

Universidad Nacional de Río Negro

Int Partículas, Astrofísica & Cosmología - 2021

- **Unidad** 01 – El modelo estándar
- **Clase** U01 C02 - 02/16
- **Fecha** 11 Ago 2021
- **Cont** Cuántica y relatividad, 1ra parte
- **Cátedra** Asorey





Puntos de contacto

- **16 encuentros semanales, desde el 04/Ago hasta el 17/Nov**
 - **Google Meet:** Miércoles 16 a 20, disponibles en YouTube
 - **Trabajo en casa:** 3 horas semanales (mínimo)
 - **Campus Bimodal UNRN**
- **Bibliografía**
 - **Depende de la unidad, ver en aula bimodal**
 - **Apuntes de clase**
 - **Wikipedia**

- **No se toman parciales → evaluación continua**
 - ③ Participación activa en los encuentros semanales (30%)
 - ③ Auto-evaluación conceptual semanal (se completa antes de la próxima clase) (30%)
 - ③ Entregas de trabajos mensuales (fecha máxima de entrega de todos los trabajos: 12/Nov/2021) y charla tema a elección (40%)

Nota: ③ significa que es condición necesaria para la promoción



Aprobación y Promoción

- **Promoción ®:**

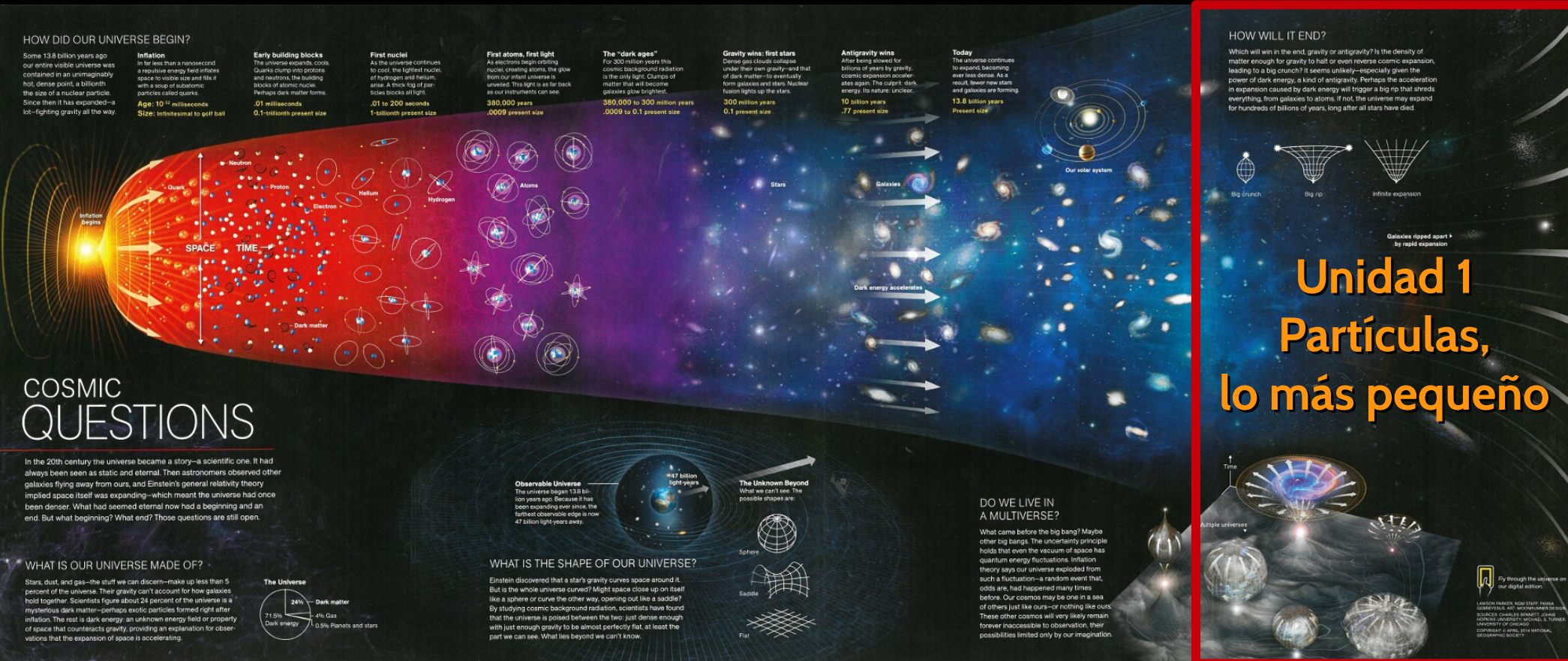
- Si habiendo cumplido las condiciones de regularización y promoción, la nota de evaluación continua es 8 o más
→ **Promoción de la materia con la nota de la evaluación continua**

ó

- **Aprobación:**

- Instancia de final en las fechas previstas por la Universidad.
- La nota final de la materia es:
 $0.7 \times \text{nota evaluación continua} + 0.3 \times \text{nota del final}$

Contenidos: un viaje en el tiempo y el espacio



U1: Partículas, lo más pequeño

4 encuentros, del 04/Ago al 25/Ago

- **Dinámica Relativista.**
- **Física de partículas**
 - **Partículas fundamentales: leptones, hadrones, bosones mensajeros**
- **El modelo estándar**
 - **Interacciones fundamentales**
 - **Simetrías y leyes de conservación**
- **Trabajo unidad → fecha máxima de entrega 12/Nov**
Para el viernes 13/Ago → proponer tema (campus)



ATLAS
EXPERIMENT
Candidate Event:
 $pp \rightarrow H(\rightarrow b\bar{b}) + W(\rightarrow \mu\nu)$
Run: 338712 Event: 335908183
2017-10-19 23:31:18 CEST



Dilatación temporal y Contracción espacial

- El lapso de tiempo entre dos eventos no es invariante de un observador a otro en distintos marcos de referencia

$$\Delta t' = \gamma \Delta t \quad \text{para eventos} \quad \Delta x = 0$$

“el reloj que se mueve es más lento”

- La distancia espacial entre dos eventos no es invariante de un observador a otro en distintos marcos de referencia

$$\Delta x' = \frac{\Delta x}{\gamma} \quad \text{para eventos} \quad \Delta t' = 0$$

“la regla que se mueve es más corta”



Tiempo propio

- Dado que cada marco de referencia tiene su propio tiempo, **podemos definir un marco de referencia adherido a un objeto en movimiento.**
- **El tiempo de ese marco es el tiempo que “percibe” un observador que se mueve junto con el objeto.**
Llamaremos a este marco “**comóvil**”.
- El tiempo del marco comóvil es el tiempo propio: es independiente de las coordenadas.

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dr^2 = ds'^2 = c^2 d\tau^2$$

Tiempo propio

$$\Rightarrow c^2 dt^2 - dr^2 = c^2 d\tau^2$$

$$dt = \gamma d\tau$$



Hasta aquí...

- Los postulados de Einstein implican cambios profundos en la concepción de la Naturaleza.
 - Estos afectan nuestra percepción de distancia y lapso temporal, de espacio y tiempo.
- Las transformaciones de Lorentz indican como transforman las leyes de la física entre dos marcos de referencia inerciales.
 - Son las transformaciones válidas entre marcos de referencia.
- La mecánica Newtoniana es una aproximación válida para velocidades bajas respecto a la velocidad de la luz.
 - ¿Cómo puede ser generalizada?

A composite image showing the cosmic microwave background on the left and particle tracks on the right.

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

$$m \rightarrow m\gamma = \frac{m}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

La relatividad es fácil

Find & Replace

Find: ▼

☐ Match case ☐ Whole words only

Replace: ▼

▼ **Other options**

☐ Current selection only ☐ Replace backwards

☐ Similarity search

☒ Diacritic-sensitive

La conservación de p es un principio básico

- Alberto lo dijo: al derivar, el tiempo depende del marco de referencia:

$$\text{Clásico: } \vec{p} = \frac{d}{dt}(m \vec{r}) \quad \text{y} \quad \vec{p}' = \frac{d}{dt}(m \vec{r}')$$

$$\text{Correcto: } \vec{p} = \frac{d}{dt}(m \vec{r}) \quad \text{y} \quad \vec{p}' = \frac{d}{dt'}(m \vec{r}')$$

- Y como todos los marcos son equivalentes, ¡podemos usar el marco comovil!

dado que: $\Delta \tau = \gamma \Delta t$

$$\frac{dr}{d\tau} = \gamma \frac{d\vec{r}}{dt}$$

Recordar a Feynmann:

$$\vec{p} = m \gamma \frac{d\vec{r}}{dt} = m(\gamma \vec{v})$$

**Cant. de movimiento
relativista**

$$\vec{p} = \frac{d}{d\tau} m(\tau) \vec{r}(\tau)$$

Una nueva magnitud conservada

- Una nueva magnitud conservada surge naturalmente:

$$E = \gamma m c^2$$

Energía total

- A bajas energías, si $v \ll c$, obtenemos la visión clásica:

$$E = \gamma m c^2 \simeq m c^2 + \frac{1}{2} m v^2$$

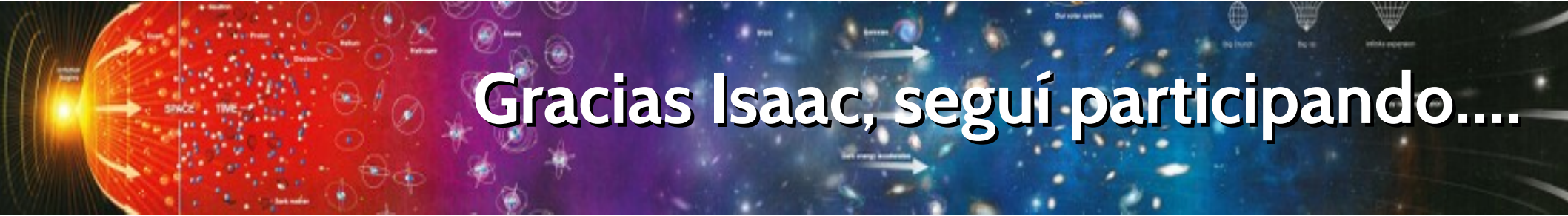
Energía cinética clásica

Equiv. masa energía

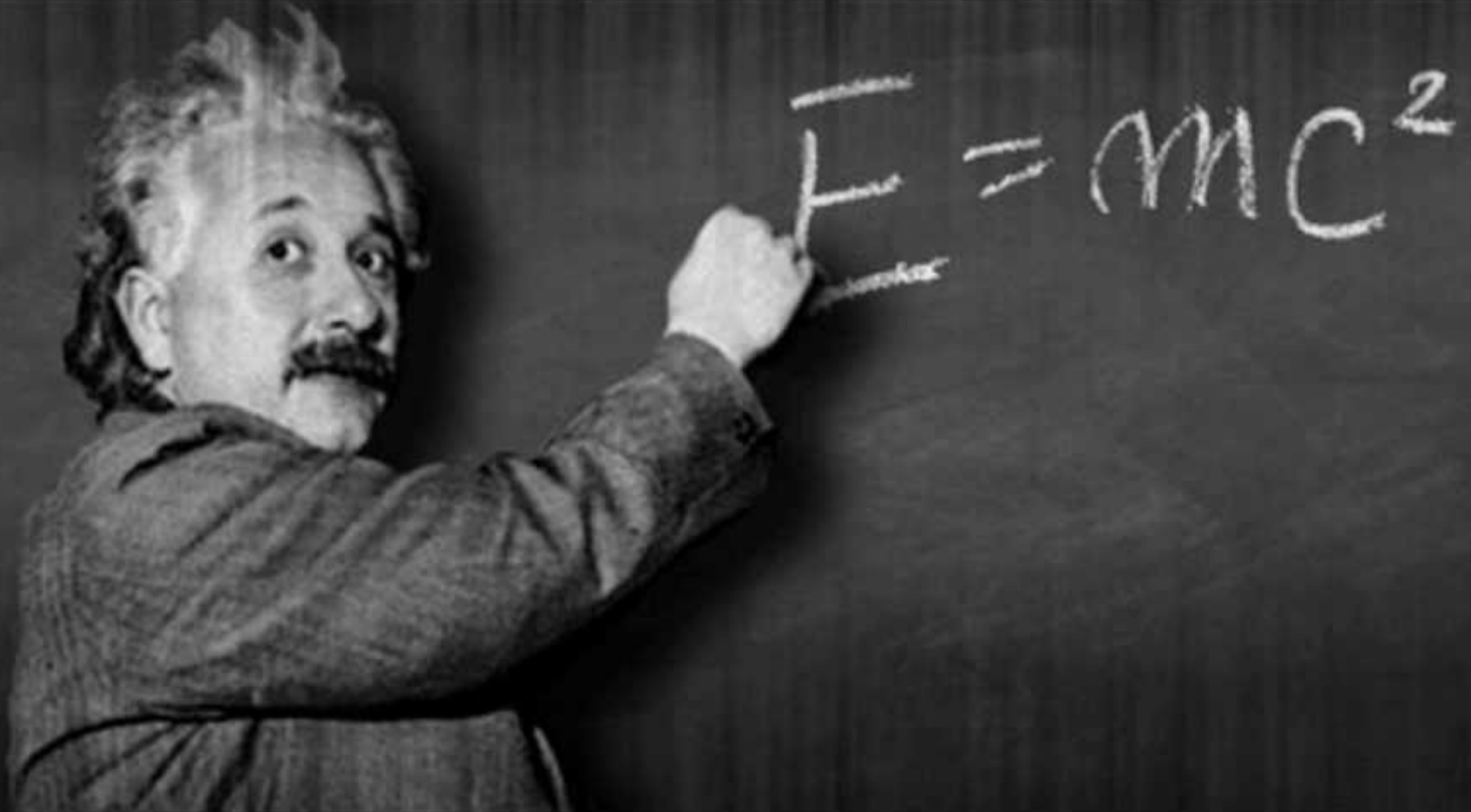
- En general, y en ausencia de otras interacciones:

$$E_K \equiv E - m c^2 = (\gamma - 1) m c^2$$

**Energía cinética
(en ausencia de otras
interacciones)**



Gracias Isaac, seguí participando....



Un nuevo invariante

Cant. de momento relativista: $\vec{p} = \gamma m \vec{v}$

Energía total relativista: $E = \gamma m c^2$

Elevaron al cuadrado: $E^2 = \gamma^2 m^2 c^4$ (1)
 $p^2 = \gamma^2 m^2 v^2 \Rightarrow p^2 c^2 = \gamma^2 m^2 v^2 c^2$ (2)

Restando (1) - (2):

$$E^2 - p^2 c^2 = \gamma^2 m^2 c^4 - \gamma^2 m^2 c^2 v^2$$

Sacando factor común: $E^2 - p^2 c^2 = \gamma^2 m^2 c^4 \left(1 - v^2/c^2\right) = \gamma^2 m^2 c^4 \left(1 - \beta^2\right)$

$$\Rightarrow E^2 - p^2 c^2 = \gamma^2 m^2 c^4 \cdot \frac{1}{\gamma^2}$$

$$\Rightarrow \boxed{E^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4}$$

invariante relativista.
(No depende del Sist. de ref).



Resumen hasta aquí

- Cantidad de movimiento relativista (correcto siempre):

$$\vec{p} = \gamma m \vec{v}$$

- Energía relativista (correcta siempre):

$$E = \gamma m c^2$$

- Un nuevo invariante relativista:

$$E^2 - (p c)^2 = (m c^2)^2$$

**Invariante
relativista**



¿y si no la partícula no tiene masa?

- ¡No importa, tiene energía y tiene cantidad de movimiento!

$$m=0 \rightarrow E^2 - (pc)^2 = (mc^2)^2 \Rightarrow E^2 - (pc)^2 = 0$$

**Cantidad de
movimiento de
partículas sin masa**

$$E = pc$$

- Por ejemplo, un fotón violeta:

$$\lambda = 420 \text{ nm} \rightarrow E = hc/\lambda = 0.473 \text{ aJ (attojoules, atto=10}^{-18}\text{)}$$

$$\rightarrow p = 1.58 \times 10^{-27} \text{ kg m/s}$$

Comentario sobre unidades

- Es conveniente trabajar en otro sistema de unidades
- 1 eV es la energía ganada por un electrón en una diferencia de potencial de 1 V

$$E = qV \rightarrow E = (1.602 \times 10^{-19} \text{ C})(1 \text{ V}) \rightarrow E = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

electronvolt

$$\Rightarrow 1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

meV

eV

keV

MeV

GeV

TeV

PeV

EeV

Microndas

R X

Partículas

R.C. Gal

Visible

Gamma

C. Galáctico

R.C.E.G.



Nuevas unidades

Magnitud	Ecuación	Unidad
Energía	E	eV
Cant. de movimiento	$p = E/c$	eV/c
Masa	$m = E / c^2$	eV/c ²

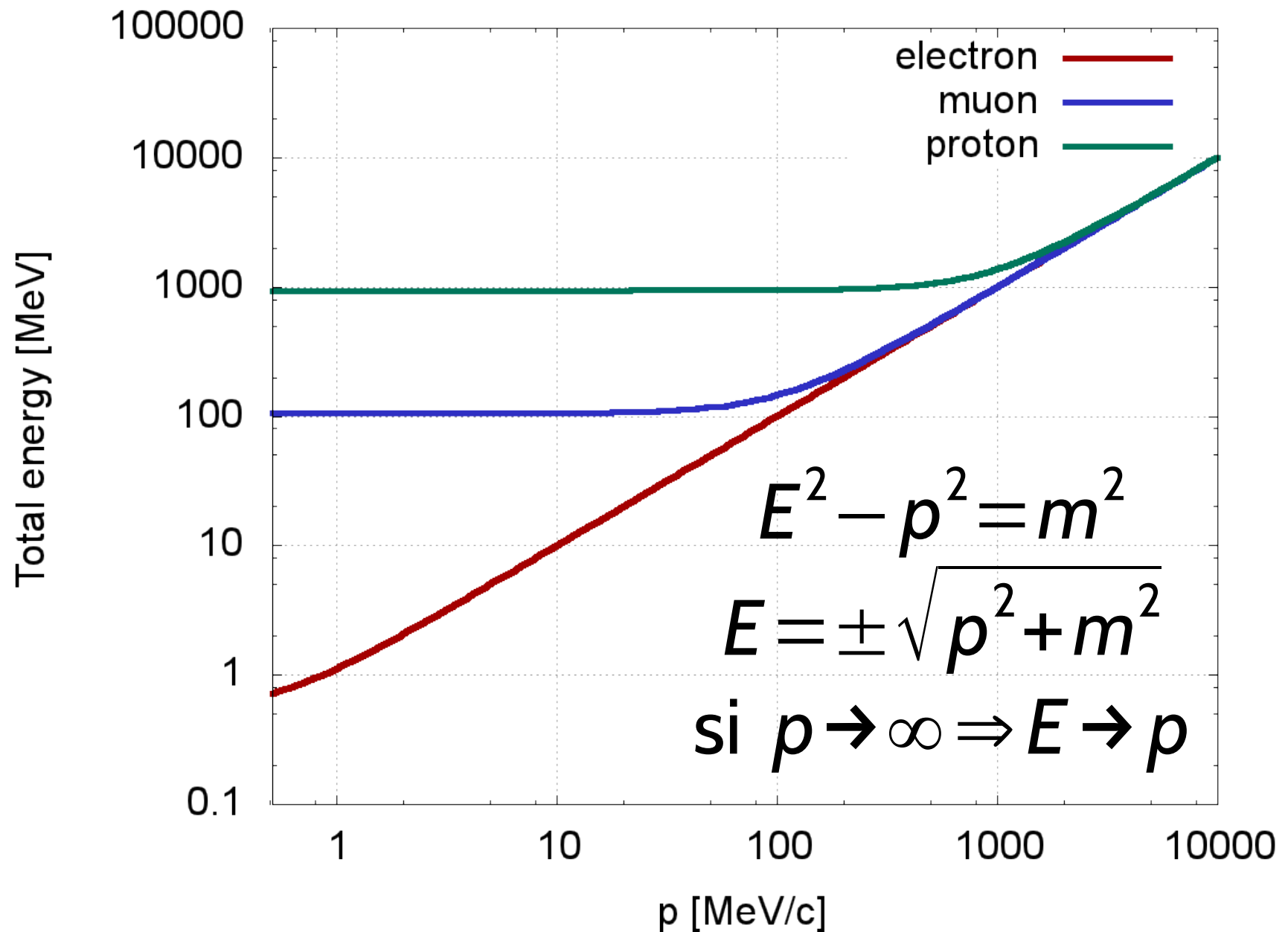
- A veces, se usan las unidades naturales:

$$h = c = 1$$

- Entonces, todo se mide en eV y \rightarrow $E^2 - p^2 = m^2$

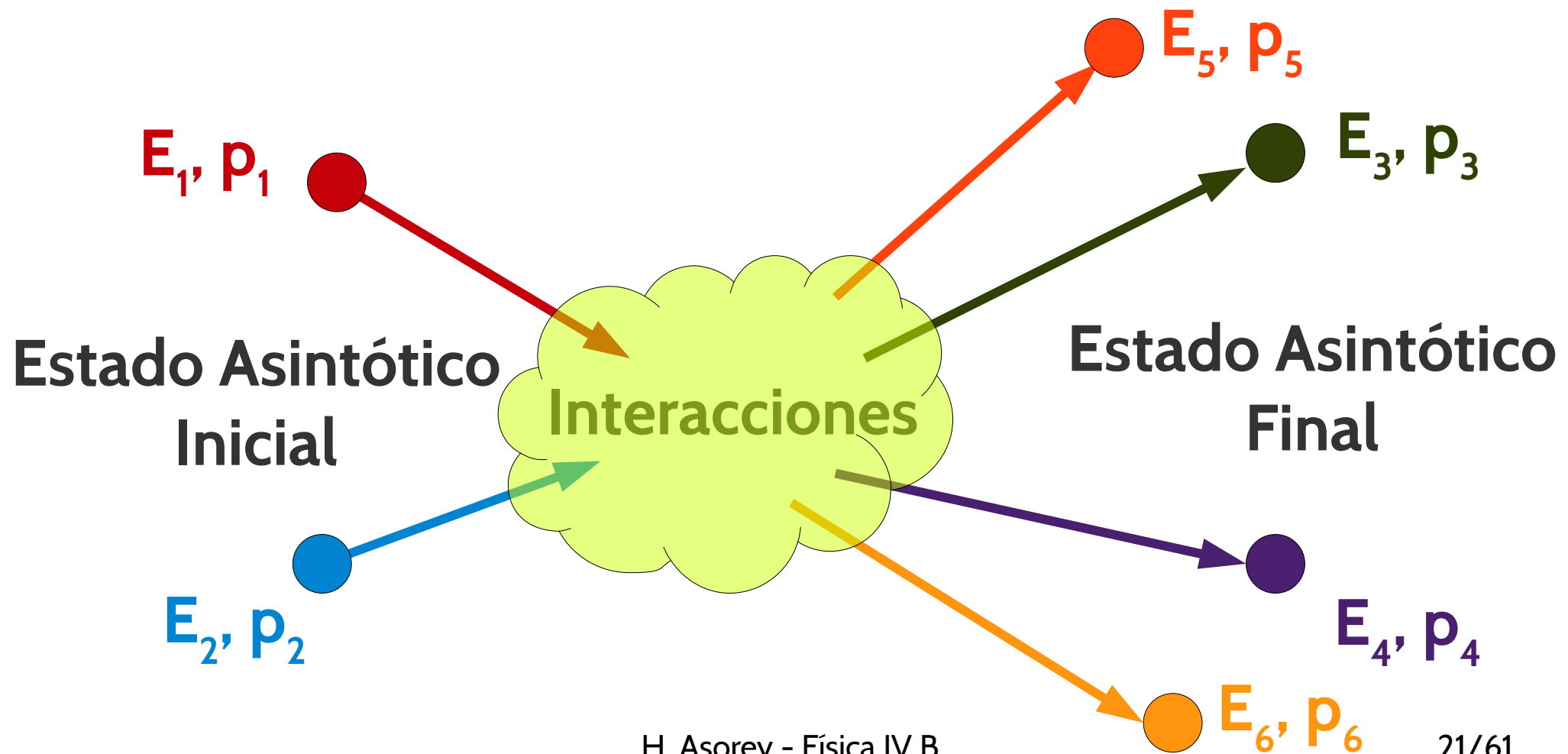


Masa y energía



¿Cómo funciona la conservación?

- Y todo por pedir que c tiene que tener el mismo valor para todos los observadores inerciales.



Así funciona la Naturaleza

- **La Energía total se conserva**

$$\left. \begin{aligned} E^{\text{inicial}} &= \sum_j^{n^{\text{inicial}}} E_j^{\text{inicial}} = \sum_j m_j \gamma_j c^2 \\ E^{\text{final}} &= \sum_k^{n^{\text{final}}} E_k^{\text{final}} = \sum_k m_k \gamma_k c^2 \end{aligned} \right\} E^{\text{inicial}} = E^{\text{final}}$$

- **La cantidad de movimiento total se conserva**

$$\left. \begin{aligned} \vec{p}^{\text{inicial}} &= \sum_j^{n^{\text{inicial}}} \vec{p}_j^{\text{inicial}} = \sum_j m_j \gamma_j \vec{v}_j \\ \vec{p}^{\text{final}} &= \sum_k^{n^{\text{final}}} \vec{p}_k^{\text{final}} = \sum_k m_k \gamma_k \vec{v}_k \end{aligned} \right\} \vec{p}^{\text{inicial}} = \vec{p}^{\text{final}}$$



Resumen hasta aquí

- Cantidad de movimiento relativista (correcto siempre):

$$\vec{p} = \gamma m \vec{v}$$

- Energía total y cinética relativista (correcta siempre):

$$E = \gamma m c^2 \qquad E_K \equiv E - m c^2 = (\gamma - 1) m c^2$$

- Un nuevo invariante relativista:

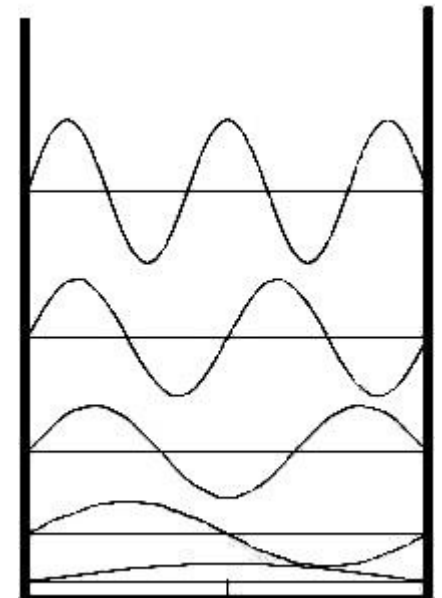
$$E^2 - (p c)^2 = (m c^2)^2$$

**Invariante
relativista**

¿Cuántica + Relatividad?

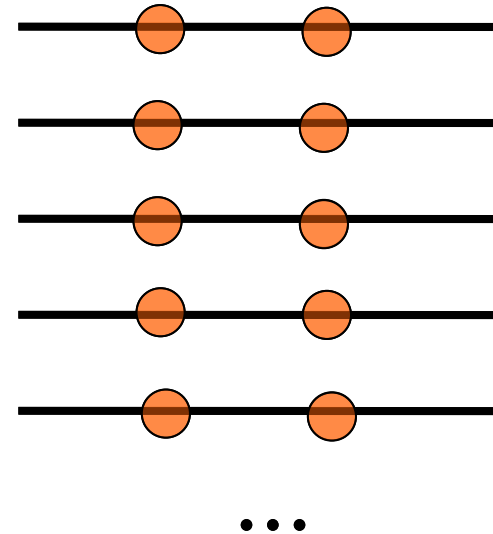
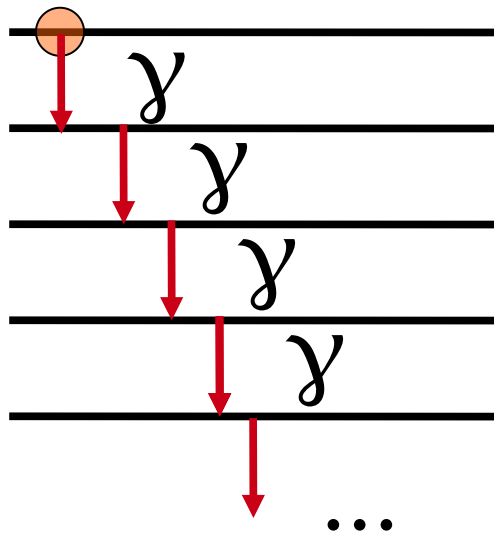
- Del invariante $E^2 - (pc)^2 = (mc^2)^2 \rightarrow E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2 \rightarrow E = \pm \sqrt{(pc)^2 + (mc^2)^2}$
- La relatividad anticipa estados con energía total negativa... → **PROBLEMAS**
- Y encima son infinitos → **MÁS PROBLEMAS**
- Por ejemplo, para la partícula en una caja los estados están acotados a $E > 0$:

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



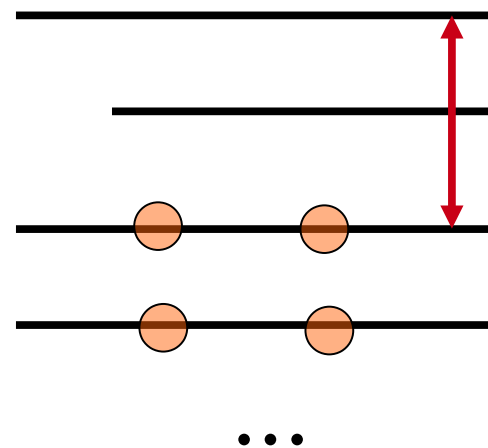
- Dirac (1928) obtiene la versión relativista de la ec. de Schrödinger y observa ese problema
- Propone que todos los estados de energía negativa están ocupados
- Los electrones obedecen el principio de exclusión de Pauli
- **Solución**
el “**vacío**” es el estado en el cual todos los estados de energía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

