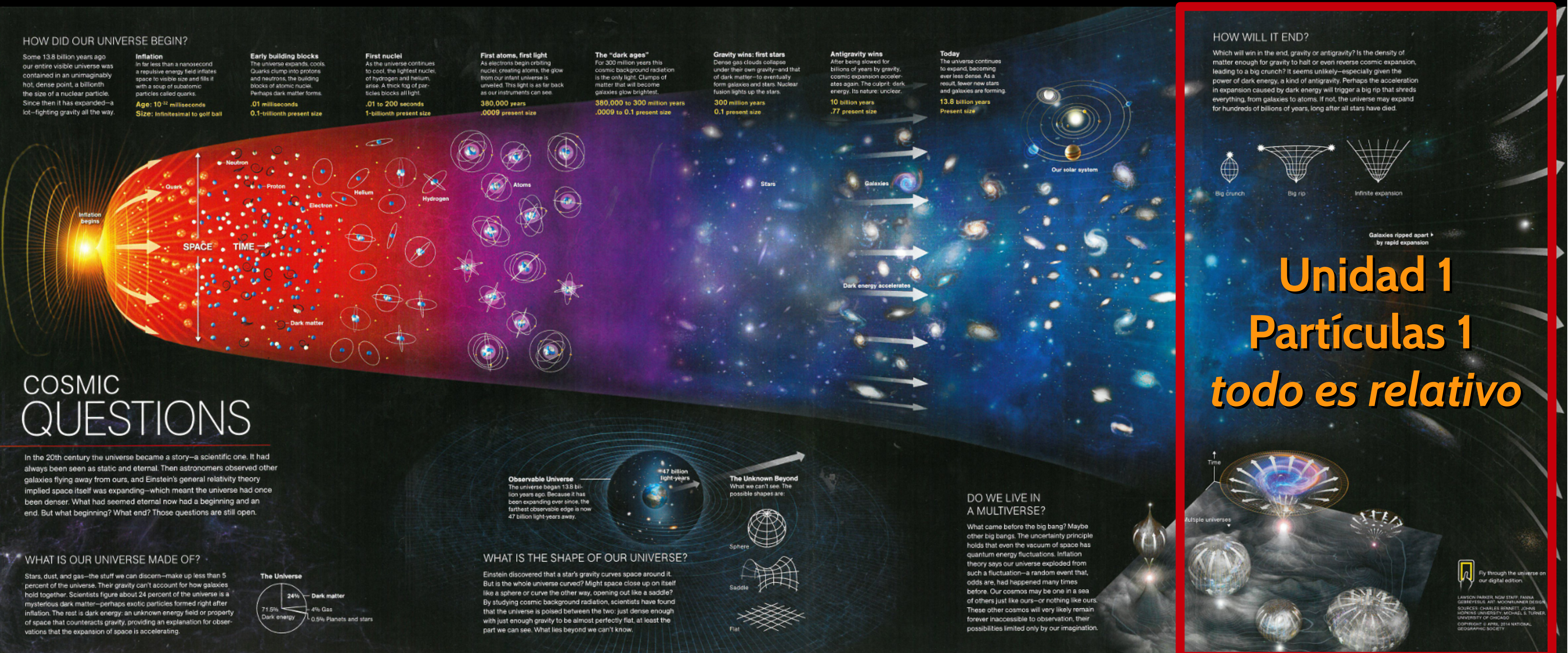
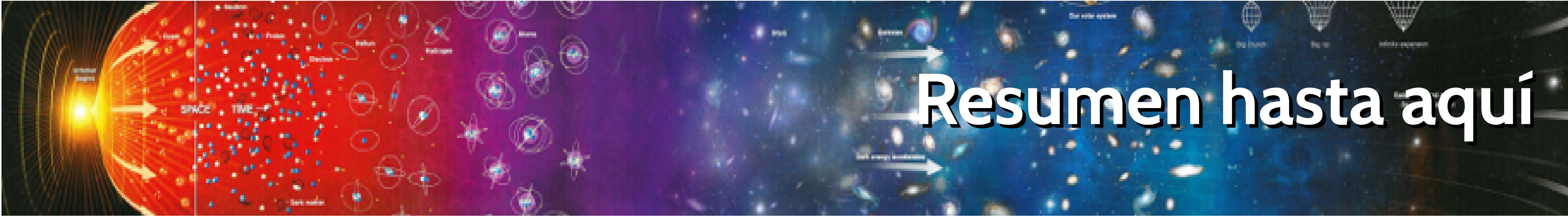
Universidad Nacional de Río Negro
Int. Partículas, Astrofísica & Cosmología - 2016

- **Unidad** 01 – Relatividad
- **Clase** 0105 – 05/16
- **Fecha** 08 Sep 2016
- **Cont** Partículas 2
- **Cátedra** Asorey
- **Web** github.com/asoreyh/unrn-ipac
- **Youtube** www.youtube.com/watch?v=nshZHCdkMUQ
- **Archivo** a-2016-U01-C05-0908-particulas-2

Contenidos: un viaje en el tiempo



Unidad 1
Partículas 1
todo es relativo



Resumen hasta aquí

- Cantidad de movimiento relativista (correcto siempre):

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

- Energía relativista (correcta siempre):

