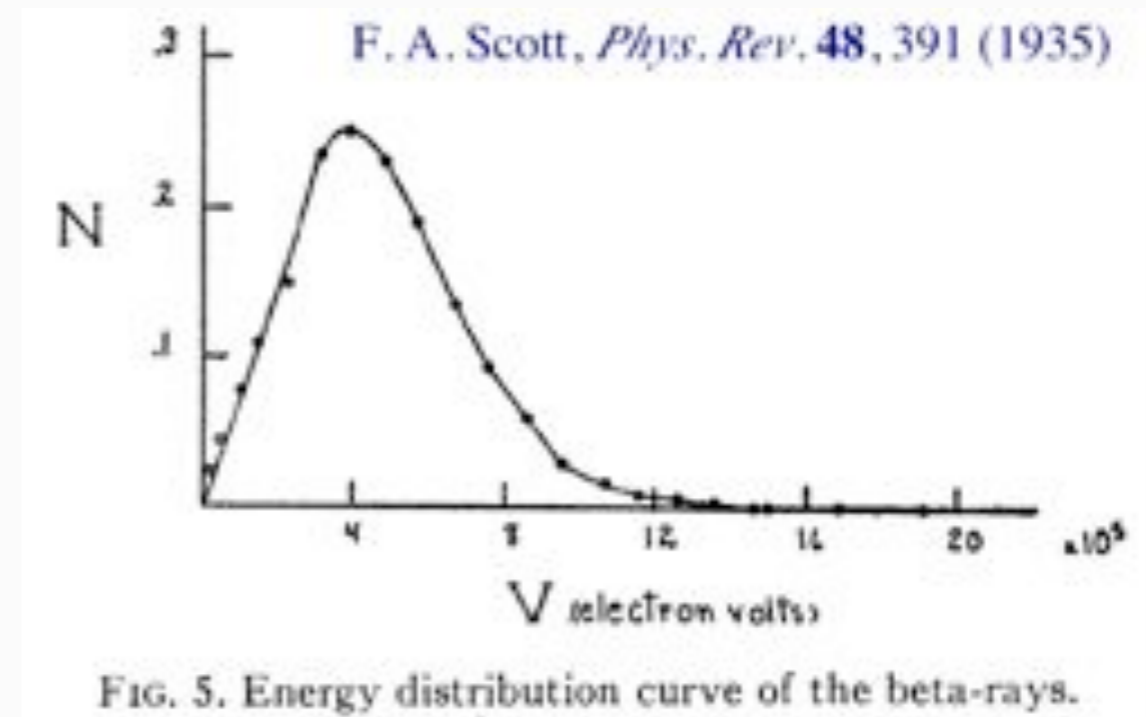
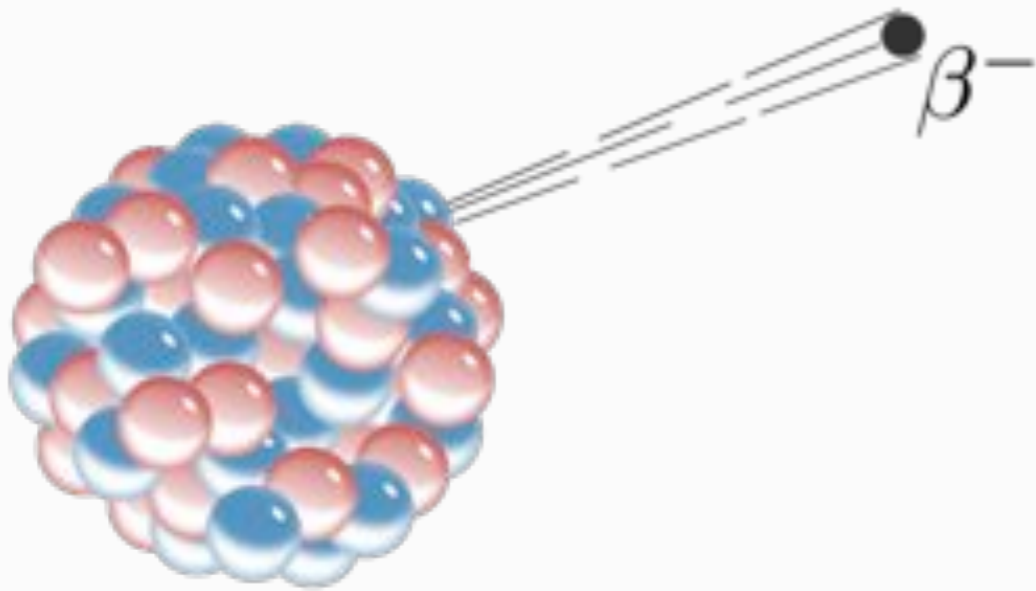
60 años después LEP colisionaba cantidades macroscópicas de electrones y positrones.



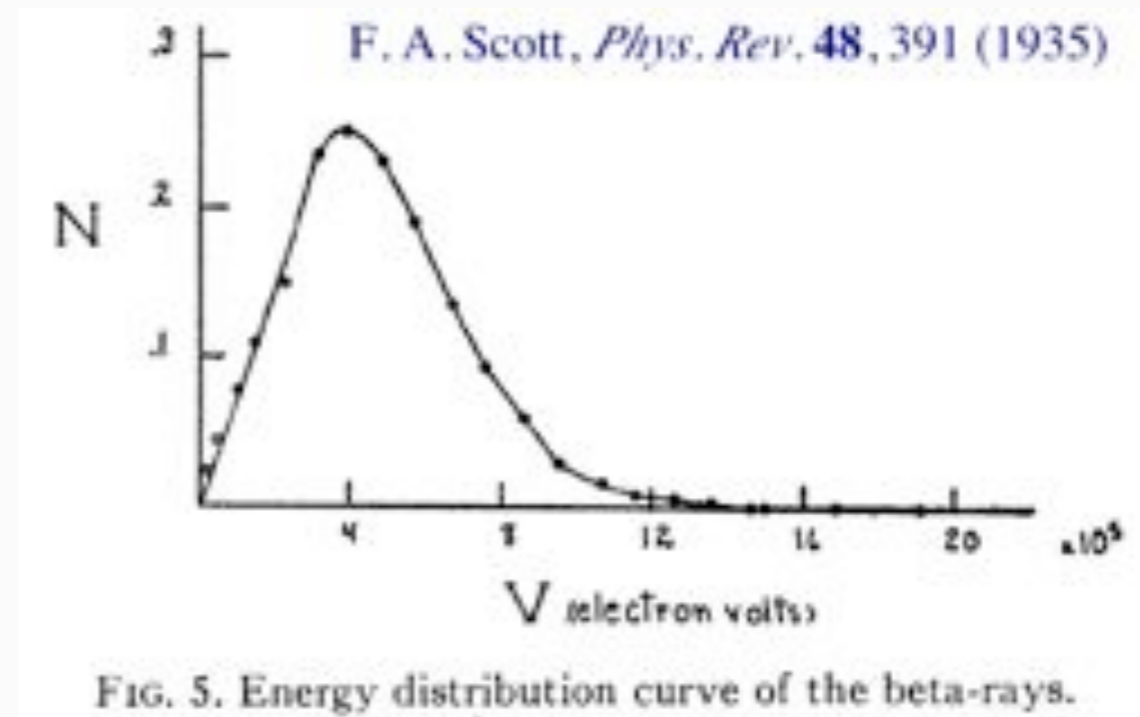
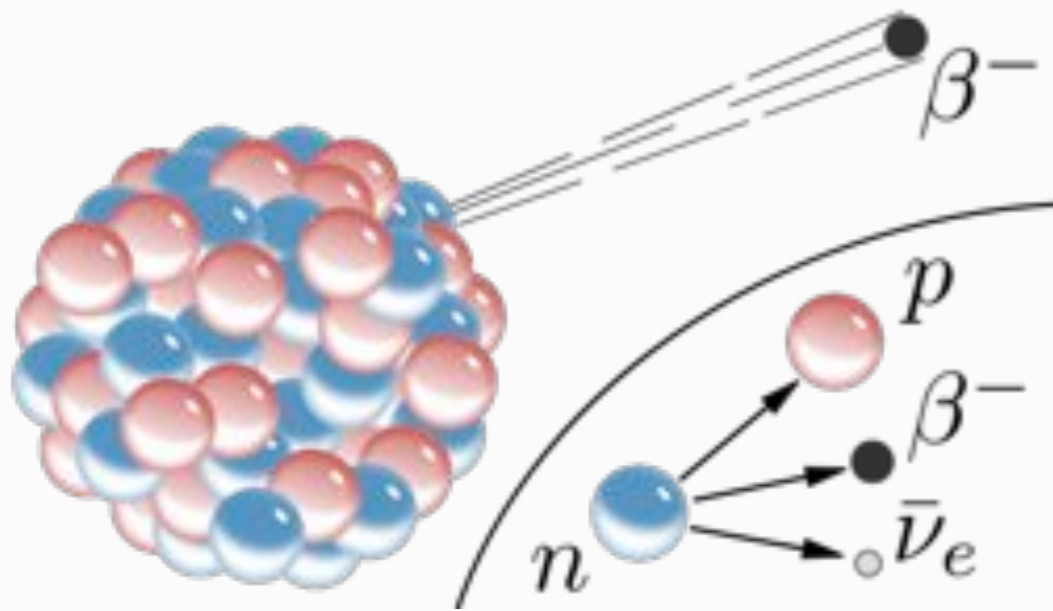
La interacción nuclear débil: neutrinos

La formulación de Dirac de la materia relativista permitió avanzar muy rápidamente en el estudio de las interacciones fundamentales.

La interacción nuclear débil: neutrinos



La interacción nuclear débil: neutrinos



Neutrino: partícula de masa muy pequeña que se lleva la energía sobrante.

Detectado directamente sólo en 1956.

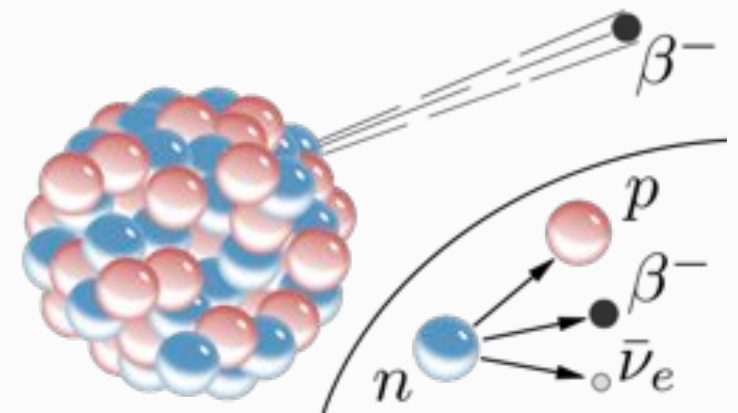


Pauli 1930
Fermi 1934

La interacción nuclear fuerte: mesones de Yukawa

Interacción electromagnética: fuerza mediada por fotones (luz).

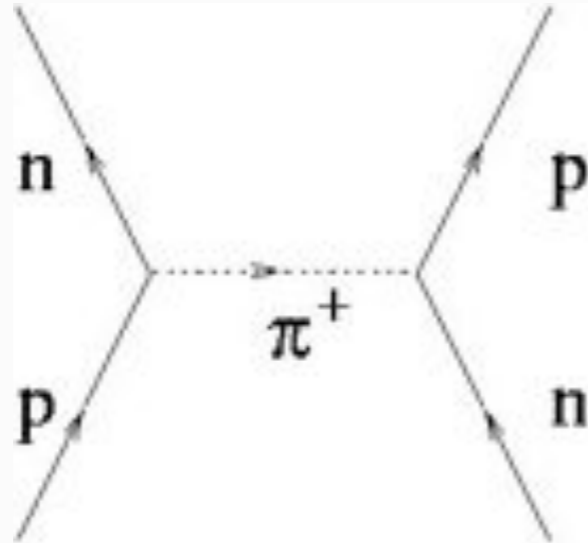
Interacción nuclear débil: teoría de Fermi.



Interacción nuclear fuerte: ¿cómo permanecen unidos los protones y los neutrones, venciendo la repulsión electromagnética?

La interacción nuclear fuerte: mesones de Yukawa

Fuerza nuclear mediada por una partícula hipotética (“mesón”).

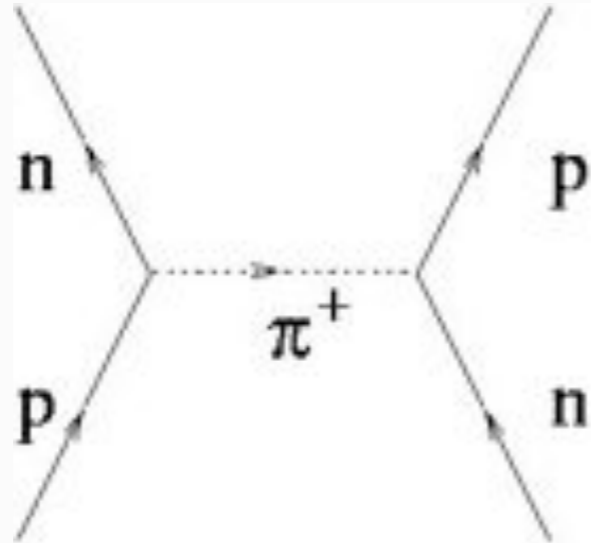


Yukawa 1934

Interacción nuclear fuerte: ¿cómo permanecen unidos los protones y los neutrones, venciendo la repulsión electromagnética?

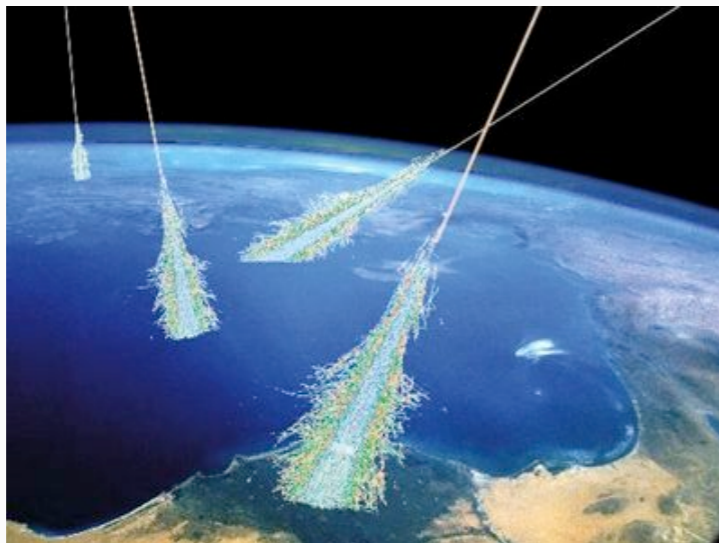
La interacción nuclear fuerte: mesones de Yukawa

Fuerza nuclear mediada por una partícula hipotética (“mesón”).



Yukawa 1934

¿Es posible detectar estos mesones fuera del medio nuclear?



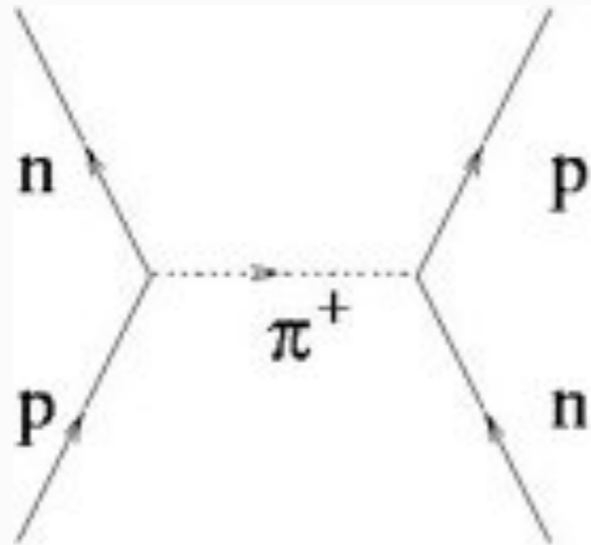
¿Muones?



Anderson, Neddermeyer 1936

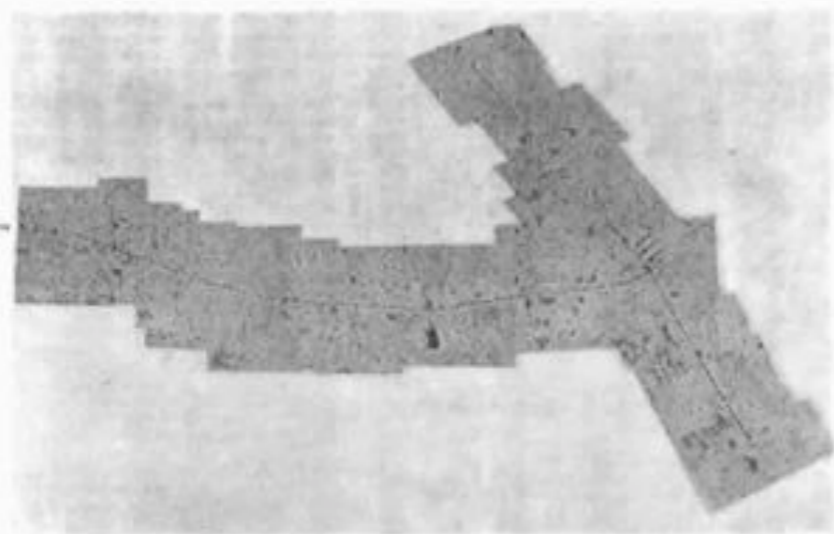
La interacción nuclear fuerte: mesones de Yukawa

Fuerza nuclear mediada por una partícula hipotética (“mesón”).



Yukawa 1934

¿Es posible detectar estos mesones fuera del medio nuclear?



¿Piones?



Powell, Lattes, Occhialini et al. 1947

Mecánica Clásica,
Teoría Cinética,
Termodinámica

Boltzmann

Maxwell

Newton

Partículas

Campos

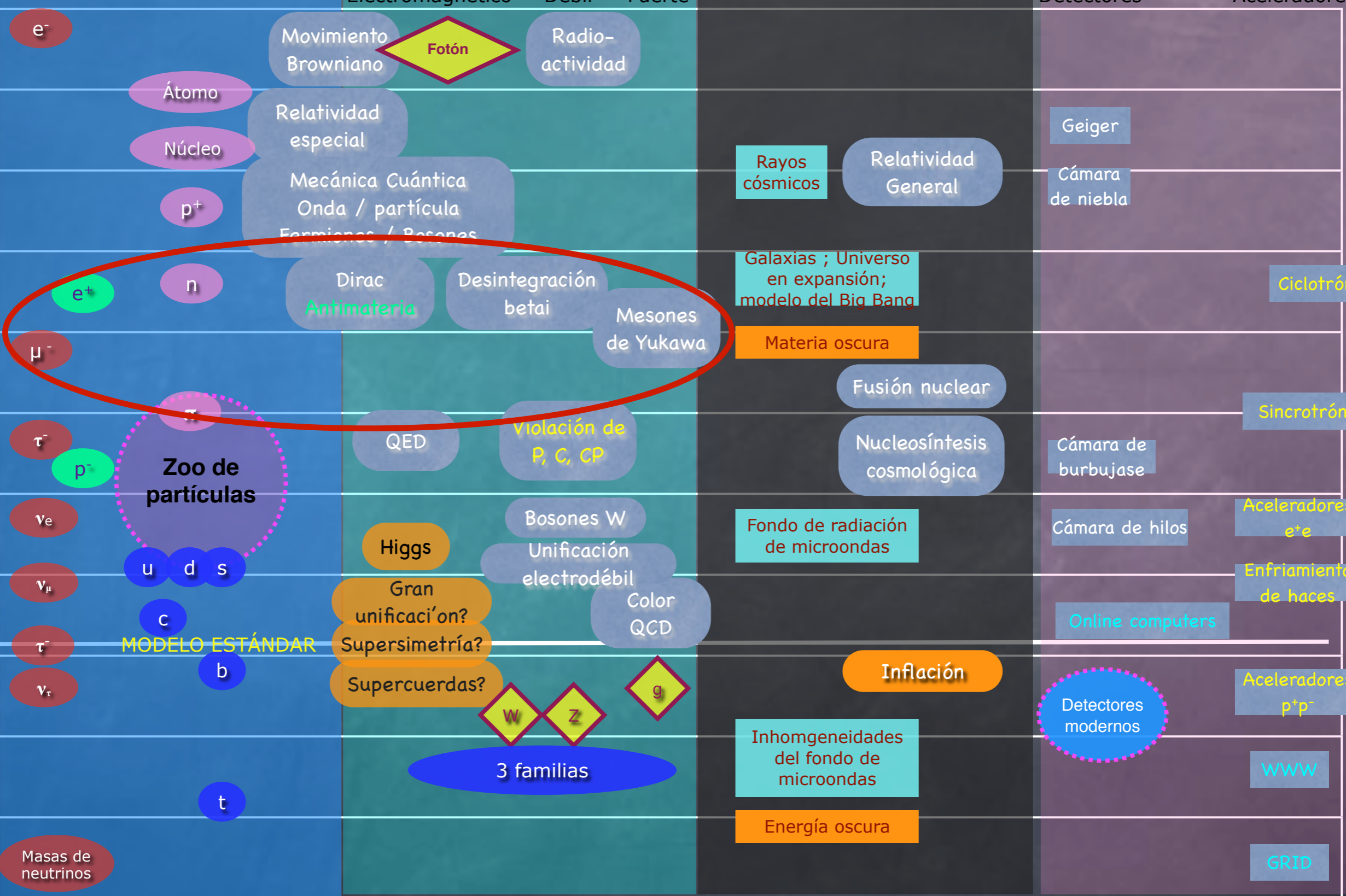
Universo

Tecnología

Electromagnético Débil Fuerte

Detectores Aceleradores

1895
1900
1905
1910
1920
1930
1940
1950
1960
1970
1980
1990
2000
2010



e^-

Átomo

Núcleo

p^+

n

e^+

μ^-

τ^-

τ^-

p^-

ν_e

ν_μ

τ^-

ν_τ

u d s

c

b

t

Masas de neutrinos

Movimiento Browniano

Fotón

Radioactividad

Relatividad especial

Mecánica Cuántica
Onda / partícula
Fermiones / Bosones

Dirac
Antimateria

Desintegración beta

Mesones de Yukawa

QED

Violación de P, C, CP

Higgs

Bosones W
Unificación electrodébil

Gran unificación?