- No hay colapso porque no hay estados vacíos



$E < 0$

$$E = 2mc^2 = 1.022 \text{ MeV}$$



$E > 0$

$E < 0$

$$E = \pm mc^2$$



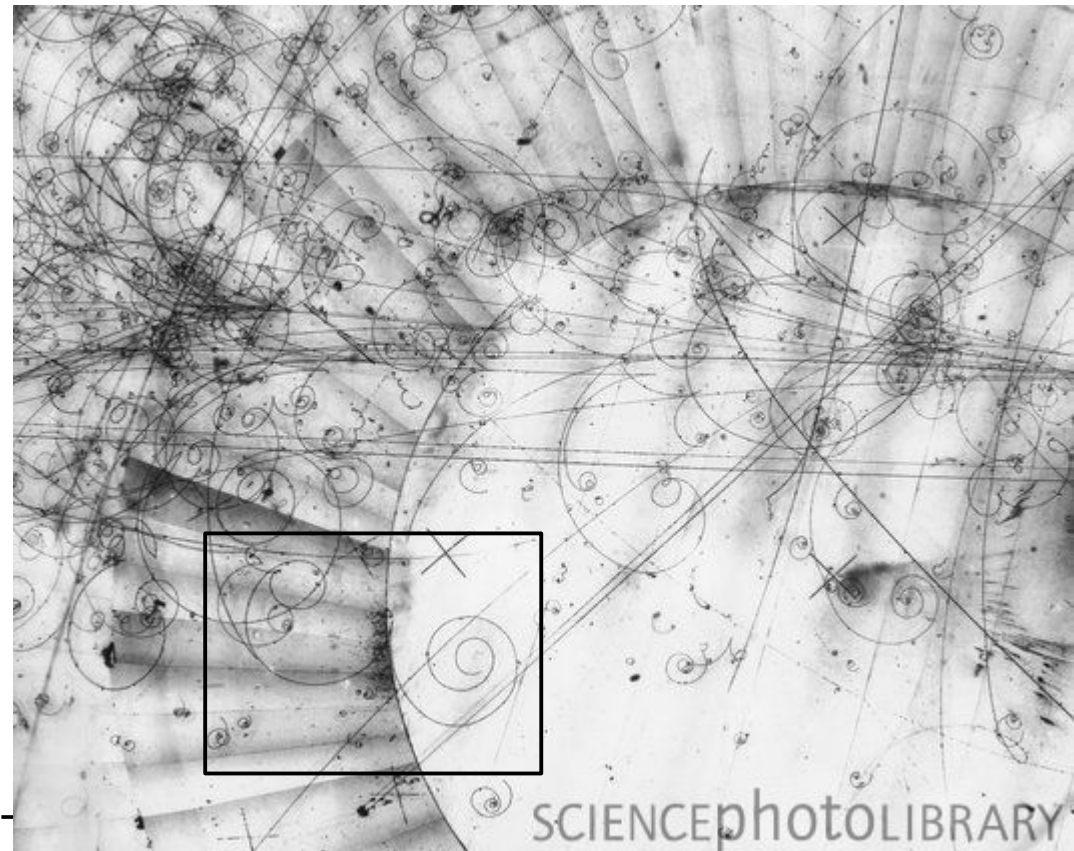
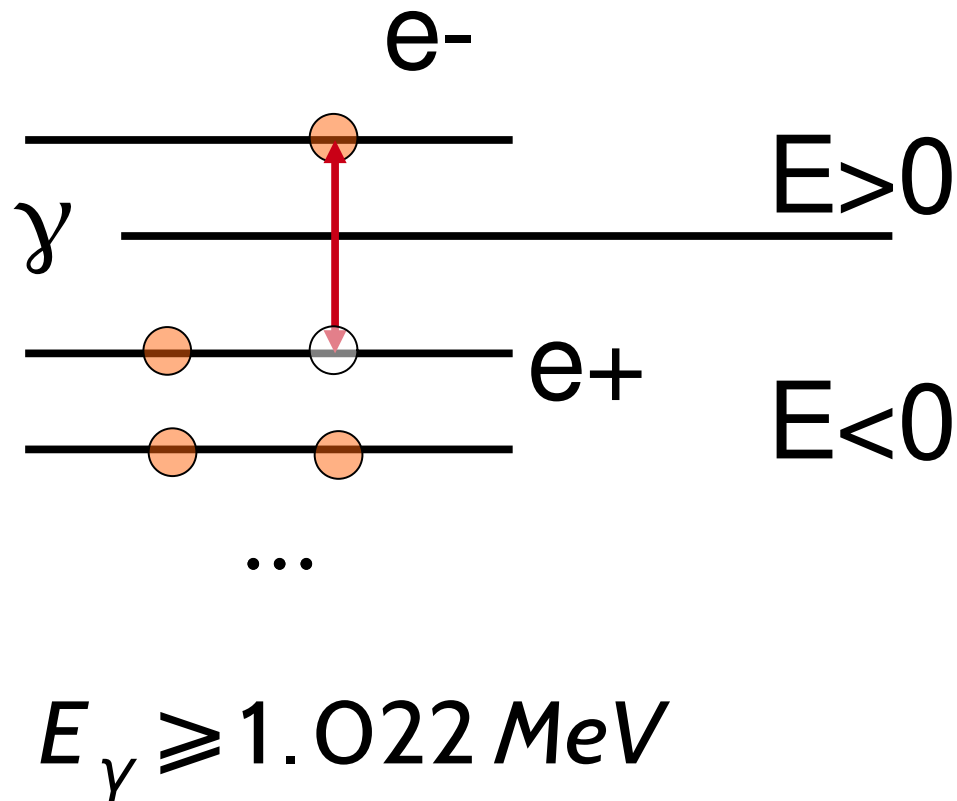
La felicidad tiene un precio...

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

No olvidar que son Modelos

Materia-Antimateria

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



Hasta aquí, teníamos al electrón

- Electrón, e^-
 - masa: $m_e = 0.511 \text{ MeV}/c^2$
 - Espín: $1/2$
 - Carga eléctrica: -1
 - Número leptónico: $+1$
 - Número lep. electrónico: $+1$
 - Vida media: infinita (estable)



The PARTICLEZOO



<https://www.particlezoo.net/>

Sewing the fabric of spacetime



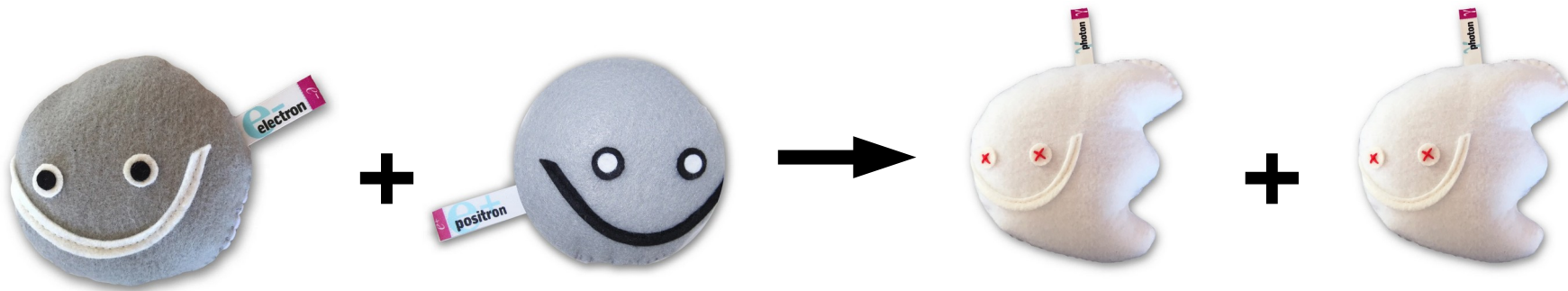
Y ahora

- Positrón (antielectrón), e^+
 - masa: $m_e = 0.511 \text{ MeV}/c^2$
 - Espín: $1/2$
 - Carga eléctrica: +1
 - Número leptónico: -1
 - Número lep. electrónico: -1
 - Vida media: infinita (estable)



Y si se juntan....

$$e^{-} + e^{+} \rightarrow \gamma + \gamma$$



A horizontal banner image showing the evolution of the universe from a bright yellow point on the left to a dark blue field of galaxies on the right. Labels like 'Space', 'Time', 'Hydrogen', 'Helium', 'Dark matter', and 'Dark energy' are visible. Arrows indicate the progression of time and expansion.

En esa época

- Se conocían cuatro partículas:
 - Protón (+)
 - Electrón (-)
 - Fotón (0) ← interacciones cargadas
 - Neutrón (0)
- Si existía el antielectrón, ¿por qué no un antiprotón?
- ¿O el antineutrón? (que es neutro)

El modelo atómico

- Un simple modelo atómico
- Radio atómico: $a_0 \sim 53 \text{ pm} = 53000 \text{ fm}$
- Radio núcleo: $r_0 \sim 1.2 \text{ fm}$
- Relación: ~ 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

