

Universidad Nacional de Río Negro

Int Partículas, Astrofísica & Cosmología - 2020

- **Unidad** 01 – El modelo estándar
- **Clase** U01 C02 - 2/16
- **Fecha** 12 Ago 2020
- **Cont** Cuántica y relatividad, 1ra parte
- **Cátedra** Asorey
- **Web** <https://gitlab.com/asoreyh/unrn-ipac/>





Puntos de contacto

- **16 encuentros semanales, desde el 03/Ago hasta el 18/Nov**
 - **Google Meet:** Miércoles 19 a 23, disponibles en YouTube
 - **Trabajo en casa:** 3 horas semanales
 - **Google Classroom**
 - **Campus Bimodal UNRN**
- **Bibliografía**
 - **Depende de la unidad, ver en classroom y aula bimodal**
 - **Apuntes de clase**
 - **Wikipedia**



Autoevaluación en línea

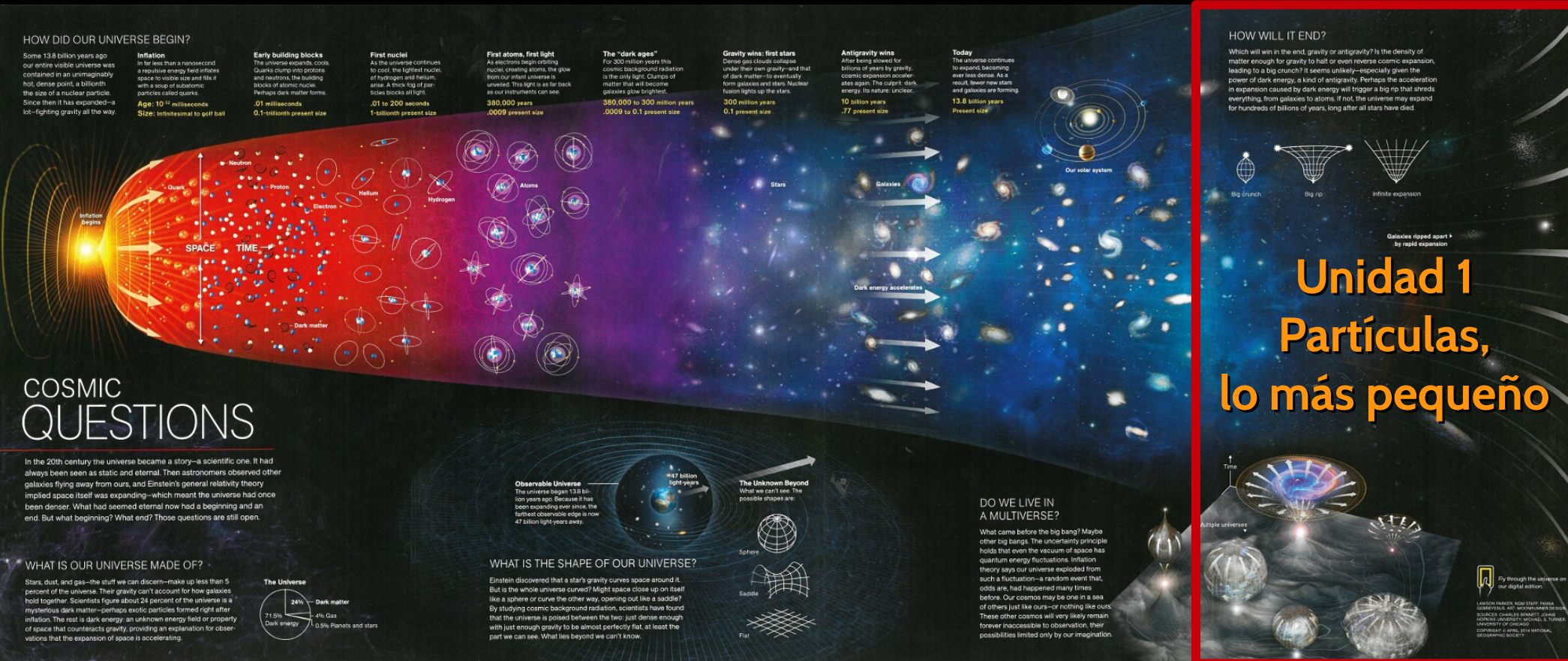
- Al final de cada semana subiré un cuestionario en línea para ser completado en forma individual
- **Revisión de los conceptos claves de cada clase**
- Es un formulario de **autoevaluación para que cada uno analice su comprensión de temas claves**
- Plazo para completarlo: una semana
- No tienen nota pero es importante que sean completados, forman parte de la evaluación continua
- Habrá 15 autoevaluaciones a lo largo del curso



¿Qué esperan de este curso en relación a...

- ... sus intereses particulares?
- ... los conceptos físicos y temas a tratar?
- ... su rol como docentes?
- ¿Hay algún tema o temas que les interesaría ver o profundizar?

Contenidos: un viaje en el tiempo y el espacio



U1:Partículas, lo más pequeño

4 encuentros, del 05/Ago al 26/Ago

- **Dinámica Relativista.**
- **Física de partículas**
 - Ley de Planck.
 - **Partículas fundamentales: leptones, hadrones, bosones mensajeros**
- **El modelo estándar**
 - Interacciones fundamentales
 - Simetrías y leyes de conservación
- **Trabajo de la unidad: tópicos de física de partículas.**
Entrega Viernes 04/Sep/2020

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

The background image is a composite. On the left, there's a bright yellow-orange glow with concentric circles, resembling a particle detector or a celestial body. To its right is a dark purple and blue field filled with numerous small, colorful dots and lines, representing particle tracks or a cosmic map. The title 'Dilatación temporal y Contracción espacial' is overlaid in large, bold, white letters with a black outline.

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

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

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

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



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

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

$$dt = \gamma d\tau$$



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**

Así funciona la Naturaleza

- **La Energía total se conserva**

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

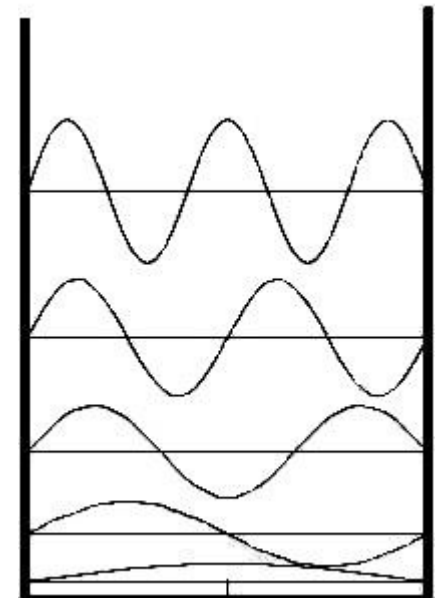
- **La cantidad de movimiento total se conserva**

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

¿Cuántica + Relatividad?