Supersimetría?

Supercuerdas?

W Z

g

3 familias

Rayos cósmicos

Relatividad General

Galaxias ; Universo en expansión; modelo del Big Bang

Materia oscura

Fusión nuclear

Nucleosíntesis cosmológica

Fondo de radiación de microondas

Inflación

Inhomogeneidades del fondo de microondas

Energía oscura

Geiger

Cámara de niebla

Ciclotrón

Sincrotrón

Cámara de burbujase

Aceleradores e^+e^-

Cámara de hilos

Enfriamiento de haces

Online computers

Detectores modernos

Aceleradores p^+p^-

WWW

GRID

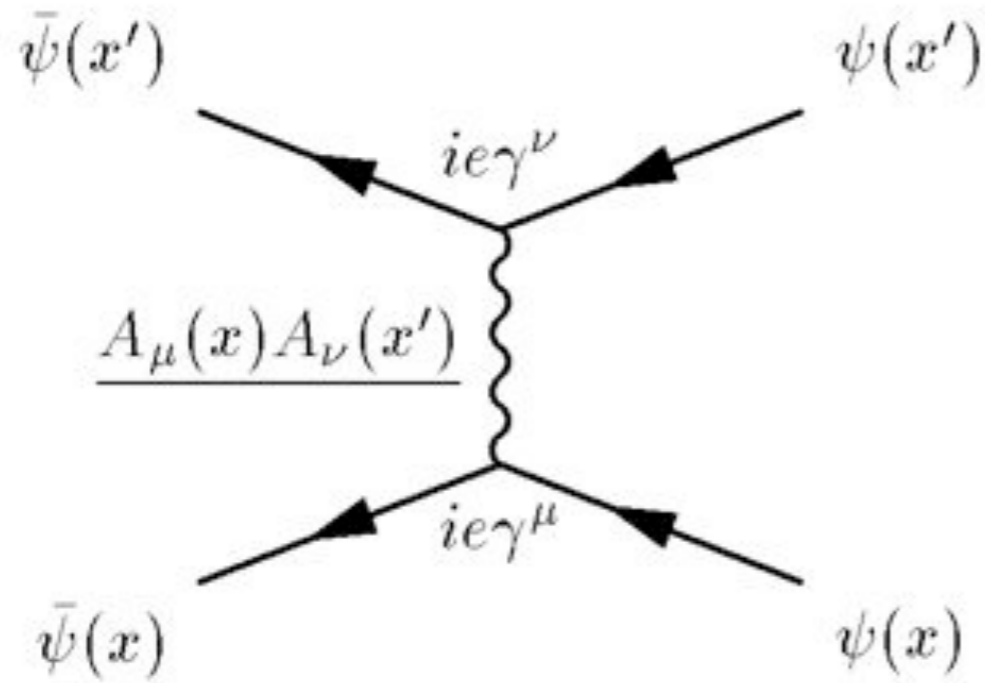
MODELO ESTÁNDAR

Zoo de partículas

Plan

- Introducción: escalas de espacio y de energía en Física Fundamental.
- Física Cuántica y Relatividad Especial.
 - Las preguntas revolucionarias.
 - Dirac y la Mecánica Cuántica Relativista.
 - Las interacciones nucleares débil y fuerte: neutrinos y mesones.
- **Interludio: diagramas de Feynman.**
- Teoría Cuántica de Campos.
 - Efectos cuánticos y fuerzas fundamentales.
 - Infinitos y Guerras.
 - La Edad de Plata: Electrodinámica Cuántica y leyes fundamentales.
- Simetrías: la Edad de Oro.
 - El Camino Óctuple: Quarks.
 - La interacción electrodébil: corrientes neutras.
 - Más infinitos.
 - El Modelo Estándar de la Física de Partículas.

Interludio: diagramas de Feynman



Instrumento gráfico para entender interacciones (suficientemente débiles) como intercambio de partículas virtuales.

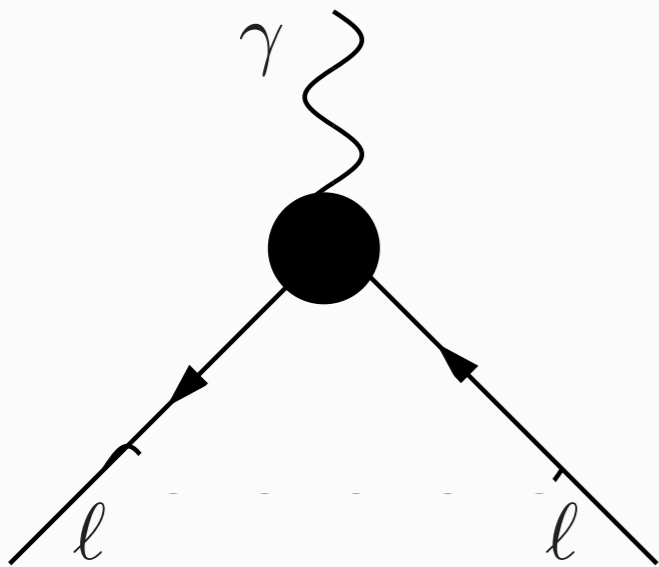
$$\Delta E \Delta t \geq \hbar$$
$$E = mc^2$$

Feynman, c. 1944
(Manhattan Project)



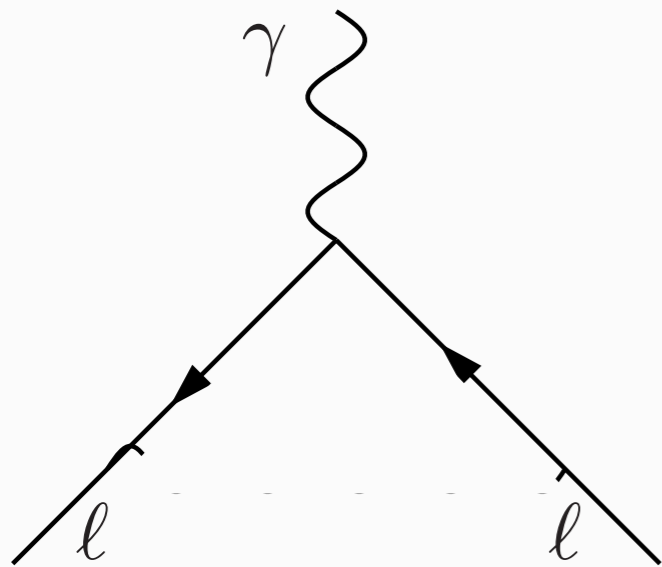
Interludio: diagramas de Feynman

Cualquier proceso se puede escribir como suma de todos los diagramas posibles, en una expansión en que cada orden es proporcional a g^{2n} : serie de potencias.



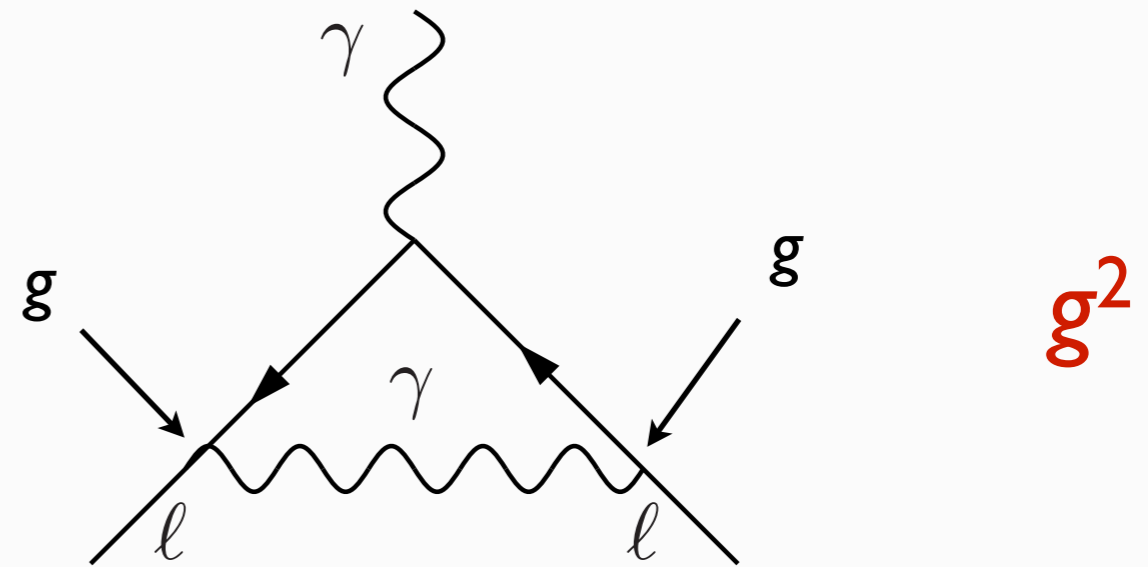
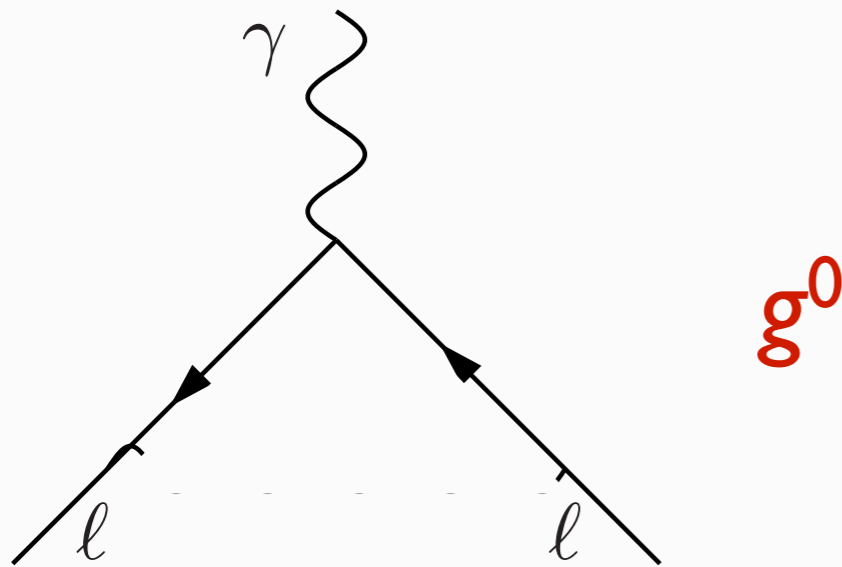
Interludio: diagramas de Feynman

Cualquier proceso se puede escribir como suma de todos los diagramas posibles, en una expansión en que cada orden es proporcional a g^{2n} : serie de potencias.



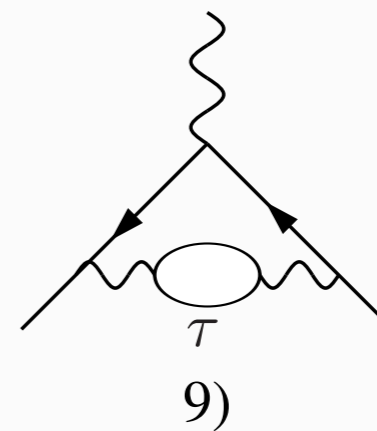
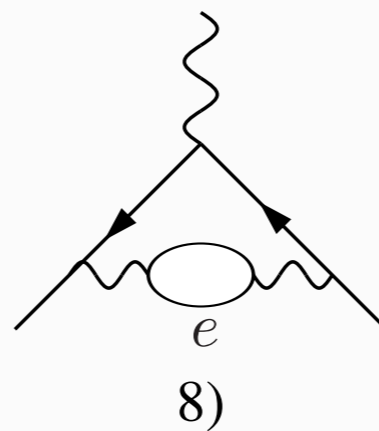
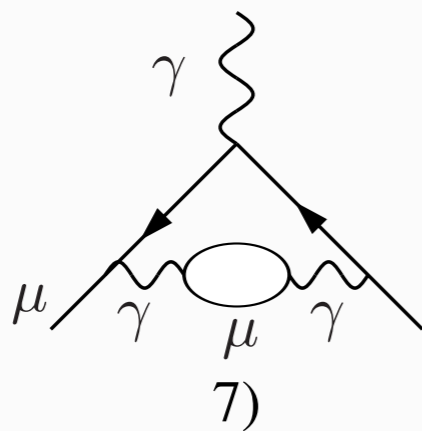
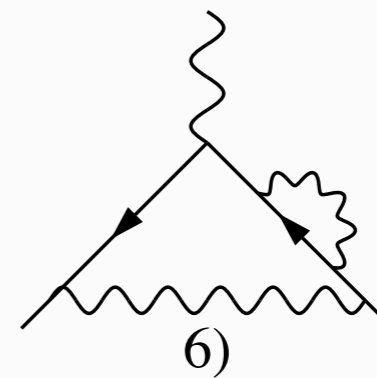
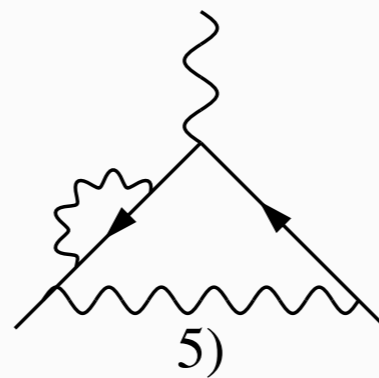
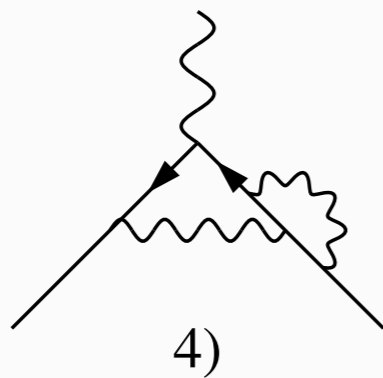
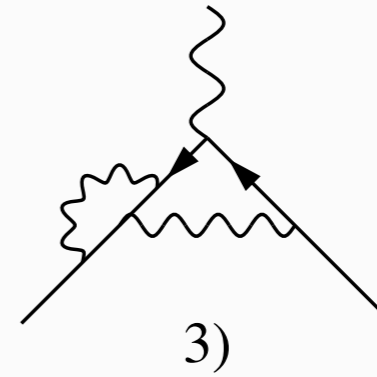
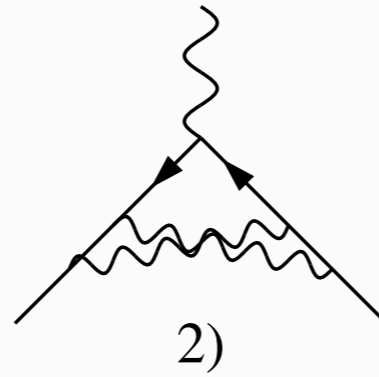
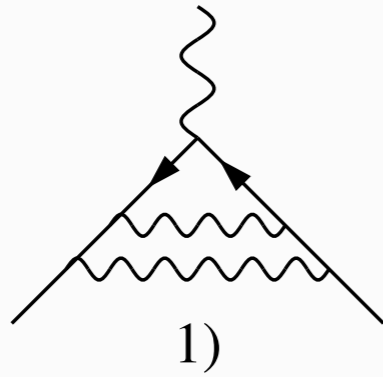
Interludio: diagramas de Feynman

Cualquier proceso se puede escribir como suma de todos los diagramas posibles, en una expansión en que cada orden es proporcional a g^{2n} : serie de potencias.