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

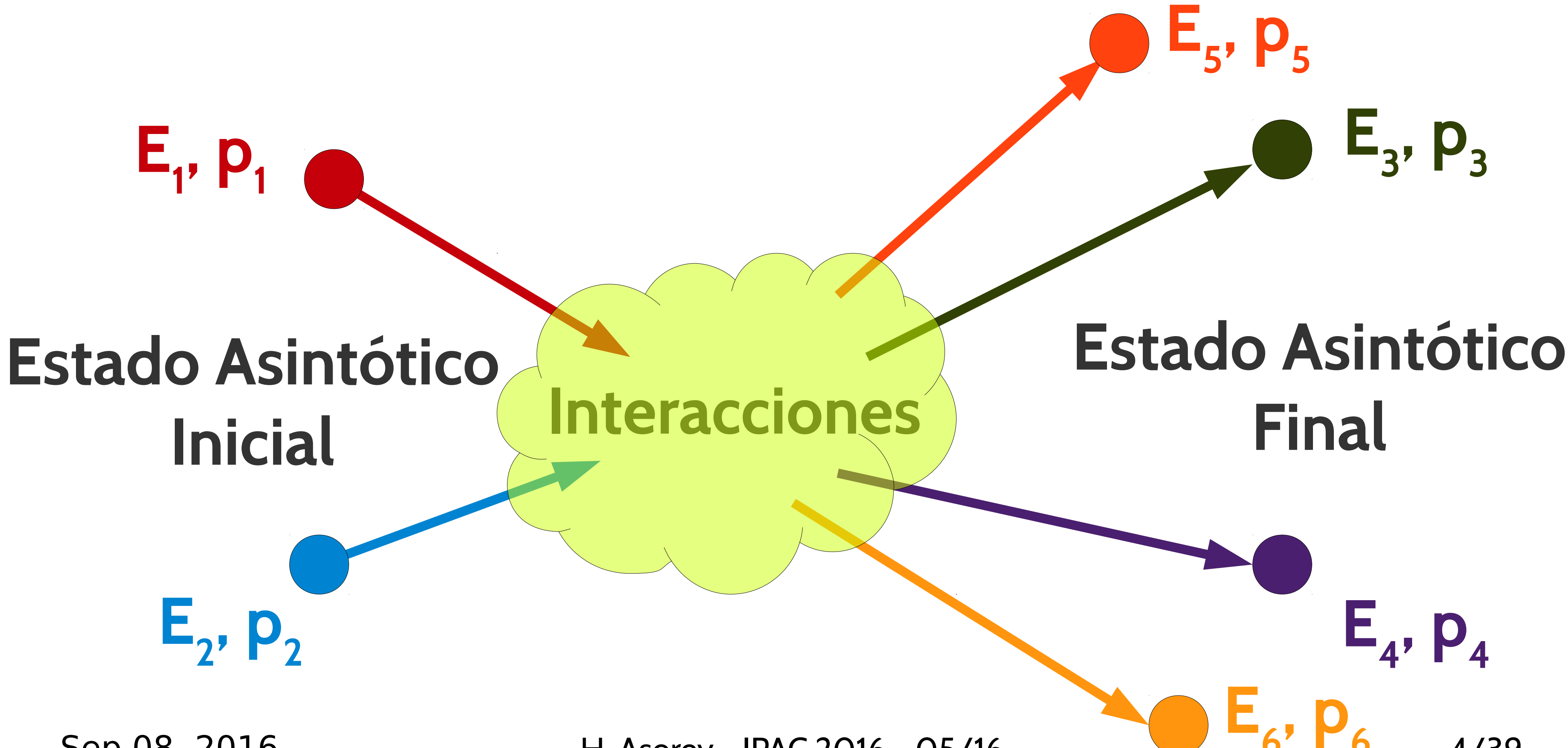
- Un nuevo invariante relativista:

$$\boxed{E^2-(p c)^2=(m c^2)^2}$$

Invariante relativista

¿Cómo funciona la conservación?

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



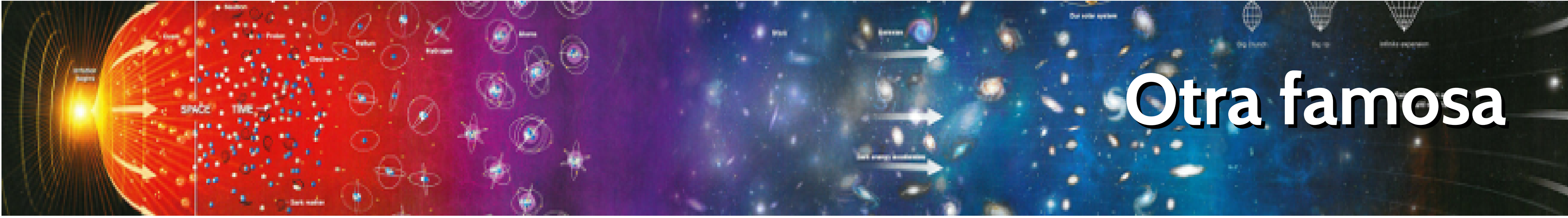
Richard Feynman dijo

- *"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

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



Otra famosa

- Y ahora

$$p^2 c^2 = \frac{m^2 \beta^2 c^4}{1-\beta^2} - \left(\frac{m^2 c^4}{1-\beta^2} \right) + \left(\frac{m^2 c^4}{1-\beta^2} \right)$$

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

$$p^2 c^2 = -m^2 c^4 + m^2 \gamma^2 c^4$$

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

- Entonces:

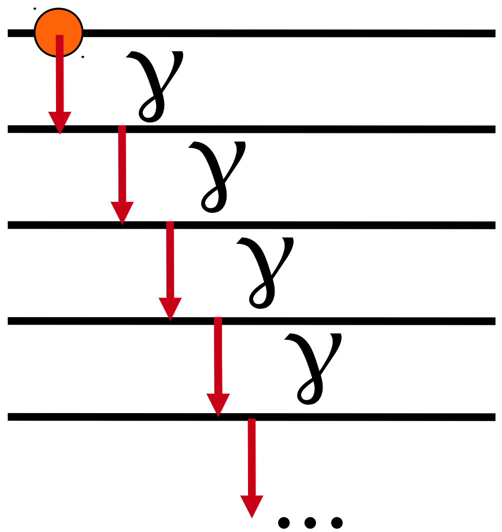
$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4 \rightarrow E = \pm \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$$

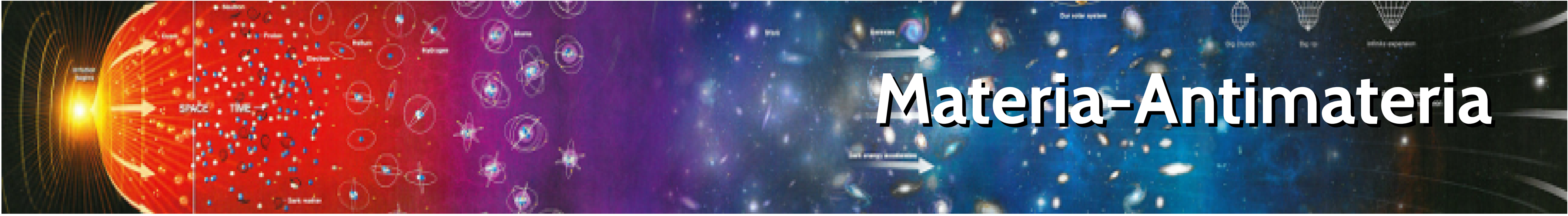
Peeeero...

- También tenemos

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

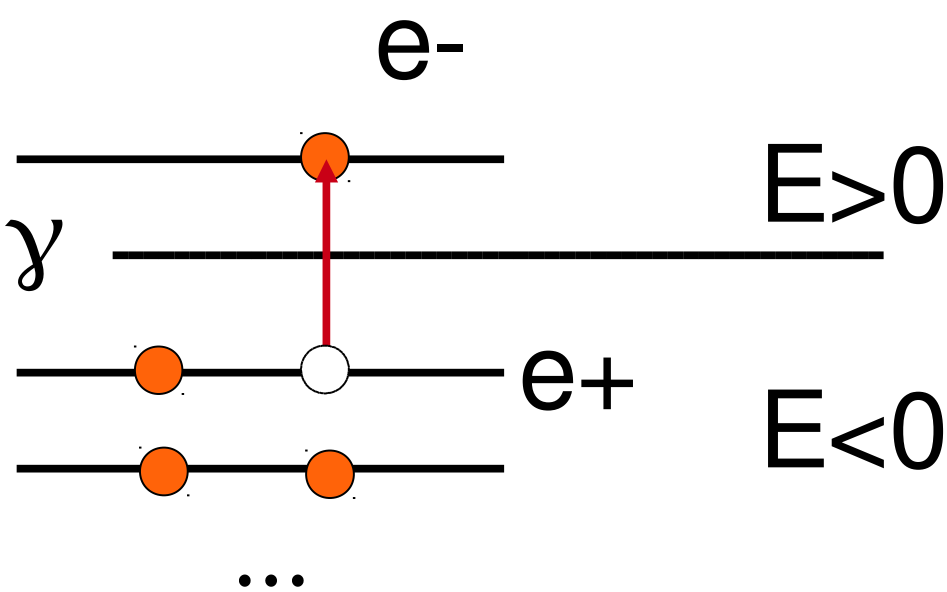
- La relatividad anticipa estados con energía total negativa... → **PROBLEMAS**
- Y encima son infinitos → **MÁS PROBLEMAS**
- Aquí no tengo "estado fundamental"
- **COLAPSO**