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

$$F_E = 160 N$$

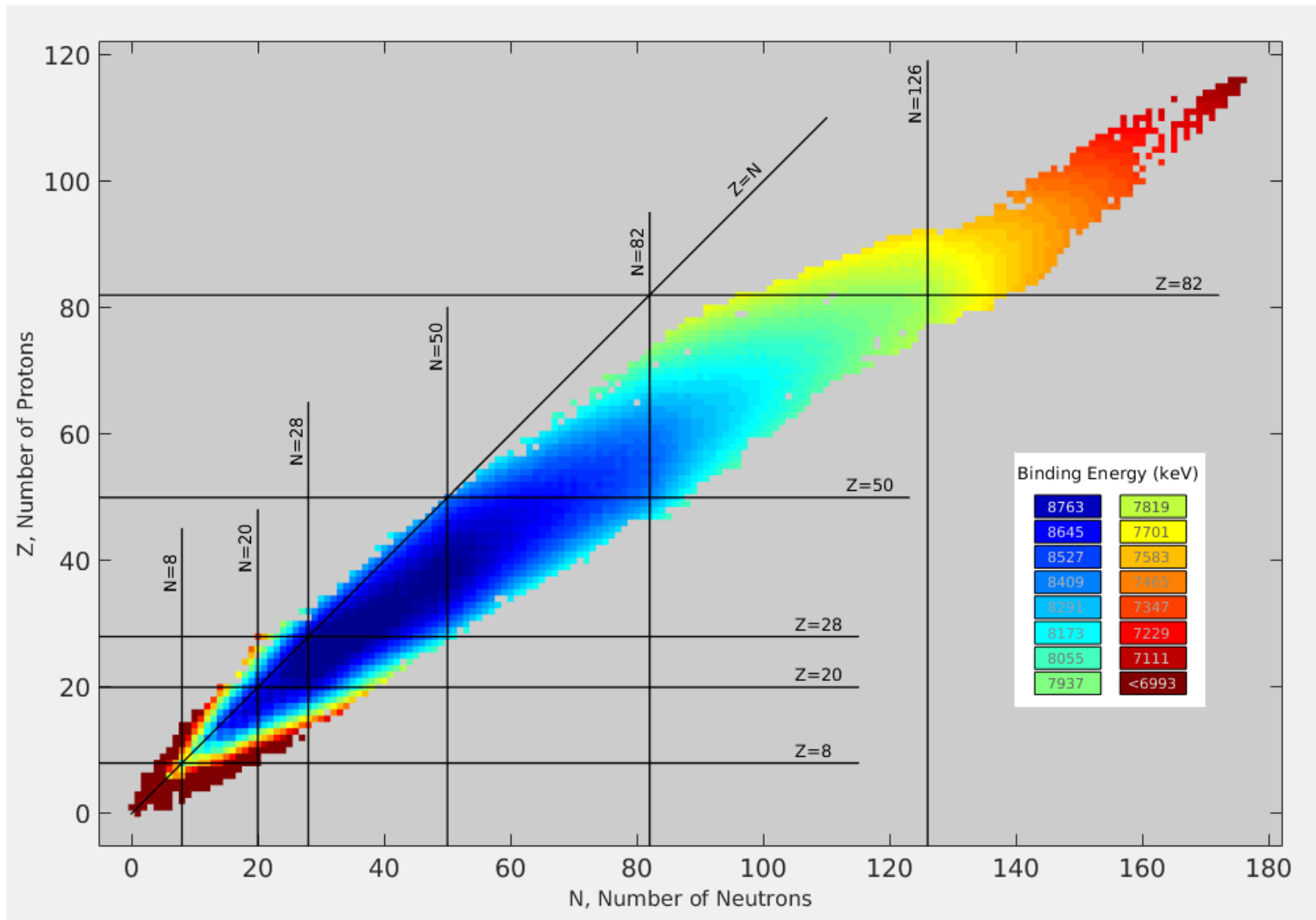
$$F_E = 1.2 \times 10^{36} F_G$$

Ayuda: En general el núcleo tiene más neutrones que protones

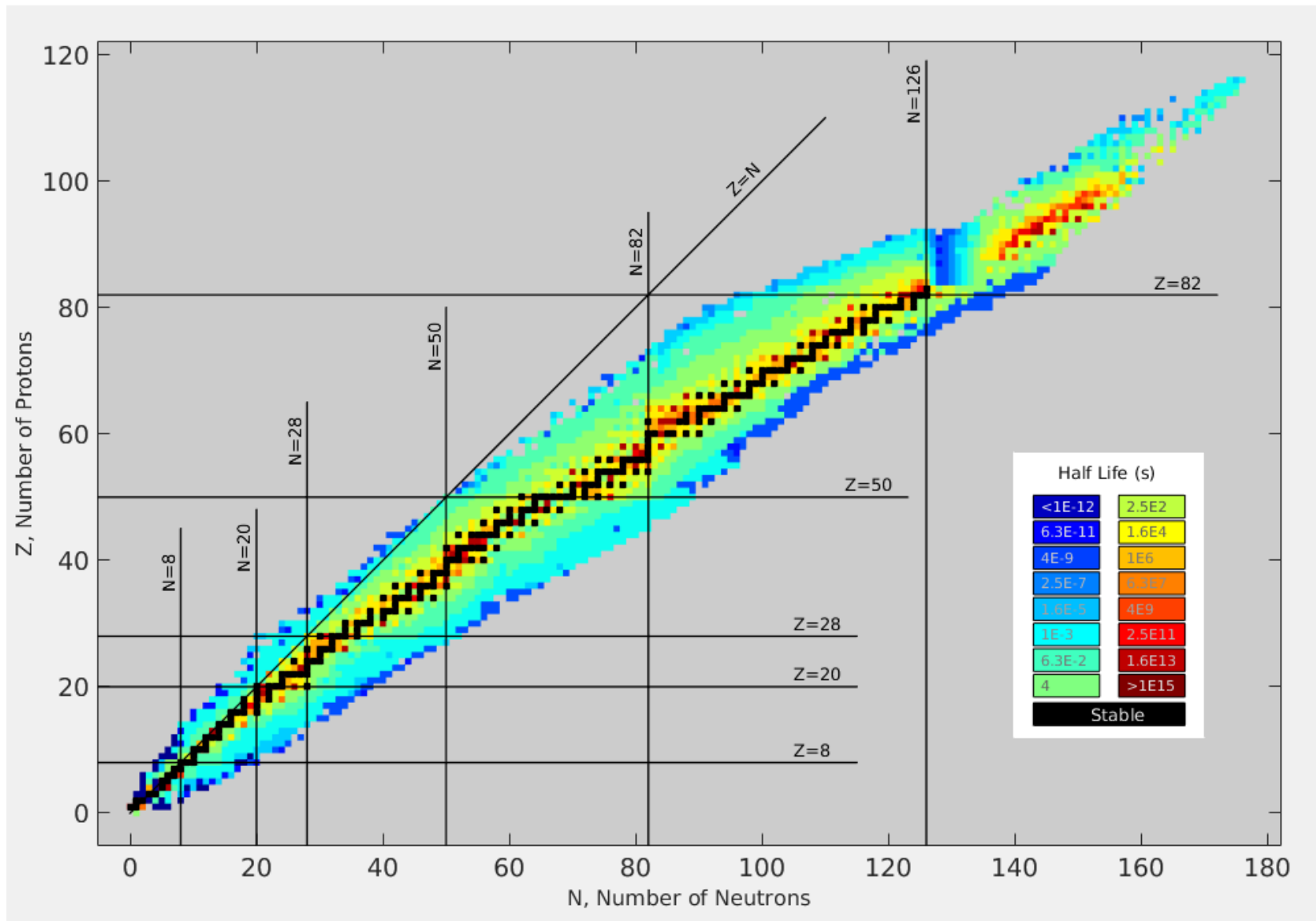
$$A = Z + N$$

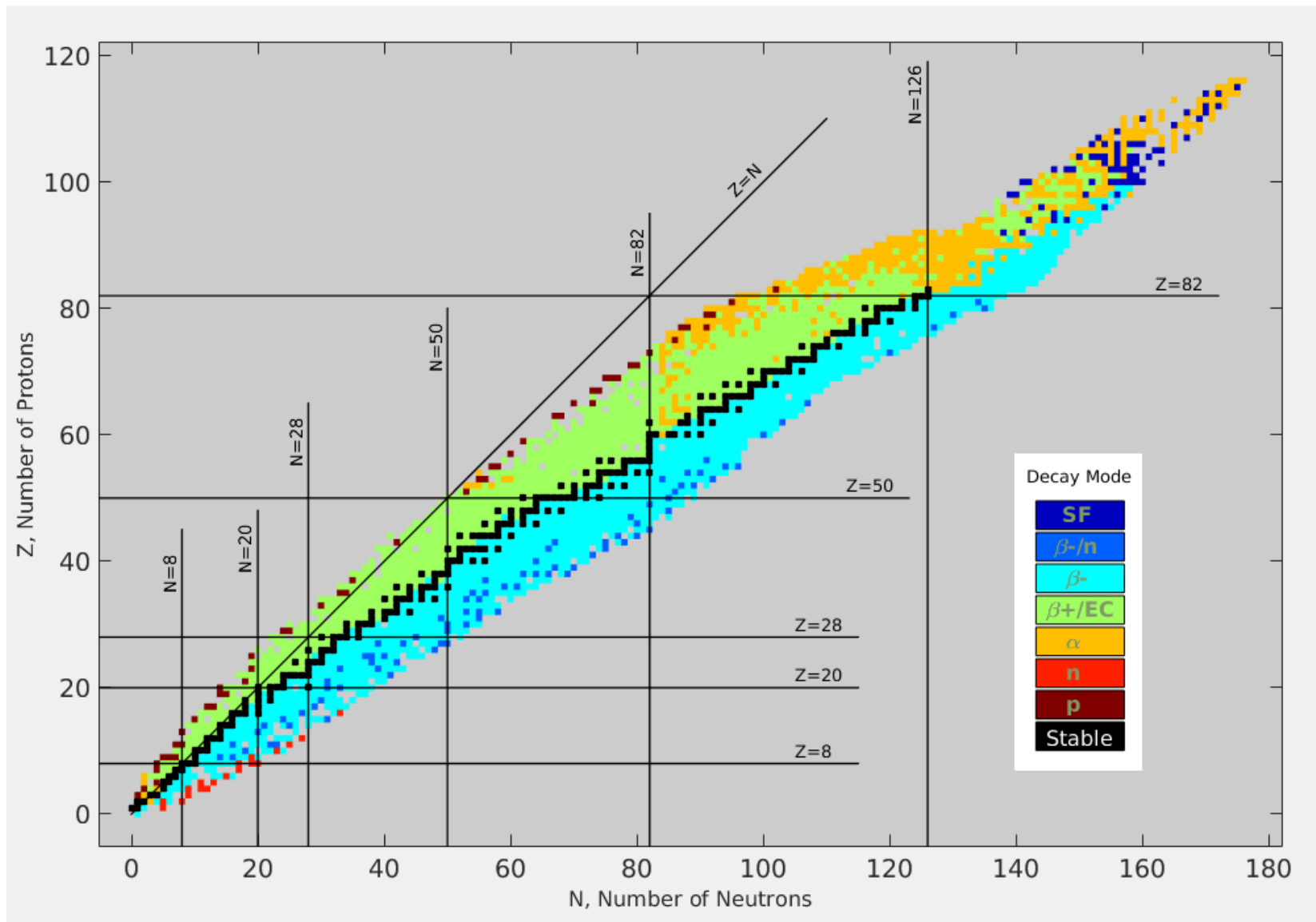
$$N \geq Z$$

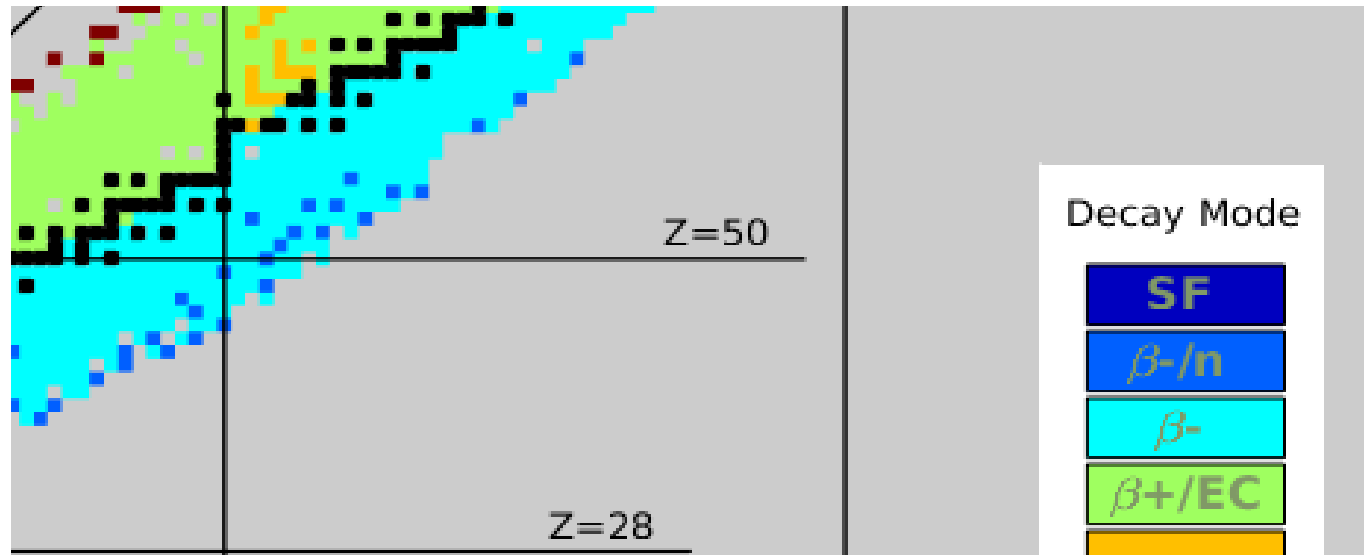
Energía de Ligadura (cuán ligado está el núcleo)



Tiempo de vida media (cuán estable)