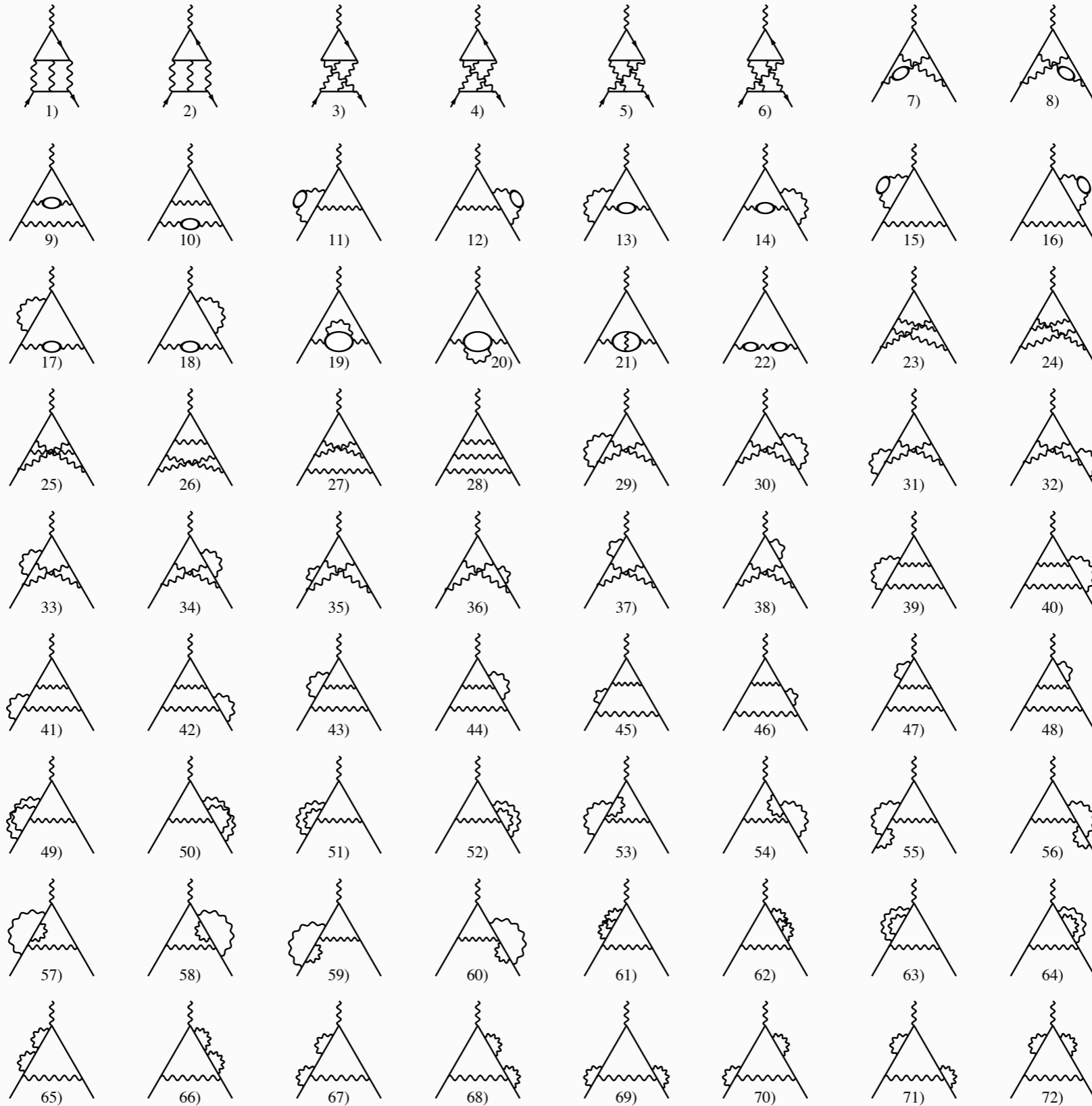
$$A = A_0 + A_1 g^2 + A_2 g^4 + A_3 g^6 + \dots$$

Interludio: diagramas de Feynman

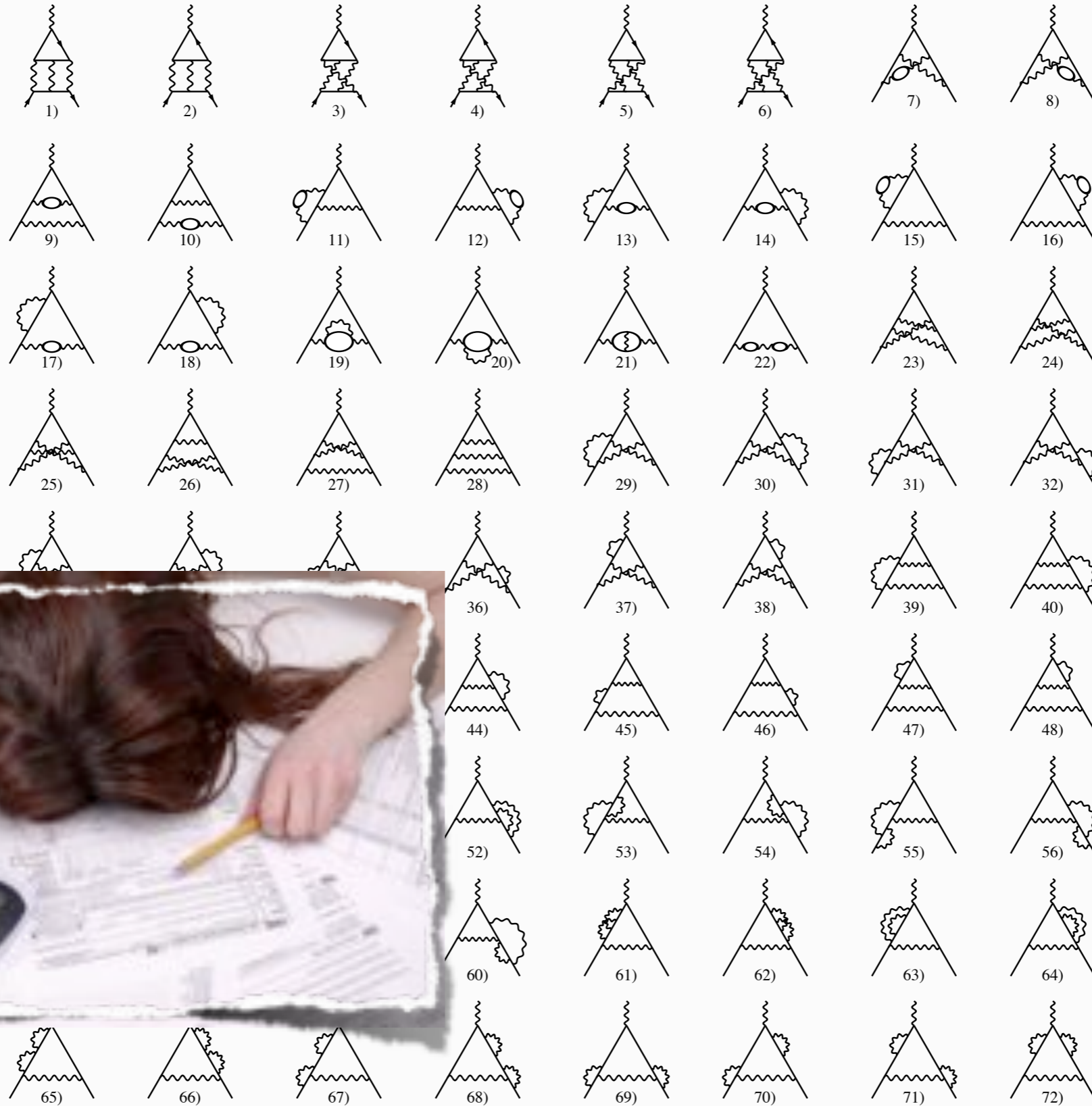


gg^4

Interludio: diagramas de Feynman



Interludio: diagramas de Feynman

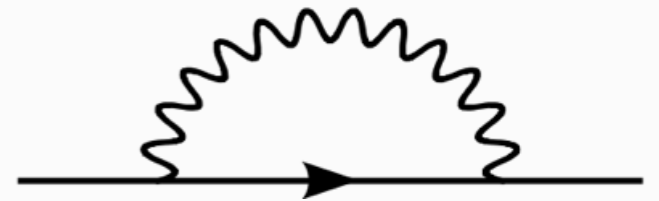
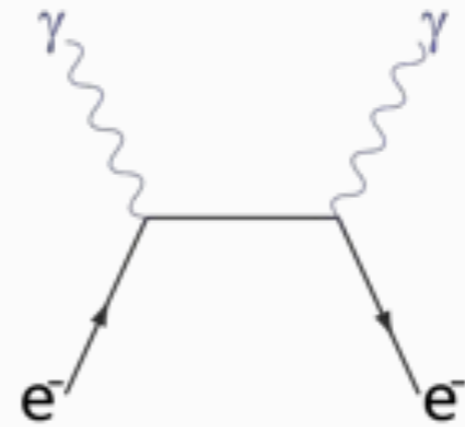


Plan

- Introducción: escalas de espacio y de energía en Física Fundamental.
- Física Cuántica y Relatividad Especial.
 - Las preguntas revolucionarias.
 - Dirac y la Mecánica Cuántica Relativista.
 - Las interacciones nucleares débil y fuerte: neutrinos y mesones.
- Interludio: diagramas de Feynman.
- Teoría Cuántica de Campos.
 - Efectos cuánticos y fuerzas fundamentales.
 - Infinitos y Guerras.
 - La Edad de Plata: Electrodinámica Cuántica y leyes fundamentales.
- Simetrías: la Edad de Oro.
 - El Camino Óctuple: Quarks.
 - La interacción electrodébil: corrientes neutras.
 - Más infinitos.
 - El Modelo Estándar de la Física de Partículas.

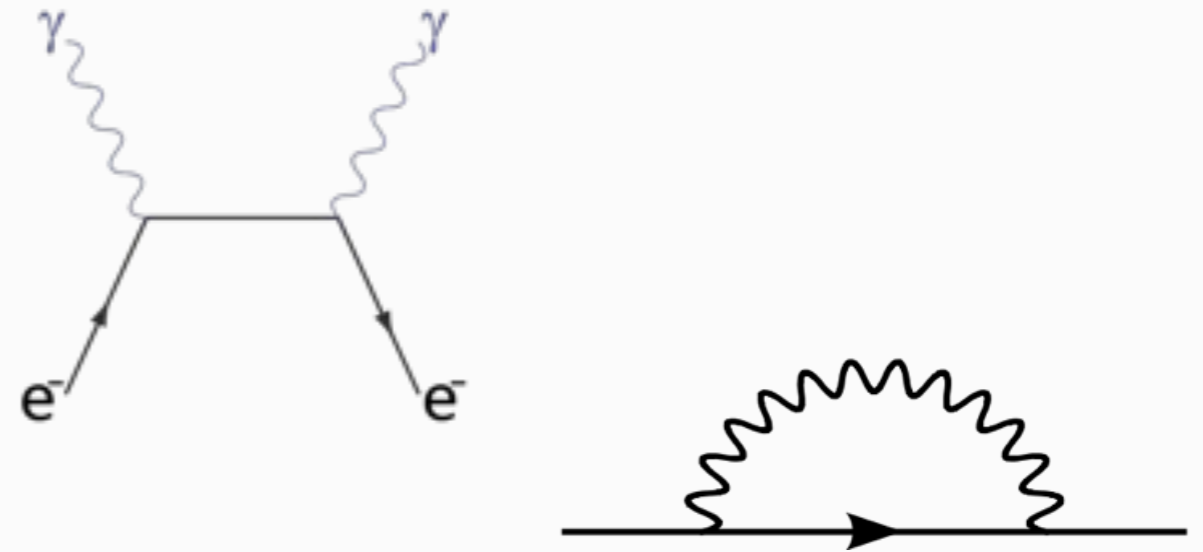
Efectos cuánticos y fuerzas a larga distancia

Una carga, al propagarse en un campo e.m., absorbe y reemite fotones continuamente.

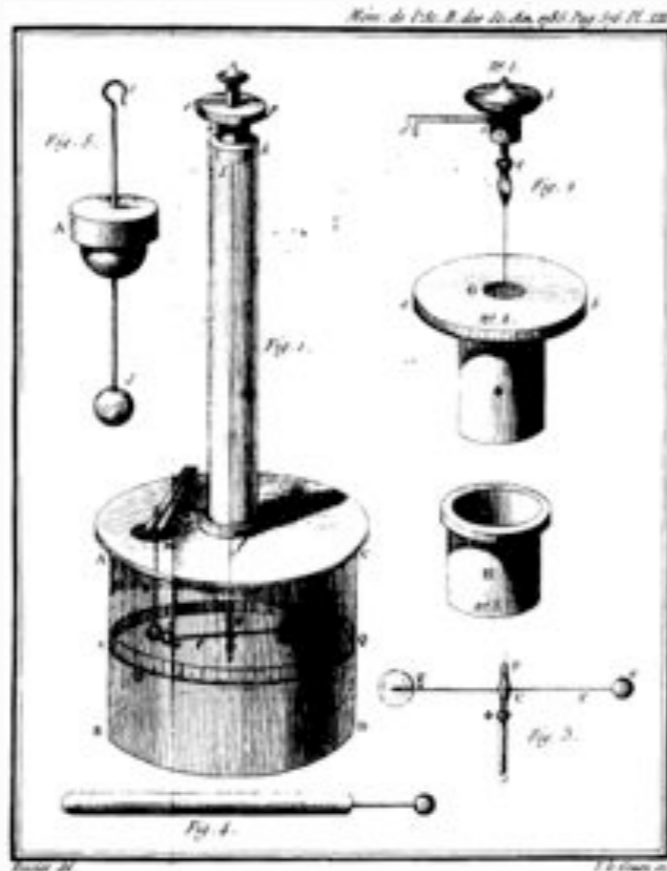


Efectos cuánticos y fuerzas a larga distancia

Una carga, al propagarse en un campo e.m., absorbe y reemite fotones continuamente.



El cálculo de todos los diagramas posibles da la probabilidad de que un fotón emitido por una carga sea absorbido por otra carga a una distancia r .

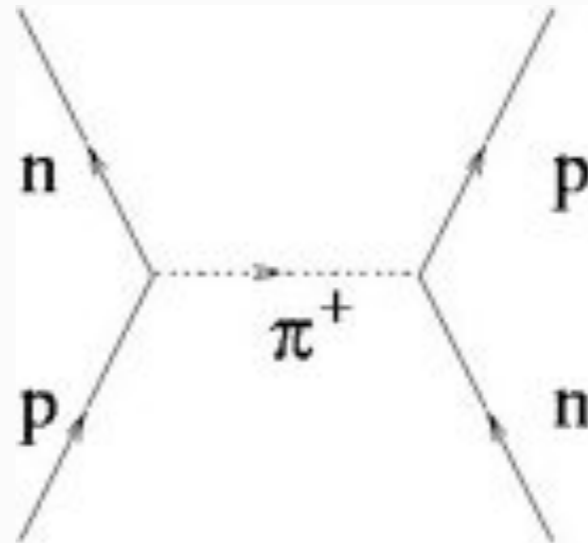


$$V(r) = c \frac{qq'}{r^2}$$

Ley de Coulomb

Efectos cuánticos y fuerzas a larga distancia

Idem para otras fuerzas



El cálculo de todos los diagramas posibles da la probabilidad de que un fotón emitido por una carga sea absorbido por otra carga a una distancia r .



Yukawa 1934

$$V(r) = -g^2 \frac{e^{-r}}{r}$$

Potencial de Yukawa

Infinitos y Guerras

La ecuación de Dirac no proporciona una descripción completa de la electrodinámica: la reacción del campo electromagnético sobre las cargas eléctricas genera divergencias (efectos no físicos).

Infinitos y Guerras

La ecuación de Dirac no proporciona una descripción completa de la electrodinámica: la reacción del campo electromagnético sobre las cargas eléctricas genera divergencias (efectos no físicos).

No es un problema nuevo: **autointeracciones** en electrodinámica clásica.

$$m_{\text{em}} = \int dV \frac{E^2}{2} = \frac{q^2}{8\pi r_e}$$

La contribución a la masa del electrón asociada a su interacción con un campo electrostático diverge si el electrón es puntual.

$$m_{\text{em}} = m_e^{\text{phys}} \Rightarrow r_e \approx 2.8 \times 10^{-15} \text{ m}$$

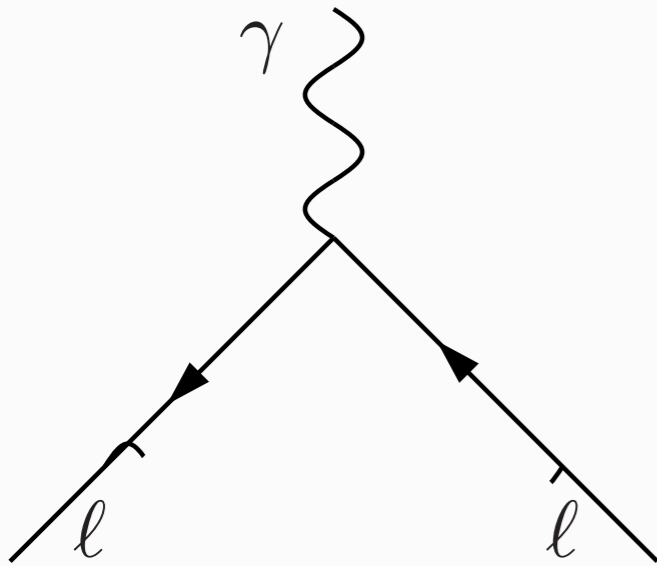
Abraham, Lorentz c. 1900

Tamaño típico de un núcleo atómico

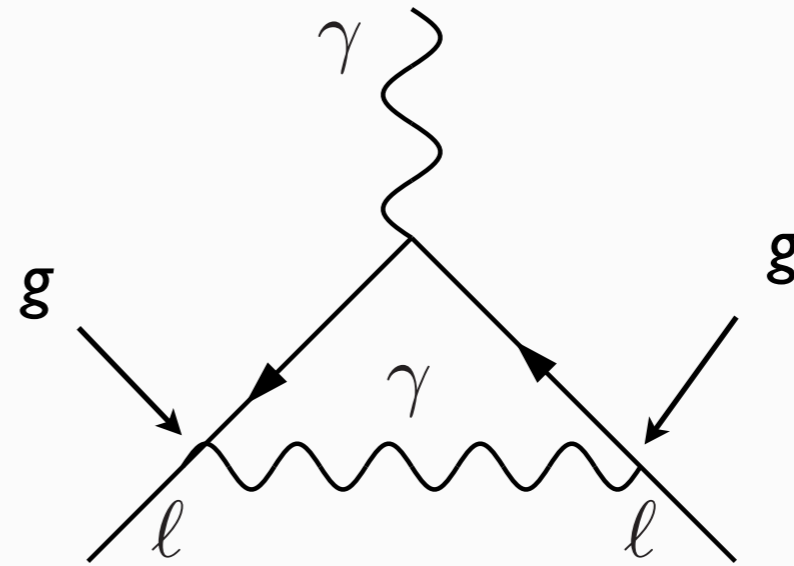
Infinitos y Guerras

La ecuación de Dirac no proporciona una descripción completa de la electrodinámica: la reacción del campo electromagnético sobre las cargas eléctricas genera divergencias (efectos no físicos).

Ocurre lo mismo para las correcciones asociadas a partículas virtuales que generan “loops”.



eg^0

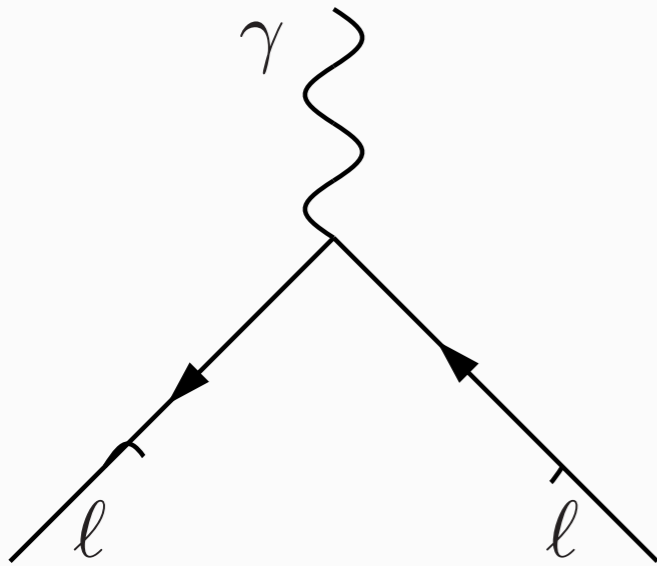


eg^2

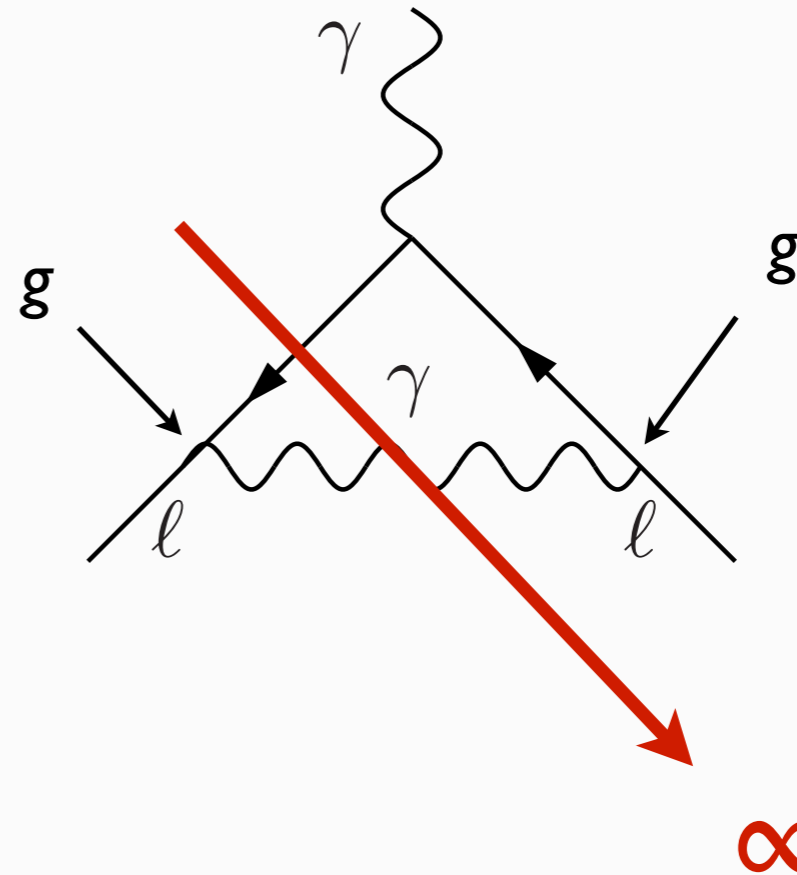
Infinitos y Guerras

La ecuación de Dirac no proporciona una descripción completa de la electrodinámica: la reacción del campo electromagnético sobre las cargas eléctricas genera divergencias (efectos no físicos).

Ocurre lo mismo para las correcciones asociadas a partículas virtuales que generan “loops”.