Materia-Antimateria

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



$$E_{\gamma} \geqslant 1.022\, MeV$$

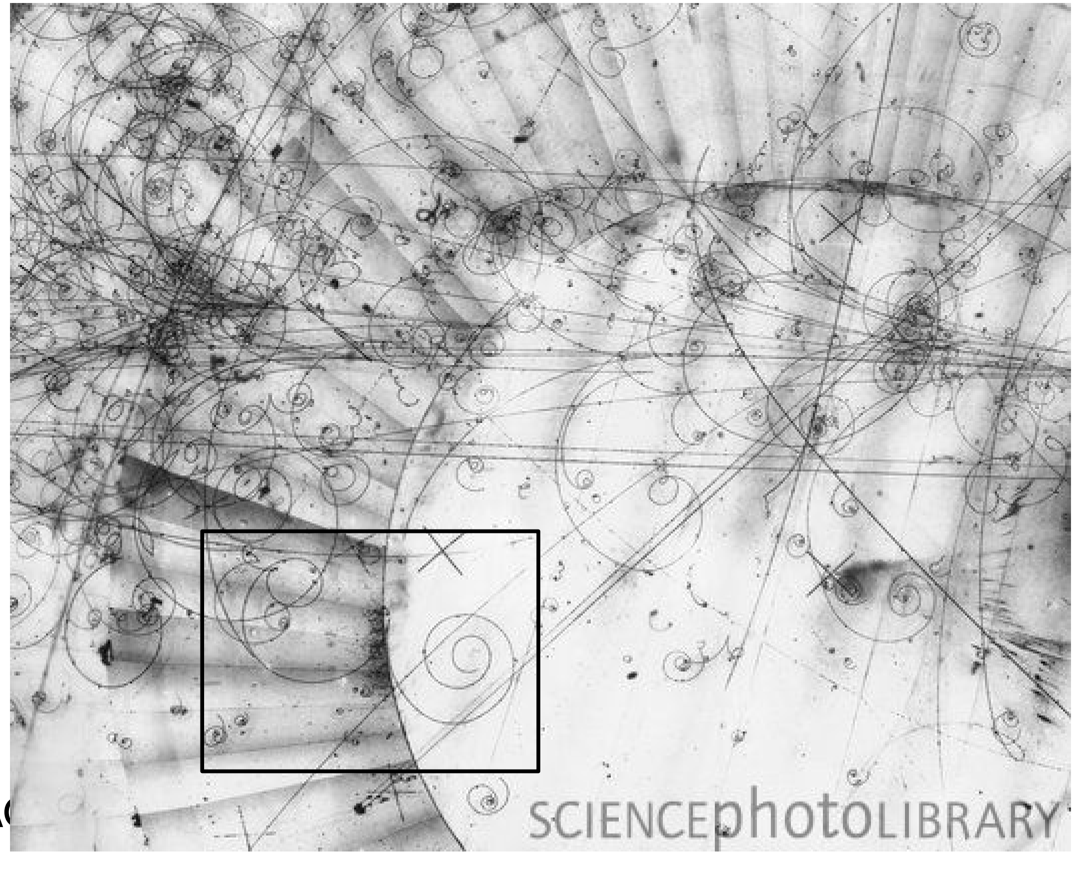
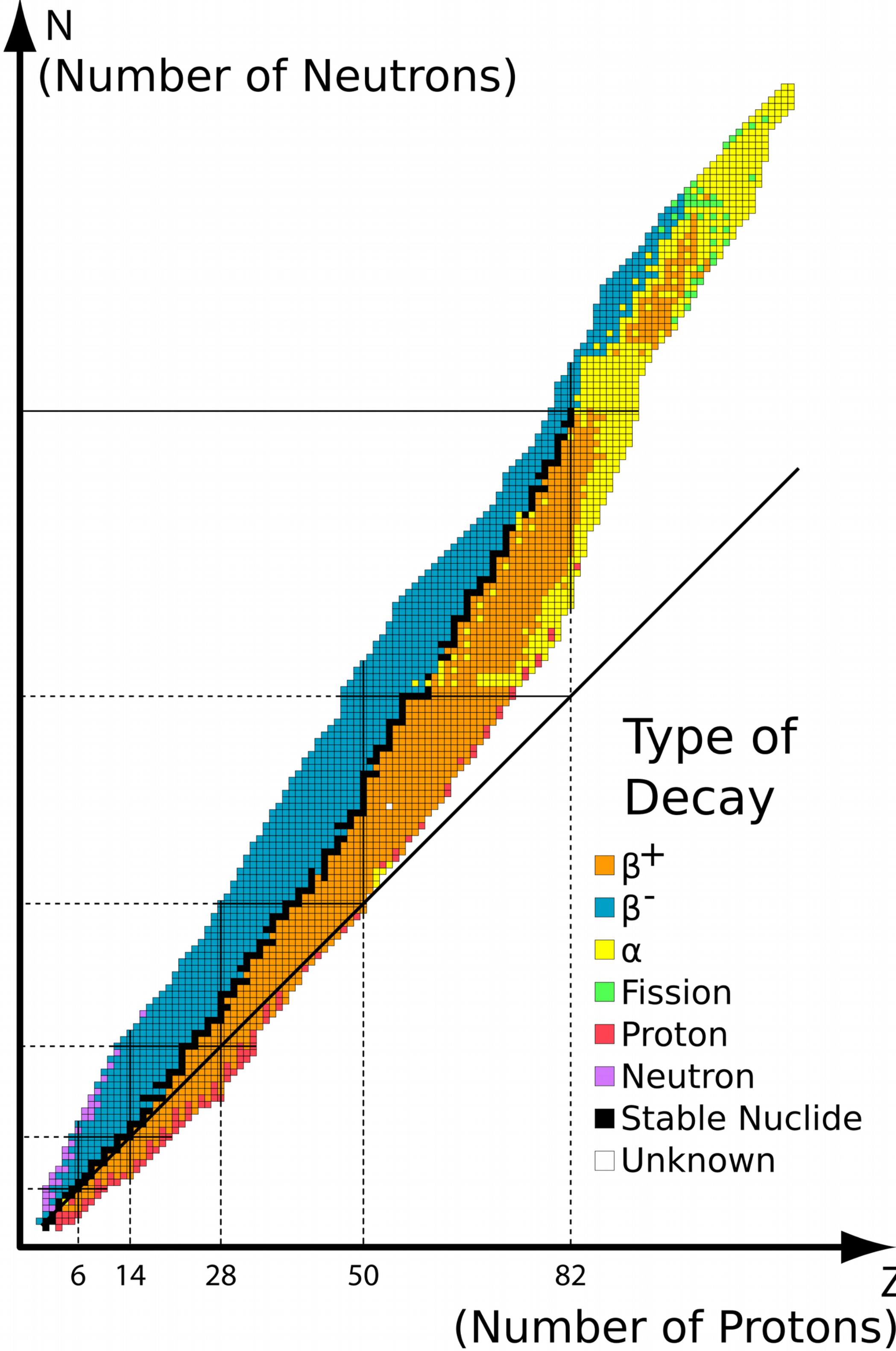