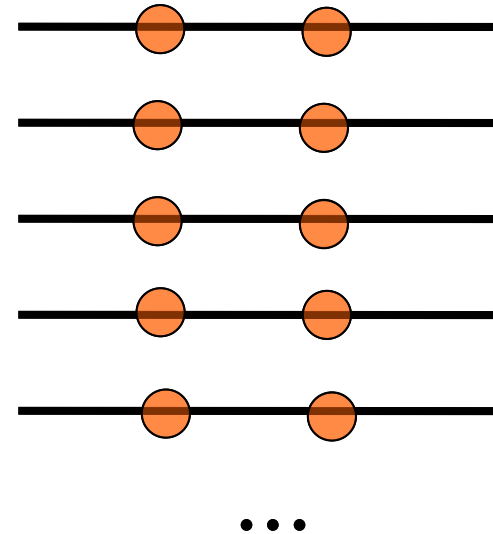
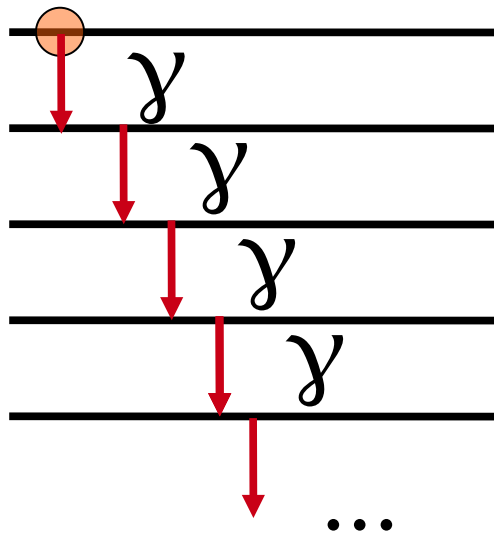
- Del invariante $E^2 - (pc)^2 = (mc^2)^2 \rightarrow E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2 \rightarrow E = \pm \sqrt{(pc)^2 + (mc^2)^2}$
- La relatividad anticipa estados con energía total negativa... → **PROBLEMAS**
- Y encima son infinitos → **MÁS PROBLEMAS**
- Por ejemplo, para la partícula en una caja los estados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

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



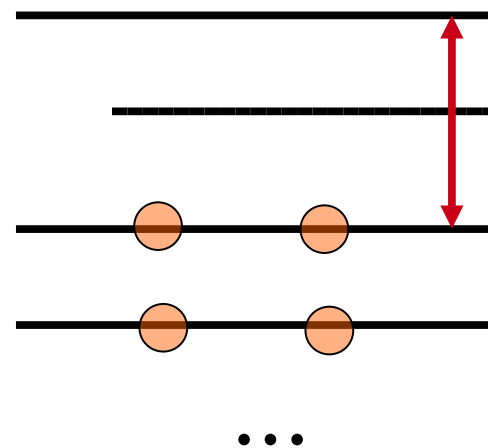
- Dirac (1928) obtiene la versión relativista de la ec. de Schrödinger y observa ese problema
- Propone que todos los estados de energía negativa están ocupados
- Los electrones obedecen el principio de exclusión de Pauli
- **Solución**
el “**vacío**” es el estado en el cual todos los estados de energía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

- No hay colapso porque no hay estados vacíos



$E < 0$

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



$E > 0$

$E < 0$

$$E = \pm mc^2$$



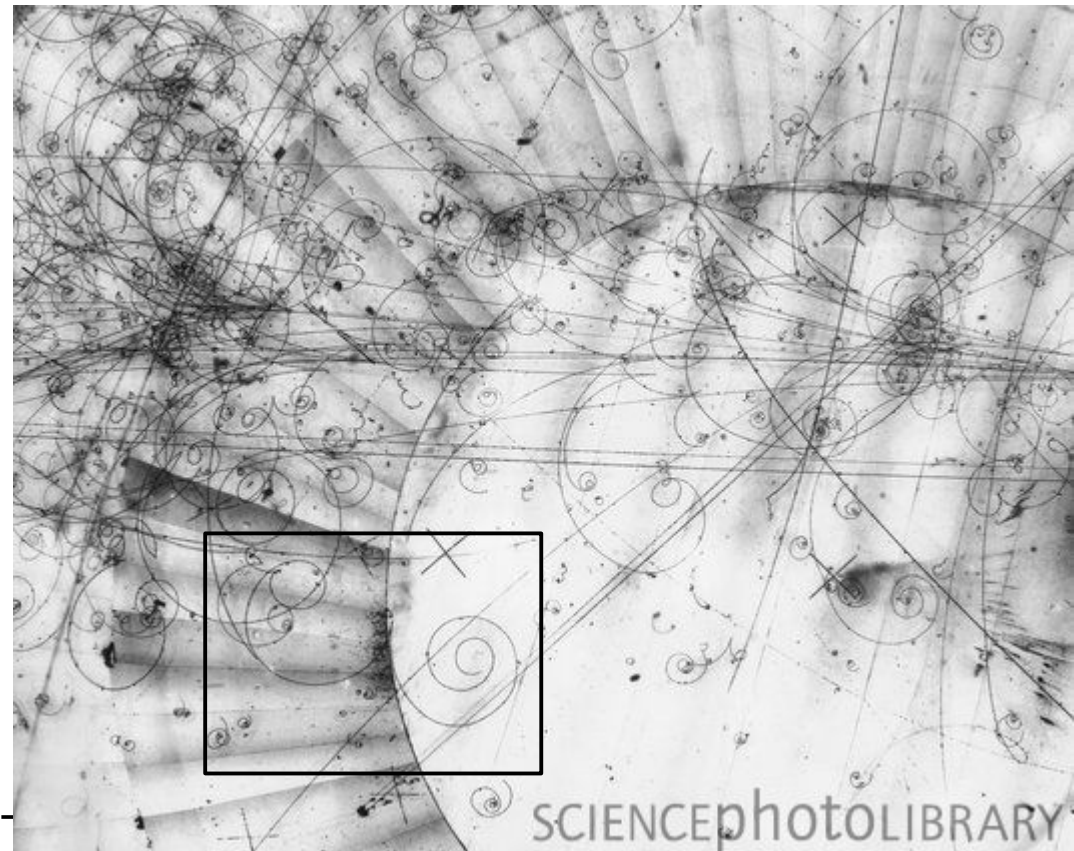
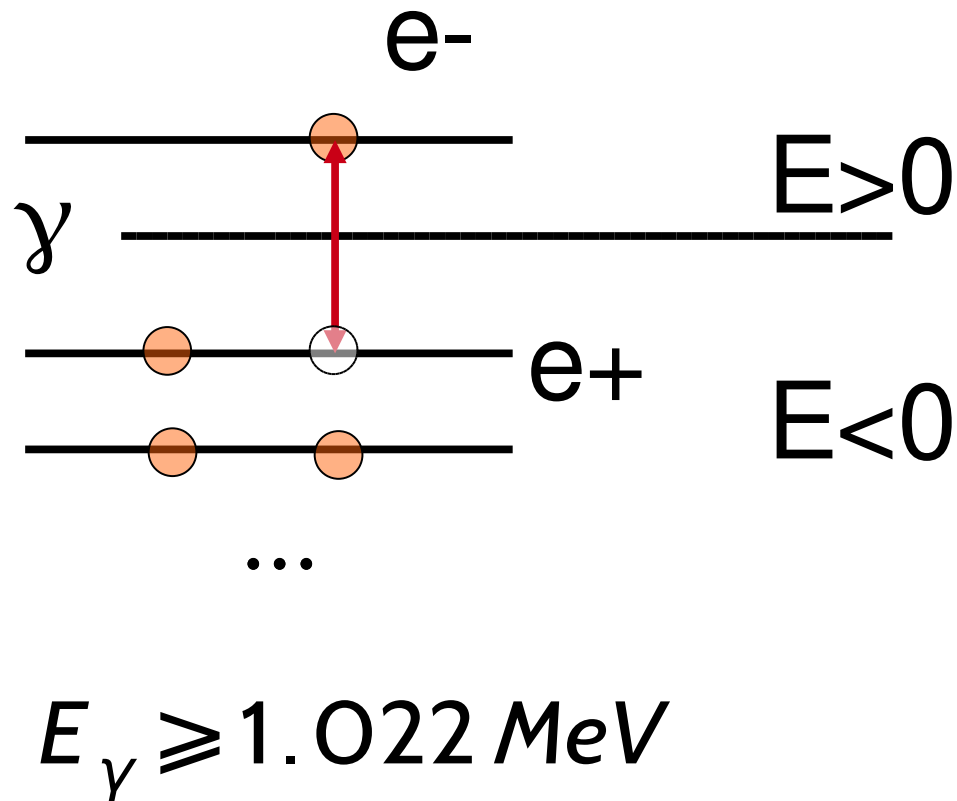
La felicidad tiene un precio...

