

Introducción a la Física de Partículas

01-01

Introducción general

Hernán Asorey

Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander
Bucaramanga, Colombia

hasorey@uis.edu.co
20130903M

01-01-20130903M-HA-introduccion.pdf

Solicitar

Particle Data Group

pdg.lbl.gov

“Order pdg products”

<https://pdg.lbl.gov/PdgOrderingSystem/>

Bibliografía

- * **D. Griffiths, “Introduction to Elementary Particles”**
- * B. Martin, “Nuclear and Particle Physics, an Introduction”
- * **A. Das & T. Ferbel, “Introduction to Nuclear and Particle Physics”, 2nd Ed**
- * J. Beringer et al [Particle Data Group], “Review of Particle Physics”, Phys. Rev D**86**, 010001 (2012)
<http://pdg.lbl.gov/>
- * **Review of Particle Physics (Booklet)**
- * Cualquier libro de Física de Partículas de su preferencia

Una digresión sobre cargas

Fuerza eléctrica

Fuerza Gravedad

Una disgresión sobre cargas

Fuerza eléctrica

$$F_E = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right) \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$$F_E = \left(k_e \frac{q_1}{r^2} \right) q_2$$

$$F_E = \left(k_e \frac{q_1}{r^2} \right) q_2 = m_2^i \frac{d^2 x}{dt^2}$$

$$F_E = \left(k_e \frac{q_1}{r^2} \right) \frac{q_2}{m_2^i} = \frac{d^2 x}{dt^2}$$

?

Fuerza Gravedad

$$F_G = G \frac{m_1^g m_2^g}{r^2}$$

$$F_e = G \frac{m_1^g}{r^2} m_2^g$$

$$F_e = \left(G \frac{m_1^g}{r^2} \right) m_2^g = m_2^i \frac{d^2 x}{dt^2}$$

$$F_e = \left(G \frac{m_1^g}{r^2} \right) \frac{m_2^g}{m_2^i} = \frac{d^2 x}{dt^2}$$

$$F_e = \left(G \frac{m_1^g}{r^2} \right) = \frac{d^2 x}{dt^2} = g$$

Richard Feynman dijo

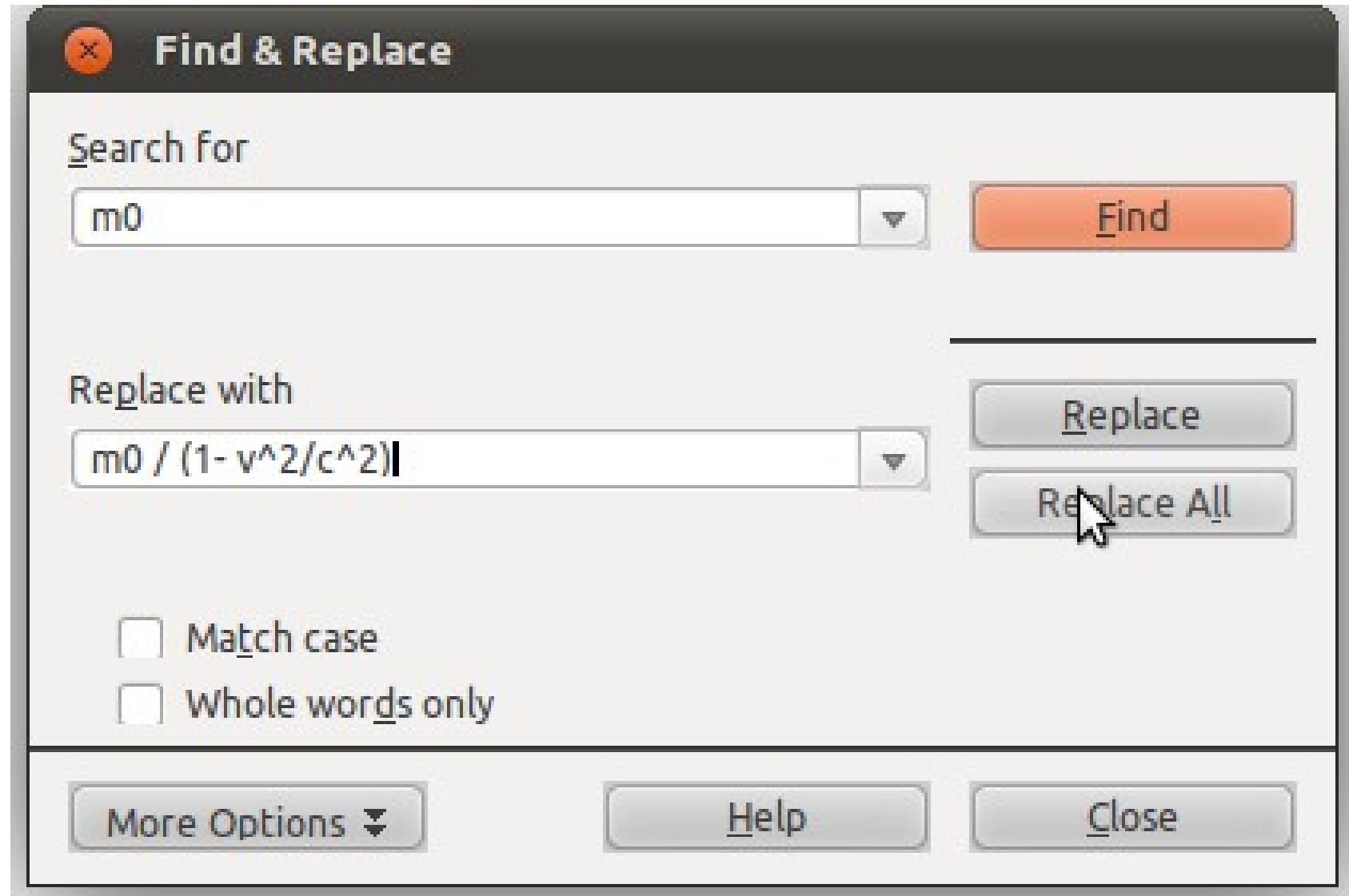
- *“For those who want to learn just enough about it so they can solve problems, that is all there is to the [special] theory of relativity – it just changes Newton’s laws by introducing a correction factor to the mass”*

- Luego:
$$\vec{F} = \frac{d(m \vec{v})}{dt}$$

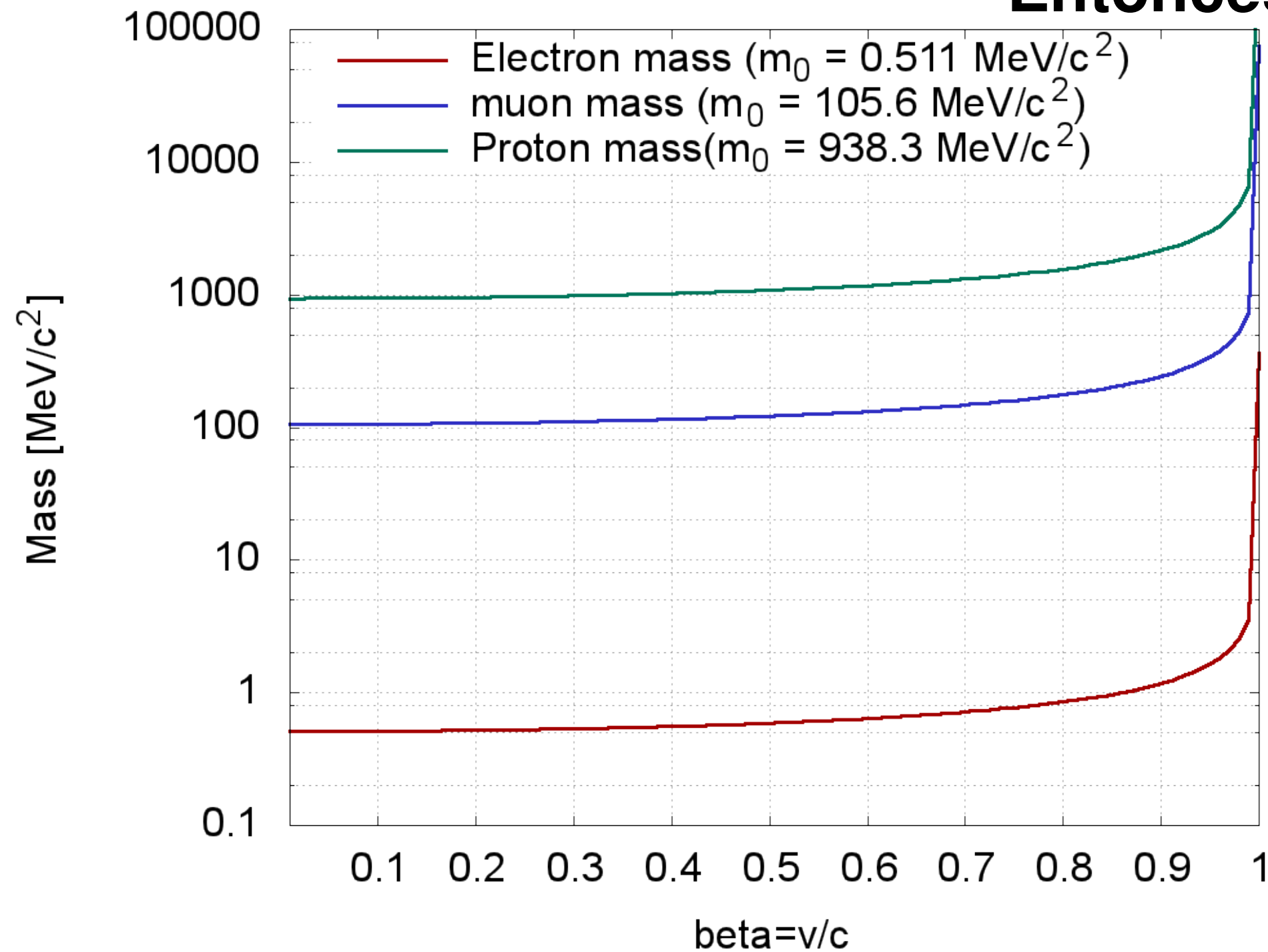
- donde
$$m \rightarrow m = \gamma m_0 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Aprendiendo relatividad en Windows

- Search & replace (CTRL+F)



Entonces...