Tabla de nucléidos



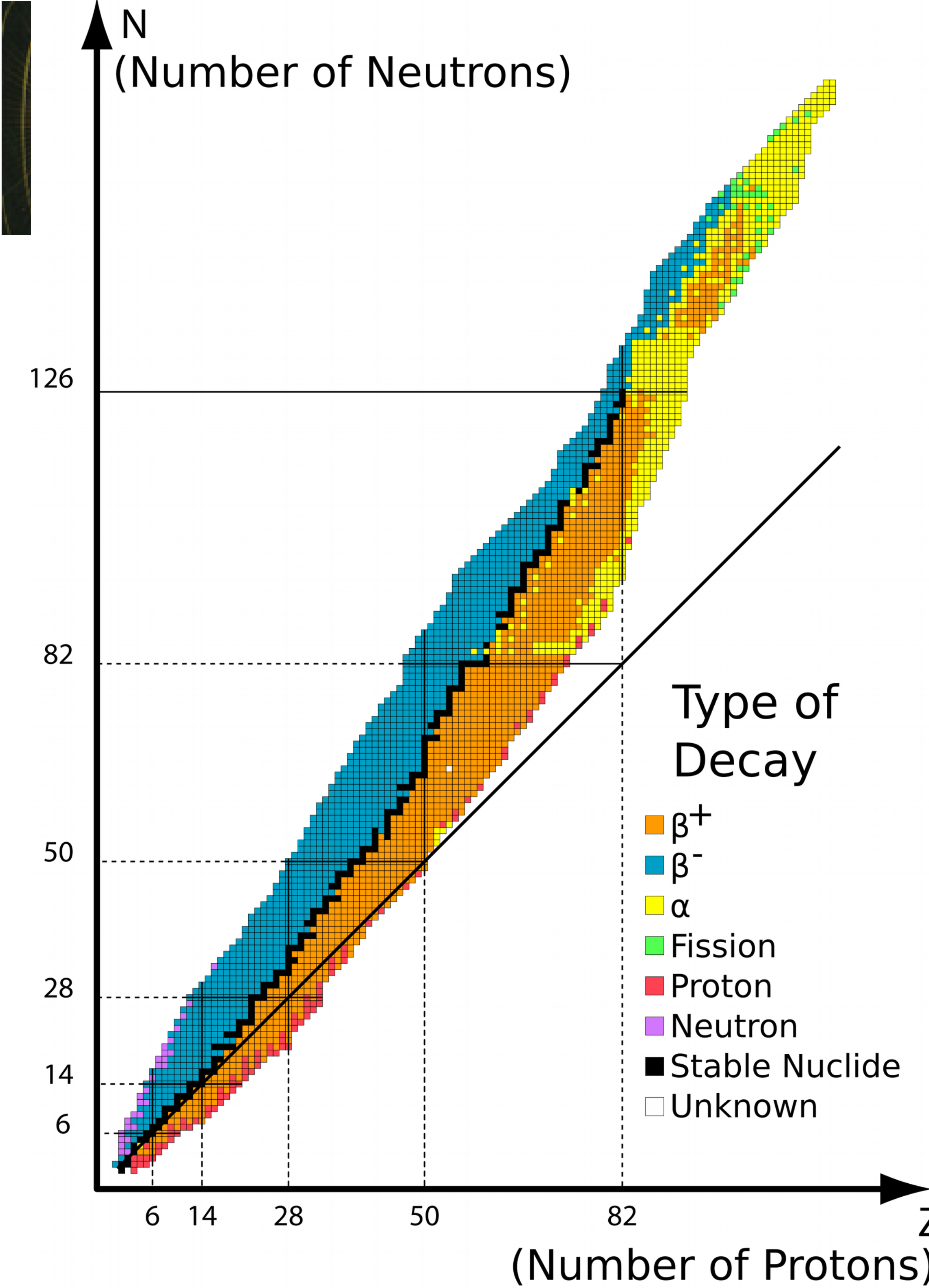
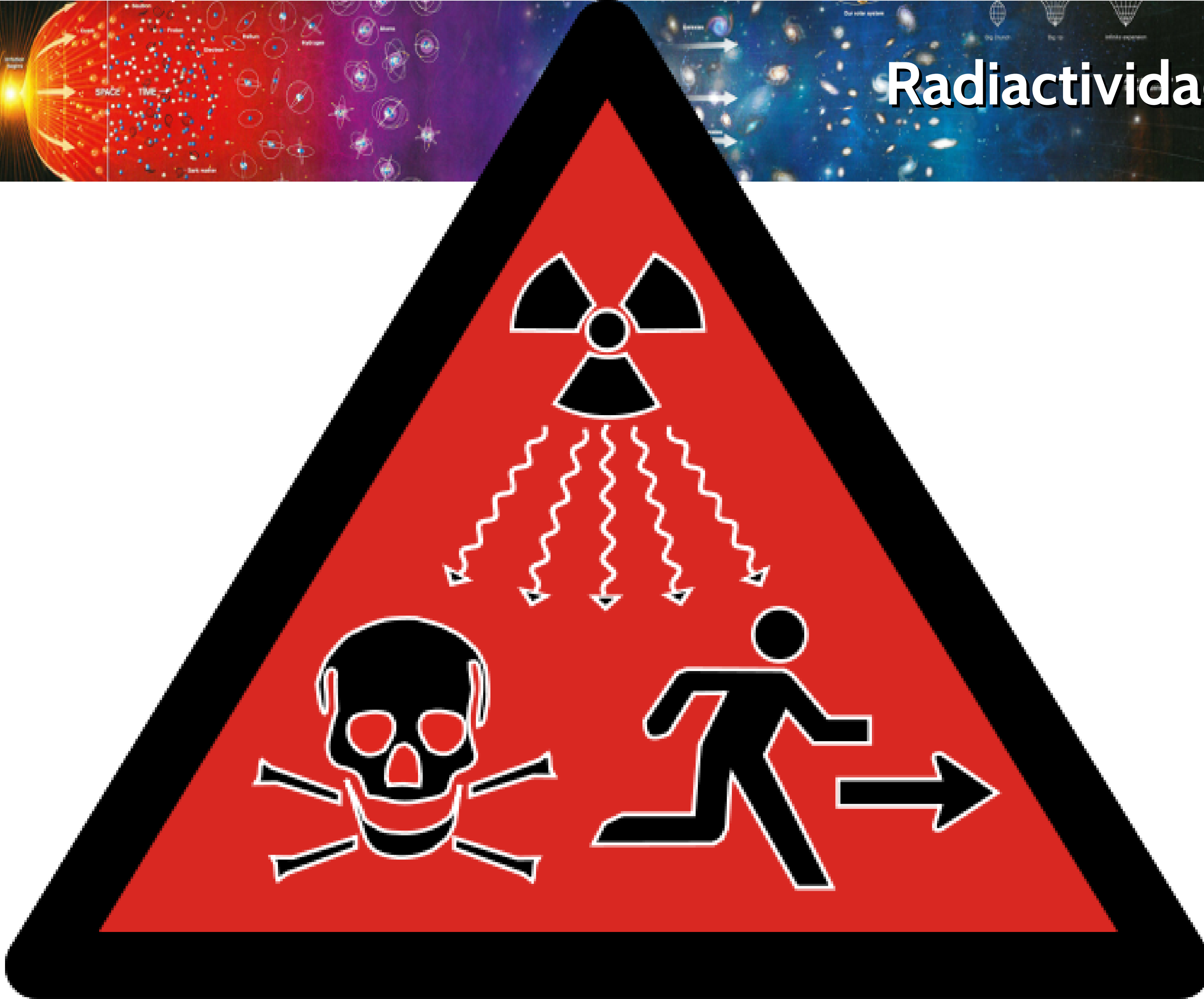