- 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: $\frac{1}{2}$
 - 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



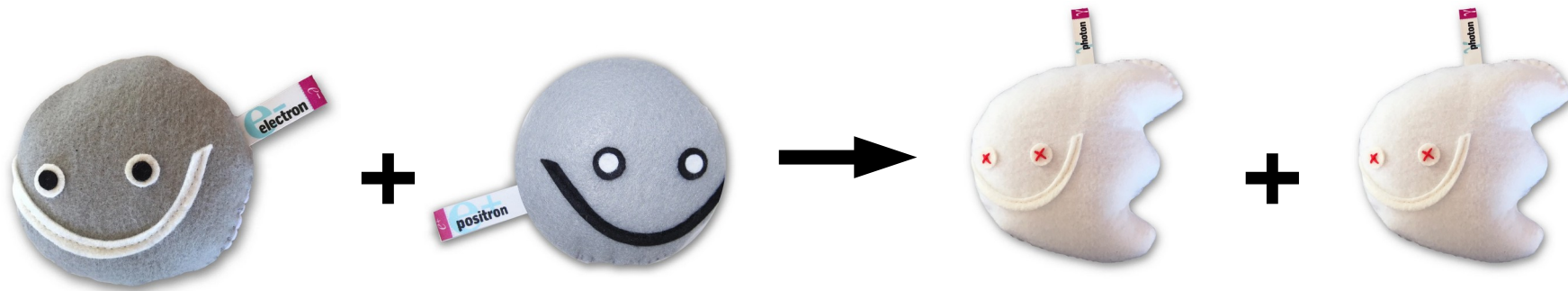
Y ahora

- Positrón (antielectrón), e^+
 - masa: $m_e = 0.511 \text{ MeV}/c^2$
 - Espín: $\frac{1}{2}$
 - 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 depicting the evolution of the universe from the Big Bang to the present. It starts with a bright yellow-orange sphere on the left, transitions through a red field of particles, a purple field of galaxies, and ends with a blue field of distant galaxies on the right. Labels like 'SPACE', 'TIME', 'Dark matter', 'Dark energy', and 'Galaxies' are visible.