Desarrollo en serie

- Desarrollemos para $v \rightarrow 0$:

$$m = \gamma m_0 = m_0 \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-1/2} = m_0 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \frac{3}{8} \frac{v^4}{c^4} + \dots \right)$$

- Luego, la famosa fórmula

$$m \approx m_0 + \frac{1}{2} m_0 \frac{v^2}{c^2}$$

$$\rightarrow mc^2 \approx m_0 c^2 + \frac{1}{2} m_0 v^2$$

$$\rightarrow E = mc^2$$



Deme un momento

- Para el impulso, recordamos la receta

$$\vec{p} = \gamma m_0 \vec{v} = m_0 \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-1/2}$$

$$p^2 = \frac{m_0^2 v^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$p^2 c^2 = \frac{m_0^2 v^2 c^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \rightarrow p^2 c^2 = \frac{m_0^2 \frac{v^2}{c^2} c^4}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \rightarrow p^2 c^2 = \frac{m_0^2 \beta^2 c^4}{1 - \beta^2}$$

Otra famosa

- Y ahora

$$p^2 c^2 = \frac{m_0^2 \beta^2 c^4}{1 - \beta^2} + \frac{m_0^2 c^4}{1 - \beta^2} - \frac{m_0^2 c^4}{1 - \beta^2}$$

$$p^2 c^2 = \frac{m_0^2 c^4 (\beta^2 - 1)}{1 - \beta^2} + m_0^2 \gamma^2 c^4$$

$$p^2 c^2 = -m_0^2 c^4 + m^2 c^4$$

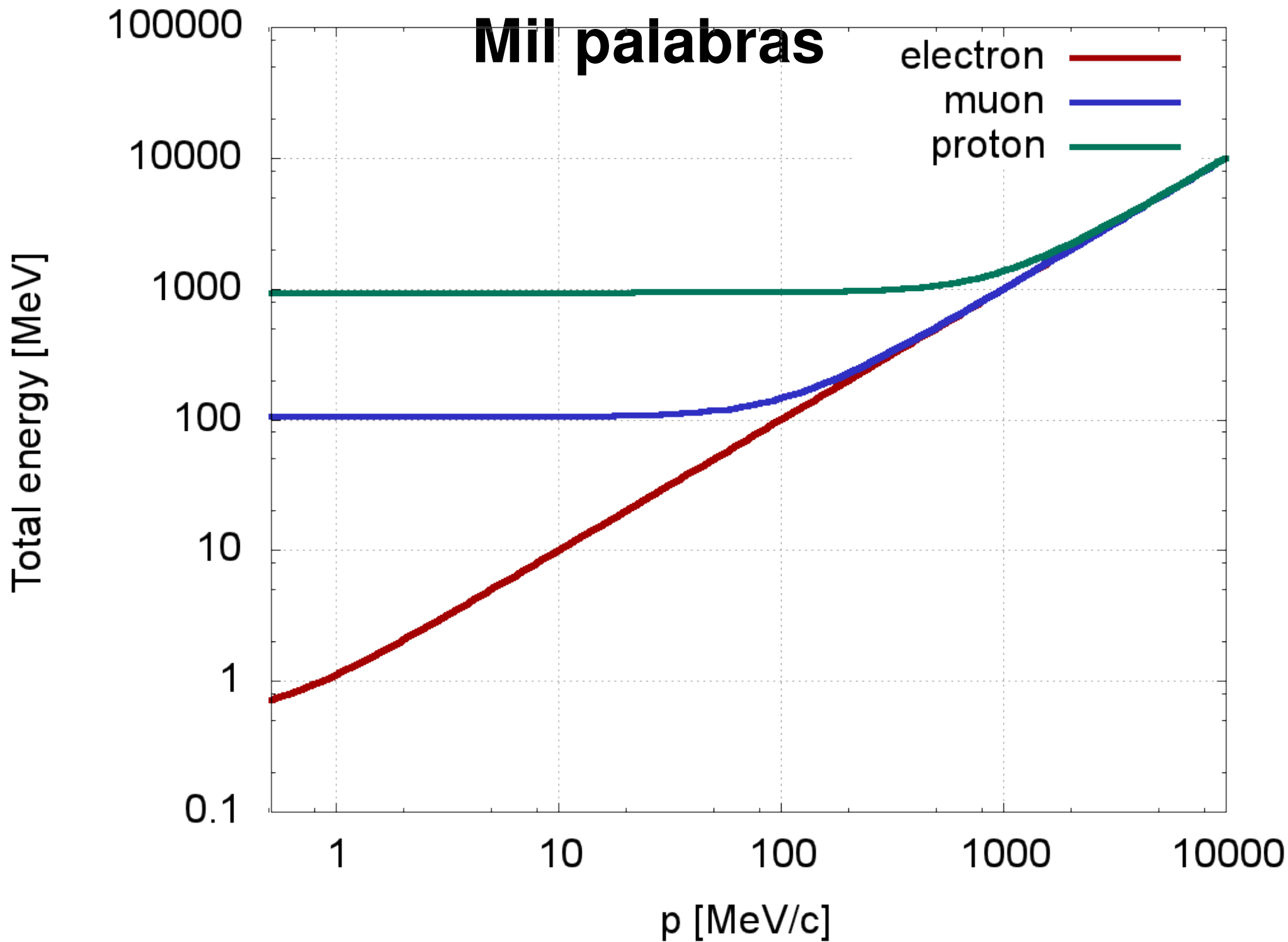
$$p^2 c^2 = -m_0^2 c^4 + E^2$$

$$E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4$$

- Entonces:

$$E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4 \rightarrow E = \sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4}$$

Mil palabras



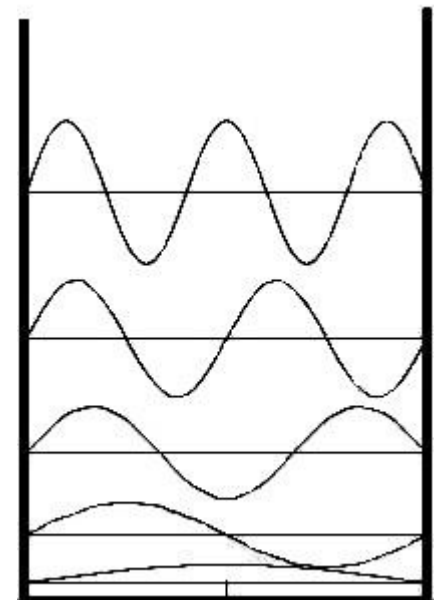
Peeeeero...

- También tenemos

$$E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4 \rightarrow E = \pm \sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4}$$

- La relatividad anticipa estados con energía total negativa... → **PROBLEMAS**
- Y encima son infinitos → **MÁS PROBLEMAS**
- Partícula en una caja

$$E_n = \left(\frac{h^2}{8mL^2} \right) n^2$$



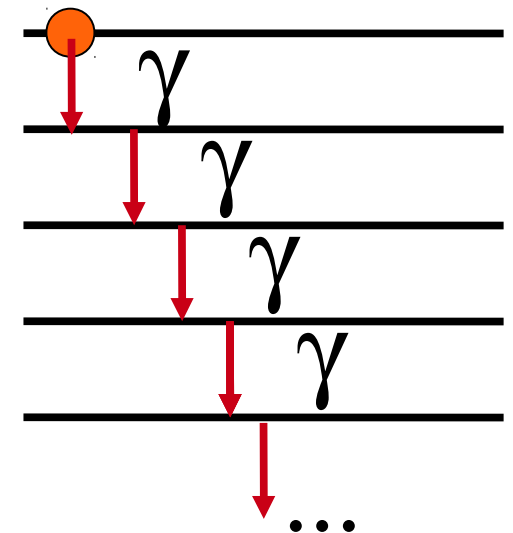
Peeero...