σ_0

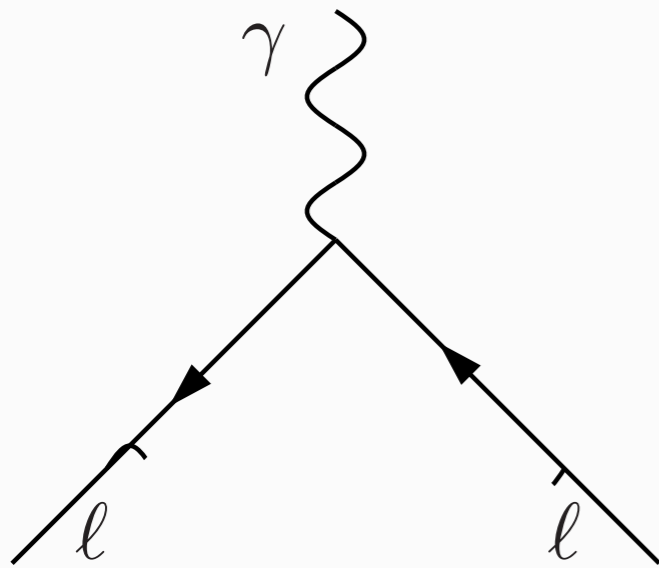


σ_2

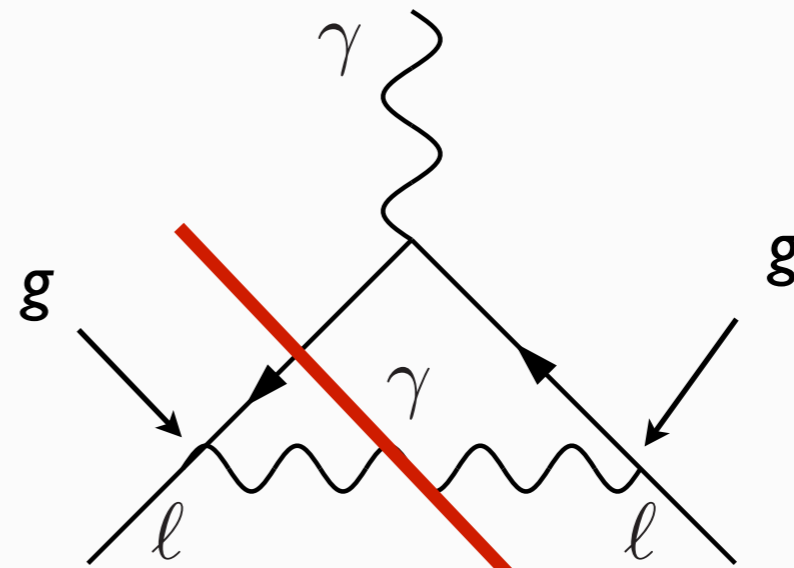
Infinitos y Guerras

La ecuación de Dirac no proporciona una descripción completa de la electrodinámica: la reacción del campo electromagnético sobre las cargas eléctricas genera divergencias (efectos no físicos).

Ocurre lo mismo para las correcciones asociadas a partículas virtuales que generan “loops”.



eg^0



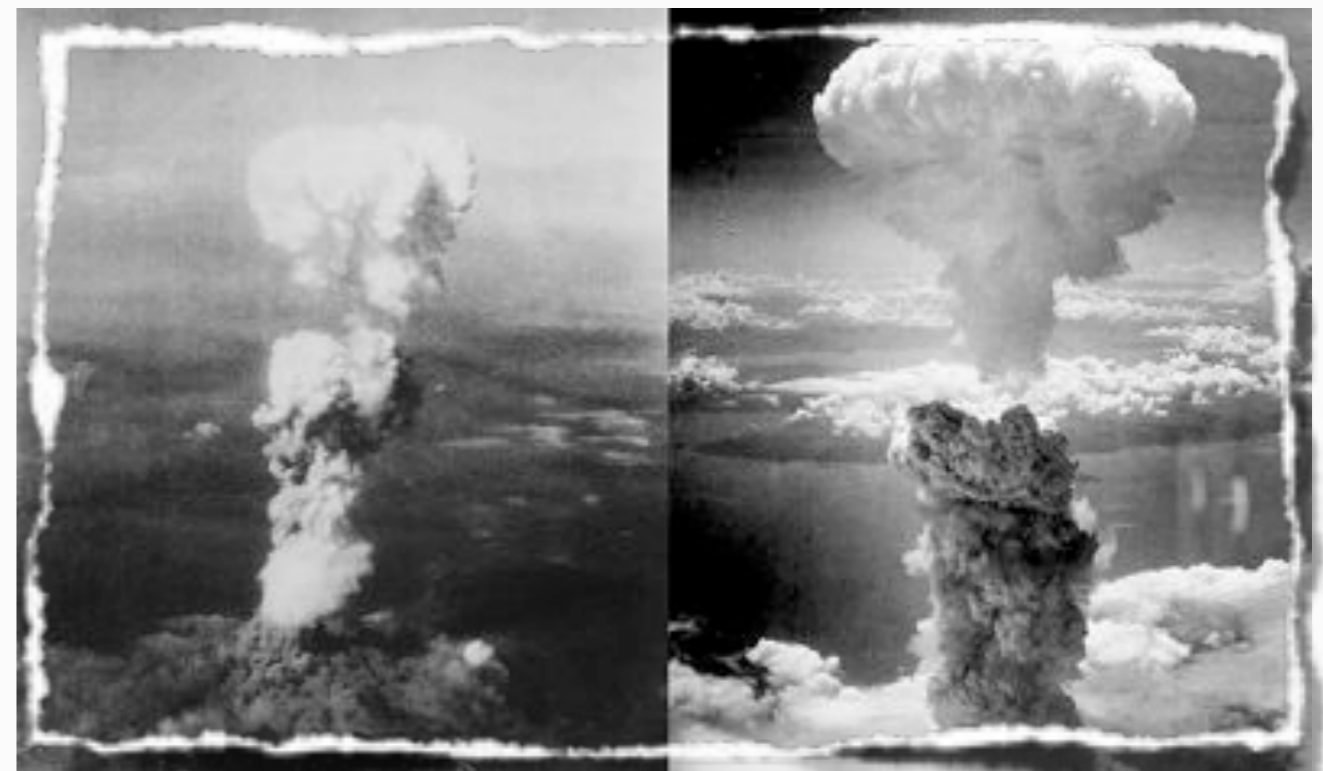
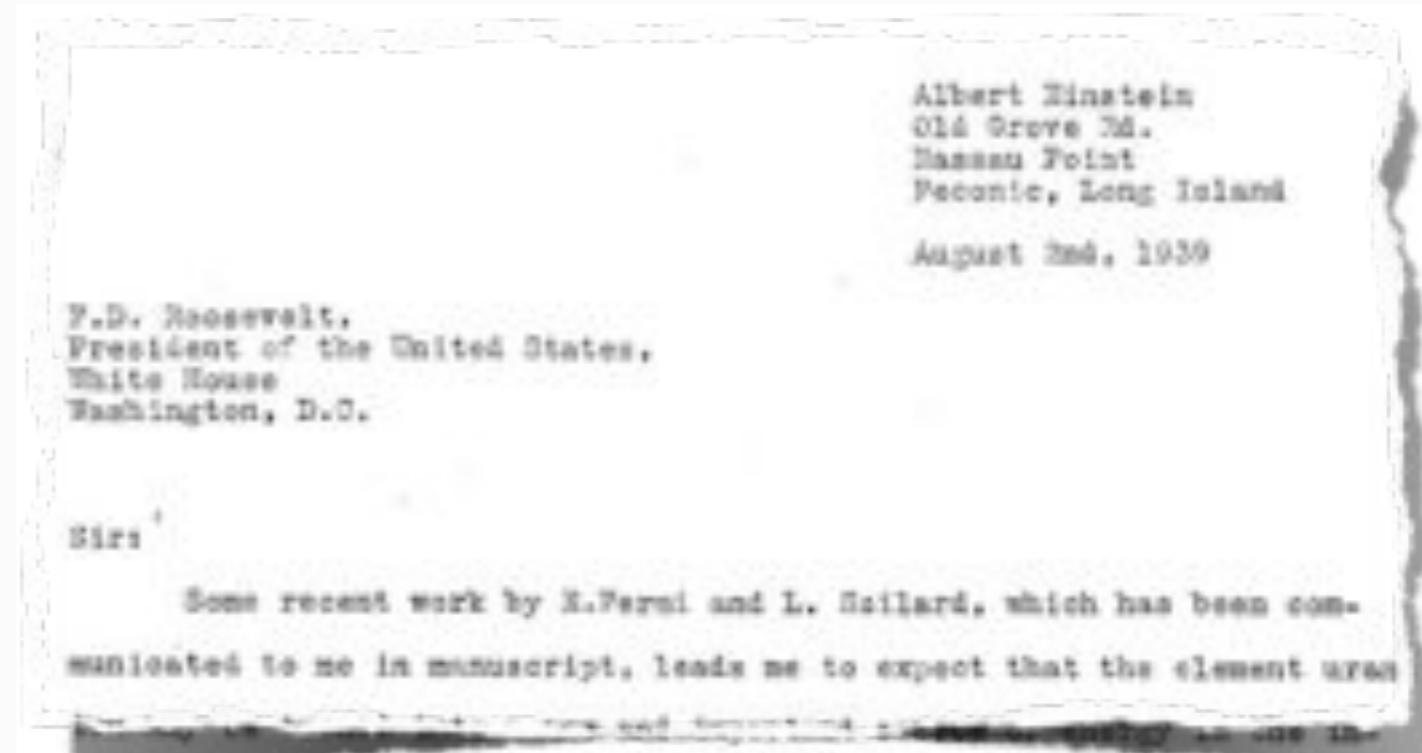
eg^2

Este problema frenó el desarrollo de la TCC entre mediados de los 1930 y 1948...

∞

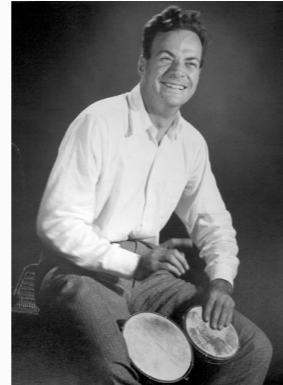
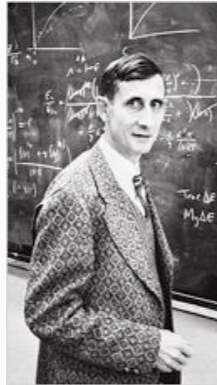
Infinitos y Guerras

... aunque también hubo motivos más serios.



Renormalización: la Teoría Cuántica de Campos

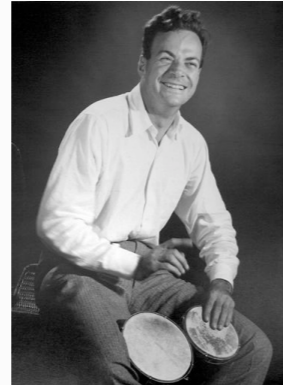
Los infinitos no son tales: desaparecen si se acepta que la magnitud de las fuerzas (valores de cargas y masas) **cambia como función de la distancia.**



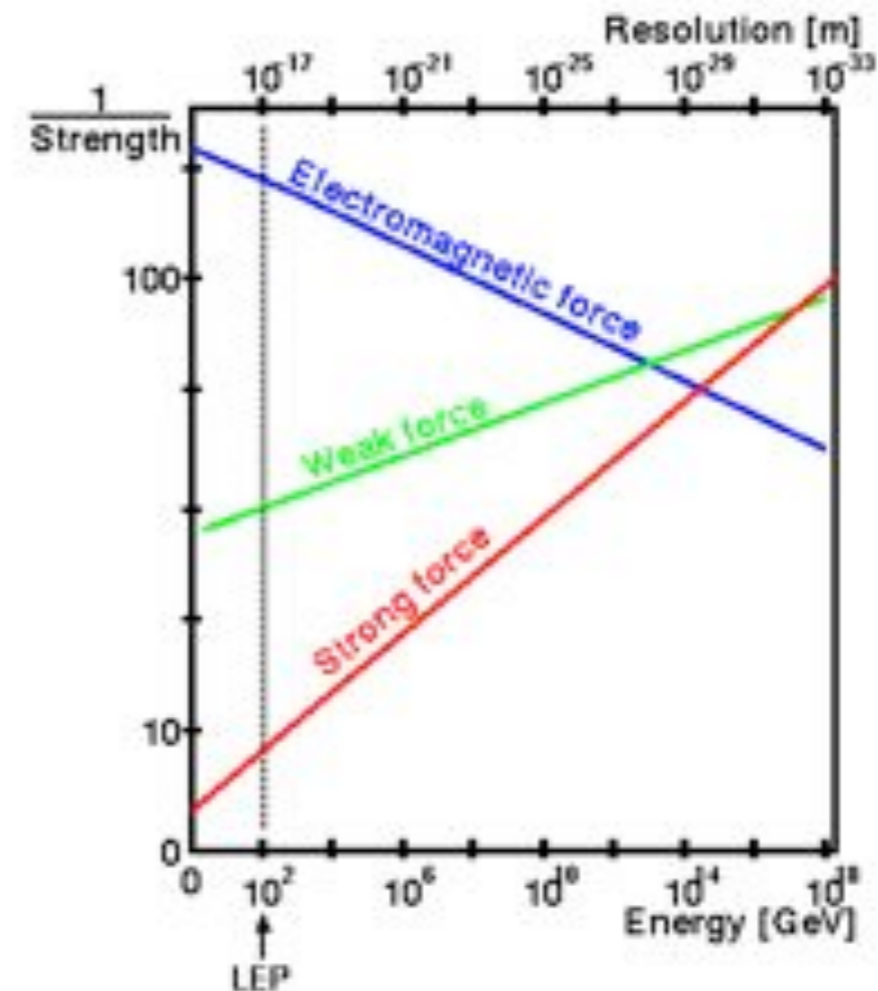
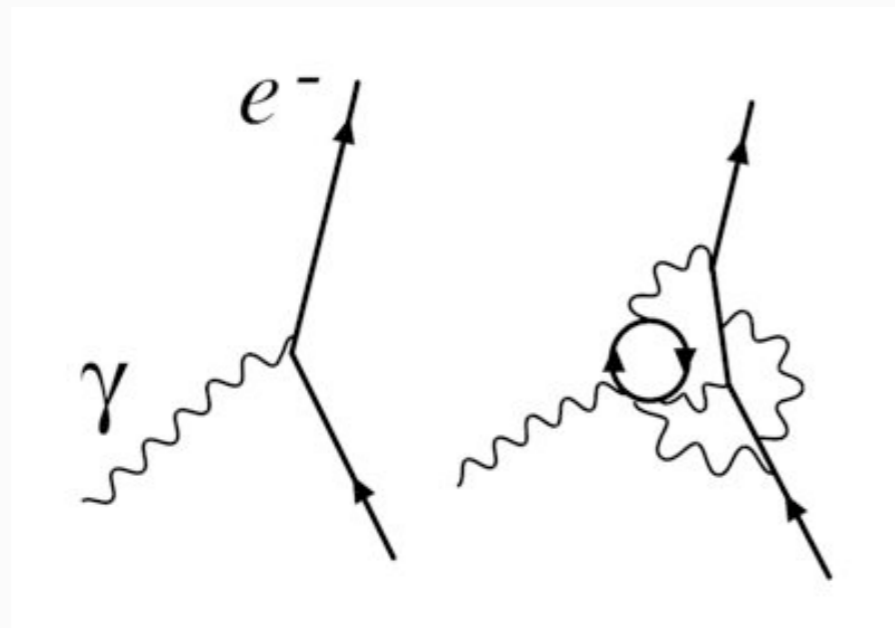
Dyson, Feynman, Schwinger, Stüeckelberg, Tomonaga 1934-1948

Renormalización: la Teoría Cuántica de Campos

Los infinitos no son tales: desaparecen si se acepta que la magnitud de las fuerzas (valores de cargas y masas) **cambia como función de la distancia**.

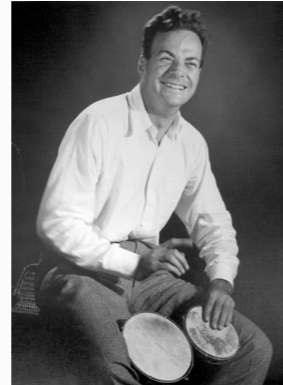
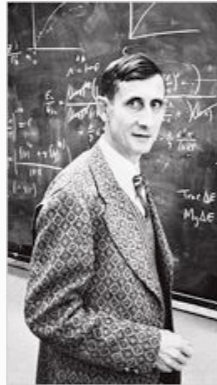


Dyson, Feynman, Schwinger, Stüeckelberg, Tomonaga 1934-1948

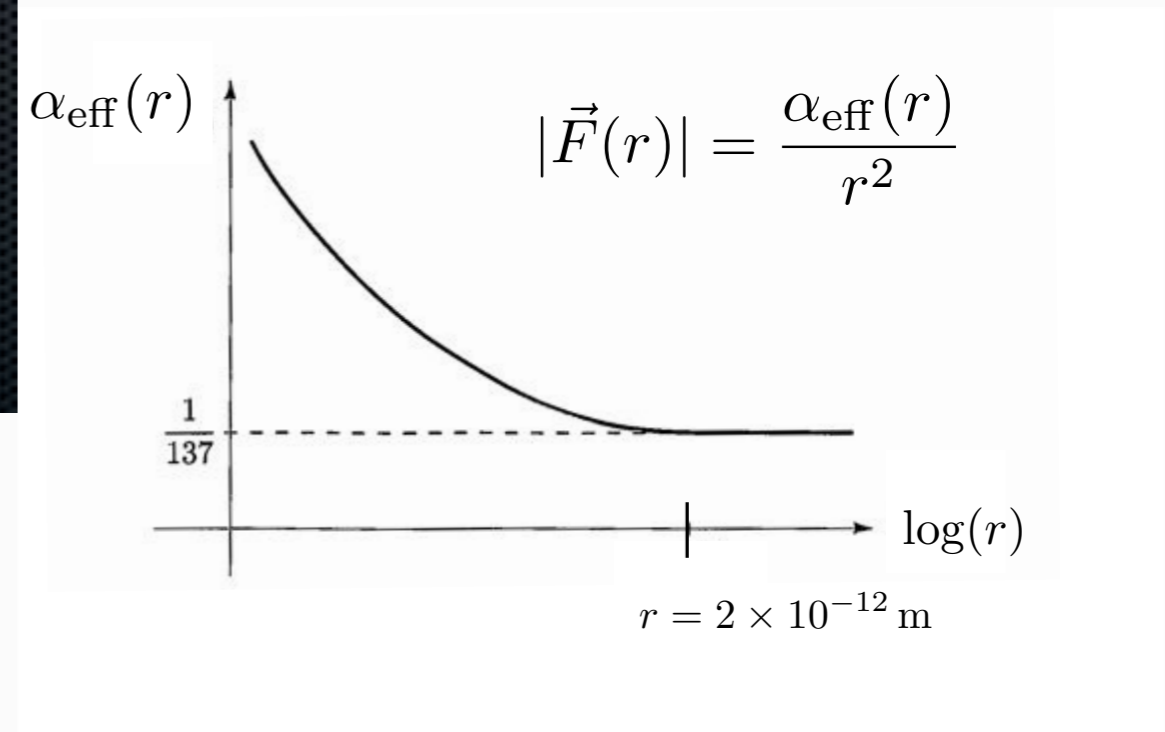
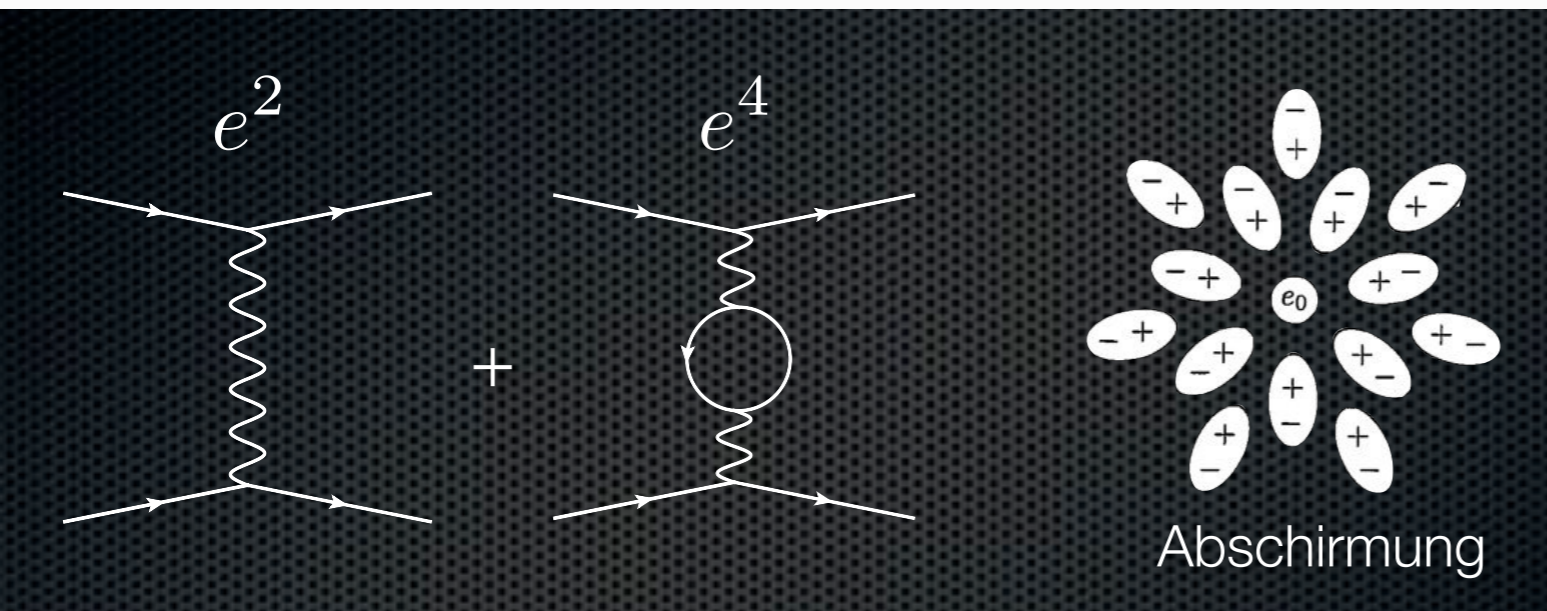


Renormalización: la Teoría Cuántica de Campos

Los infinitos no son tales: desaparecen si se acepta que la magnitud de las fuerzas (valores de cargas y masas) **cambia como función de la distancia**.