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

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

$$F_E = 160 N$$

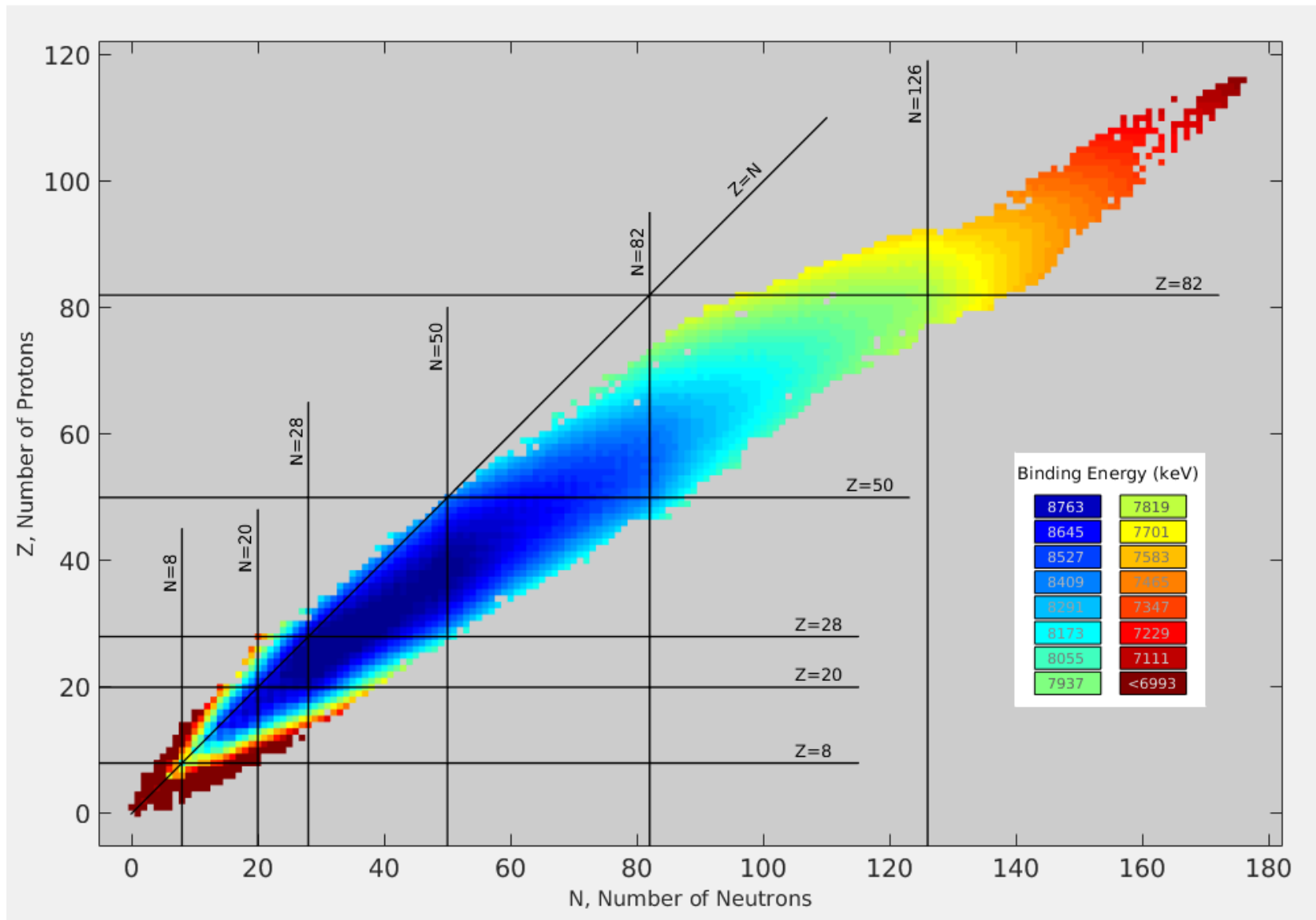
$$F_E = 1.2 \times 10^{36} F_G$$

Ayuda: En general el núcleo tiene más neutrones que protones

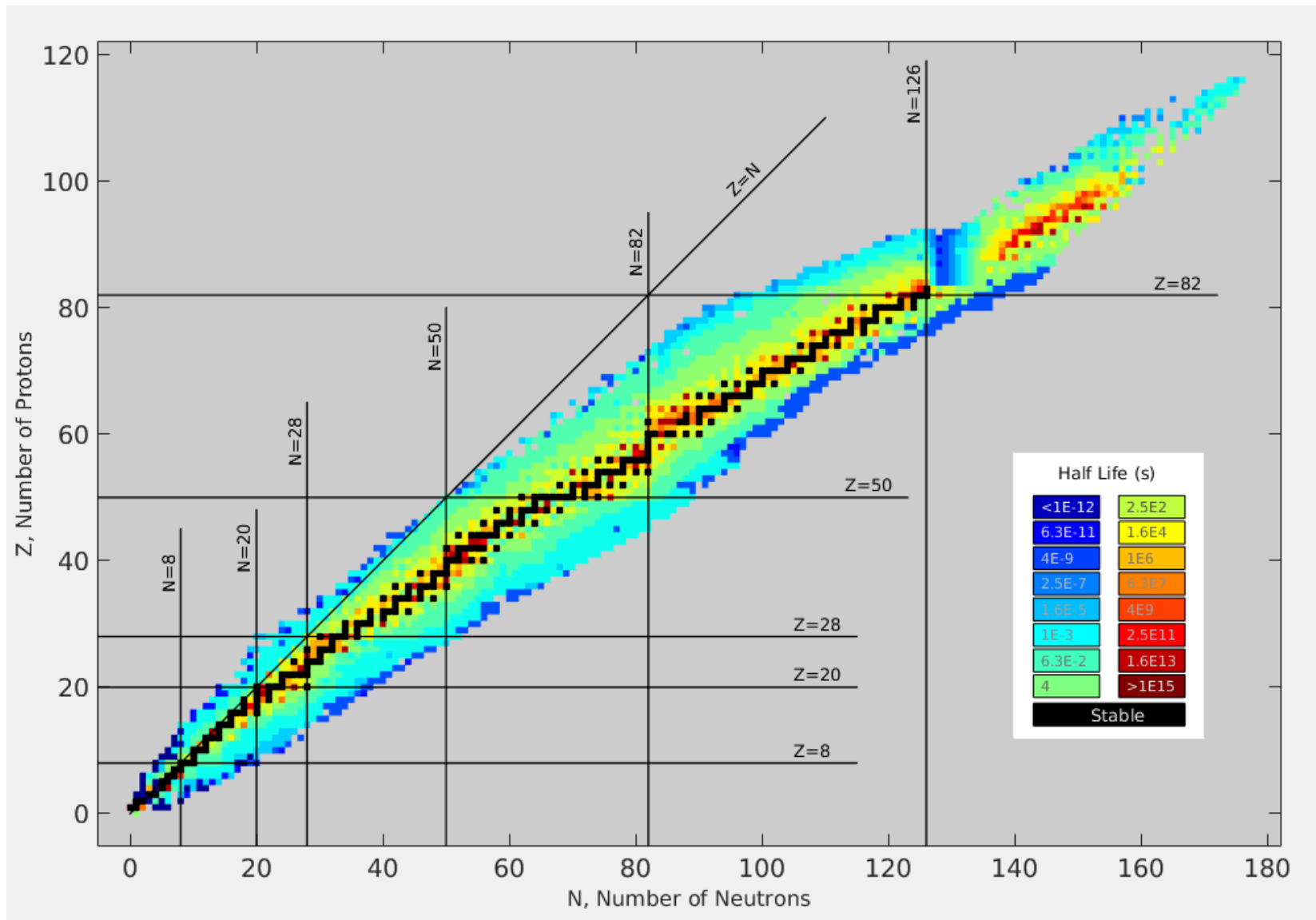
$$A = Z + N$$

$$N \geq Z$$

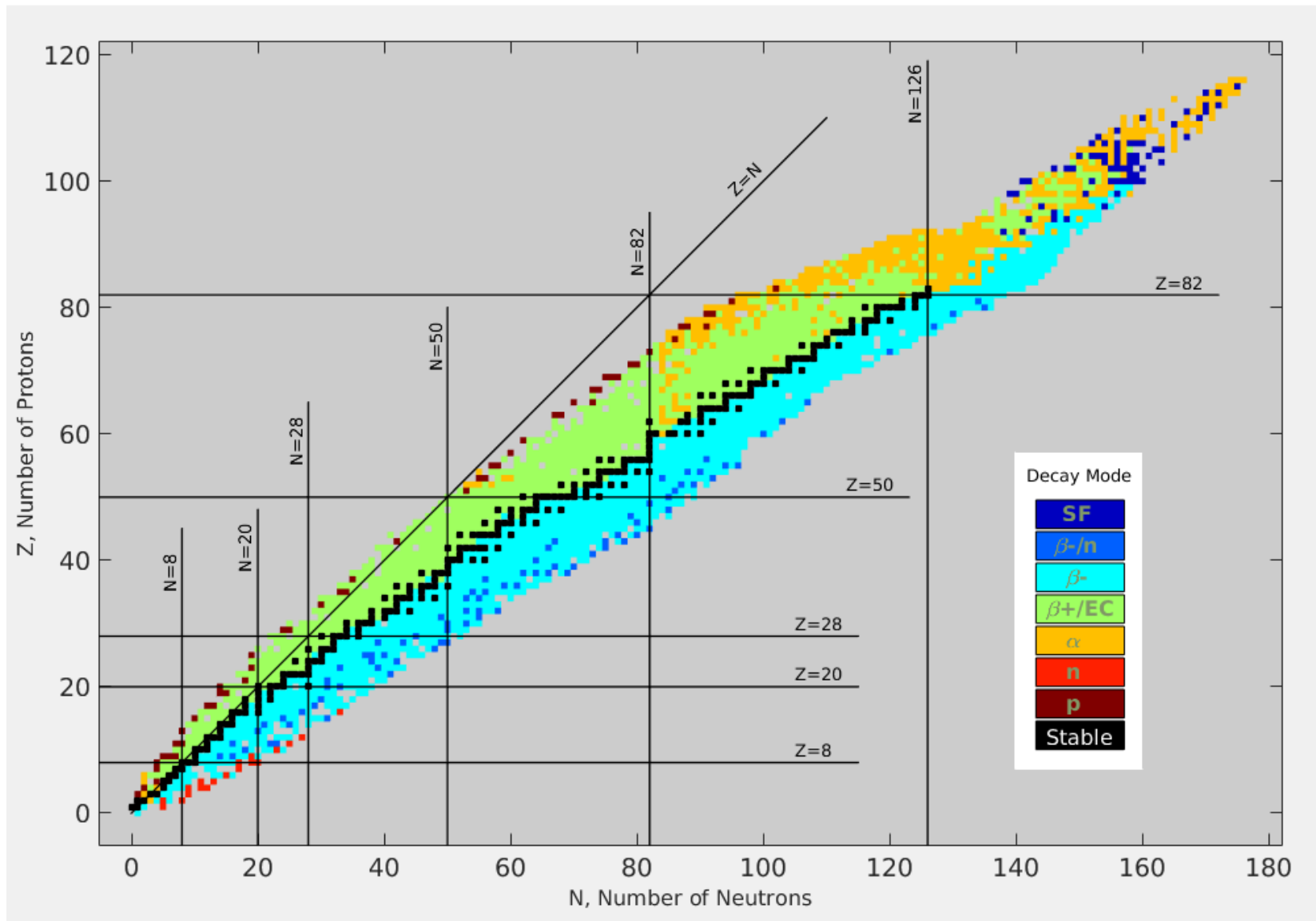
Energía de Ligadura (cuán ligado está el núcleo)