- También tenemos

$$E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4 \rightarrow E = \pm \sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4}$$

- La relatividad anticipa estados con energía total negativa... → **PROBLEMAS**
- Y encima son infinitos → **MÁS PROBLEMAS**
- Aquí no tengo “estado fundamental”

- COLAPSO**

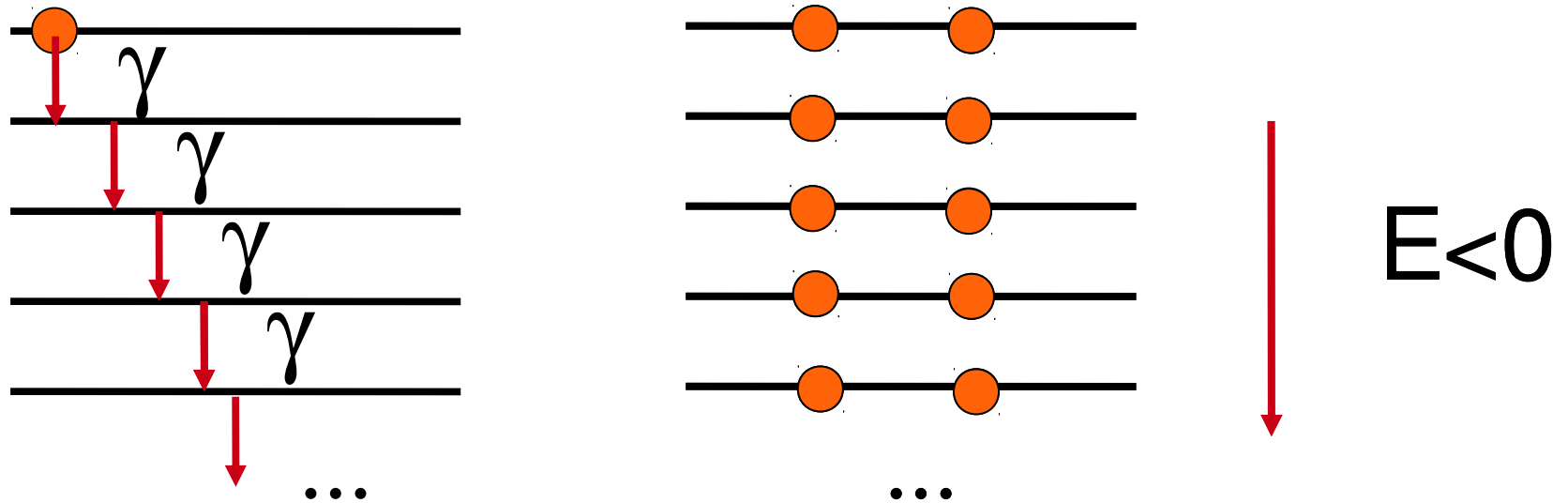


Solución

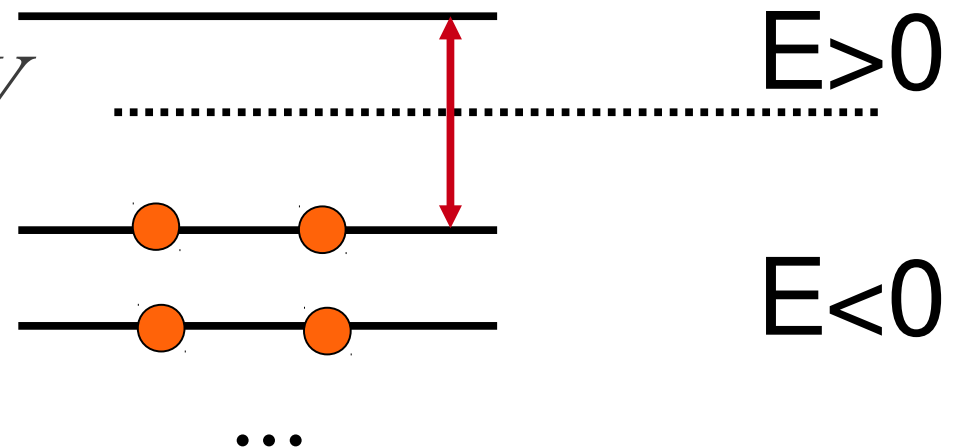
- Dirac (1928) obtiene la versión relativista de la ec. de Schrödinger y observa ese problema
- Propone que todos los estados de energía negativa están ocupados
- Los electrones obedecen el principio de exclusión de Pauli
- Solución: el “vacío” es el estado en el cual todos los estados de energía negativos están llenos

Felicidad

- No hay colapso porque no hay estados vacíos



$$E = 2m_0 c^2 = 1.022 \text{ MeV}$$



$$E = \pm m_0 c^2$$

Algunas cosas

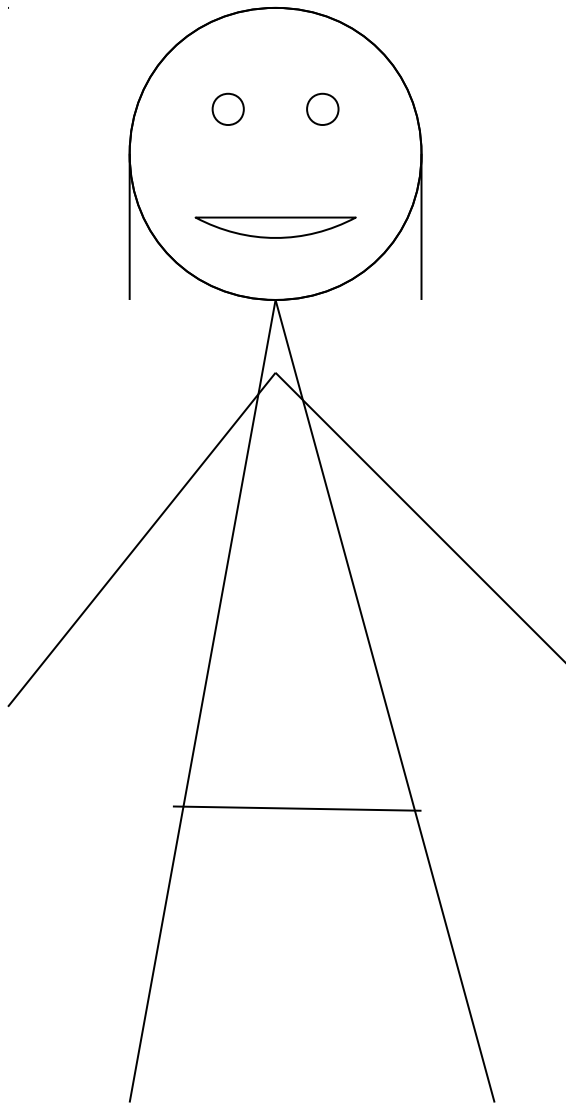
- El espacio está lleno con infinitas partículas
- Energía infinita
- Energía de punto 0 (como el oscilador armónico)

No olvidar que son Modelos

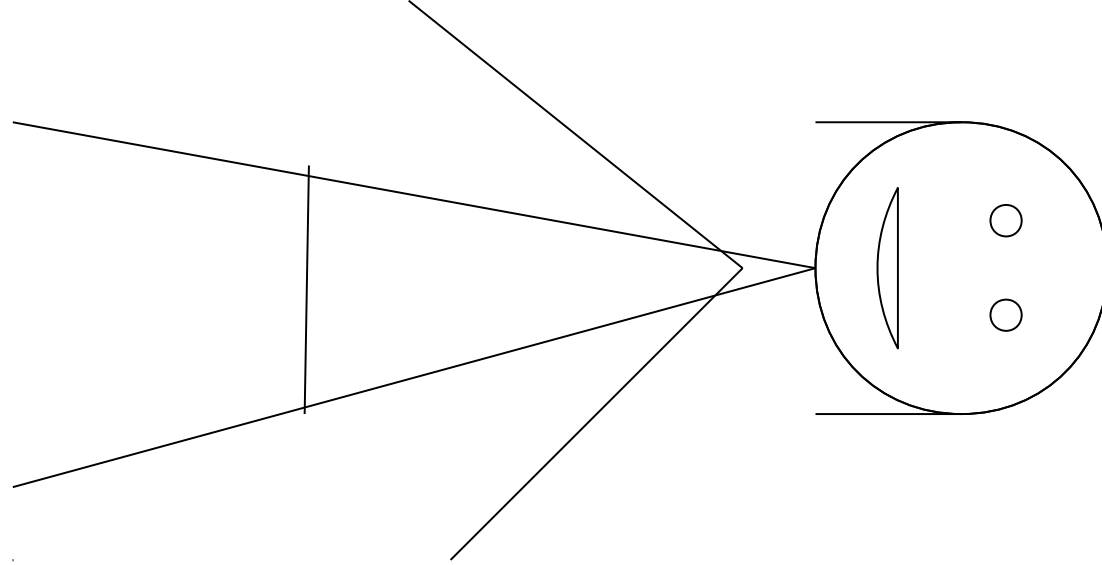
Un modelo representa a esto...