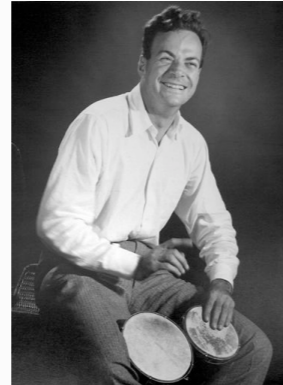


Dyson, Feynman, Schwinger, Stückelberg, Tomonaga 1934-1948



Renormalización: la Teoría Cuántica de Campos

Los infinitos no son tales: desaparecen si se acepta que la magnitud de las fuerzas (valores de cargas y masas) **cambia como función de la distancia.**

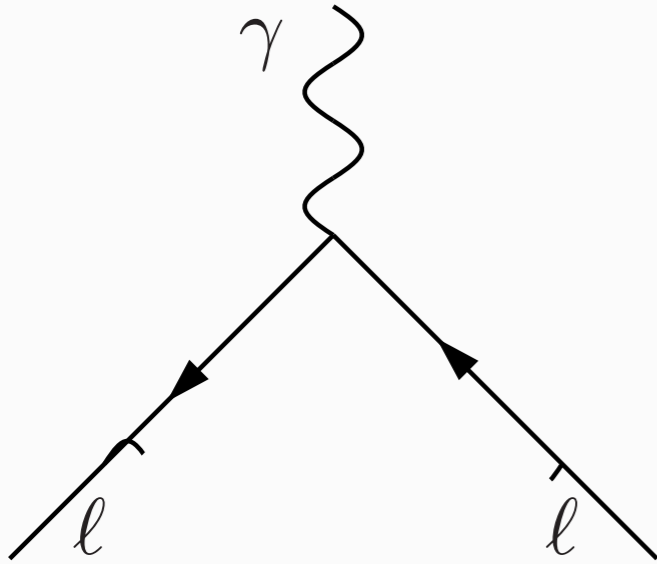


Dyson, Feynman, Schwinger, Stückelberg, Tomonaga 1934-1948

N.B.: el juego de la renormalización NO funciona siempre. Es consistente para la electrodinámica, pero NO para los modelos de Fermi y Yukawa.

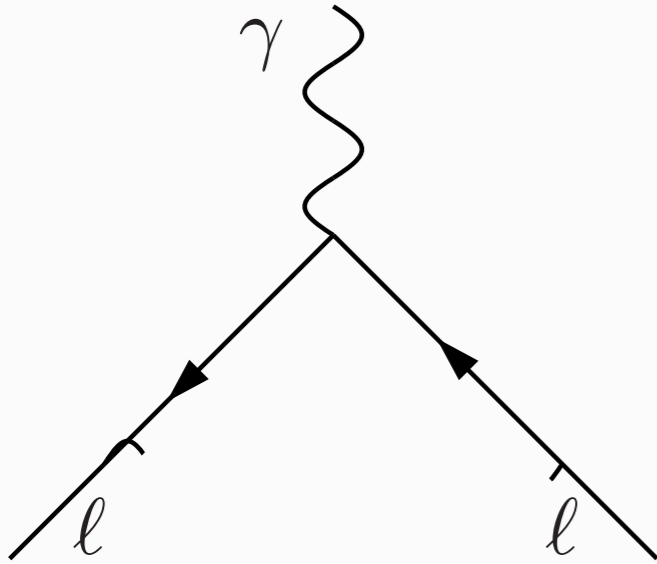
Falta una teoría consistente para las interacciones nucleares fuerte y débil.

El momento magnético anómalo del electrón

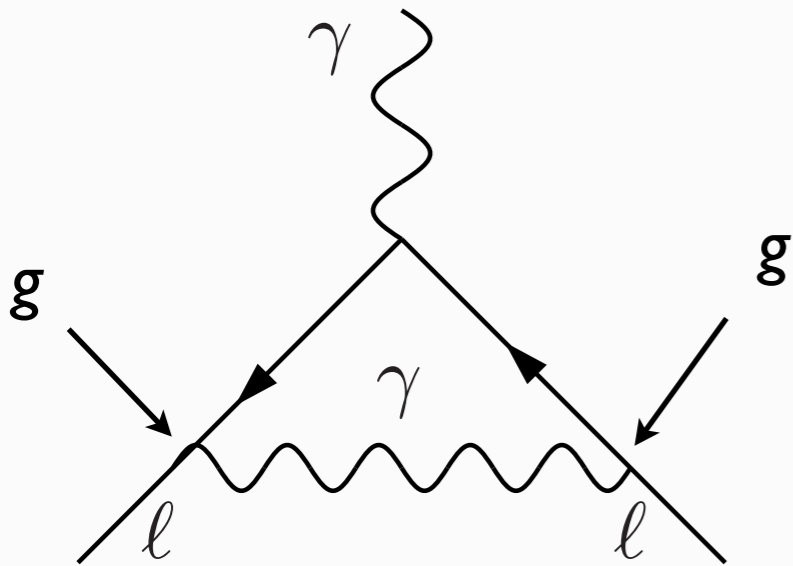


$$a = \frac{g - 2}{2} \quad \text{Dirac: } g = 2$$

El momento magnético anómalo del electrón



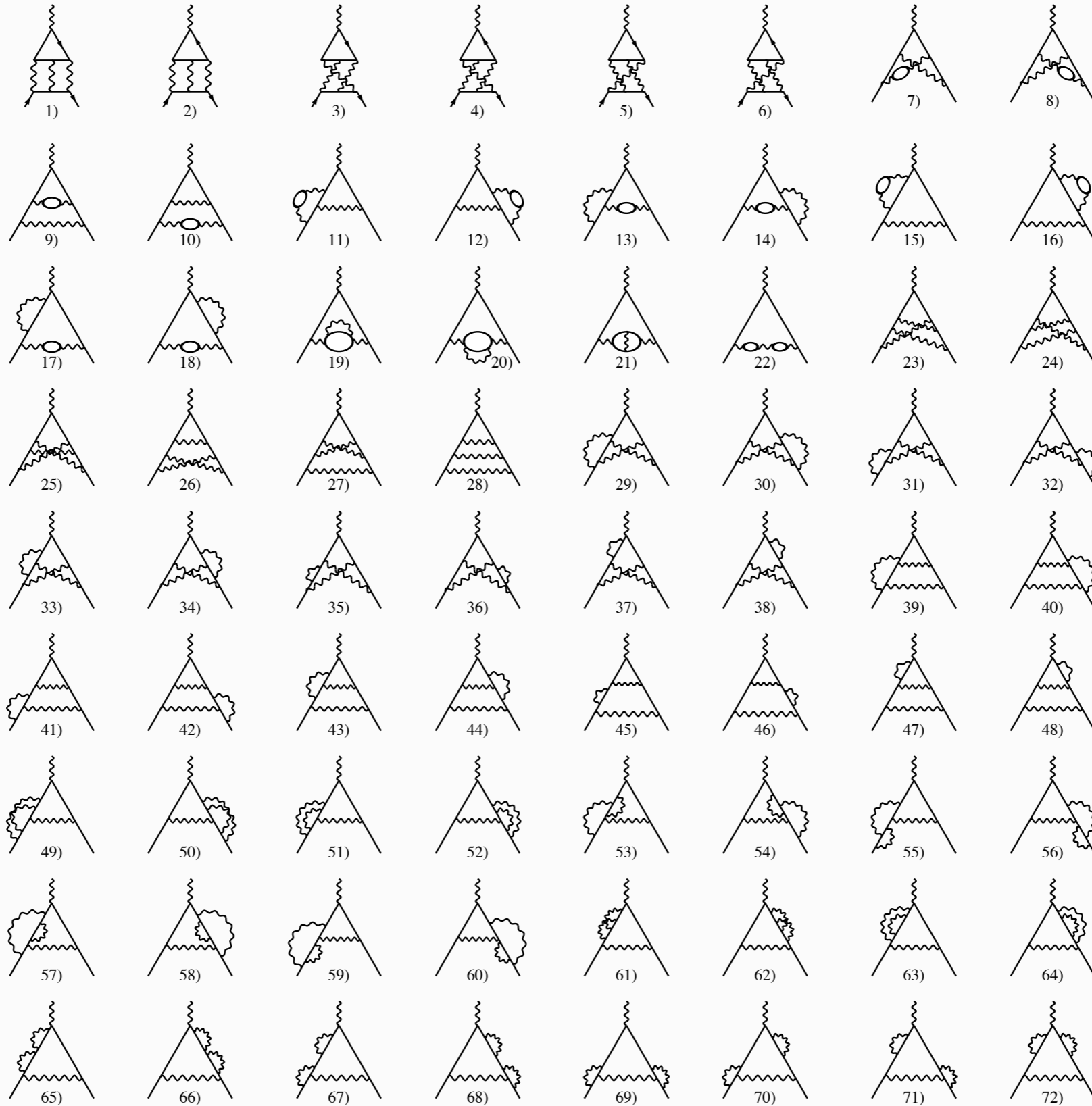
$$a = \frac{g - 2}{2} \quad \text{Dirac: } g = 2$$



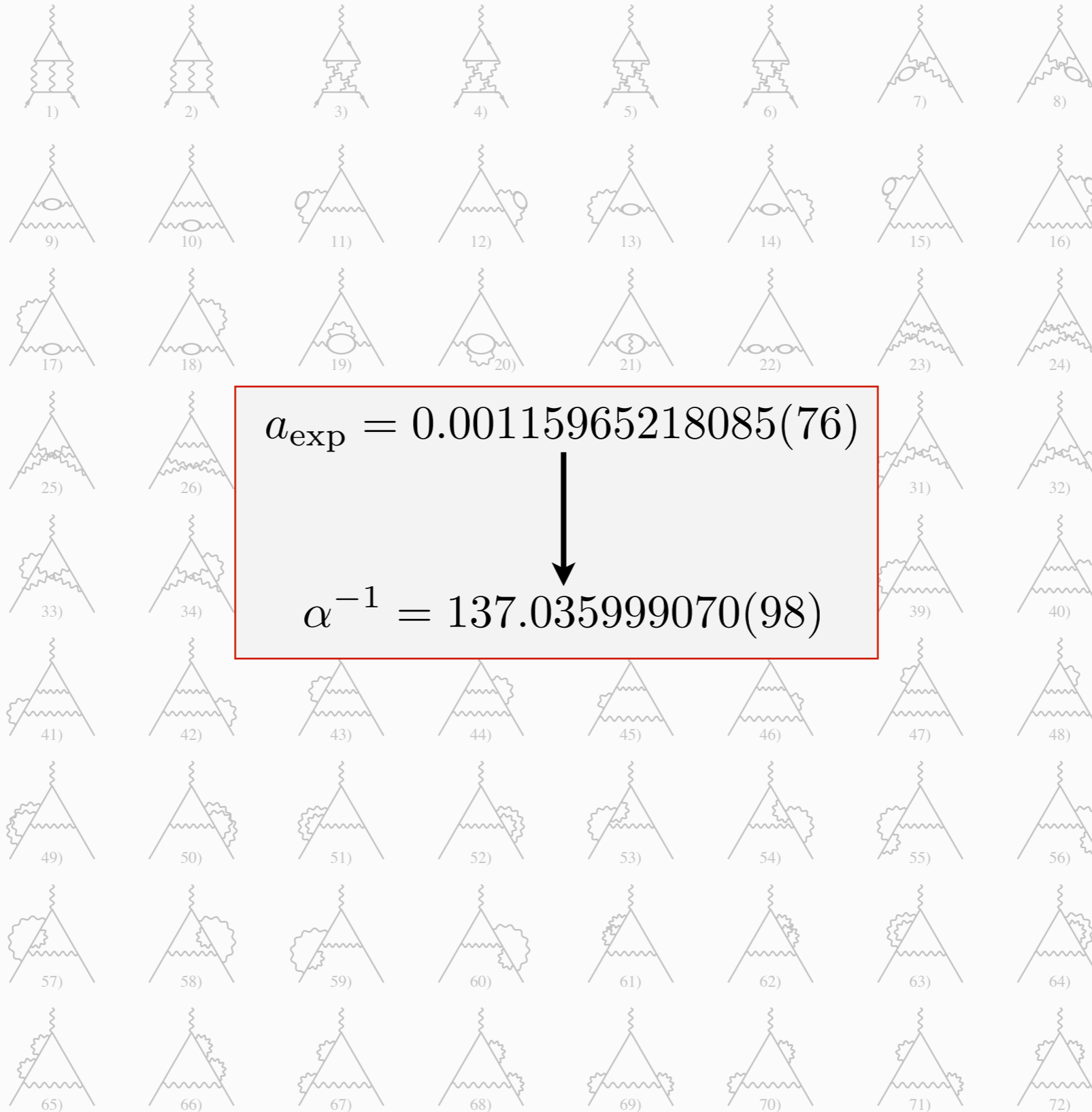
$$a = \frac{\alpha}{2\pi} \approx 0.0011614$$

Schwinger 1948

El momento magnético anómalo del electrón



El momento magnético anómalo del electrón



La edad de plata de la teoría de campos

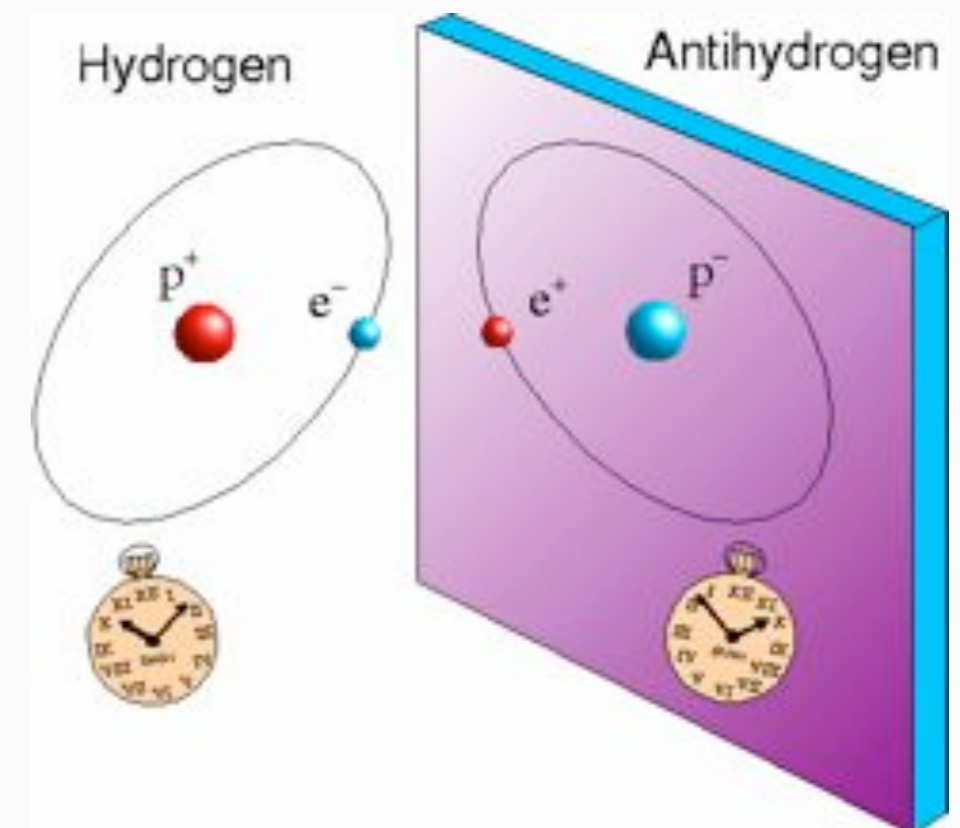
La madurez técnica de la TCC permitió demostrar muchas propiedades fundamentales de la naturaleza que habían sido postuladas durante la revolución cuántica.

- ➔ Fermiones y bosones: sólo dos tipos de campos bajo relatividad especial.
- ➔ Spin-estadística: principio de exclusión de Pauli.

A. Wightman, 30/03/1922-13/01/2013

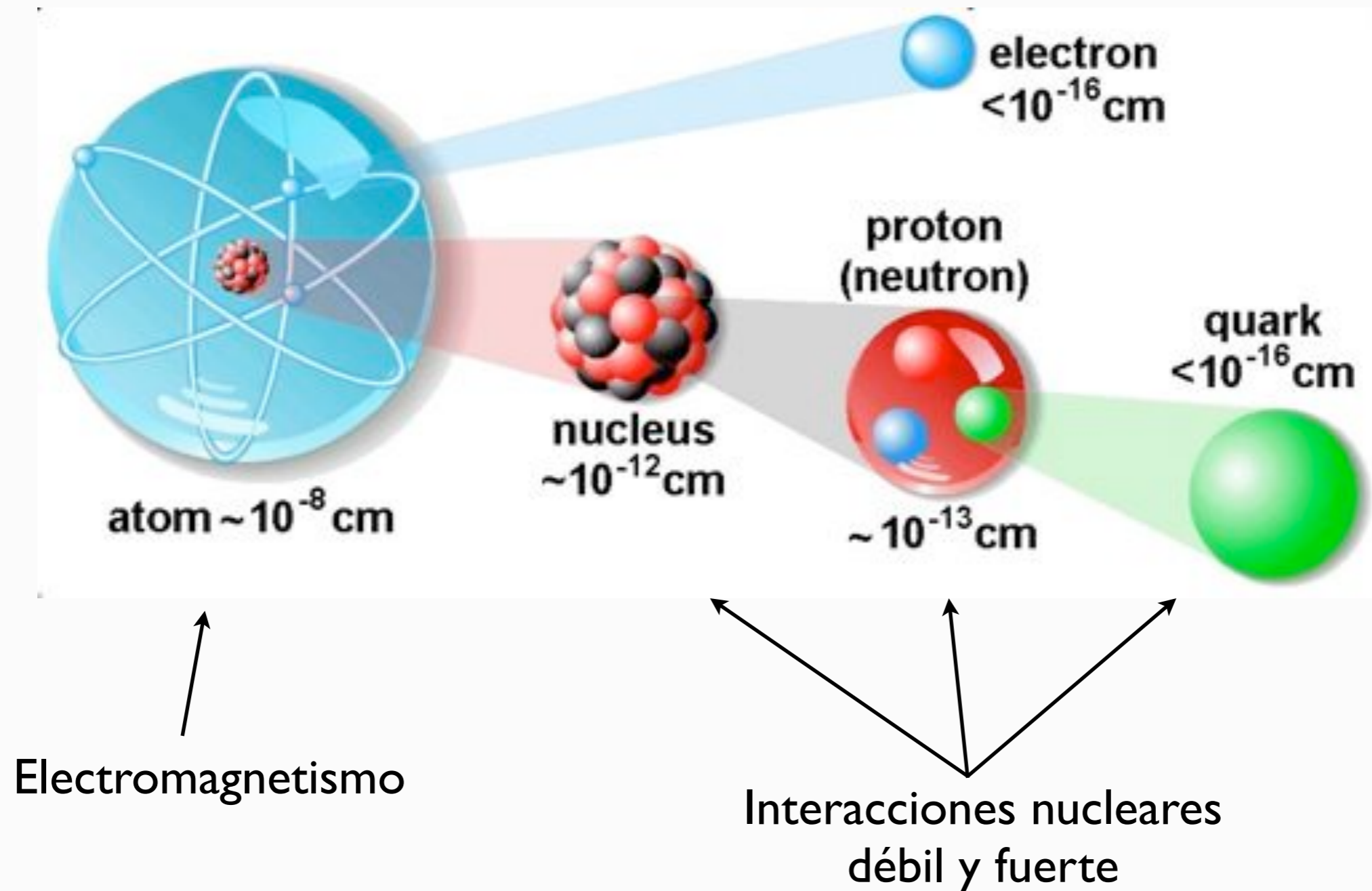
“El átomo está tan lleno como es físicamente posible.”