Tabla de nucléidos

- $F_E \sim Z^2$
- Neutrones sin carga eléctrica
- $^{1}H_{1}$ $^{4}He_{2}$ $^{208}Pb_{82}$

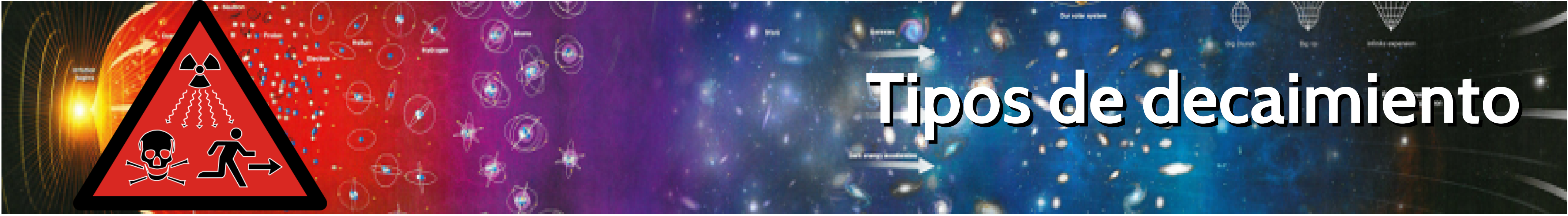
Los neutrones ayudan a la "cohesión" (estabilidad) de los núcleos

Fuerza Fuerte



Radiactividad

- **Fenómeno físico** por el cual algunos elementos inestables **decaen** en otros más estables **emitiendo radiación ionizante** (Energías típicas: keV – MeV). Ttipos:
  - **Alfa**: emisión de un núcleo de Helio (2 protones, 2 neutrones). Poca capacidad de penetración (las detiene un papel)
  - **Beta**: emisión de un electrón o un positrón (media capacidad de penetración: láminas metálicas delgadas)
  - **Gamma**: emisión de un fotón de alta energía (alta capacidad de penetración, hasta plomo)
  - Otros: neutrones, protones, fisión espontánea, fragmentación



Tipos de decaimiento

- **Emisión de partículas cargadas** (alfa, beta, protón, fisión, fragmentación): implican cambios en el número atómico
- **Emisión de neutrones**: cambios en el número másico
- **Emisión de fotones**: desexcitación nuclear
- En todo decaimiento **se libera energía, *Q*,** usualmente en forma de energía cinética de los productos del decaimiento. **El decaimiento ocurre si y sólo si Q>0**
- En general, ***Q* es igual a la diferencia de masa entre reactivos y productos.**

$$Q = \left(m_{\mathrm{reactivos}} - m_{\mathrm{productos}}\right) c^2$$

Ley de decaimiento radiactivo

- **Suceso cuántico y estadístico**: **no podemos saber cuando un átomo particular decaerá.**
- Se observa que para un elemento la **tasa de decaimiento es constante, λ.**

$$[\lambda] = s^{-1}$$

Ley de decaimiento radiactivo

+ Sea una muestra con N_0 núcleos inestables.