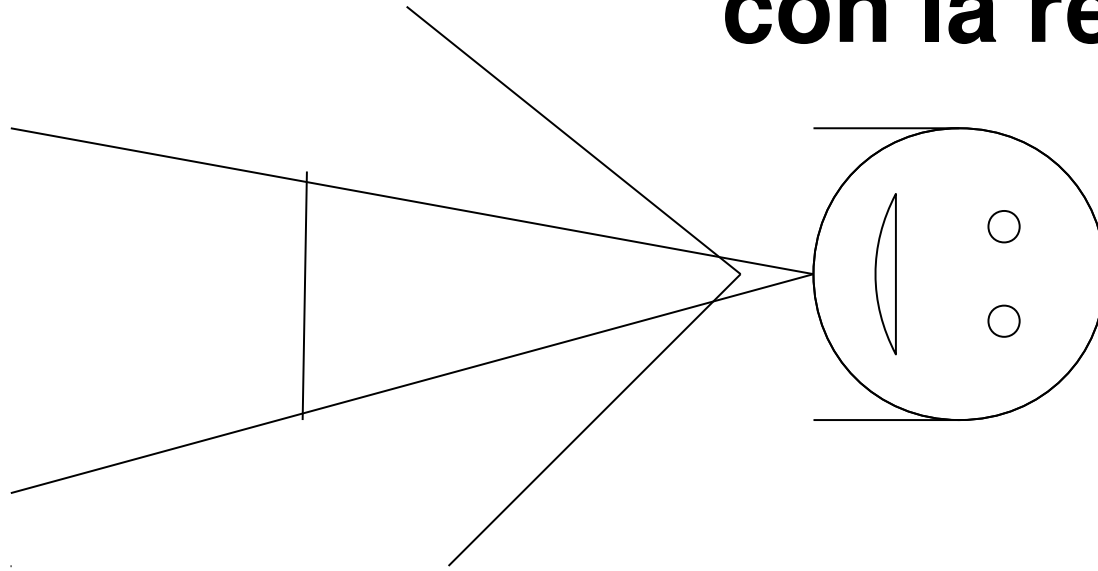
... con esto: orden cero



Bueno, en realidad esto... (orden 1)

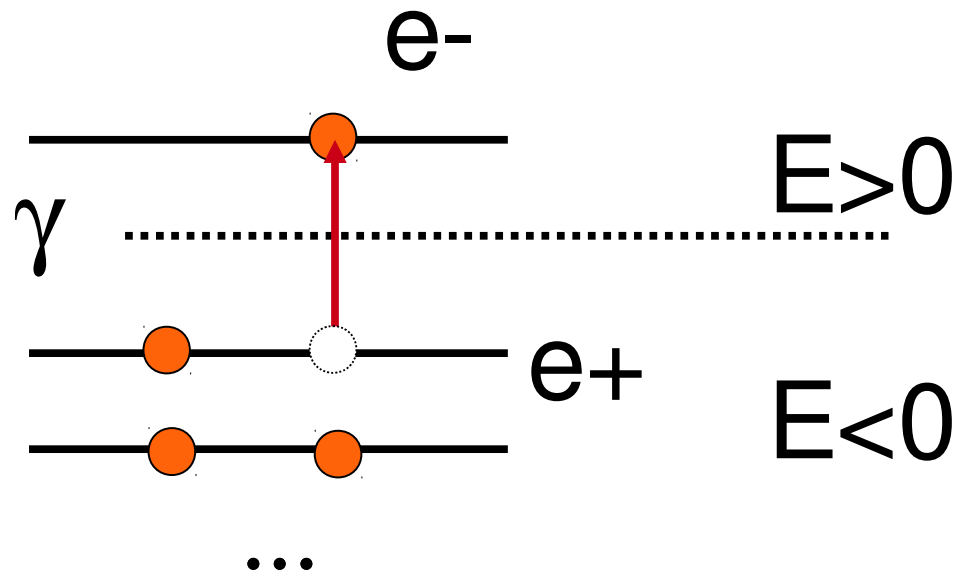


**El problema es al contrastar al modelo
con la realidad....**

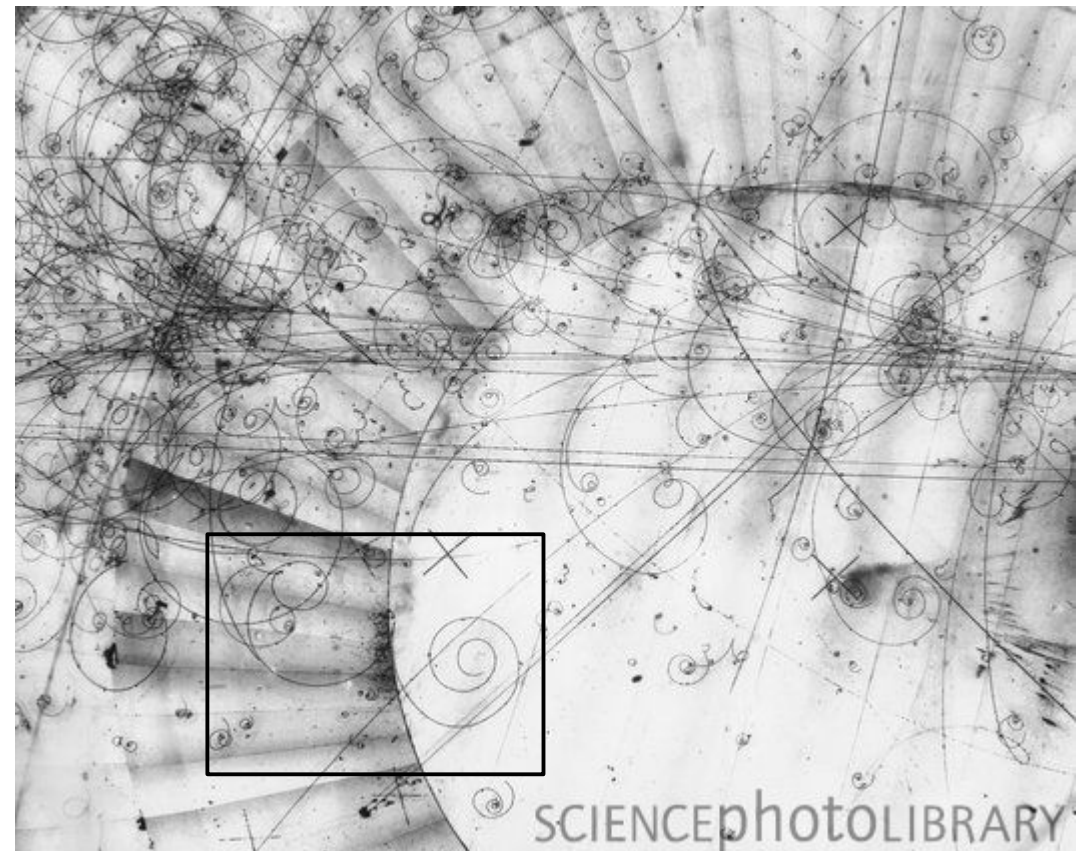


Materia-Antimateria

- En una interacción EM (scattering) es posible sacar un electrón del mar
- El “hueco” se ve como un electrón positivo



$$E_{\gamma} \geq 1.022 \text{ MeV}$$



En esa época

- Se conocían cuatro partículas:
 - Protón (+)
 - Electrón (-)
 - Fotón (0) ← interacciones cargadas
 - Neutrón (0)
- Si existía el antielectrón, ¿por qué no un antiprotón?
- La idea del antineutrón es más compleja (sin carga)

El modelo atómico

- Un simple modelo atómico
- Radio atómico: $a_0 \sim 53 \text{ pm} = 53000 \text{ fm}$
- Radio núcleo: $f_0 \sim 1.2 \text{ fm}$
- Relación: $a_0/f_0 \sim 44200$
- Núcleo 4 mm \rightarrow electrones 177 m
- **La naturaleza es esencialmente “vacío”**



El núcleo es estable

- Tiene que haber una fuerza más fuerte que la fuerza eléctrica

$$F_E = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right) \frac{e^2}{f_0^2}$$