- ➔ Simetrías discretas: el universo es invariante bajo *CPT*, pero no necesariamente bajo *C*, *P* o *T*.



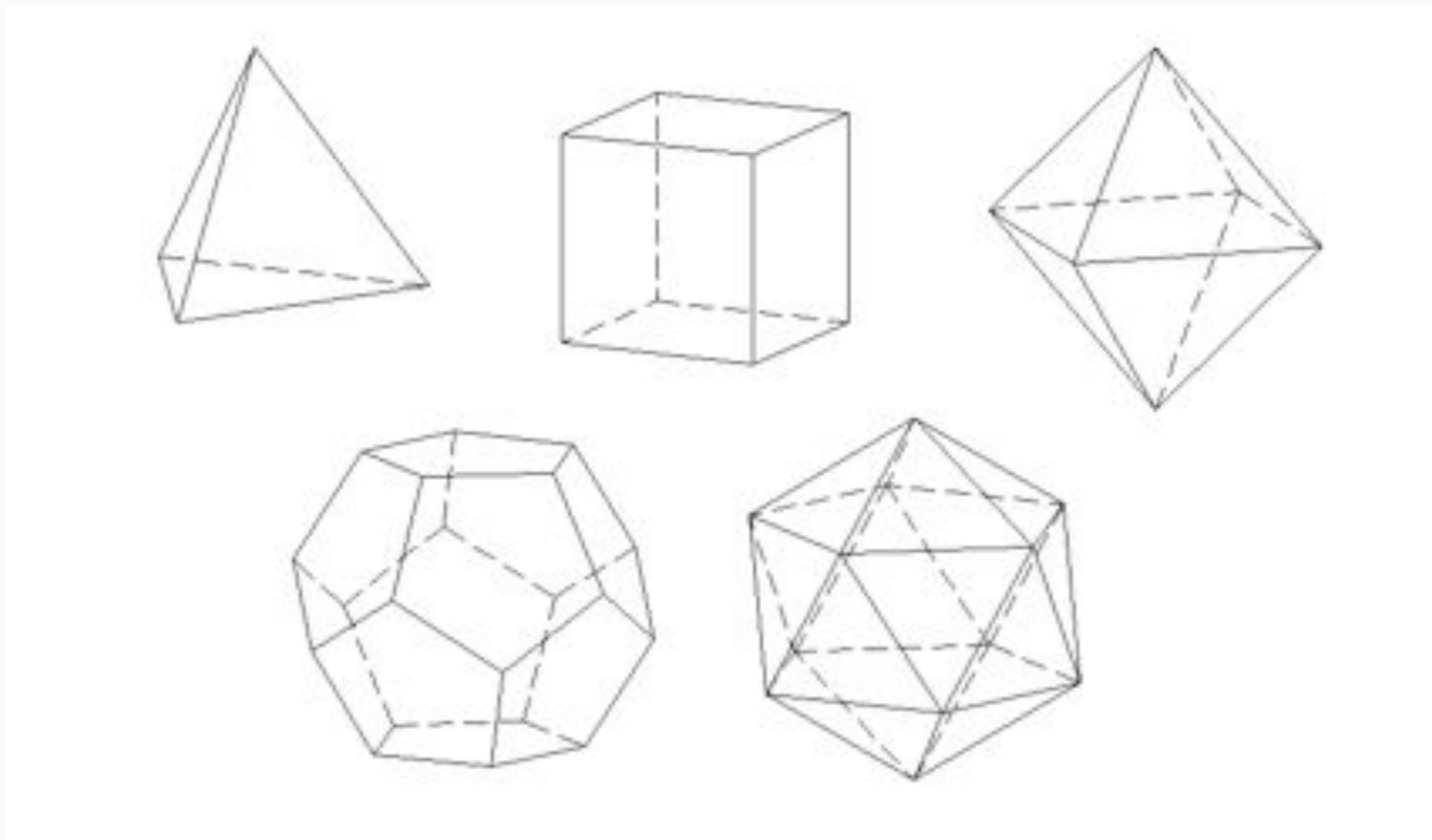
La edad de plata de la teoría de campos

... pero el progreso del núcleo atómico fue lento, hasta que emergió toda la importancia de las propiedades de simetría de la Física Fundamental.



Simetría: La edad de oro de la teoría de campos

... pero el progreso del núcleo atómico fue lento, hasta que emergió toda la importancia de las propiedades de simetría de la Física Fundamental.



"What is especially striking and remarkable is that in fundamental physics a beautiful or elegant theory is more likely to be right than a theory that is inelegant."

Plan

- Introducción: escalas de espacio y de energía en Física Fundamental.
- Física Cuántica y Relatividad Especial.
 - Las preguntas revolucionarias.
 - Dirac y la Mecánica Cuántica Relativista.
 - Las interacciones nucleares débil y fuerte: neutrinos y mesones.
- Interludio: diagramas de Feynman.
- Teoría Cuántica de Campos.
 - Efectos cuánticos y fuerzas fundamentales.
 - Infinitos y Guerras.
 - La Edad de Plata: Electrodinámica Cuántica y leyes fundamentales.
- **Simetrías: la Edad de Oro.**
 - **El Camino Óctuple: Quarks.**
 - **La interacción electrodébil: corrientes neutras.**
 - **Más infinitos.**
 - **El Modelo Estándar de la Física de Partículas.**

La interacción fuerte: el zoo de partículas

Los experimentos de física de altas energías de los años 50 descubrieron docenas de nuevas partículas que interactuaban fuertemente (*mesones* y *bariones*). El modelo de Yukawa no bastaba para describirlas adecuadamente.



La interacción fuerte: el Camino Óctuple



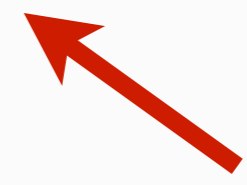
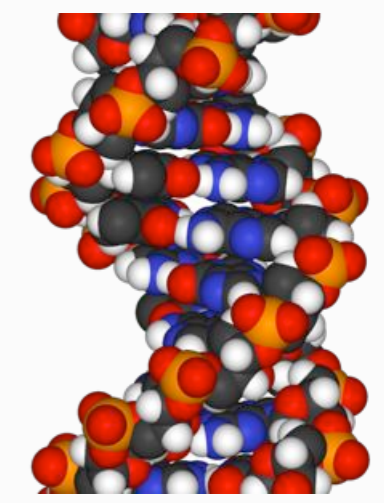
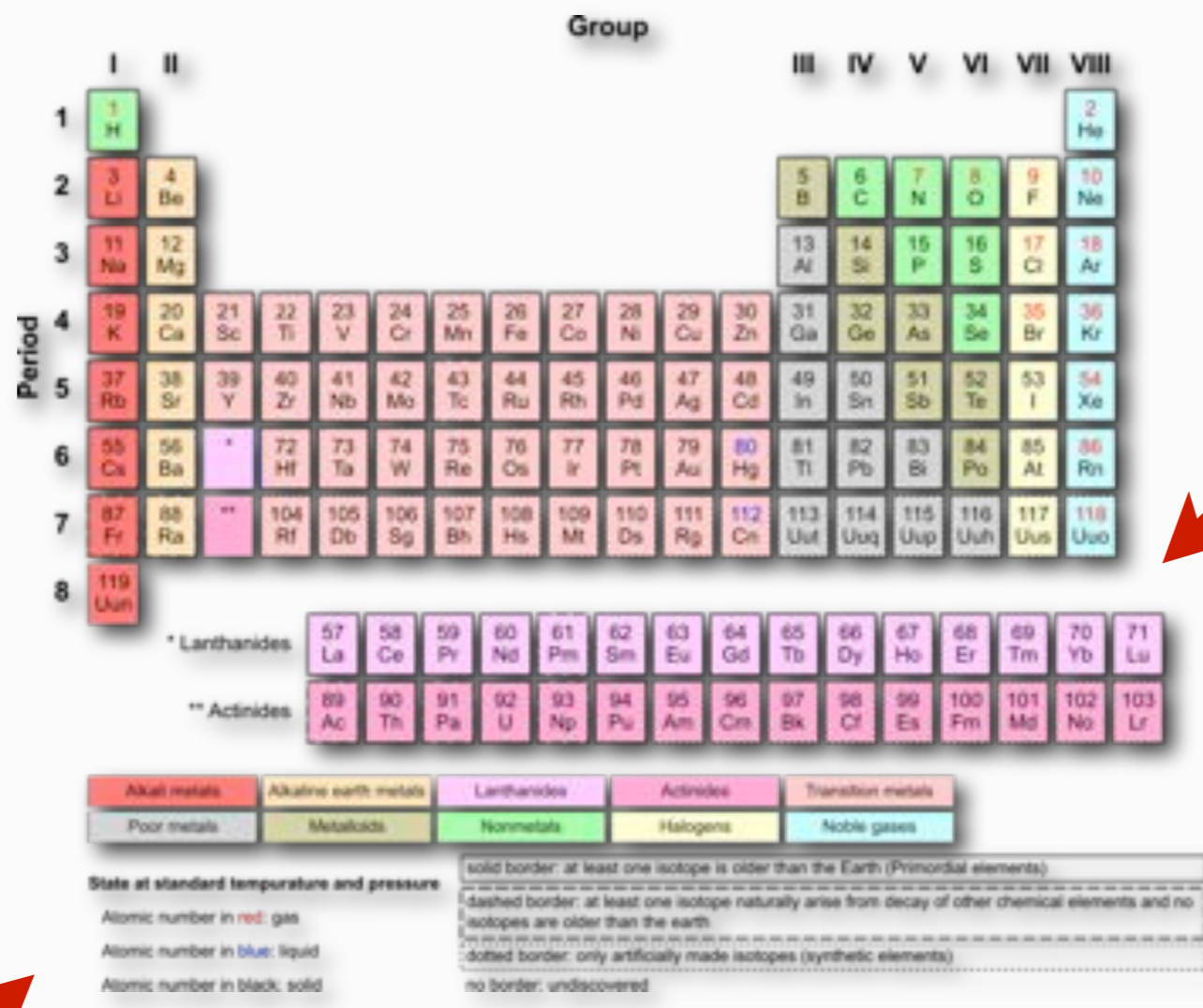
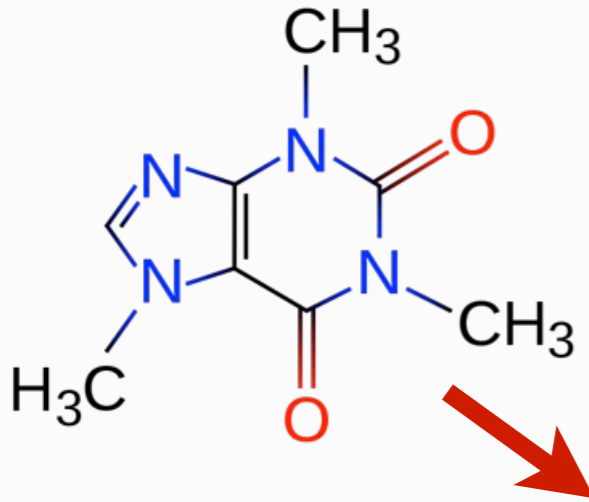
inicio de la edad de oro de la física teórica de partículas

La interacción fuerte: el Camino Óctuple

$n^{2s+1}\ell_J$	J^{PC}	$l=1$ $u\bar{d}, \bar{u}d, \frac{1}{\sqrt{2}}(d\bar{d} - u\bar{u})$	$l=\frac{1}{2}$ $u\bar{s}, d\bar{s}; \bar{d}s, -\bar{u}s$	$l=0$ f'	$l=0$ f
1^1S_0	0^{-+}	π	K	η	$\eta'(958)$
1^3S_1	1^{--}	$\rho(770)$	$K^*(892)$	$\phi(1020)$	$\omega(782)$
1^1P_1	1^{+-}	$b_1(1235)$	K_{1B}^\dagger	$h_1(1380)$	$h_1(1170)$
1^3P_0	0^{++}	$a_0(1450)$	$K_0^*(1430)$	$f_0(1710)$	$f_0(1370)$
1^3P_1	1^{++}	$a_1(1260)$	K_{1A}^\dagger	$f_1(1420)$	$f_1(1285)$
1^3P_2	2^{++}	$a_2(1320)$	$K_2^*(1430)$	$f_2'(1525)$	$f_2(1270)$
1^1D_2	2^{-+}	$\pi_2(1670)$	$K_2(1770)^\dagger$	$\eta_2(1870)$	$\eta_2(1645)$
1^3D_1	1^{--}	$\rho(1700)$	$K^*(1680)$		$\omega(1650)$
1^3D_2	2^{--}		$K_2(1820)$		
1^3D_3	3^{--}	$\rho_3(1690)$	$K_3^*(1780)$	$\phi_3(1850)$	$\omega_3(1670)$
1^3F_4	4^{++}	$a_4(2040)$	$K_4^*(2045)$		$f_4(2050)$
1^3G_5	5^{--}	$\rho_5(2350)$			
1^3H_6	6^{++}	$a_6(2450)$			$f_6(2510)$
2^1S_0	0^{-+}	$\pi(1300)$	$K(1460)$	$\eta(1475)$	$\eta(1295)$
2^3S_1	1^{--}	$\rho(1450)$	$K^*(1410)$	$\phi(1680)$	$\omega(1420)$

$n^{2s+1}\ell_J$	J^{PC}	$l=0$ $c\bar{c}$	$l=0$ $b\bar{b}$	$l=\frac{1}{2}$ $c\bar{u}, c\bar{d}; \bar{c}u, \bar{c}d$	$l=0$ $c\bar{s}; \bar{c}s$	$l=\frac{1}{2}$ $b\bar{u}, b\bar{d}; \bar{b}u, \bar{b}d$	$l=0$ $b\bar{s}; \bar{b}s$	$l=0$ $b\bar{c}; \bar{b}c$
1^1S_0	0^{-+}	$\eta_c(1S)$	$\eta_b(1S)$	D	D_s^\pm	B	B_s^0	B_c^\pm
1^3S_1	1^{--}	$J/\psi(1S)$	$\Upsilon(1S)$	D^*	$D_s^{*\pm}$	B^*	B_s^*	
1^1P_1	1^{+-}	$h_c(1P)$		$D_1(2420)$	$D_{s1}(2536)^\pm$	$B_1(5721)$	$B_{s1}(5830)^0$	
1^3P_0	0^{++}	$\chi_{c0}(1P)$	$\chi_{b0}(1P)$	$D_0^*(2400)$	$D_{s0}^*(2317)^{\pm\dagger}$			
1^3P_1	1^{++}	$\chi_{c1}(1P)$	$\chi_{b1}(1P)$	$D_1(2430)$	$D_{s1}(2460)^{\pm\dagger}$			
1^3P_2	2^{++}	$\chi_{c2}(1P)$	$\chi_{b2}(1P)$	$D_2^*(2460)$	$D_{s2}^*(2573)^\pm$	$B_2^*(5747)$	$B_{s2}^*(5840)^0$	
1^3D_1	1^{--}	$\psi(3770)$			$D_{s1}^*(2700)^\pm$			
2^1S_0	0^{-+}	$\eta_c(2S)$						
2^3S_1	1^{--}	$\psi(2S)$	$\Upsilon(2S)$					
$2^3P_{0,1,2}$	$0^{++}, 1^{++}, 2^{++}$		$\chi_{b0,1,2}(2P)$					

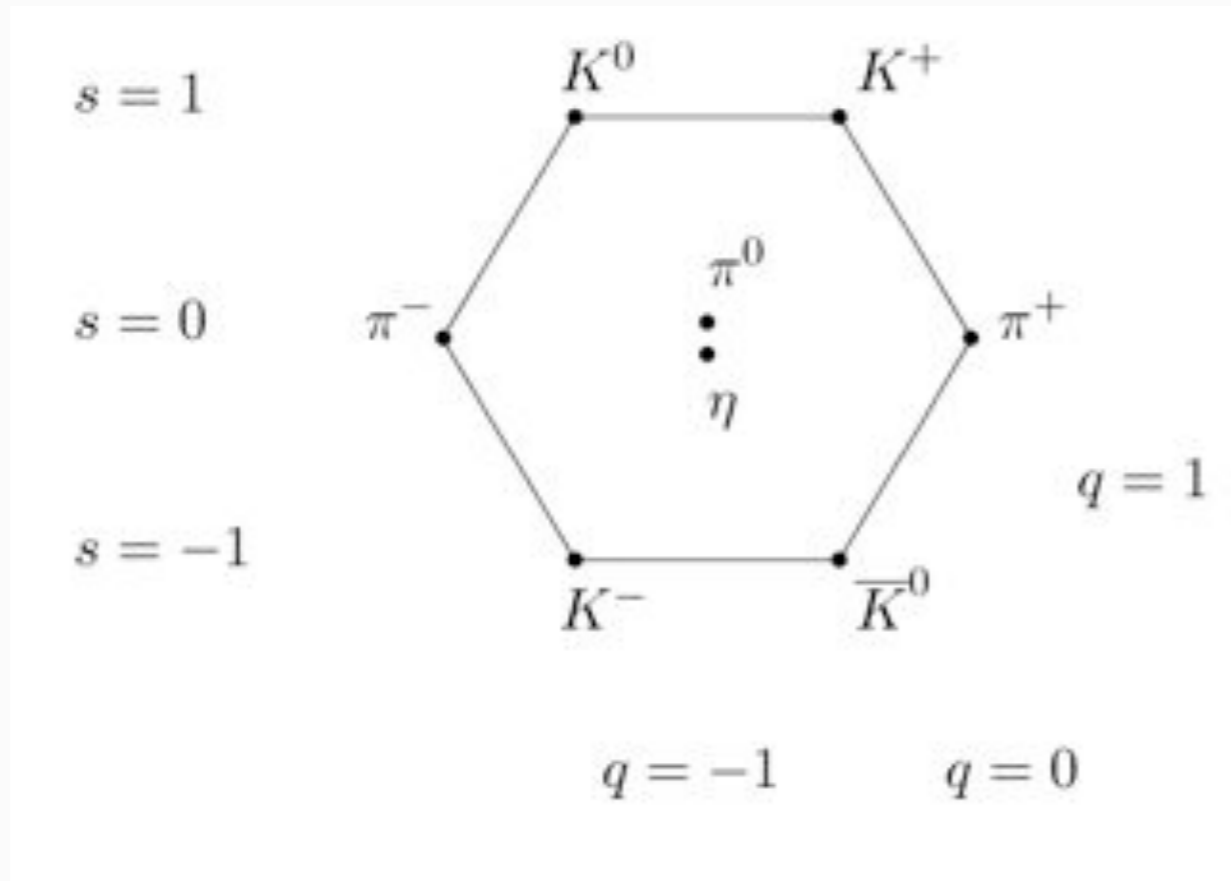
La interacción fuerte: el Camino Óctuple



La interacción fuerte: el Camino Óctuple

Es posible explicar el espectro de mesones y bariones asumiendo que están constituidos por sólo tres tipos de partículas más elementales: los **quarks**.