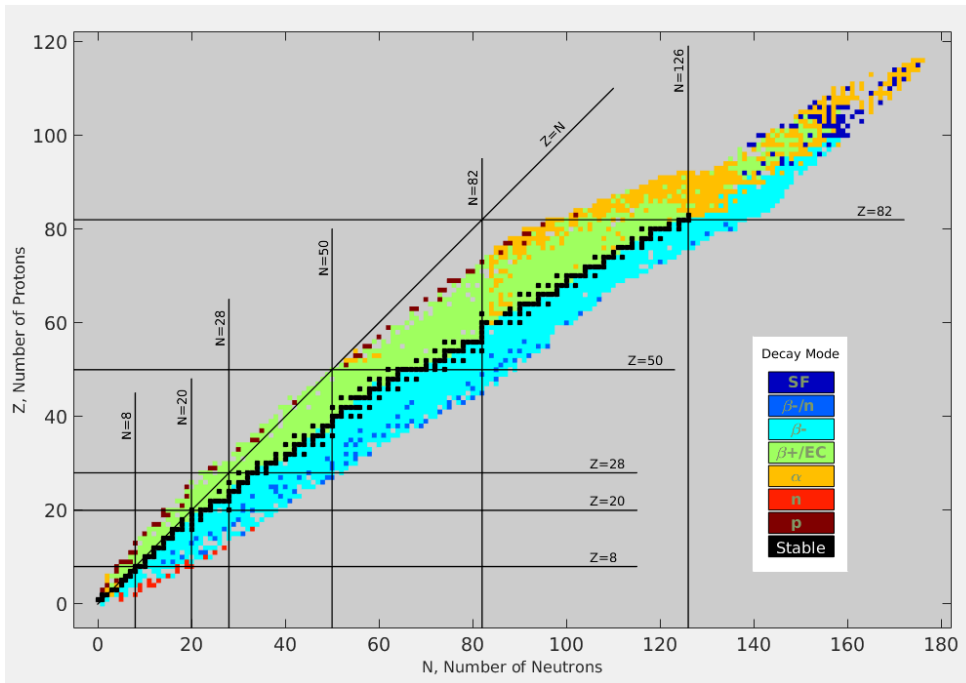


- Celeste oscuro: emisión de neutrones
- Celeste claro: beta- ($n \rightarrow p$)
- Verde claro: beta+ ($p \rightarrow n$)



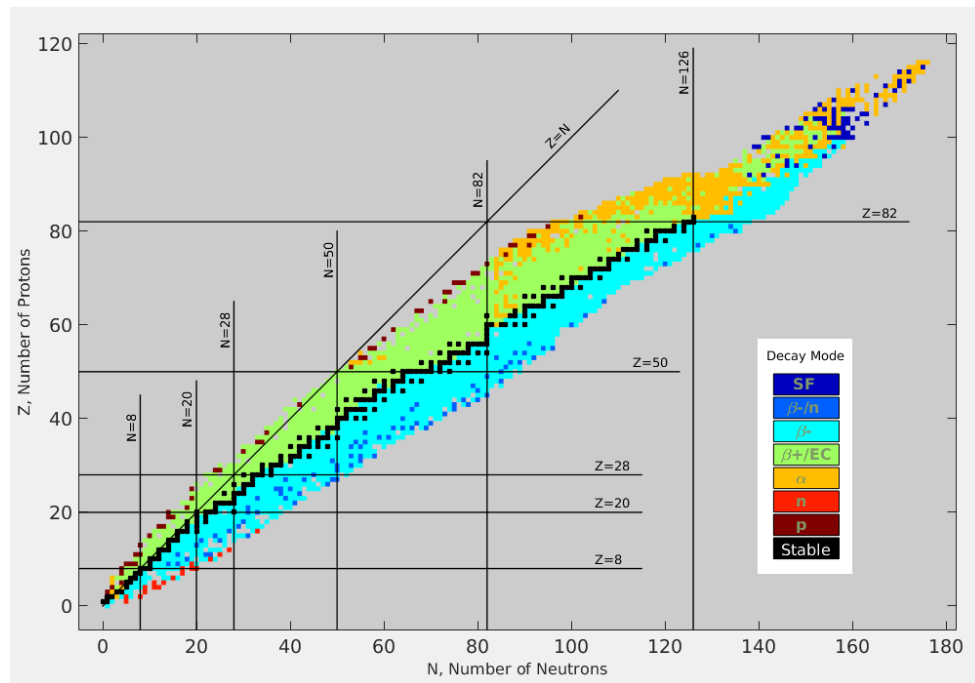
Como funciona

- Hay una proporción de estabilidad (curva negra) entre el número de neutrones y protones





Entonces

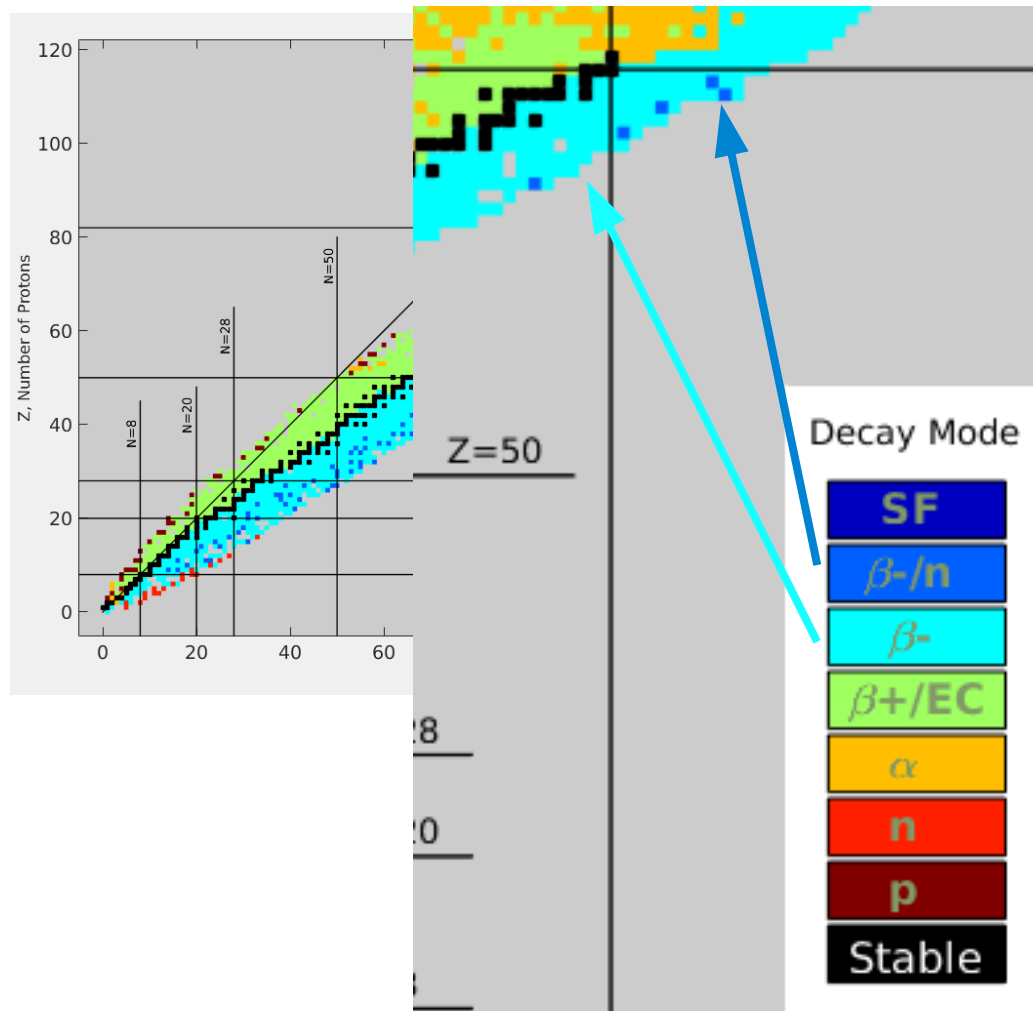


- Hay una proporción de estabilidad (curva negra) entre el número de neutrones y protones
- La fuerza eléctrica $\sim Z^2$
- Los neutrones no tienen carga eléctrica
- Z pequeños, $N/Z \sim 1$, luego $N > Z \rightarrow N/Z \sim 1 + \alpha A^{2/3}$
- Los neutrones aportan a la cohesión nuclear



Interacción fuerte

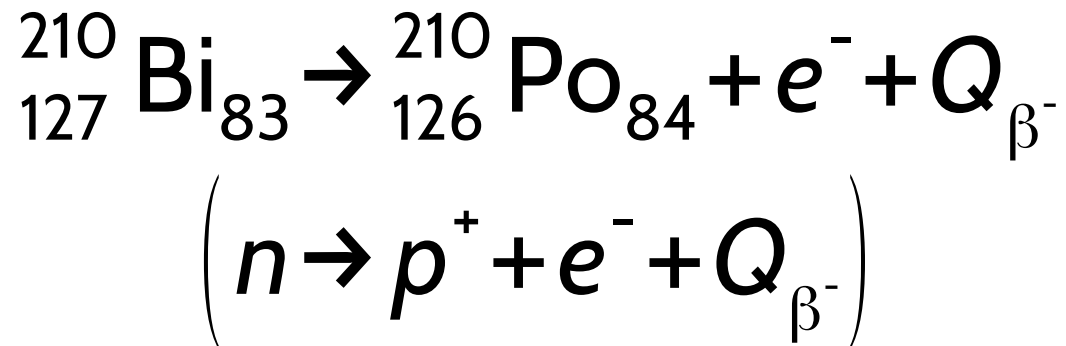
Interacción “Fuerte” (próximamente)



- Hay una proporción de estabilidad (curva negra) entre el número de neutrones y protones
- La fuerza eléctrica $\sim Z^2$
- Los neutrones no tienen carga eléctrica
- Z pequeños, $N/Z \sim 1$, luego $N > Z \rightarrow N/Z \sim 1 + \alpha A^{2/3}$
- Los neutrones aportan a la cohesión nuclear