$$F_E = 160 \text{ N}$$

$$F_E = 1.2 \times 10^{36} F_G$$

Ayuda: En general el núcleo tiene más protones que neutrones

$$A = Z + N$$

$$N \geq Z$$

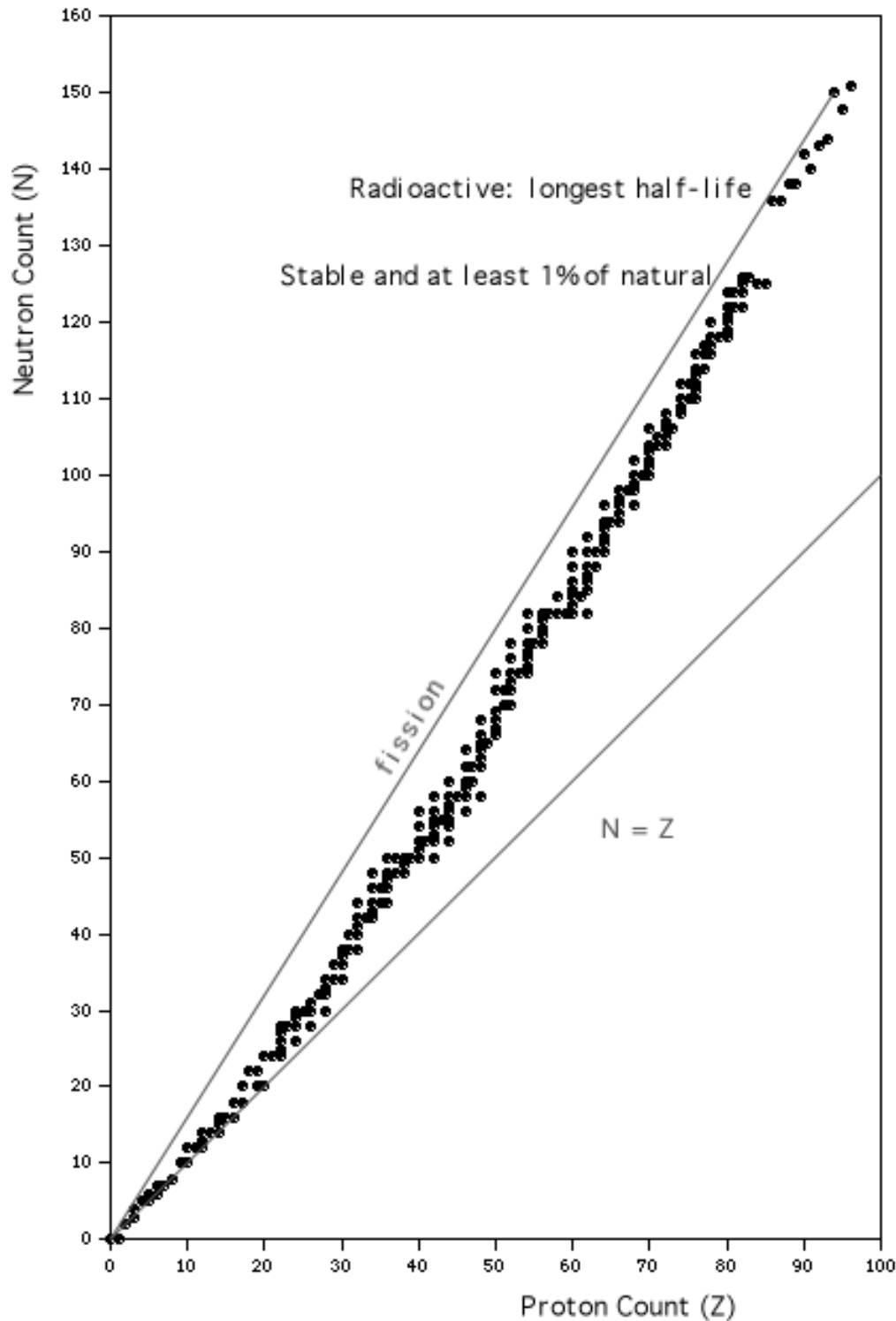


Tabla de nucléidos

- $F_E \sim Z^2$
- Neutrones sin carga
- ${}^1_1\text{H}$ ${}^4_2\text{He}$ ${}^{238}_{92}\text{U}$
- Los neutrones ayudan a la cohesión

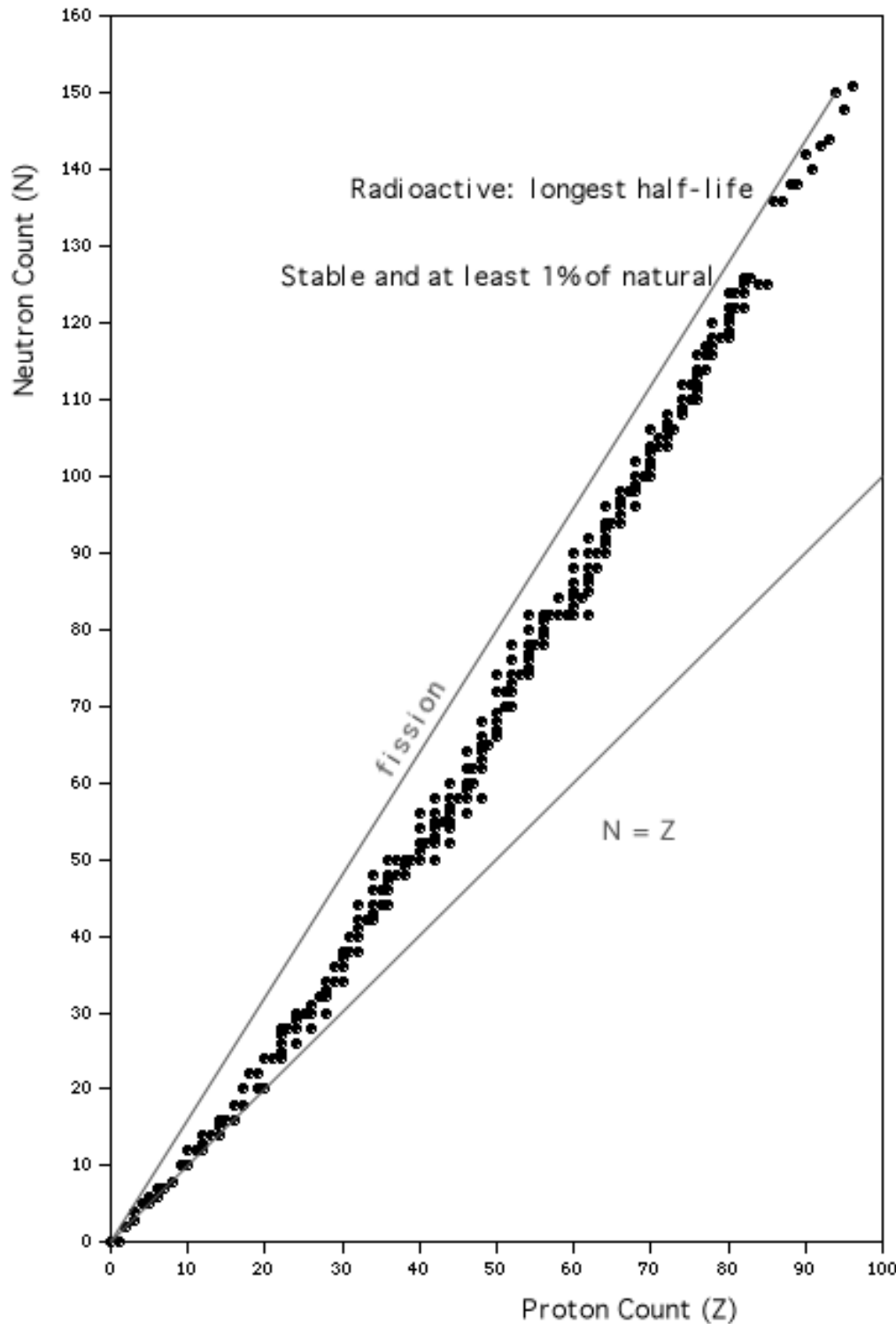


Tabla de nucléidos

- $F_E \sim Z^2$
- Neutrones sin carga
- ${}^1_1\text{H}$ ${}^4_2\text{He}$ ${}^{238}_{92}\text{U}$
- Los neutrones ayudan a la cohesión
- Nueva fuerza para mantener unidas cosas que no quieren estarlo:

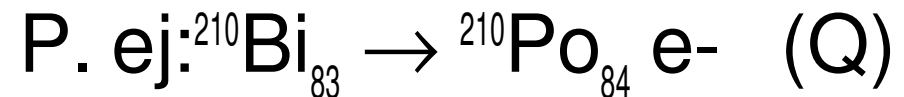
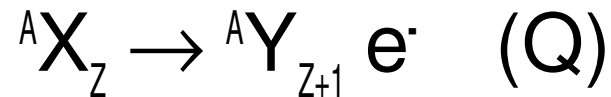
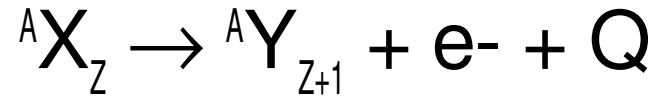
Matrimonio

Fuerza Fuerte

Decaimiento beta

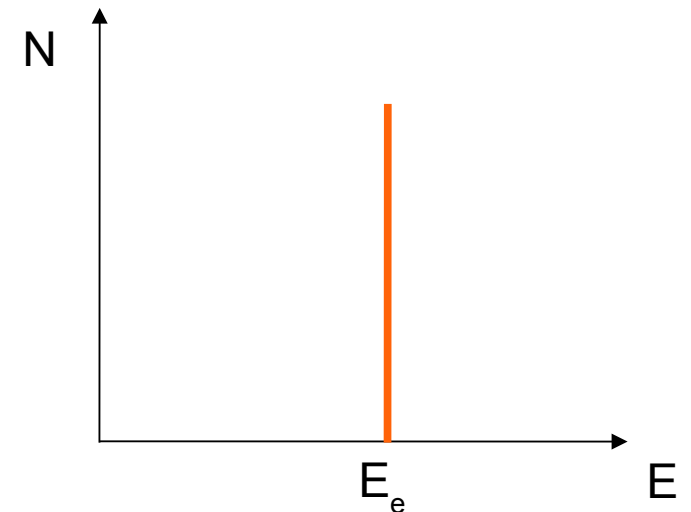
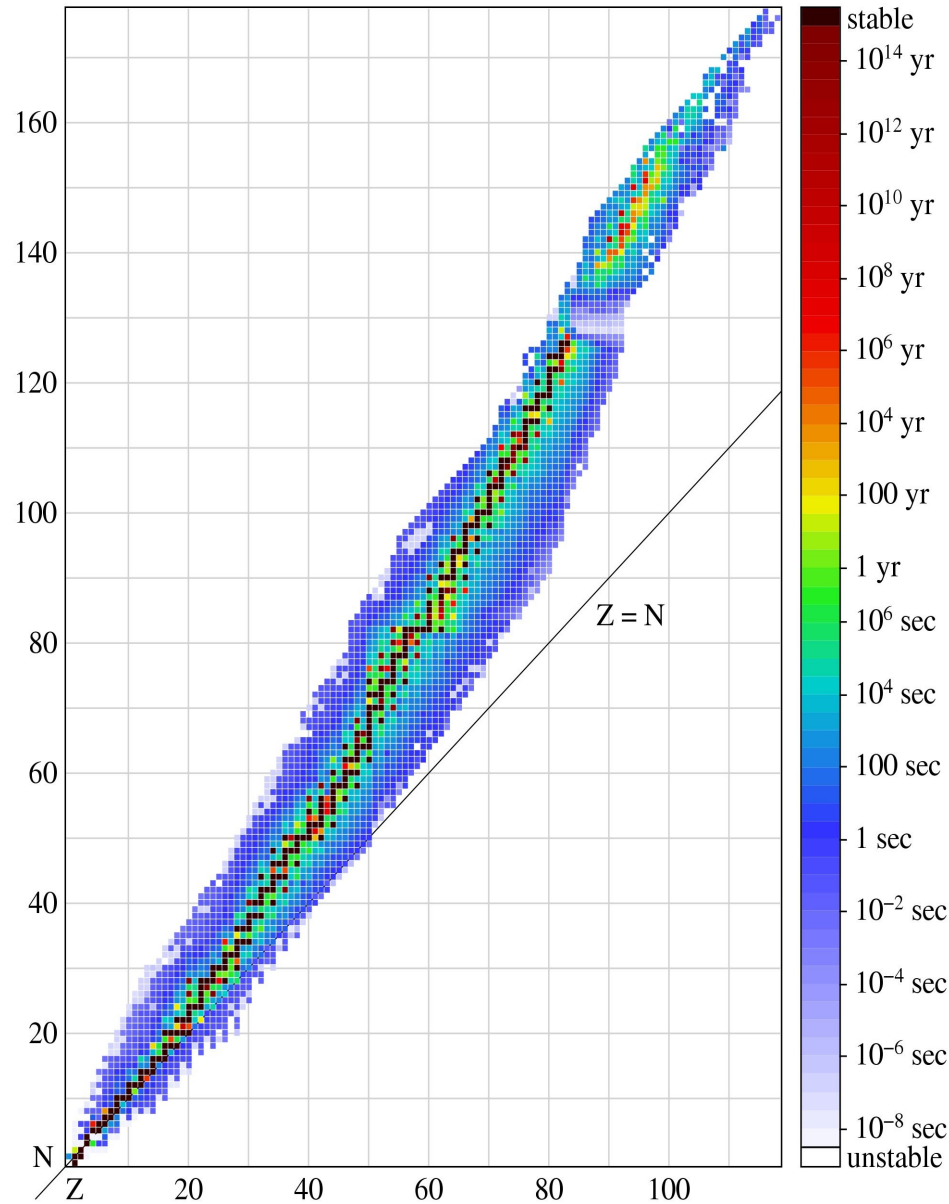
Emisión radioactiva de electrones