Gell-Mann, Ne'eman 1961

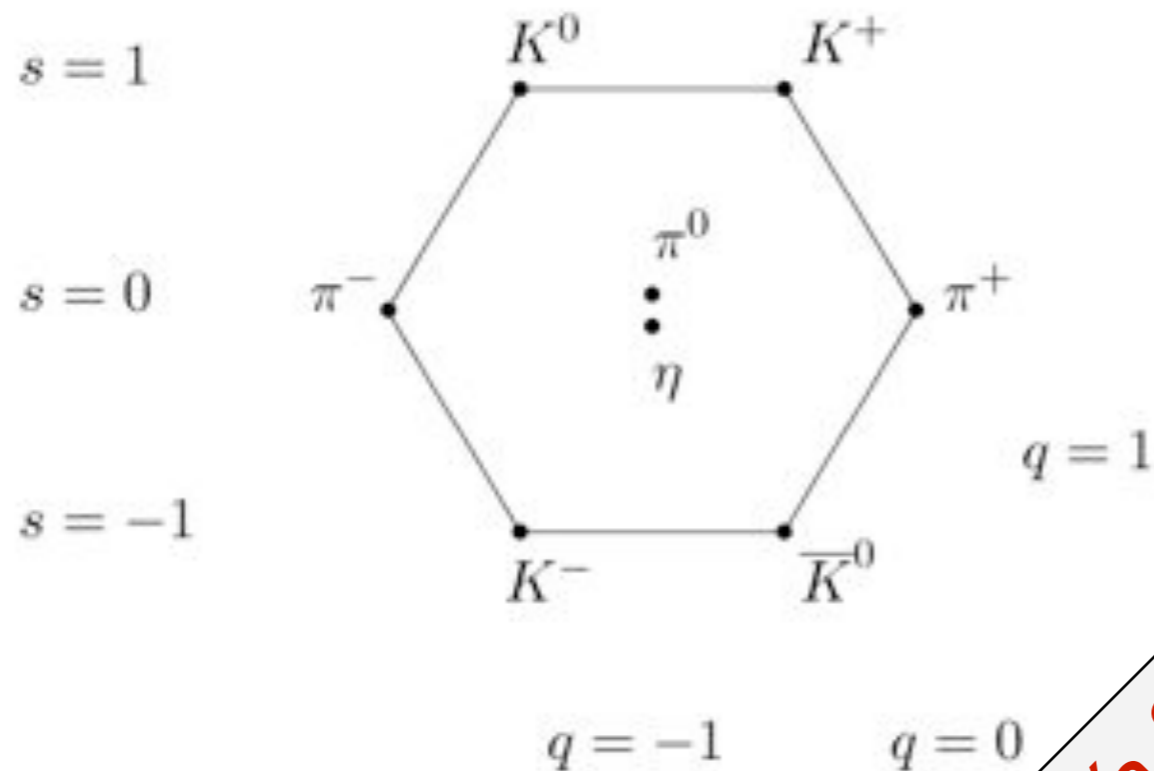


$l = 1$ $u\bar{d}, \bar{u}d, \frac{1}{\sqrt{2}}(d\bar{d} - u\bar{u})$	$l = \frac{1}{2}$ $u\bar{s}, d\bar{s}; \bar{d}s, -\bar{u}s$
--	--

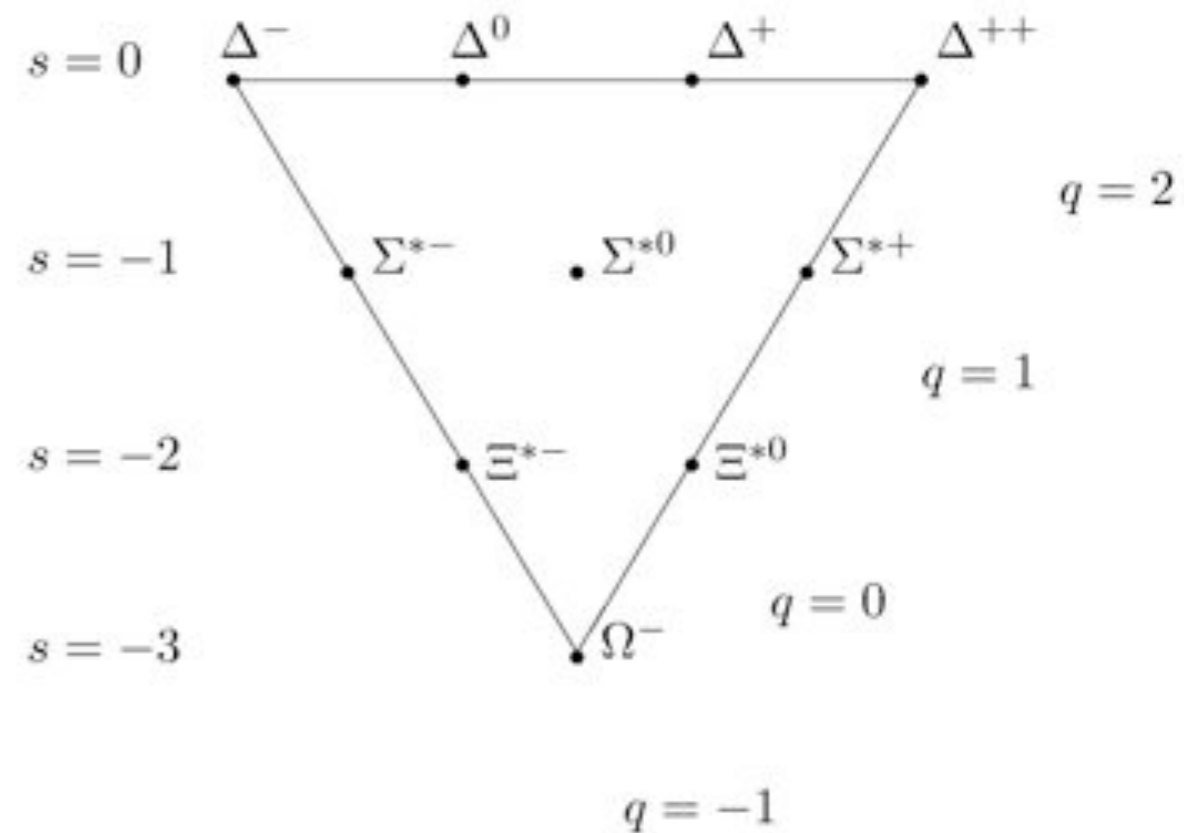
La interacción fuerte: el Camino Óctuple

Es posible explicar el espectro de mesones y bariones asumiendo que están constituidos por sólo tres tipos de partículas más elementales: los **quarks**.

Gell-Mann, Ne'eman 1961



Simetría $SU(3)$ ("de sabor")

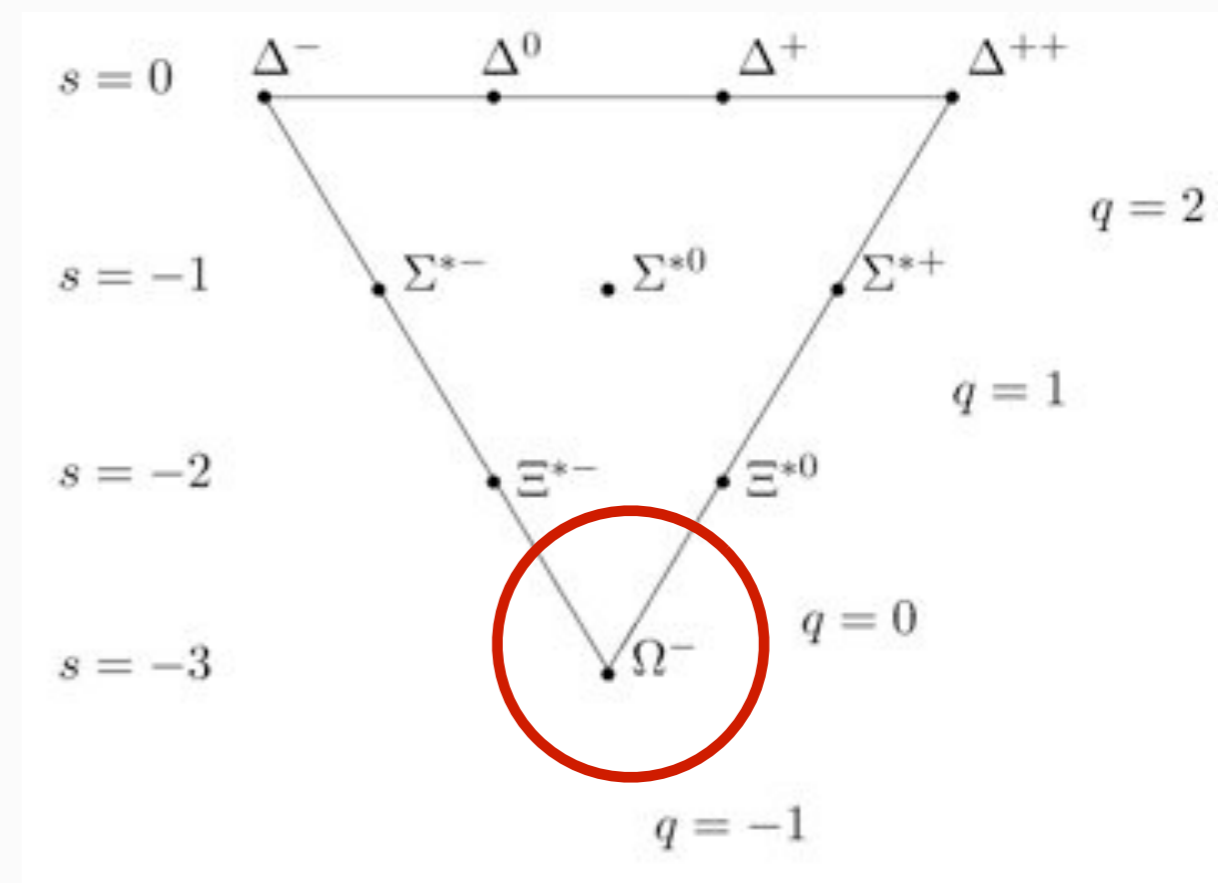


La interacción fuerte: el Camino Óctuple

Es posible explicar el espectro de mesones y bariones asumiendo que están constituidos por sólo tres tipos de partículas más elementales: los **quarks**.

Gell-Mann, Ne'eman 1961

Principio de exclusión de Pauli: tres fermiones idénticos no pueden estar en el mismo estado.



La interacción fuerte: el Camino Óctuple

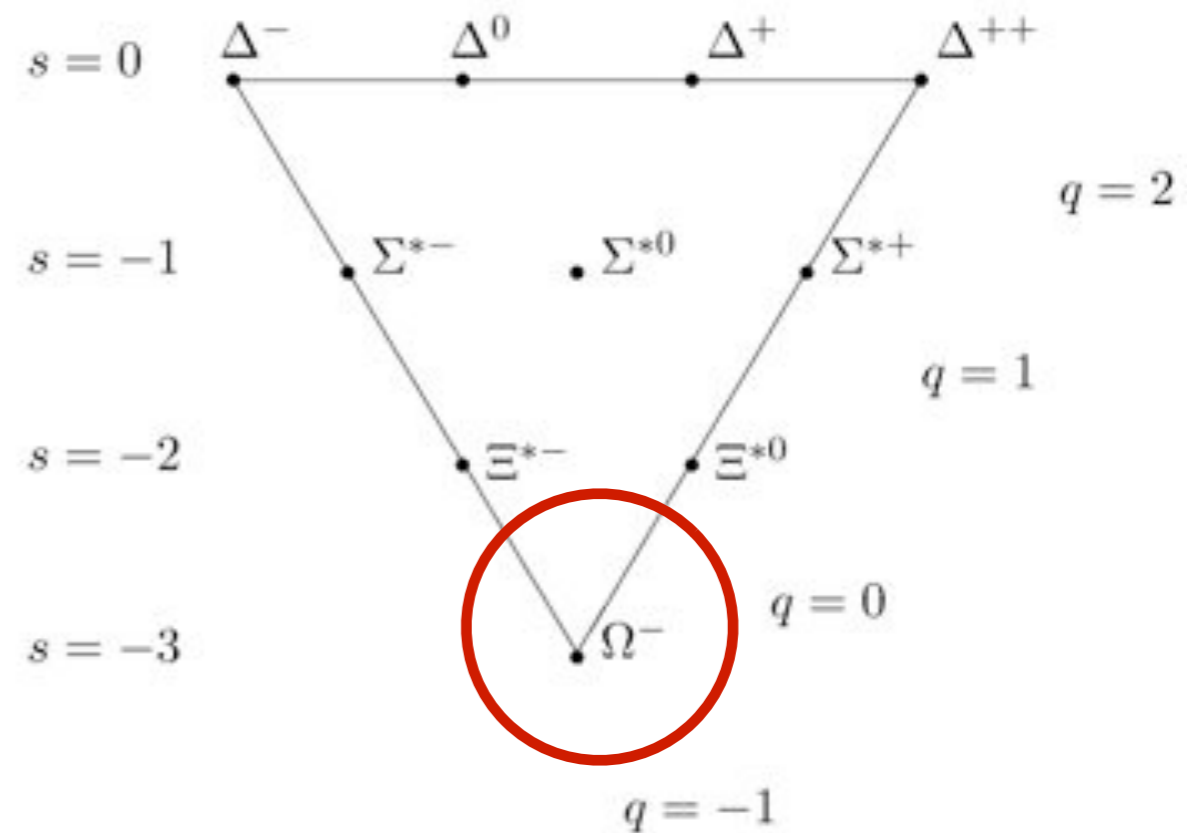
Es posible explicar el espectro de mesones y bariones asumiendo que están constituidos por sólo tres tipos de partículas más elementales: los **quarks**.

Gell-Mann, Ne'eman 1961

Principio de exclusión de Pauli:
fermiones idénticos no pueden estar en el mismo estado.

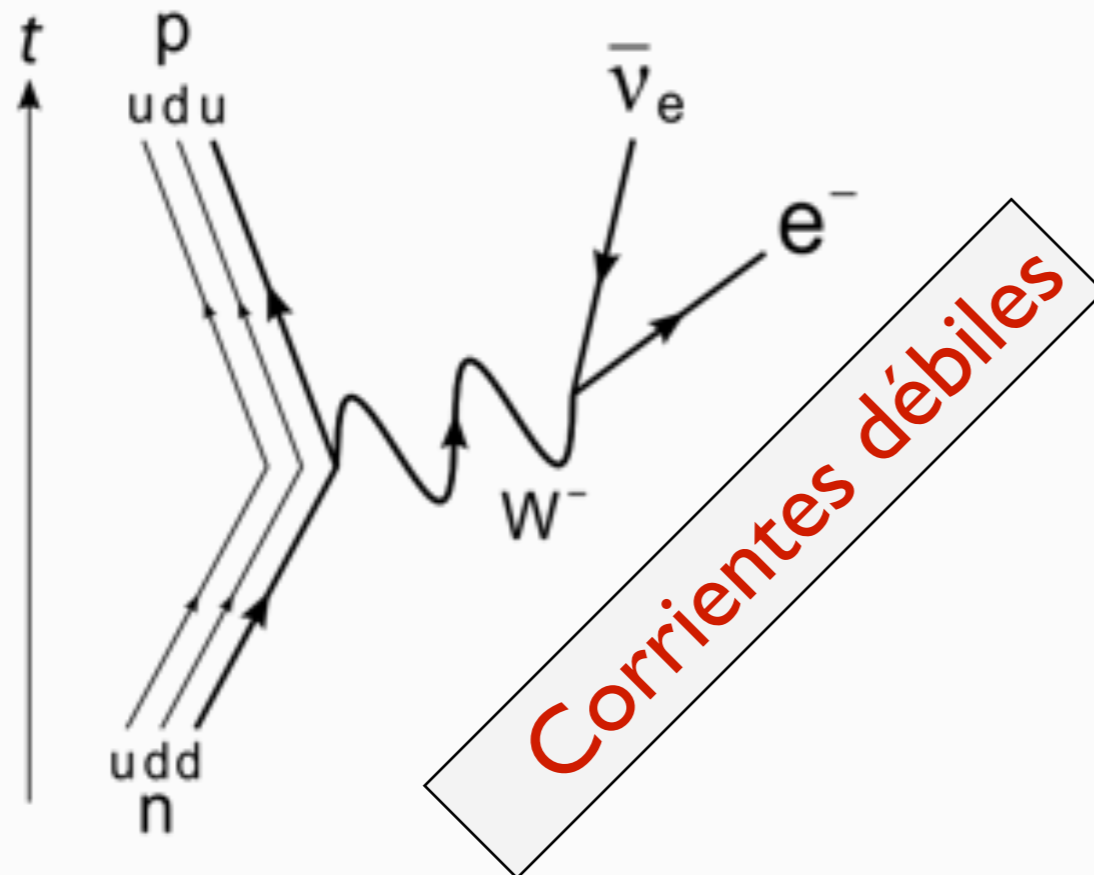
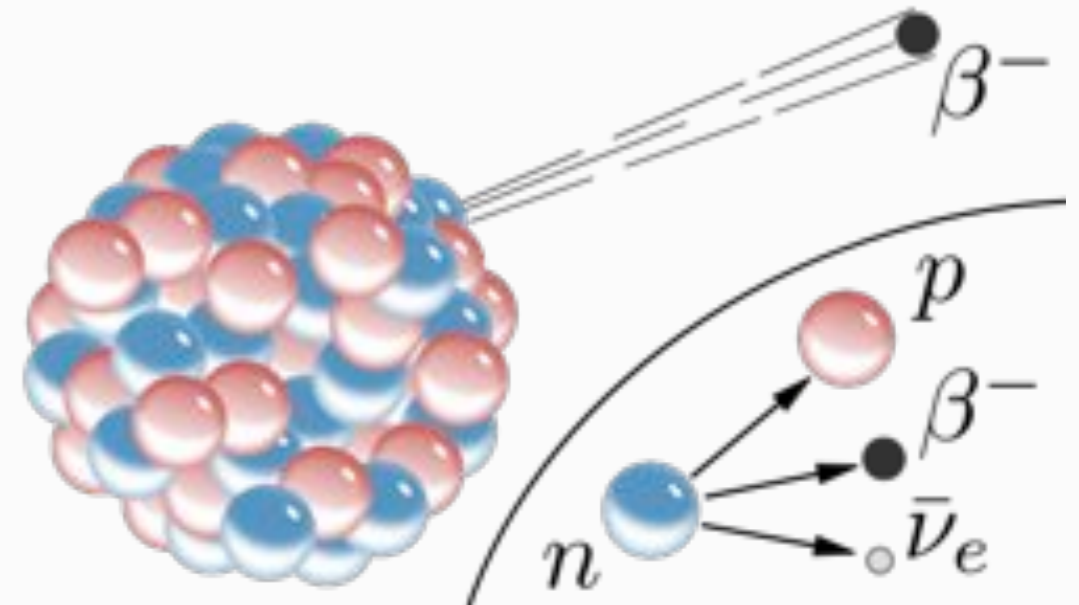
Simetría $SU(3)$ ("de color")

Es necesario postular un "equivalente fuerte" de la carga eléctrica: la **carga de color**.