Un proceso que se observó hace casi 100 años

- Propuesta para el decaimiento beta del Bismuto-210

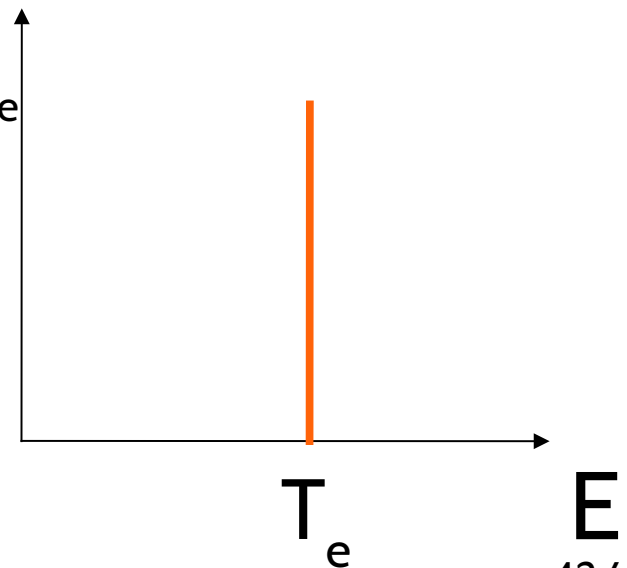


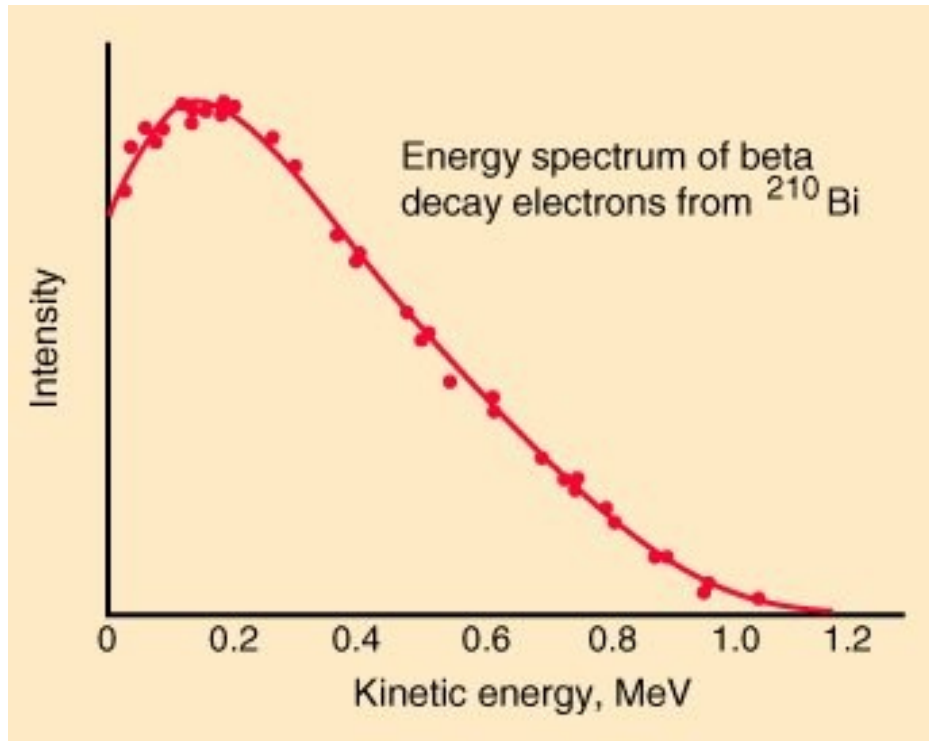
- Luego, la energía liberada debería ser

$$m_{\text{Bi}} c^2 = (m_{\text{Po}} + m_e) c^2 + Q \quad \#_e$$

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

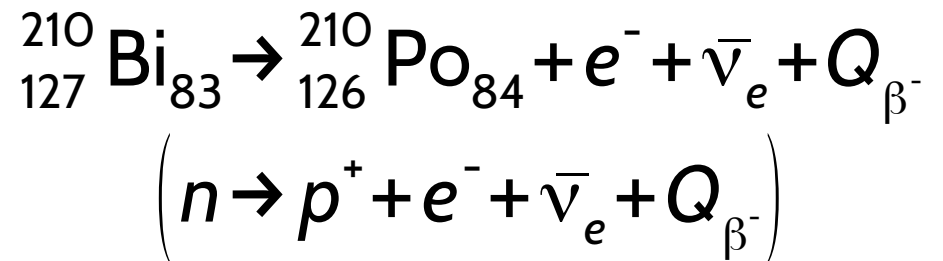
$$T_e \simeq 1.16 \text{ MeV}$$





- Bohr: “La energía no se conserva”
- Pauli: La energía se conserva si existe otra partícula: “**neutrino**”

- Decaimiento beta correcto:



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

$$Q \approx T_e + T_{\nu}$$

Mientras tanto en la atmósfera

- ... caen rayos cósmicos
- Anderson descubre una partícula $m/q \sim 200 m_e/e$

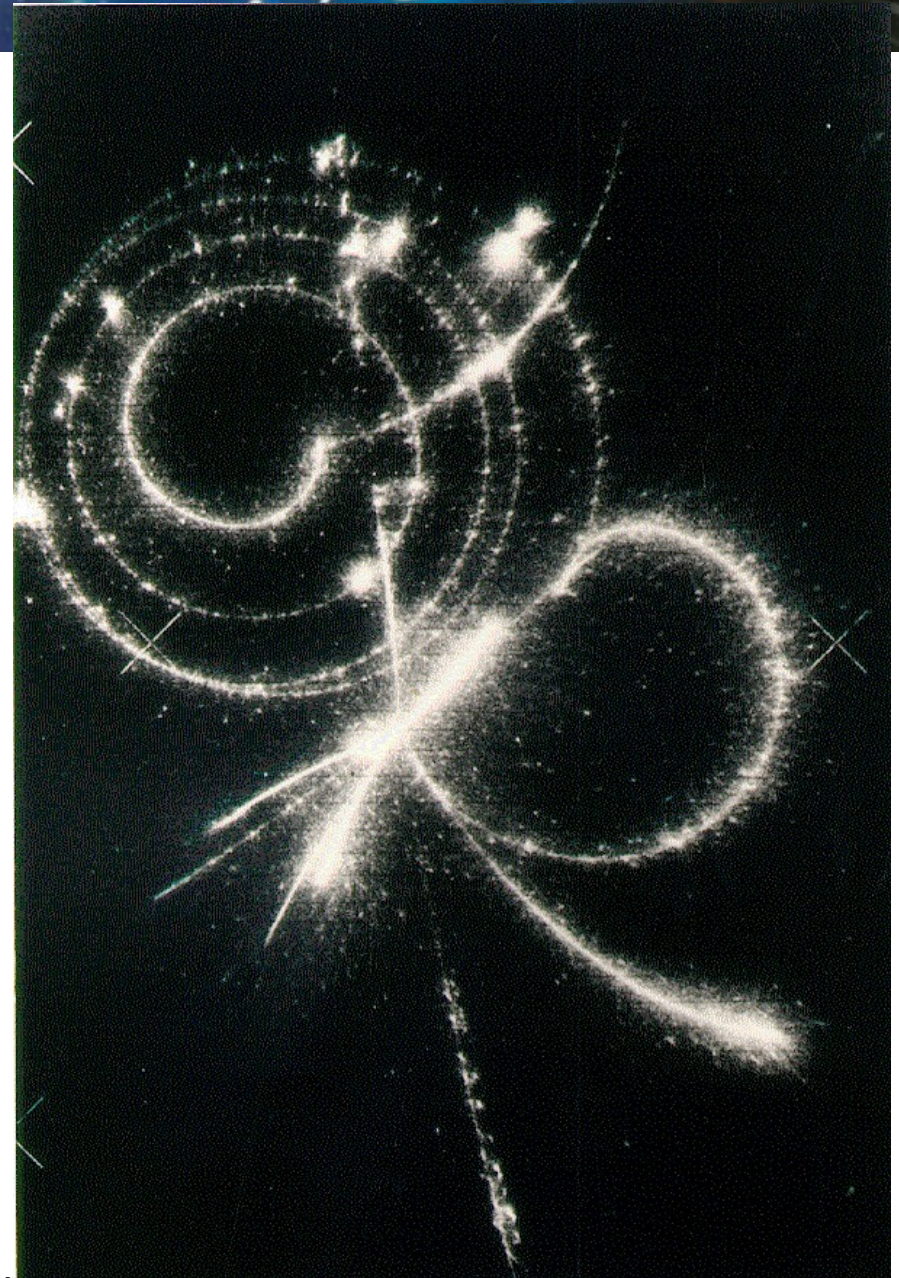
→ $m \sim 100 \text{ MeV}$

- Luego, se observa

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

que también violaba la E

$$\Rightarrow \pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu}$$



- Muón (μ^-)
 - masa: $m_\mu = 105,6 \text{ MeV}/c^2$
 - Espín: $1/2$
 - Carga eléctrica: -1
 - Número leptónico: $+1$
 - Número lep. electrónico: 0
 - Número lep. muónico: $+1$
 - Vida media: $2,196 \mu\text{s}$

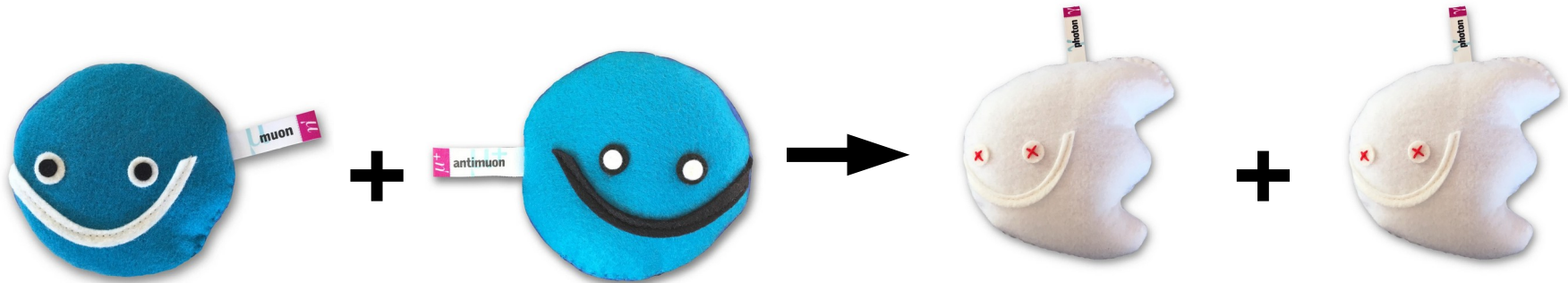


- Antimuón (μ^+)
 - masa: $m_e = 105,6 \text{ MeV}/c^2$
 - Espín: $1/2$
 - Carga eléctrica: +1
 - Número leptónico: -1
 - Número lep. electrónico: 0
 - Número lep. muónico: -1
 - Vida media: $2,196 \mu\text{s}$

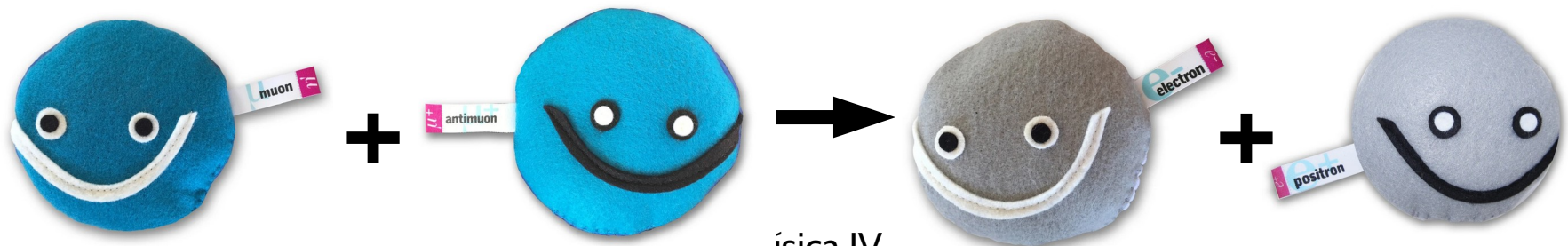


Y si se juntan....