+ El núcleo tiene una tasa de decaimiento λ, $[\lambda] = s^{-1}$

$\Rightarrow \quad N_0 \xrightarrow{t} N(t) \qquad N(t) < N_0 \quad$ y $\quad N(t) = N_0 + dN \Rightarrow dN < 0$

Luego, en un tiempo dt:

$$\boxed{\frac{dN}{dt} = -\lambda N} \qquad \left(\frac{dN}{dt} < 0\right)$$

Aplicamos el procedimiento usual para esta ecuación diferencial:

$$\Rightarrow \frac{dN}{N} = -\lambda dt \Rightarrow \int \frac{dN}{N} = -\lambda \int dt \Rightarrow \ln N = -\lambda t + C$$

Siendo C la constante de integración. Luego:

$$e^{\ln N} = e^{-\lambda t + C} \Rightarrow N(t) = e^{-\lambda t} e^{C} \text{ y para } t=0, N(t) = N_0 \Rightarrow$$

$$N_0 = e^{-\lambda 0} e^{C} \Rightarrow e^{C} = N_0 . \text{ Finalmente:}$$

$$\boxed{N(t) = N_0 e^{-\lambda t}}$$

Ley de Decaimiento Radiactivo.

Ley de decaimiento radiactivo

- **Suceso cuántico y estadístico**: **no podemos saber cuando un átomo particular decaerá.**
- Se observa que para un elemento la **tasa de decaimiento es constante, λ.**

$$[\lambda]=s^{-1}$$

- Luego, en una muestra con *N* átomos radiactivos, la tasa de decaimiento *dN/dt* será proporcional a *N*:

$$\frac{-dN}{dt}=-\lambda N \rightarrow \frac{dN}{N}=-\lambda\, dt \rightarrow \int \frac{dN}{N}=\int -\lambda\, dt$$

$$\rightarrow \ln N=-\lambda t+C \rightarrow N(t)=N_0 e^{-\lambda t}$$

Ley de Decaimiento exponencial

- Ocurre con una **tasa de decaimiento constante λ**

$$N(t)=N_0 e^{-\lambda t} \qquad [\lambda]=s^{-1}$$

- A partir de λ, definimos la **vida media τ**

$$\tau \equiv \frac{1}{\lambda} \Rightarrow N(t)=N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \qquad [\tau]=s$$

- Y además, el **período de semi-desintegración, como el tiempo que debe transcurrir para que la cantidad del elemento en una muestra se reduzca a la mitad**

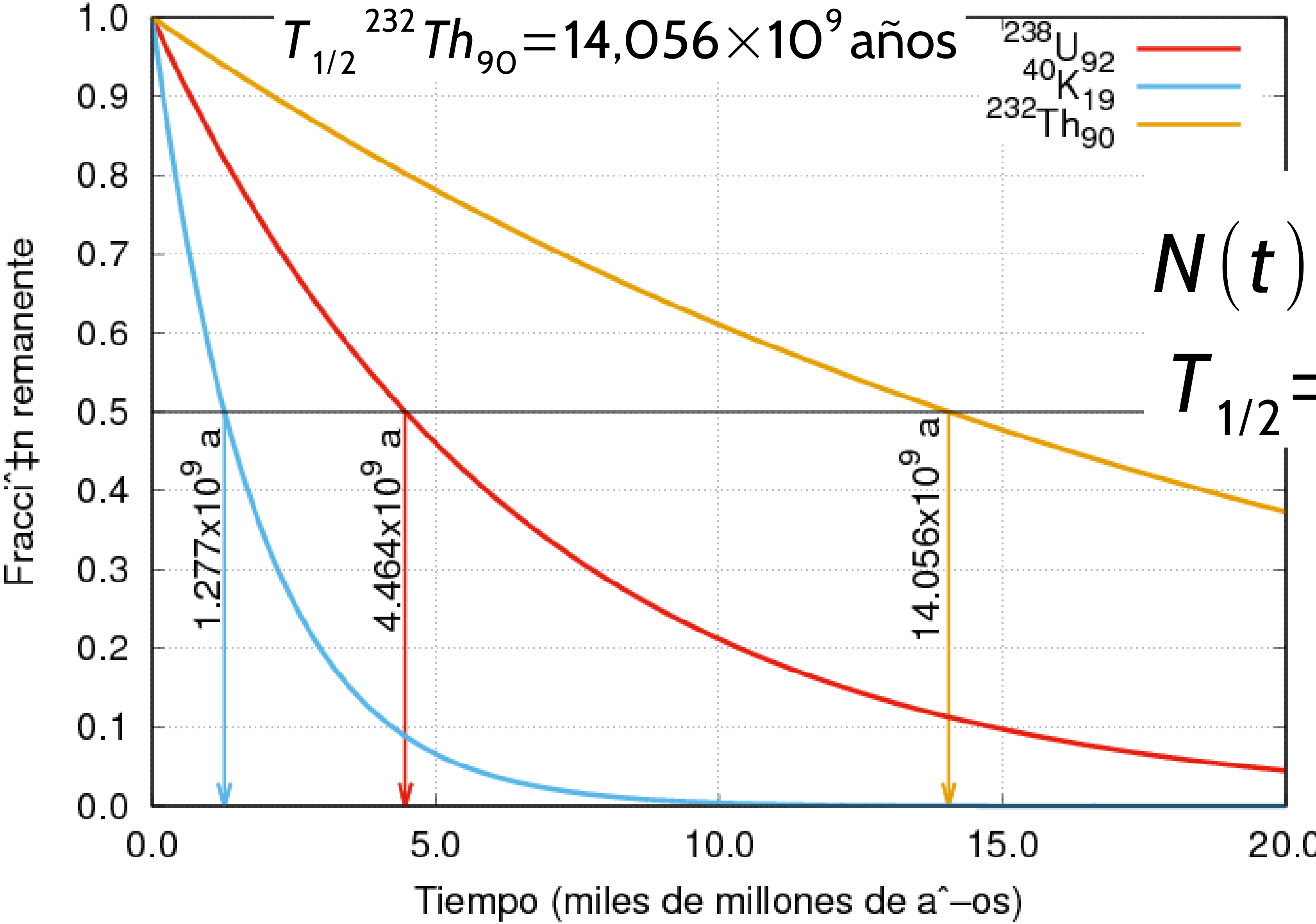
$$T_{1/2} \text{ es tal que } N(T_{1/2})=\frac{N_0}{2}=N_0 e^{-\frac{T_{1/2}}{\tau}} \Rightarrow \frac{1}{2}=e^{-\frac{T_{1/2}}{\tau}}$$