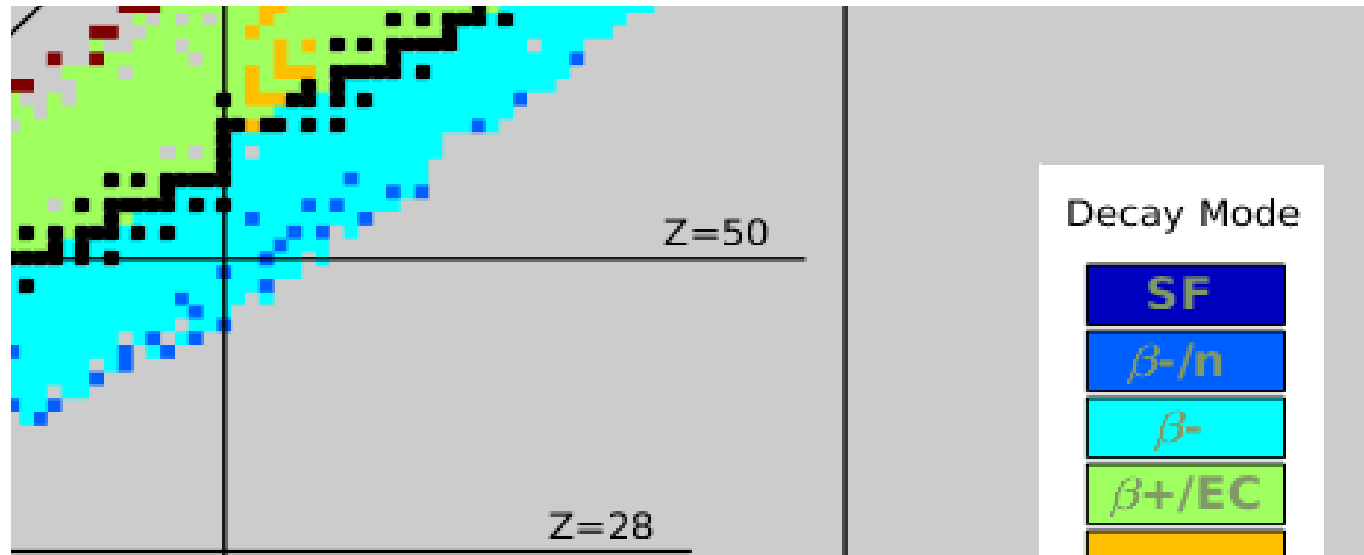


Tiempo de vida media (cuán estable)



Tipo de decaimiento (que le sobra)



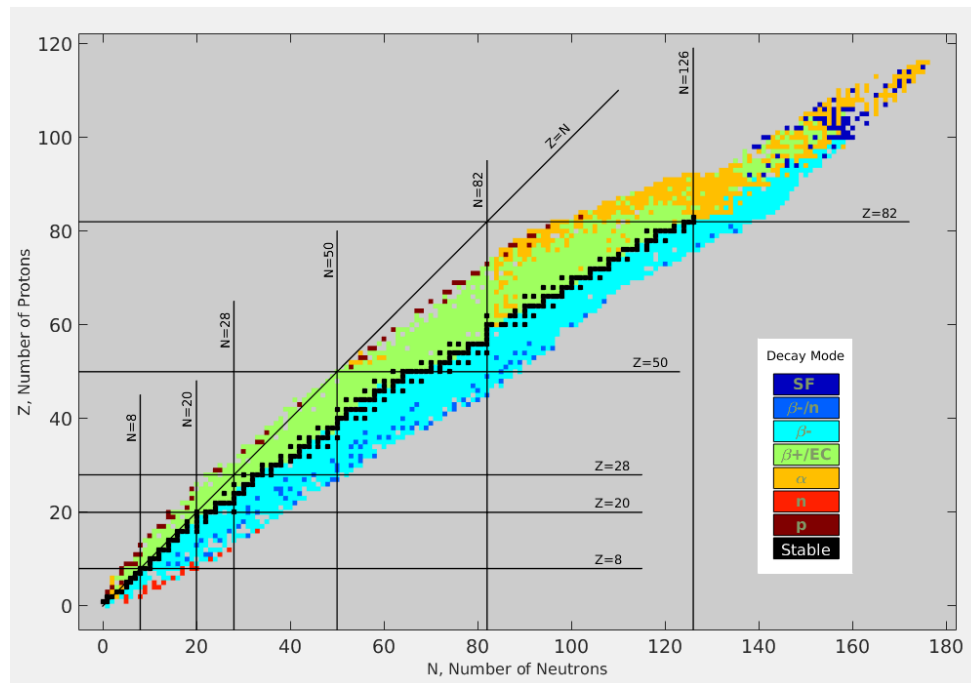


- Celeste oscuro: emisión de neutrones
- Celeste claro: beta- ($n \rightarrow p$)
- Verde claro: beta+ ($p \rightarrow n$)