- Reacción nuclear

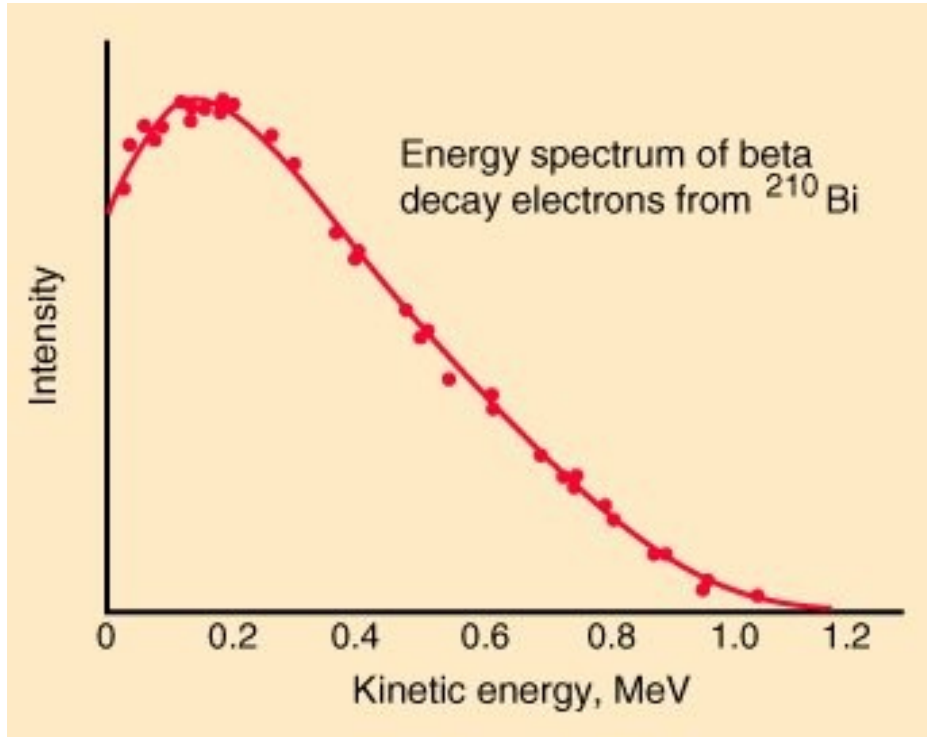


$$m_{Bi} c^2 = m_{Po} c^2 + m_e c^2 + Q$$

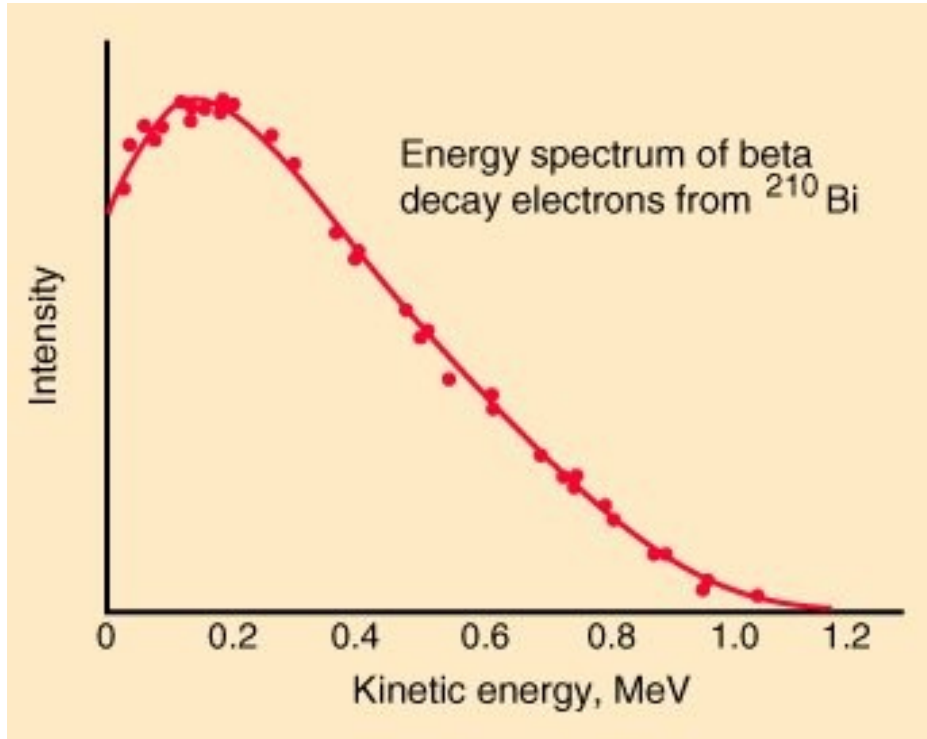
$$Q = (m_{Bi} - m_{Po} - m_e) c^2 \simeq E_e$$



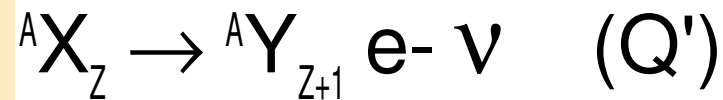
La medición



La medición



- Oops...
- Bohr: La energía no se conserva
- Pauli: La energía se conserva si existe otra partícula:



$$Q' = (m_{\text{Bi}} - m_{\text{Po}} - m_e - m_\nu) c^2$$

$$Q' \simeq E_e + E_\nu$$

pero dado que $Q' \sim Q$, $m_\nu \sim 0$

Tenemos un problema → inventamos una partícula

- Decaimiento beta (libera un electrón)

$$n \rightarrow p^+ e^- \nu (Q)$$

- Beta inverso (libera un positrón)

$$(Q) p^+ \rightarrow n \nu e^+$$

- Lo más natural es:

$$n \rightarrow p^+ e^- \nu + Q$$

$$p^+ \rightarrow n \nu e^+ - Q$$

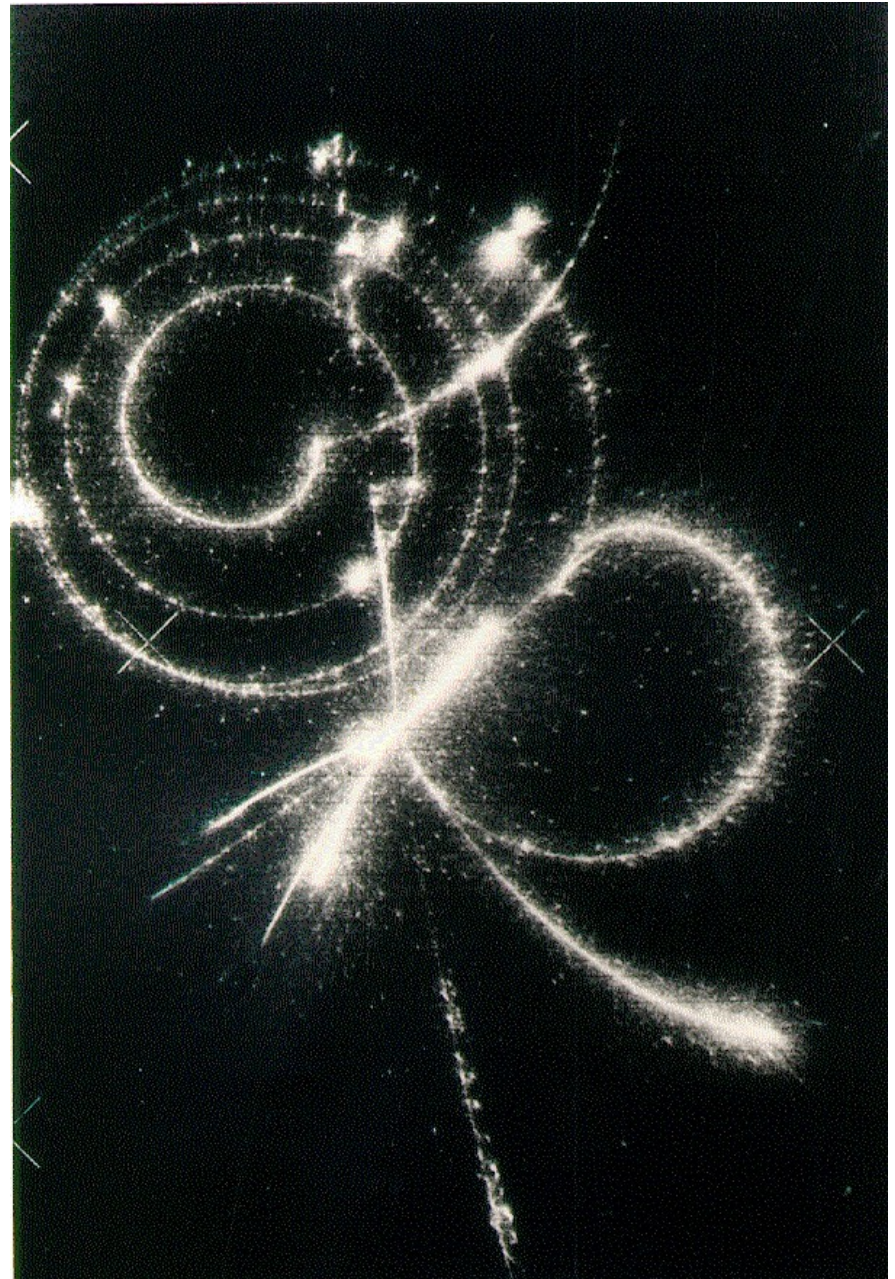
Mientras tanto, en la atmósfera...

- ... caen rayos cósmicos
- Anderson descubre una partícula $m/q \sim 200 m_e/e$
 $\rightarrow m \sim 100 \text{ MeV}$
- Luego, se observa una nueva

$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm}$$

que también violaba la E

$$\pi^{-} \rightarrow \mu^{-} \nu$$



Probemos esto

- Sección eficaz neutrinos

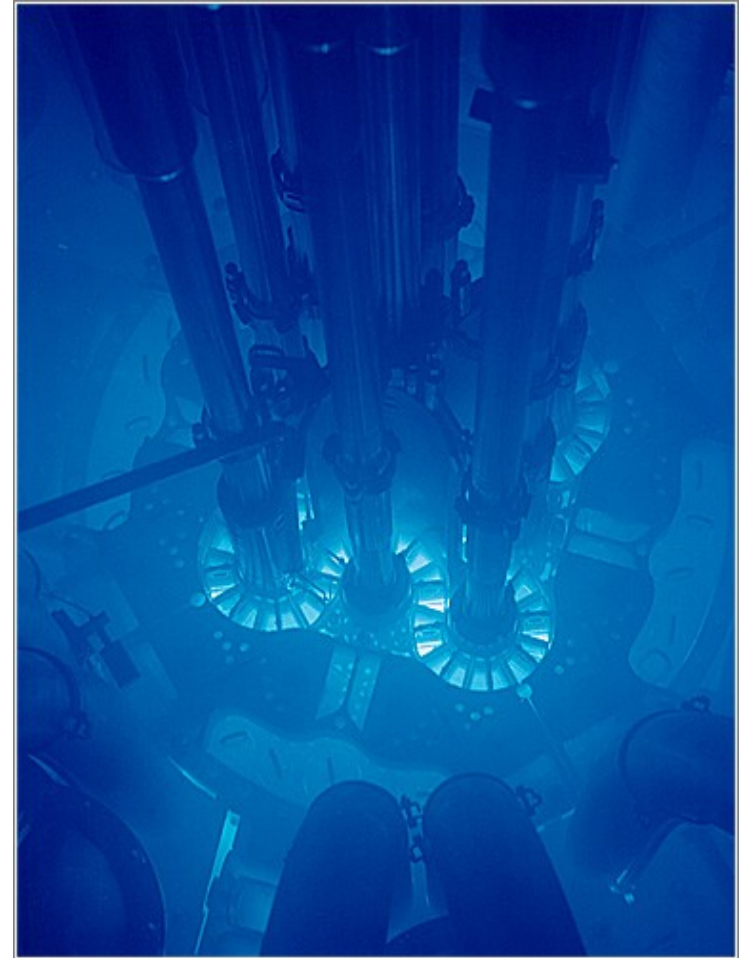
$$\sigma_{\nu} \simeq 10^{-44} \text{ cm}^2$$

~250 años luz de agua
($\sim 2 \times 10^{20} \text{ cm}$)

- Usemos 10^{20} neutrinos
en 1 cm de agua

$$p^+ \rightarrow n e^+ \nu$$

$$p^+ \rightarrow n \mu^+ \nu$$



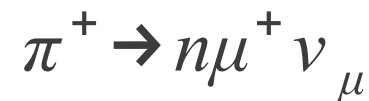
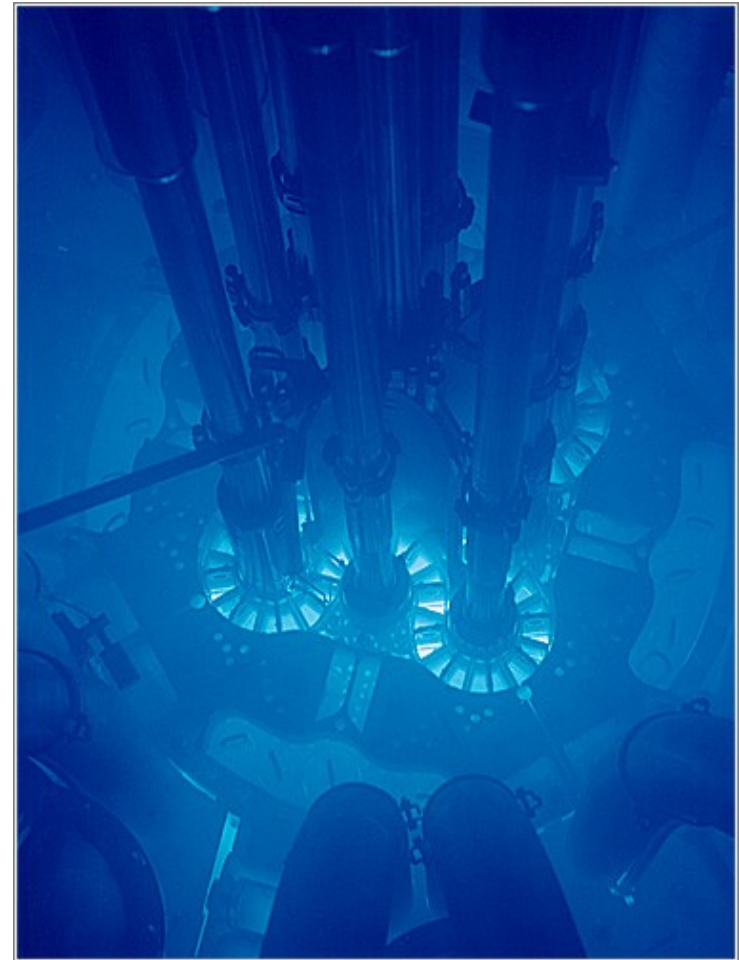
Probemos esto

- Sección eficaz neutrinos

$$\sigma_{\nu} \simeq 10^{-44} \text{ cm}^2$$

~250 años luz de agua
($\sim 2 \times 10^{20} \text{ cm}$)

- Usemos 10^{20} neutrinos
en 1 cm de agua



- Tiempos “largos”: Corto

Hasta aquí tenemos:

- Sin fuerza fuerte: $e, \mu, \nu_e, \nu_\mu, \leftarrow$ Leptones
- Con fuerza fuerte: p, n, π, \leftarrow Hadrones
- Y sus antipartículas. **Total: 14** (empezamos con **2**)
- Fuerzas: $\gamma, \pi, W, (G) \leftarrow$ Mediadores (Calibre)

Con los aceleradores



Con los aceleradores



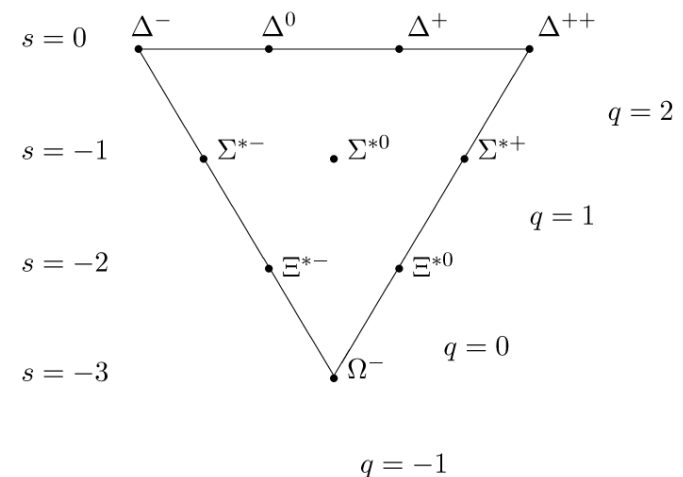
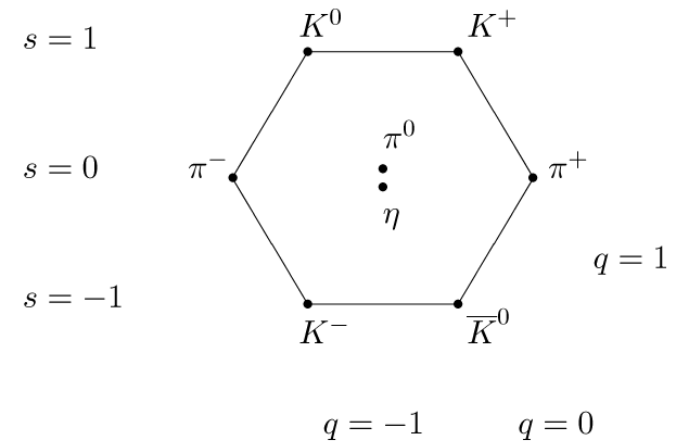
Con los aceleradores