La interacción débil

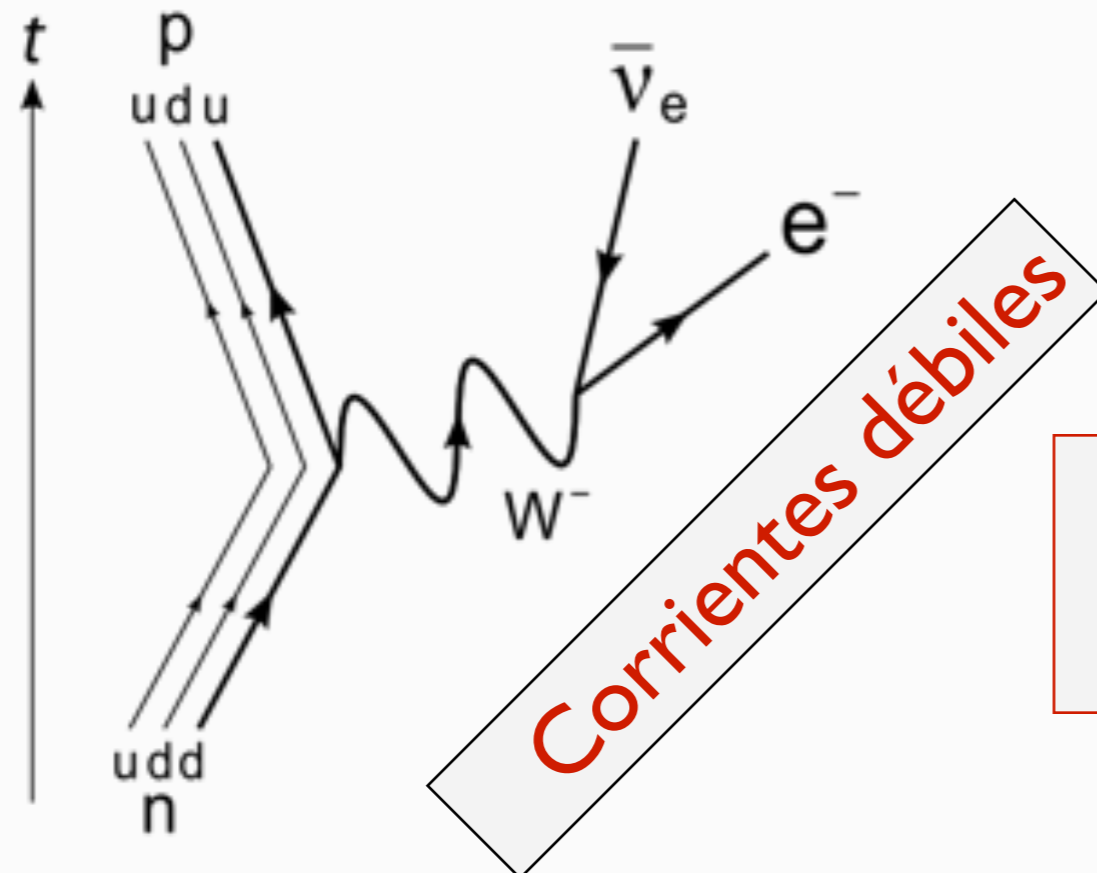
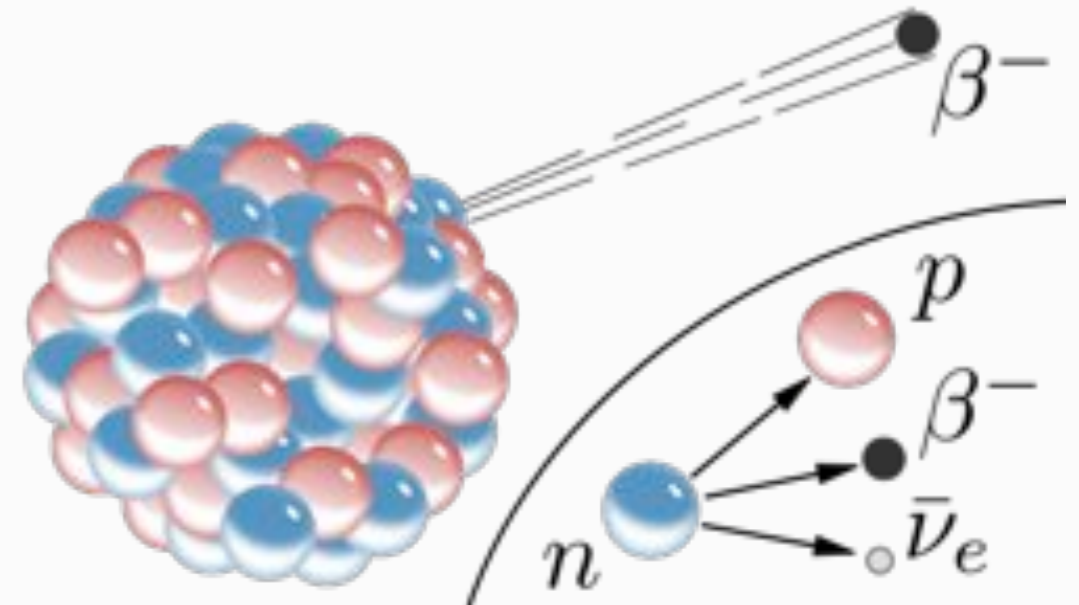
El modelo de Fermi para la interacción débil se vuelve inconsistente para energías del orden de 100 GeV.



Solución: postular la existencia de una interacción fundamental mediada por partículas similares al fotón pero masivas.

La interacción débil

El modelo de Fermi para la interacción débil se vuelve inconsistente para energías del orden de 100 GeV.



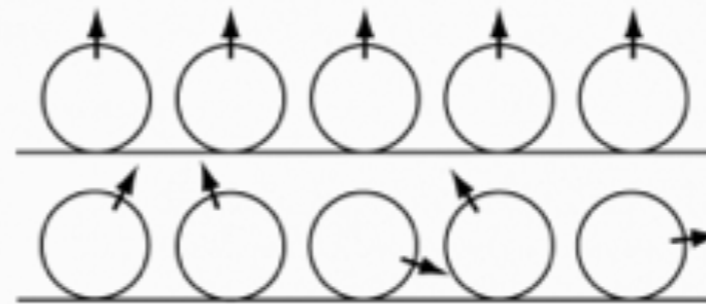
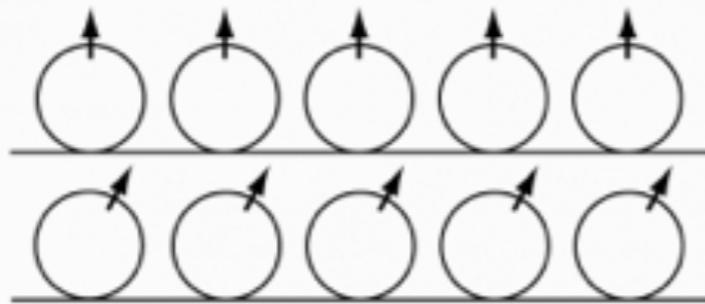
Solución: postular la existencia de una interacción fundamental mediada por partículas similares al fotón pero masivas.

BONUS: es posible unificar una interacción de este tipo con la electromagnética (**fuerza electrodébil**).

Infinitos nucleares

Pero en los años 60 estos modelos tienen dos problemas:

- ➔ No se sabe formular una TCC consistente para las simetrías implicadas: $SU(3)$ de color para los quarks, $SU(2) \times U(1)$ para la interacción electrodébil (*teorías gauge no abelianas*).
- ➔ Aún cuando fuera posible formular una teoría electrodébil, no se sabe cómo dar masa a las partículas implicadas en interacciones débiles sin violar simetrías fundamentales.

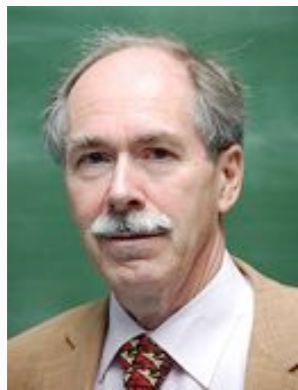


Simetría gauge: los grados de libertad “internos” (cargas) pueden ser rotados de manera distinta en cada punto del espacio-tiempo.

Infinitos nucleares

Pero en los años 60 estos modelos tienen dos problemas:

- ➔ No se sabe formular una TCC consistente para las simetrías implicadas: $SU(3)$ de color para los quarks, $SU(2) \times U(1)$ para la interacción electrodébil (*teorías gauge no abelianas*).
- ➔ Aún cuando fuera posible formular una teoría electrodébil, no se sabe cómo dar masa a las partículas implicadas en interacciones débiles sin violar simetrías fundamentales.



't Hooft, Veltman 1971

Demostración de la renormalizabilidad de teorías gauge no abelianas.

Infinitos nucleares

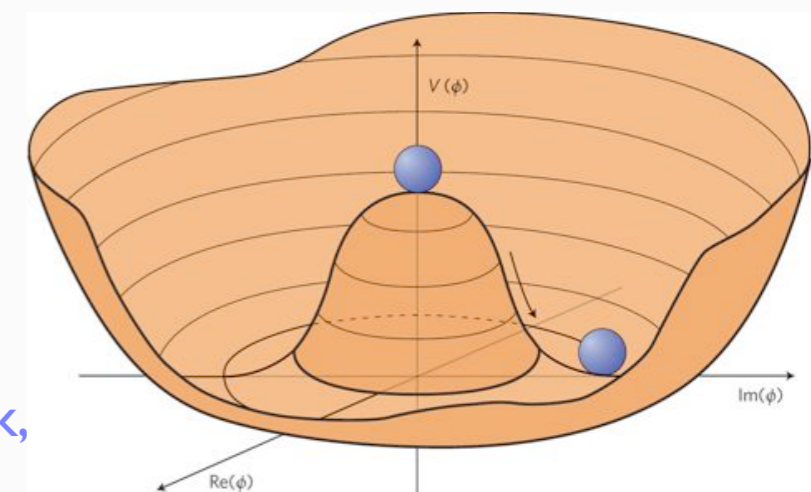
Pero en los años 60 estos modelos tienen dos problemas:

- ➔ No se sabe formular una TCC consistente para las simetrías implicadas: $SU(3)$ de color para los quarks, $SU(2) \times U(1)$ para la interacción electrodébil (*teorías gauge no abelianas*).
- ➔ Aún cuando fuera posible formular una teoría electrodébil, no se sabe cómo dar masa a las partículas implicadas en interacciones débiles sin violar simetrías fundamentales.



Generación de masa a través de la rotura espontánea de la simetría electrodébil.

Englert, Brout, Higgs, Guralnik,
Hagen, Kibble 1963-64



Infinitos nucleares

Pero en los años 60 estos modelos tienen dos problemas:

- ➔ No se sabe formular una TCC consistente para las simetrías implicadas: $SU(3)$ de color para los quarks, $SU(2) \times U(1)$ para la interacción electrodébil (*teorías gauge no abelianas*).
- ➔ Aún cuando fuera posible formular una teoría electrodébil, no se sabe cómo dar masa a las partículas implicadas en interacciones débiles sin violar simetrías fundamentales.



Bosón de Higgs: partícula asociada a la generación de masa para campos de materia fundamentales.

El Modelo Estándar de la Física de Partículas

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass	2.4 MeV	1.27 GeV	173.2 GeV	0
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name	u up	c charm	t top	γ photon
Quarks	4.6 MeV	194 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	1
	d down	s strange	b bottom	g gluon
Leptons	<1.1 eV	<0.17 MeV	<0.18 MeV	0
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z ⁰ weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	-1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e electron	μ muon	τ tau	W [±] weak force

Bosons (Forces)

El Modelo Estándar de la Física de Partículas

Interacción fuerte: Cromodinámica Cuántica (QCD)

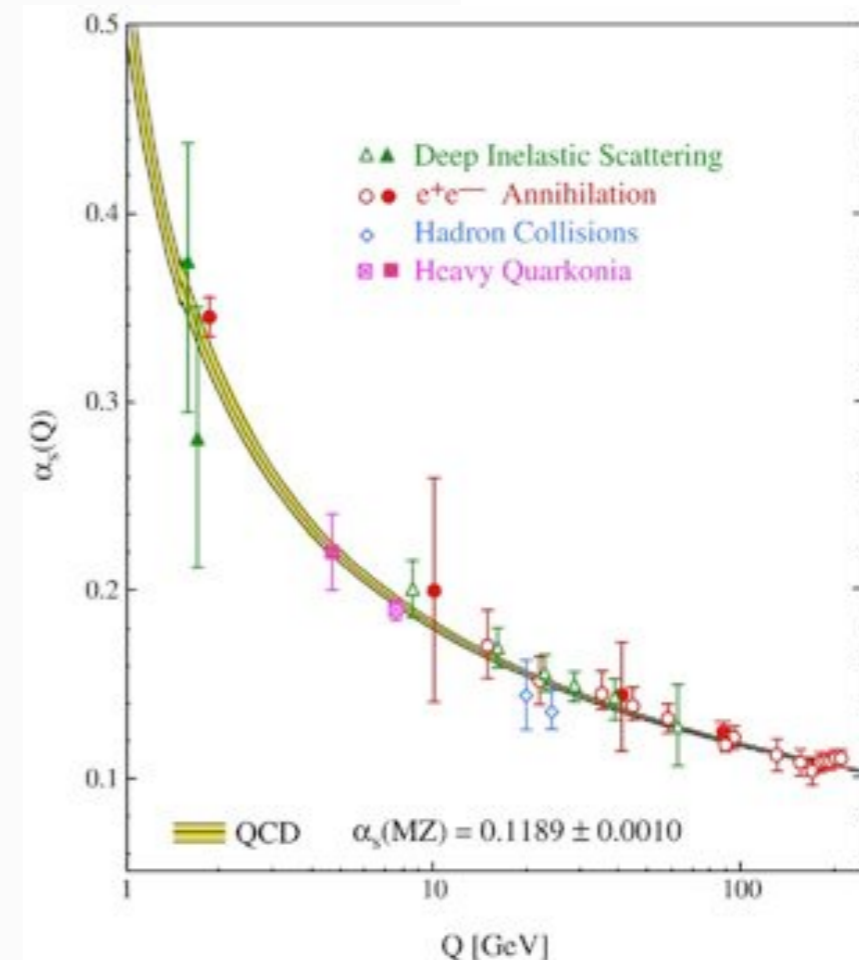
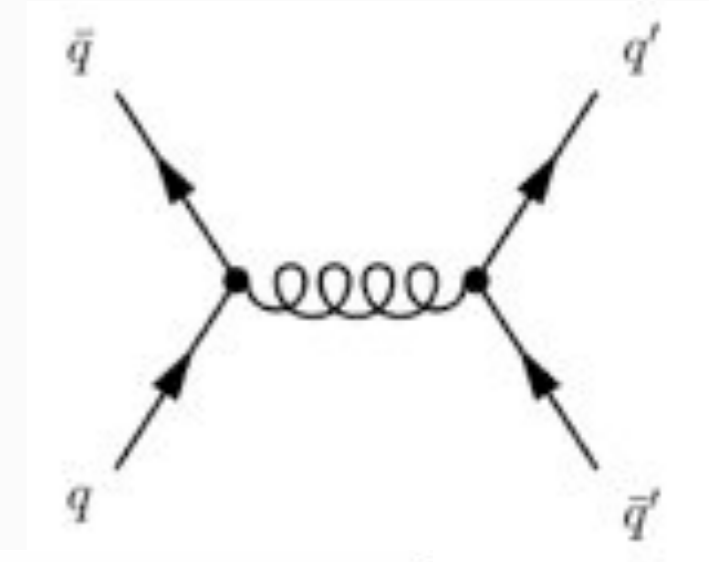
Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass	2.4 MeV	1.27 GeV	173.2 GeV	0
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name	up	charm	top	photon
	u	c	t	γ
	4.6 MeV	194 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	down	strange	bottom	gluon
	d	s	b	g
	<1.1 eV	<0.17 MeV	<20.9 MeV	0
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	electron neutrino	muon neutrino	tau neutrino	weak force
	ν_e	ν_μ	ν_τ	Z
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	-1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	electron	muon	tau	weak force
	e	μ	τ	W

Quarks

Leptons

Bosons (Forces)



El Modelo Estándar de la Física de Partículas

Interacción electrodébil: Modelo de Glashow-Weinberg-Salam

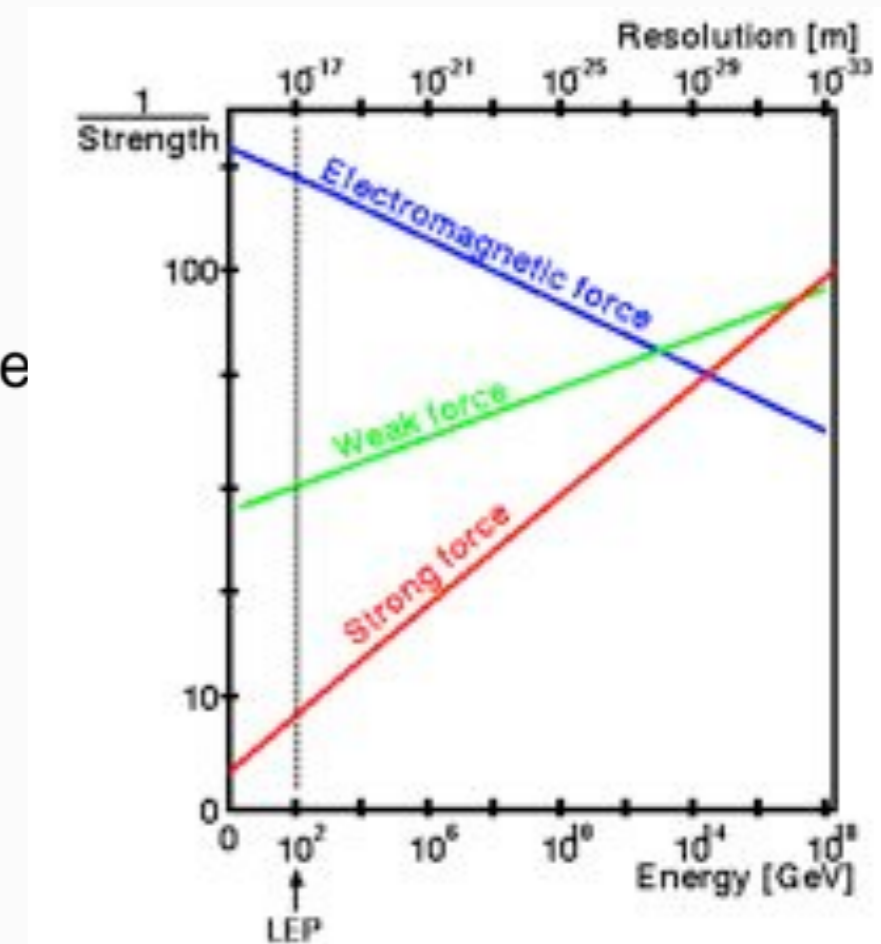
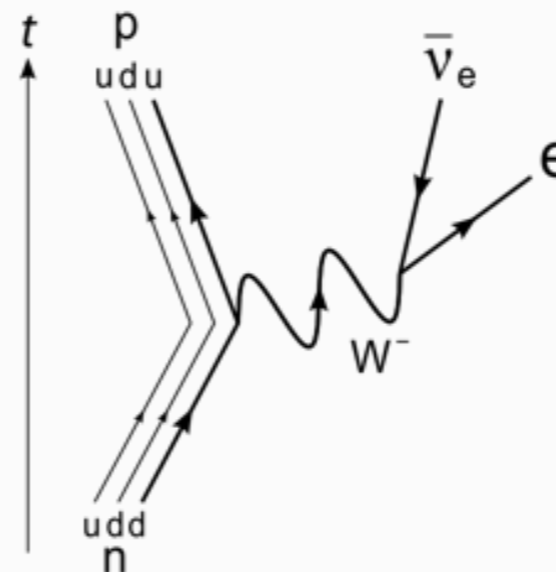
Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass	2.4 MeV	1.27 GeV	173.2 GeV	0
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name	up	charm	top	photon
	4.6 MeV	194 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	8
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	8
	down	strange	bottom	gluon
	<1.1 eV	<1.1 MeV	<22.3 MeV	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
	electron neutrino	muon neutrino	tau neutrino	weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	electron	muon	tau	weak force

Quarks

Leptons

Bosons (Forces)



El Modelo Estándar de la Física de Partículas

Interacción electrodébil: Modelo de Glashow-Weinberg-Salam

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass	2.4 MeV	1.27 GeV	173.2 GeV	0
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name	u up	c charm	t top	γ photon
	4.6 MeV	194 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Quarks	d down	s strange	b bottom	g gluon
	<1.1 eV	<1.1 MeV	<2.0 MeV	0
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	-1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Leptons	e electron	μ muon	τ tau	W weak force

Bosons (Forces)



Gargamelle

Simetría

El progreso actual de la física se debe, en gran medida, el intento de simplificar y profundizar la estructura de simetría de las interacciones fundamentales.