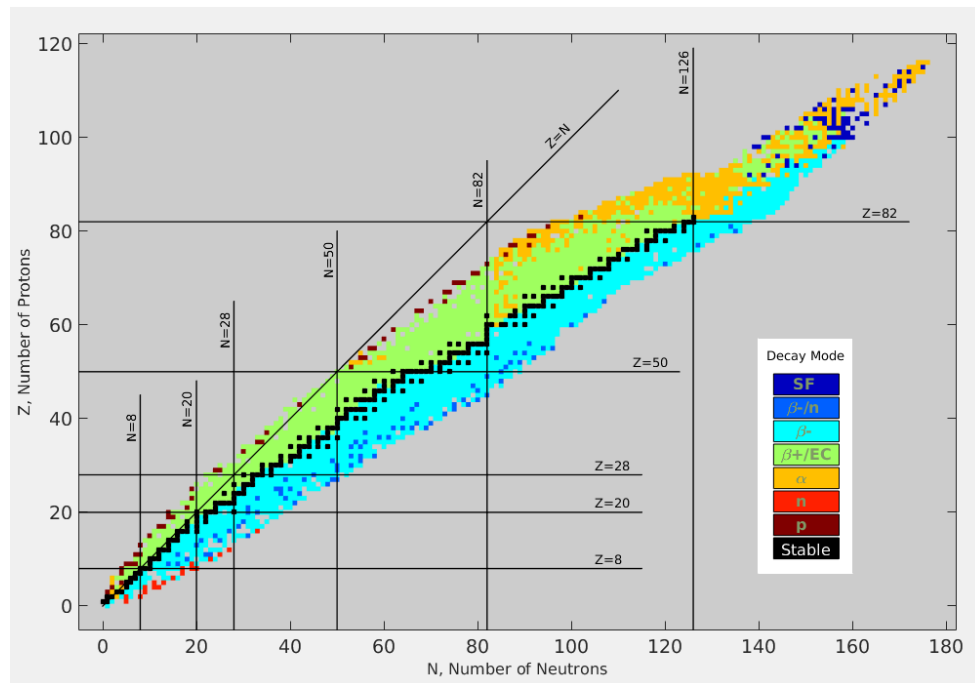
Como funciona

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





Entonces

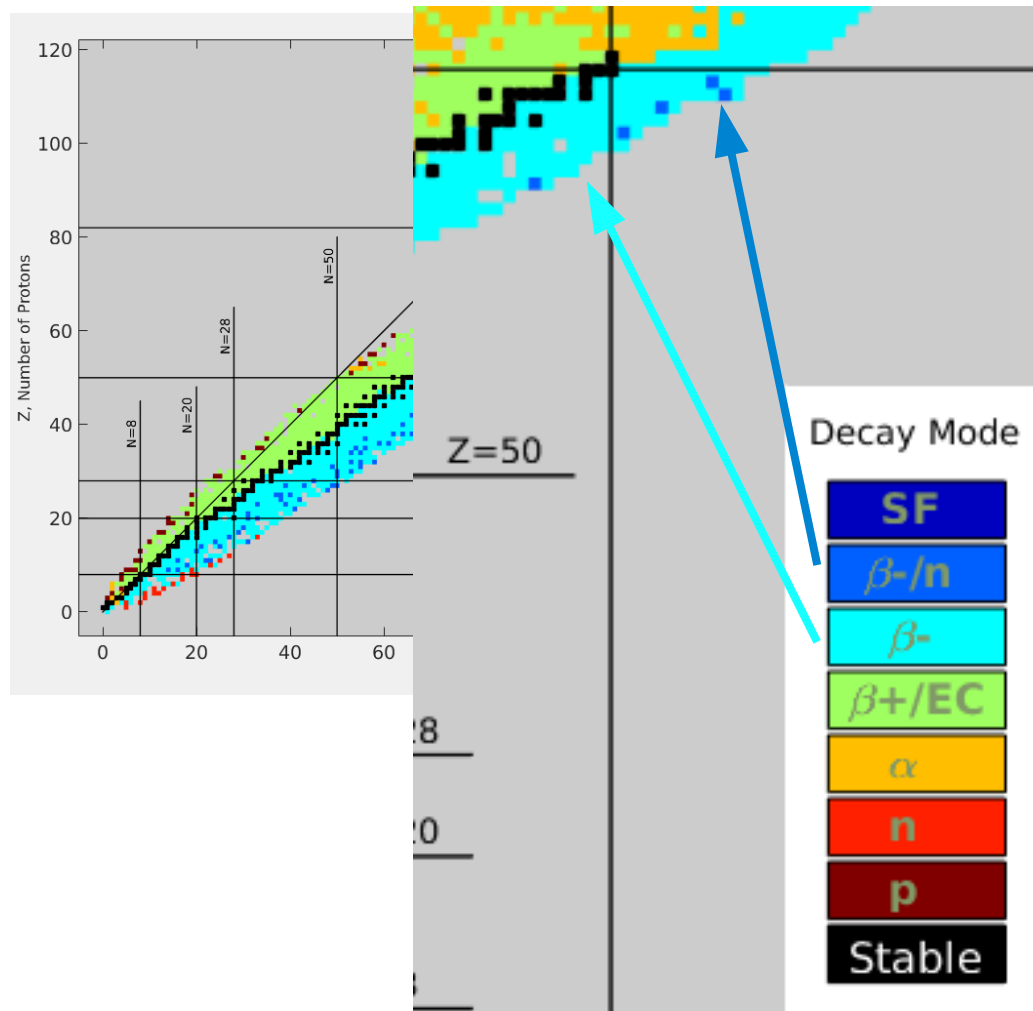


- Hay una proporción de estabilidad (curva negra) entre el número de neutrones y protones
- La fuerza eléctrica $\sim Z^2$
- Los neutrones no tienen carga eléctrica
- Z pequeños, $N/Z \sim 1$, luego $N > Z \rightarrow N/Z \sim 1 + \alpha A^{2/3}$
- Los neutrones aportan a la cohesión nuclear



Interacción fuerte

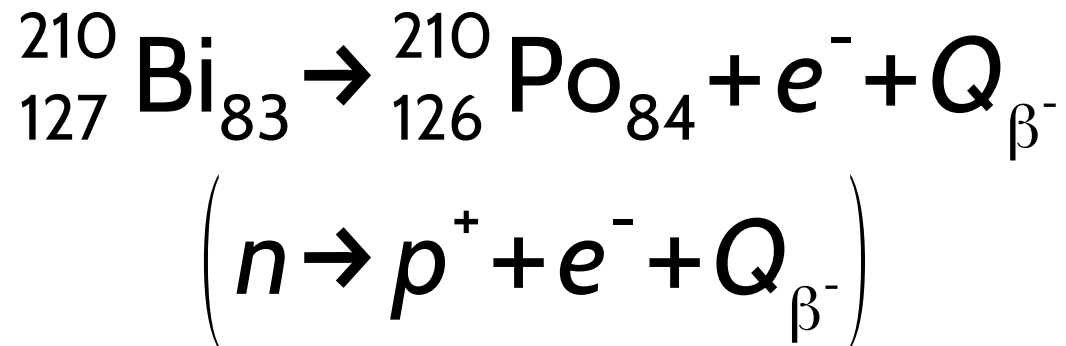
Interacción “Fuerte” (próximamente)



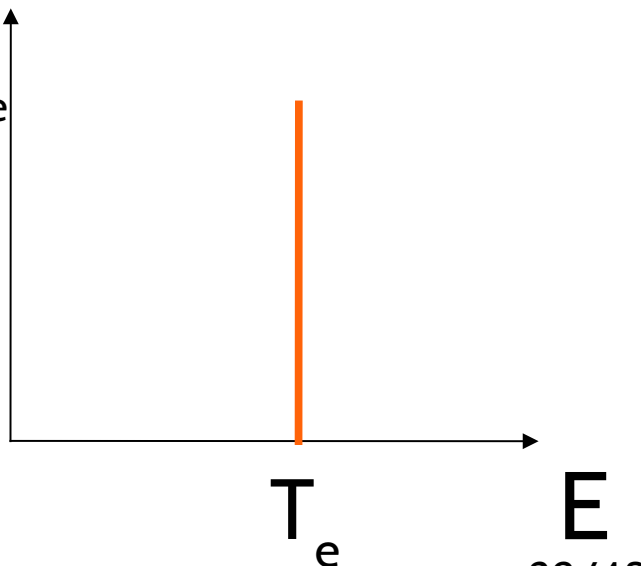
- Hay una proporción de estabilidad (curva negra) entre el número de neutrones y protones
- La fuerza eléctrica $\sim Z^2$
- Los neutrones no tienen carga eléctrica
- Z pequeños, $N/Z \sim 1$, luego $N > Z \rightarrow N/Z \sim 1 + \alpha A^{2/3}$
- Los neutrones aportan a la cohesión nuclear