Hoy se conocen ~ 1000 hadrones

Los hadrones no pueden ser elementales

- Luego, debe haber partículas más simples
- Modelo octuple (Gell-mann, 1961)
- Quarks:
 - Se combinan para formar los hadrones
 - Tienen carga fraccionaria
 - Dos por familia



Quarks, primera generación

- Hadrones:
 - 3 quarks: bariones
 - 2 quarks: mesones
- Primera generación
 - “up” y “down”
 - Carga eléctrica
 - u: +2/3 e
 - d: -1/3 e
 - masa
 - m_u : 1.7-3.3 MeV
 - M_d : 4.1-5.8 MeV

- Bariones:

$$p : (uud)$$

$$n : (udd)$$

$$\bar{p} : (\bar{u} \bar{u} \bar{d})$$

- Mesones:

$$\pi^+ : (u \bar{d})$$

$$\pi^- : (\bar{u} d)$$

$$\pi^0 : (u \bar{u} + d \bar{d})$$

$$u \bar{u} + d \bar{d}$$

Quarks, the next generation

- Segunda generación
 - “charm” y “strange”
 - Carga eléctrica
 - $c: +2/3 e$
 - $s: -1/3 e$
 - masa
 - $m_c: (1.27 \pm 0.07) \text{ GeV}$
 - $m_s: (101 \pm 29) \text{ MeV}$
- Tercera generación
 - “top” y “bottom”
 - Carga eléctrica
 - $t: +2/3 e$
 - $b: -1/3 e$
 - masa
 - $m_t: (172 \pm 2) \text{ GeV}$
 - $M_b: (4.19 \pm 0.18) \text{ GeV}$



Interacción fuerte: carga de “color”

- Fuerzas y cargas

- G: una carga (masa)
- EM: dos cargas (+,-)
- W: “una” carga (w)
- FF: tres cargas (r,g,b)



- El color no se observa: la naturaleza es “blanca”
- Bariones: (qqq) o (qq qq qq)/3
- Mesones: (qq) (nota: el magenta es el antiverde)
- 8 Gluones: (rojo antiverde), (azul antirrojo), ...

¿y los leptones?

- Tenemos 3 generaciones de quarks
- 3 generaciones de leptones:
 - e, ν_e
 - μ, ν_μ
 - τ, ν_τ
- $m_\tau = 1776.99 \text{ MeV}$

La foto de la familia

THE STANDARD MODEL

Fermions			Bosons	
Quarks	u up	c charm	t top	γ photon
	d down	s strange	b bottom	Z Z boson
Leptons	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson
	e electron	μ muon	τ tau	g gluon
			Higgs [*] boson	

*Yet to be confirmed

Source: AAAS

Para terminar, el Higgs

THE HIGGS MECHANISM

credit: courtesy of CERN

① TO UNDERSTAND THE HIGGS MECHANISM, IMAGINE THAT A ROOM FULL OF PHYSICISTS QUIETLY CHATTERING IS LIKE SPACE FILLED ONLY WITH THE HIGGS FIELD.



A WELL KNOWN SCIENTIST, ALBERT EINSTEIN, WALKS IN, CREATING A DISTURBANCE AS HE MOVES ACROSS THE ROOM, AND ATTRACTING A CLUSTER OF ADMIRERS WITH EACH STEP.

THIS INCREASES HIS RESISTANCE TO MOVEMENT - IN OTHER WORDS, HE ACQUIRES MASS, JUST LIKE A PARTICLE MOVING THROUGH THE HIGGS FIELD.

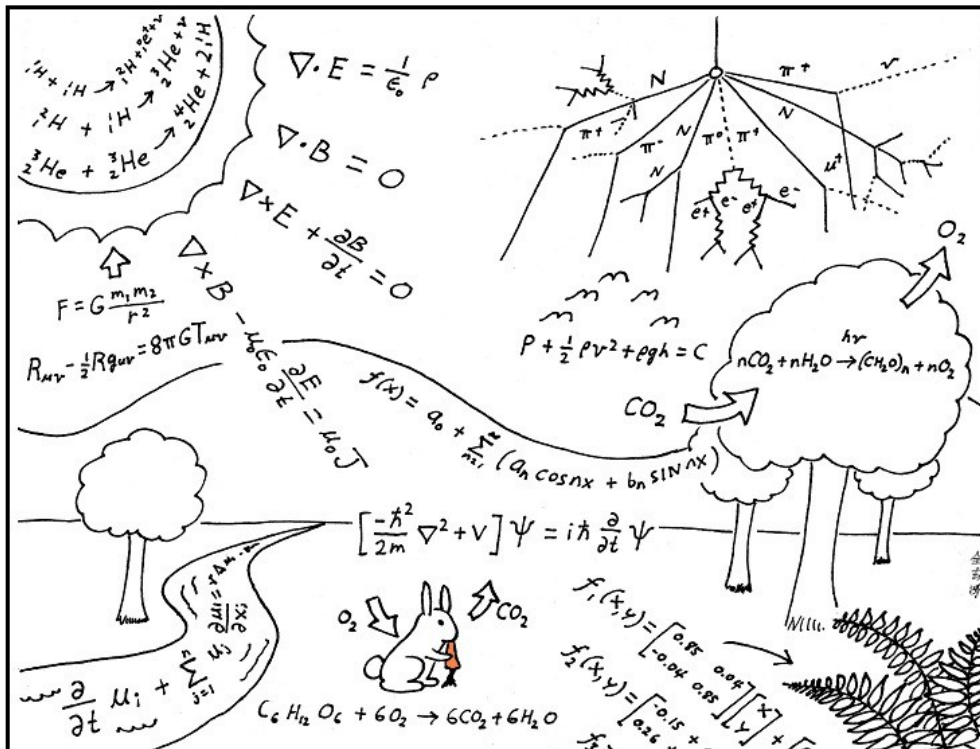
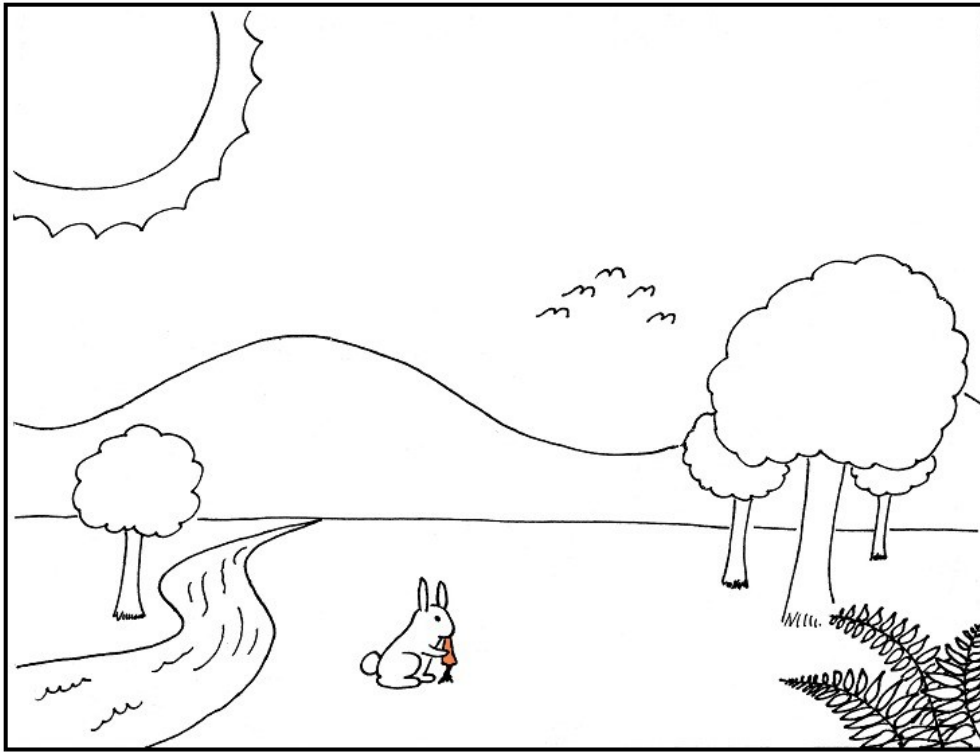


IF A RUMOUR CROSSES THE ROOM ...



IT CREATES THE SAME KIND OF CLUSTERING, BUT THIS TIME AMONG THE SCIENTISTS THEMSELVES. IN THIS ANALOGY, THESE CLUSTERS ARE THE HIGGS PARTICLES.

No se olviden



This is how scientists see the world.