$$\mu^{-} + \mu^{+} \rightarrow \gamma + \gamma$$



$$\mu^{-} + \mu^{+} \rightarrow e^{-} + e^{+}$$



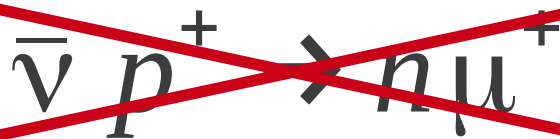
Probemos esto

- Sección eficaz neutrinos

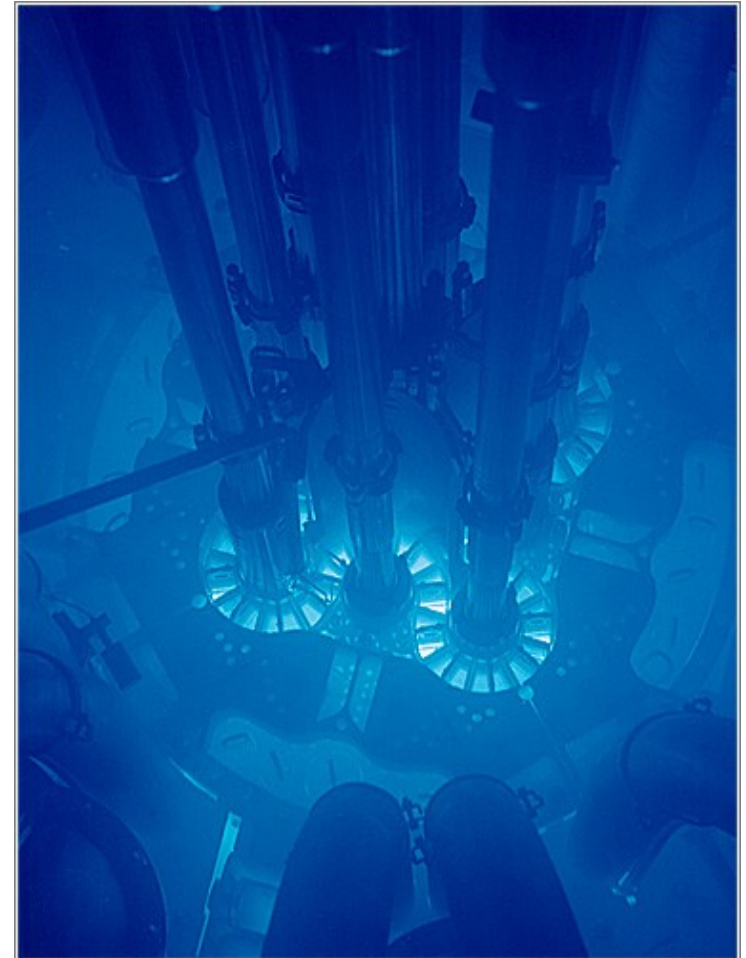
$$\sigma_{\nu} \simeq 10^{-44} \text{ cm}^2$$

~250 años luz de agua (~2 x 10²⁰ cm)

- Usemos 10²⁰ neutrinos en 1 cm de agua



- Tiempos “largos”: Corto alcance. Interacción Débil**

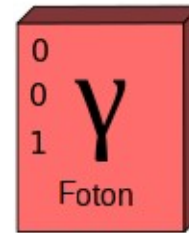


- Existen dos partículas que son muy similares: e^- y μ^-
- Tienen la misma carga eléctrica “negativa”
- Tienen espín semientero $\rightarrow s=1/2$,
 - Son fermiones y cumplen con el ppio de exclusión de Pauli
- Sólo se diferencia en su masa:
 - $m_e^- = 0,511 \text{ MeV}/c^2$ y $m_\mu^- = 105,6 \text{ MeV}/c^2$
- Asociados a estas, existen dos partículas eléctricamente neutras, y aparentemente sin masa:
 - neutrinos, ν_e y ν_μ .

Tenemos los primeros ladrillos

Sabor electrónico

Sabor muónico



masa—	$< 2,2 \text{ eV}/c^2$	$< 0,17 \text{ MeV}/c^2$
carga—	0	0
espín—	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
nombre—	ν_e Neutrino electrónico	ν_μ Neutrino muónico
	$0,511 \text{ MeV}/c^2$	$105,7 \text{ MeV}/c^2$
	-1	-1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	e Electrón	μ Muón

Con ustedes, los
Leptones
(leptón → liviano, delicado)

Tenemos los primeros ladrillos



$<2,2 \text{ eV}/c^2$ $0 \frac{1}{2} \nu_e$ Neutrino electrónico	$<0,17 \text{ MeV}/c^2$ $0 \frac{1}{2} \nu_\mu$ Neutrino muónico
$0,511 \text{ MeV}/c^2$ $-1 \frac{1}{2} e$ Electrón	$105,7 \text{ MeV}/c^2$ $-1 \frac{1}{2} \mu$ Muón

Con ustedes, los
Leptones
(leptón \rightarrow liviano, delicado)

Y los antileptones



Con ustedes, los
Leptones
(leptón → liviano, delicado)



Con ustedes, los
AntiLeptones

Todos los números cuánticos cambiados
de signo

Y las primeras principios de conservación

- 1) Conservación de la energía y cantidad de movimiento,
(es una sola regla) $\rightarrow E^2 = p^2 + m^2 \leftarrow$ ¡invariante!

$$Q = \left(m_{\text{Bi}} - m_{\text{Po}} - m_e - m_{\bar{\nu}_e} \right) c^2$$

- 2) Conservación de la carga eléctrica

$$n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu} + Q_{\beta^-}$$

- 3) Conservación del número leptónico

$$n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu} + Q_{\beta^-}$$

- 4) Conservación del número leptónico por sabor

$$\nu_e + n \rightarrow p^+ + e^- + Q_{\beta^-}$$

~~$$\nu_e + n \rightarrow p^+ + \mu^- + Q_{\beta^-}$$~~



Conservación del número leptónico

- A cada leptón se le asigna una unidad de número leptónico (+1) y a su antileptón lo contrario (-1)
- Es una **magnitud conservada**
 - el **número leptónico total** (cantidad de leptones) antes y después de la reacción debe ser el mismo
- Se asignan números leptónicos por sabor:
 - Número leptónico electrónico: e^- : (+1); ν_e : (+1); e^+ : (-1); $\bar{\nu}_e$: (-1)
 - Número leptónico muónico: μ^- : (+1); ν_μ : (+1); μ^+ : (-1); $\bar{\nu}_\mu$: (-1)



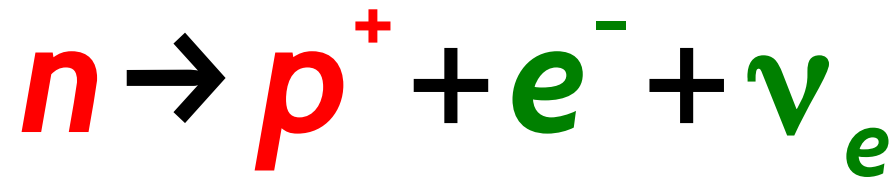
Por ejemplo:



Inicial	Magnitudes	Energía	Carga eléctrica	Número leptónico	Número leptónico electrónico	Número leptónico muónico
	partícula					
	n		0	0	0	0
final	p ⁺		+1	0	0	0
	e ⁻		-1	+1	+1	0
						0
	Final		0 	+1 	+1 	0 



Por ejemplo:



Inicial	Magnitudes	Energía	Carga eléctrica	Número leptónico	Número leptónico electrónico	Número leptónico muónico
	partícula					
	n		0	0	0	0
final	p ⁺		+1	0	0	0
	e ⁻		-1	+1	+1	0
	ν _e		0	+1	+1	0
	Final	✓	0 ✓	+2 	+2 	0 ✓



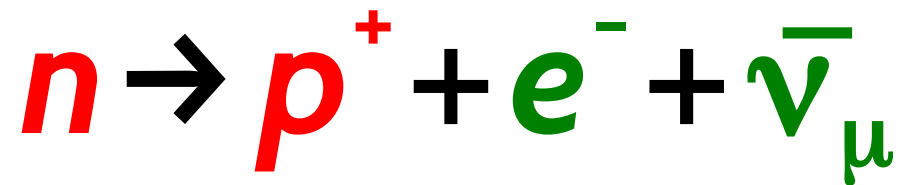
Por ejemplo:

$$n \rightarrow p^{+} + e^{-} + \nu_{\mu}$$

Inicial	Magnitudes partícula	Energía	Carga eléctrica	Número leptónico	Número leptónico electrónico	Número leptónico muónico
	n		0	0	0	0
final	p ⁺		+1	0	0	0
	e ⁻		-1	+1	+1	0
	ν _μ		0	+1	0	+1
	Final	✓	0 ✓	+2 	+1 	+1 



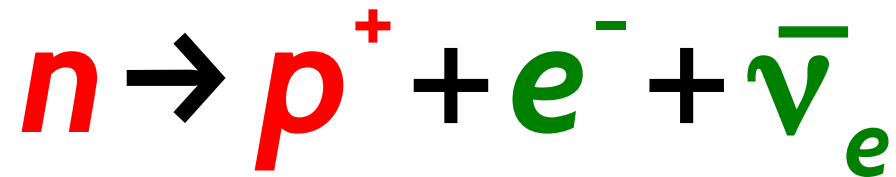
Por ejemplo:



Inicial	Magnitudes	Energía	Carga eléctrica	Número leptónico	Número leptónico electrónico	Número leptónico muónico
	partícula					
	n		0	0	0	0
final	p ⁺		+1	0	0	0
	e ⁻		-1	+1	+1	0
	<n _μ >		0	-1	0	-1
	Final	✓	0 ✓	0 ✓	+1 	-1 



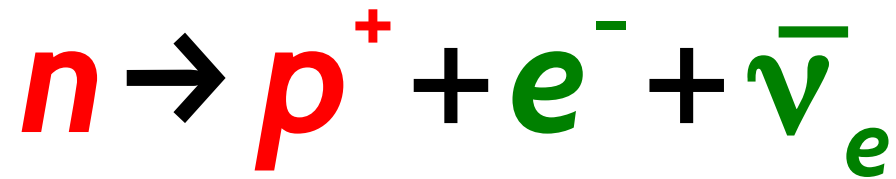
Por ejemplo:



Inicial	Magnitudes	Energía	Carga eléctrica	Número leptónico	Número leptónico electrónico	Número leptónico muónico
	partícula					
	n		0	0	0	0
final	p ⁺		+1	0	0	0
	e ⁻		-1	+1	+1	0
	<n _e >		0	-1	-1	0
	Final	✓	0 ✓	0 ✓	0 ✓	0 ✓



Por ejemplo:



Inicial	Magnitudes	Energy	Lepton number	Number of muons
	particle			
	n			0
final	p ⁺			0
	e ⁻			0
	<n _e >			0
	Final	✓	✓	0 ✓



Algunas preguntas....

- Proponer un decaimiento posible para el muón
- ¿Puede decaer el electrón?