Un proceso que se observó hace casi 100 años

- Propuesta para el decaimiento beta del Bismuto-210

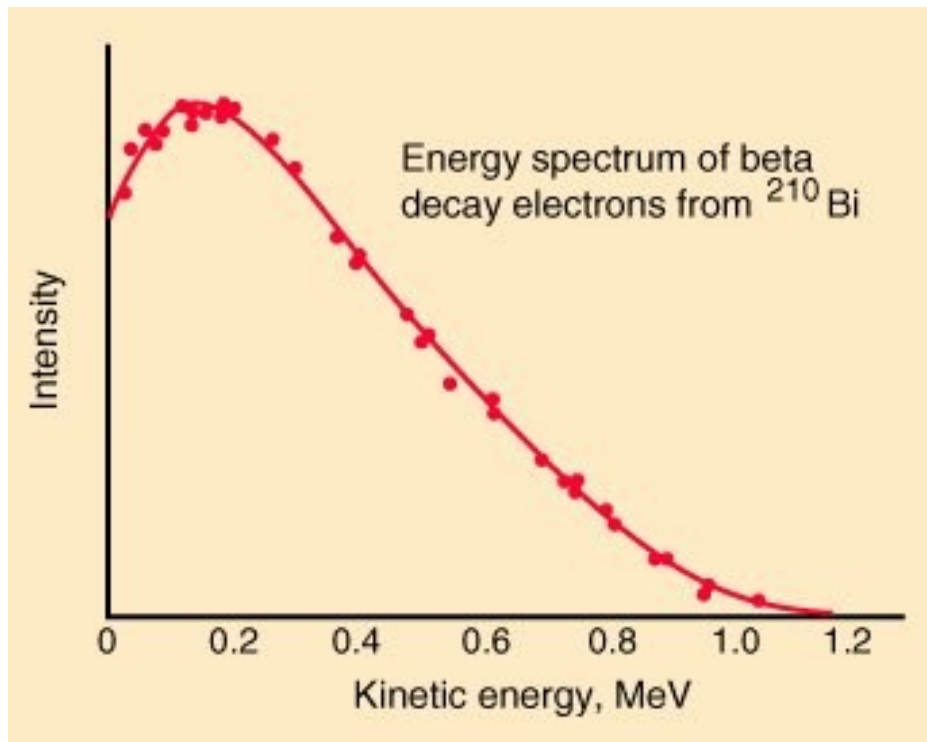


- Luego, la energía liberada debería ser

$$m_{\text{Bi}} c^2 = (m_{\text{Po}} + m_e) c^2 + Q$$
$$Q = (m_{\text{Bi}} - m_{\text{Po}} - m_e) c^2 \approx T_e$$
$$T_e \simeq 1.16 \text{ MeV}$$


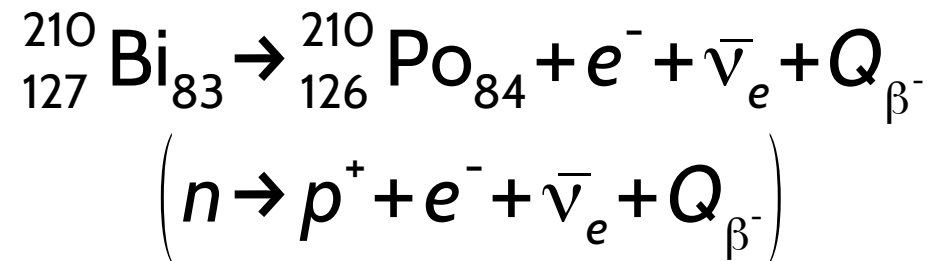


La medición



- 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

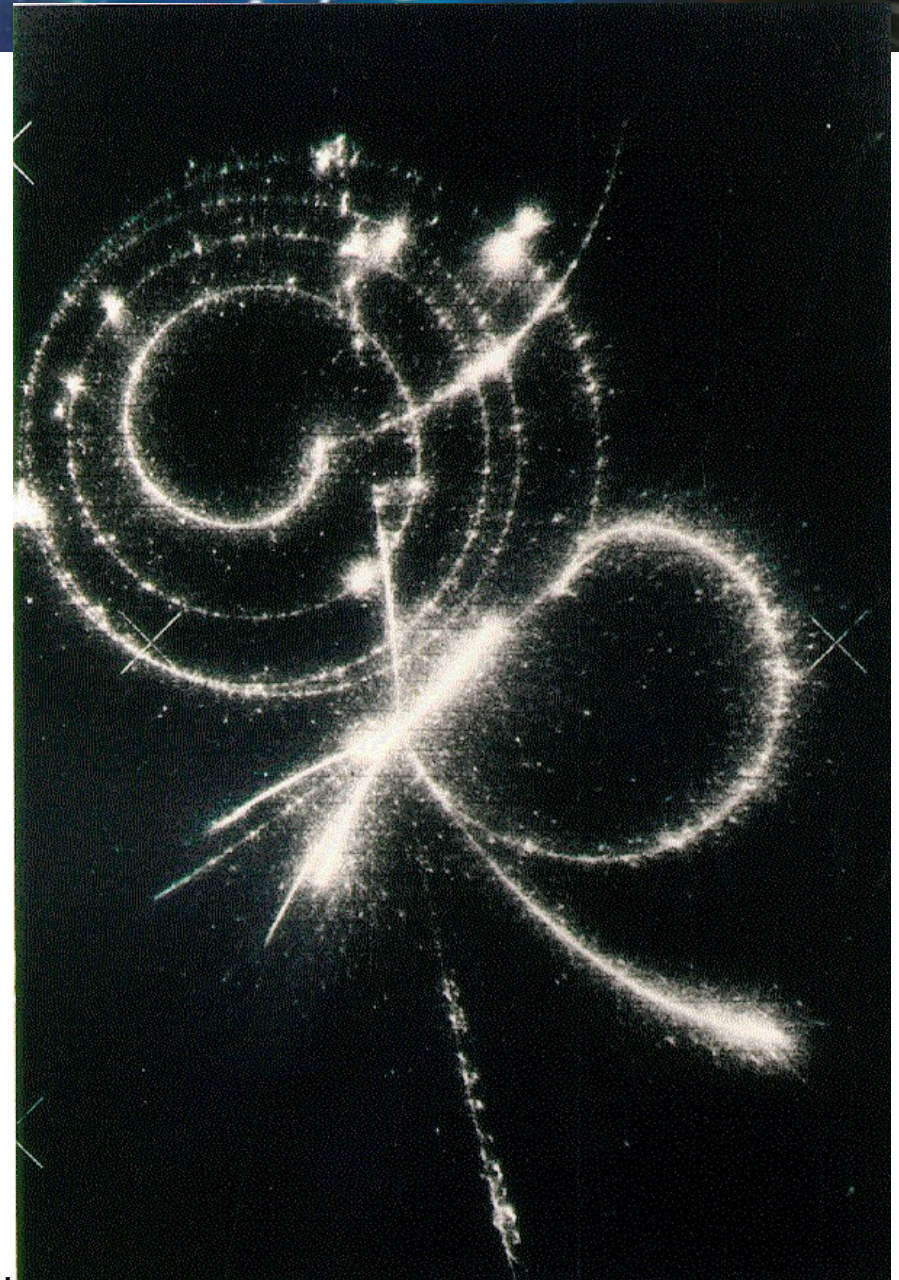
- ... caen rayos cósmicos
- Anderson descubre una partícula $m/q \sim 200 m_e/e$
 $\rightarrow m \sim 100 \text{ MeV}$

- Luego, se observa

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

que también violaba la E

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



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

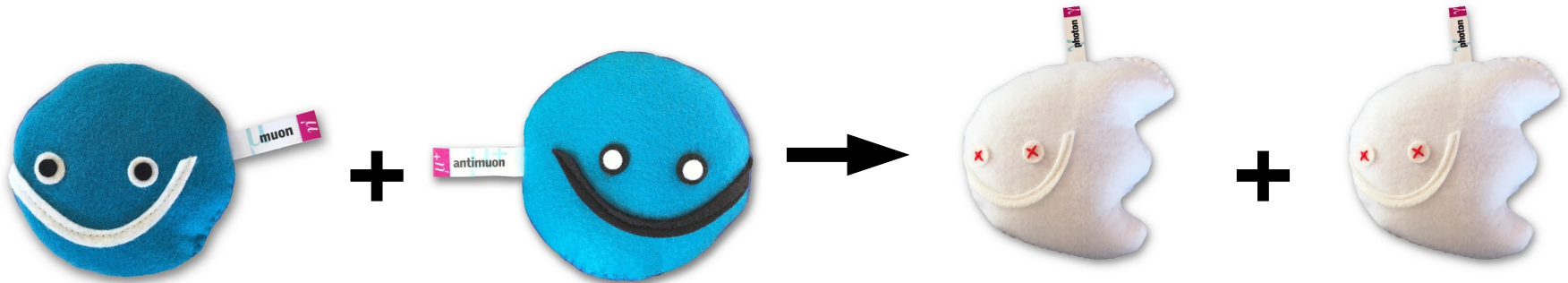


- Antimuón (μ^+)
 - masa: $m_e = 105,6 \text{ MeV}/c^2$
 - Espín: $1/2$
 - Carga eléctrica: $+1$
 - Número leptónico: -1
 - Número lep. electrónico: 0
 - Número lep. muónico: -1
 - Vida media: $2,196 \mu\text{s}$

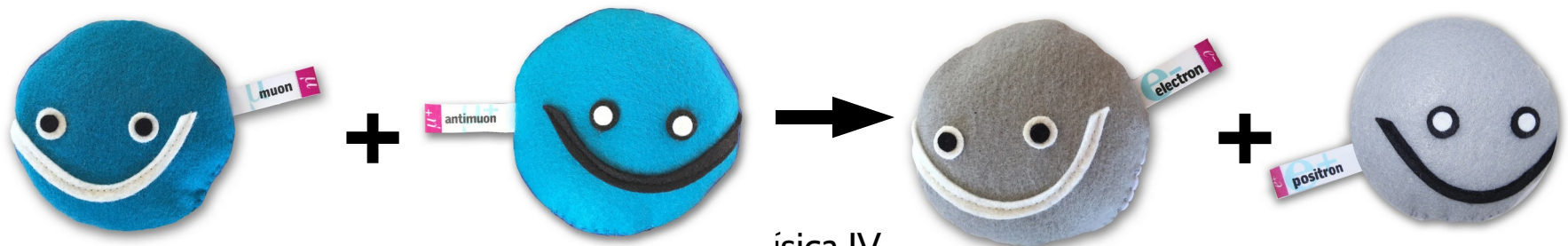


Y si se juntan....

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



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



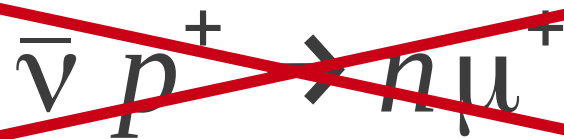
Probemos esto

- Sección eficaz neutrinos

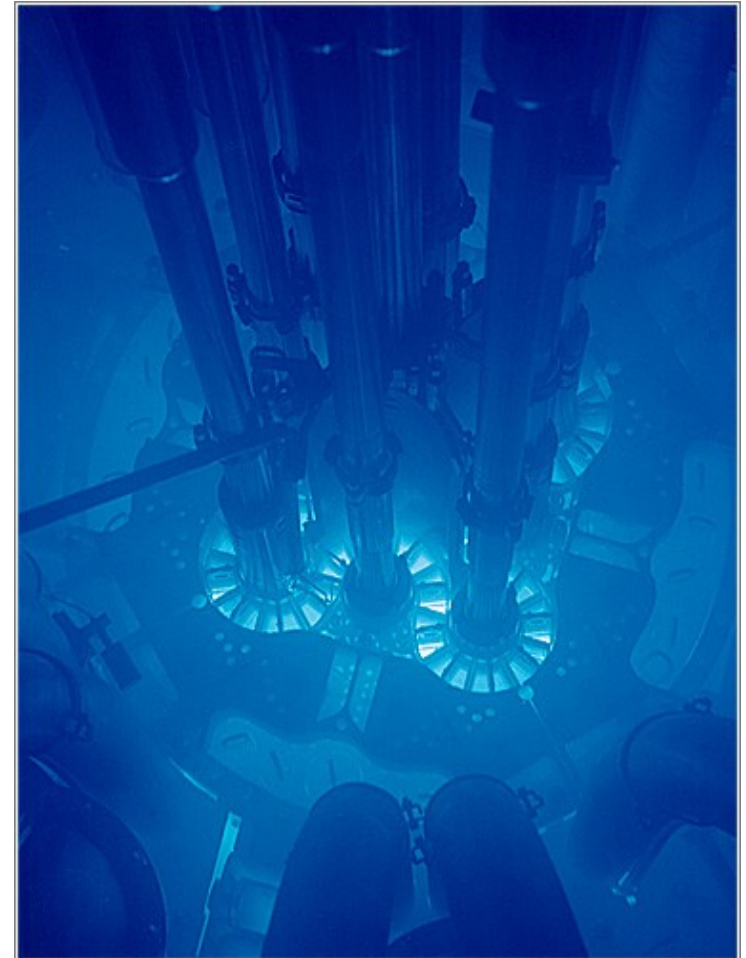
$$\sigma_{\nu} \simeq 10^{-44} \text{ cm}^2$$

~250 años luz de agua (~2 x 10²⁰ cm)

- Usemos 10²⁰ neutrinos en 1 cm de agua



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

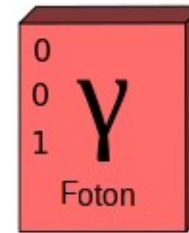


- Existen dos partículas que son muy similares: e^- y μ^-
- Tienen la misma carga eléctrica “negativa”
- Tienen espín semientero $\rightarrow s=1/2$,
 - Son fermiones y cumplen con el ppio de exclusión de Pauli
- Sólo se diferencia en su masa:
 - $m_{e^-} = 0,511 \text{ MeV}/c^2$ y $m_{\mu^-} = 105,6 \text{ MeV}/c^2$
- 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 $\frac{1}{2}$ ν_e Neutrino electrónico	$<0,17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ Neutrino muónico
$0,511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ e Electrón	$105,7 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ μ Muón

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

Y los antileptones



Con ustedes, los
Leptones
(leptón \rightarrow 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)



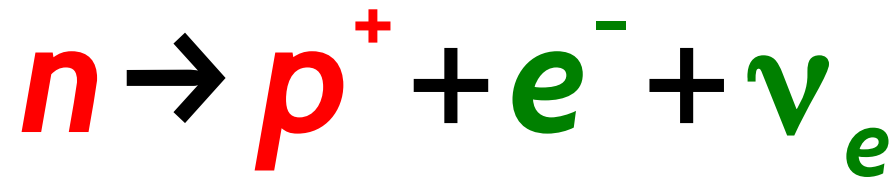
Por ejemplo:



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 



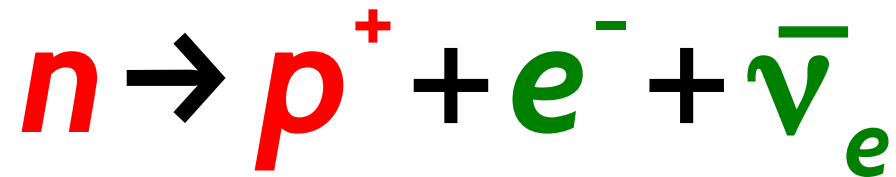
Por ejemplo:

$$n \rightarrow p^{+} + e^{-} + \bar{\nu}_{\mu}$$

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 



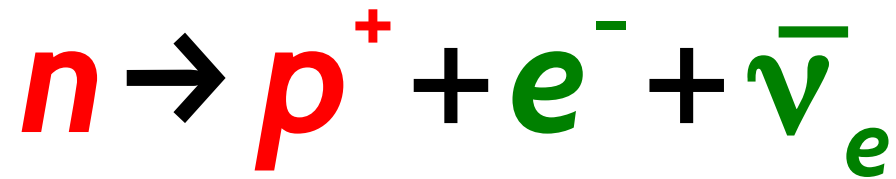
Por ejemplo:



Inicial	Magnitudes 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
	<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?