$$\Rightarrow T_{1/2}=\ln(2)\tau$$

$$T_{1/2}\,{}^{40}K_{19} = 1{,}277 \times 10^{9}\text{ años}$$

$$T_{1/2}\,{}^{238}U_{92} = 4{,}464 \times 10^{9}\text{ años}$$

$$T_{1/2}\,{}^{232}Th_{90} = 14{,}056 \times 10^{9}\text{ años}$$



$$N(t) = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$T_{1/2} = \ln(2)\,\tau$$

En un mol de $^{232}Th_{90}$, ¿Cuántos decaimientos se producen en un segundo?

+ Sea un mol de $^{232}_{142}Th_{90}$ ($\Rightarrow N_0 = 6.02 \times 10^{23}$ átomos de Thorio)

+ La masa del mol es 232 g.

+ $T_{1/2} = 14{,}056 \times 10^9\, a = 4{,}43 \times 10^{17}\, s$

+ $T_{1/2} = \ln(2)\,\tau \Rightarrow \tau = T_{1/2}/\ln(2) \Rightarrow \tau = 6{,}39 \times 10^{17}\, s$

Con lo cual $\lambda = \frac{1}{\tau} = 1{,}56 \times 10^{-18}\, s^{-1}$

+ Luego cada segundo esperamos medir $\Delta N = N_0 \cdot \lambda$

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = -N_0 \cdot 1{,}56 \times 10^{-18}\, s^{-1}$$ para el primer segundo

$$\Rightarrow \frac{\Delta N}{\Delta t} = -6{,}02 \times 10^{23} \cdot 1{,}56 \times 10^{-18}\, s^{-1}$$

Aproximación valida si $\Delta t \ll \tau$

$$\Rightarrow \frac{\Delta N}{\Delta t} \cong -10^6\, at/s$$ para el primer segundo.

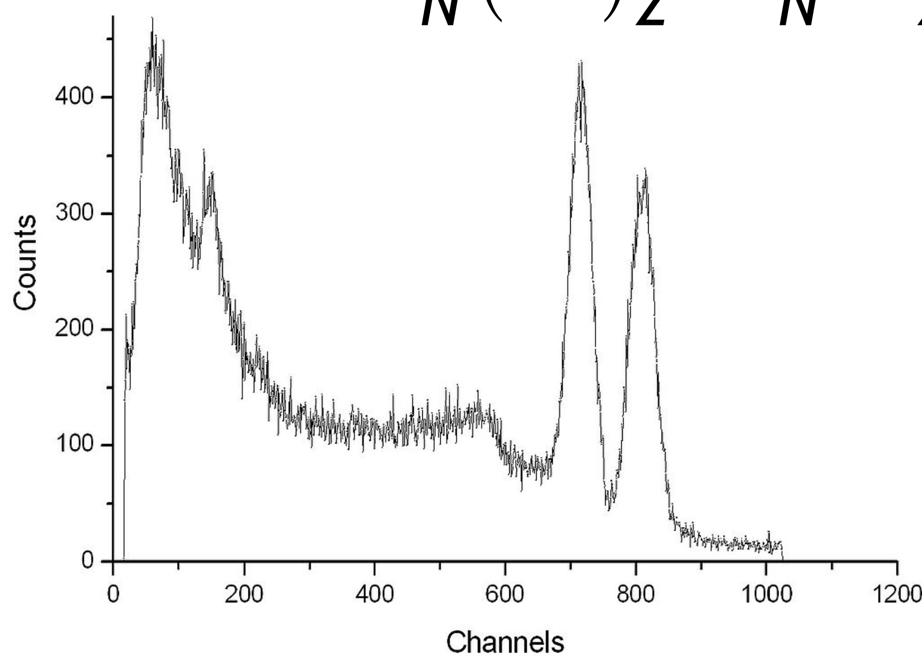
Para tiempos largos $\Rightarrow N(t) = N_0\, e^{-t/\tau} \Rightarrow \Delta N = N(t) - N_0$

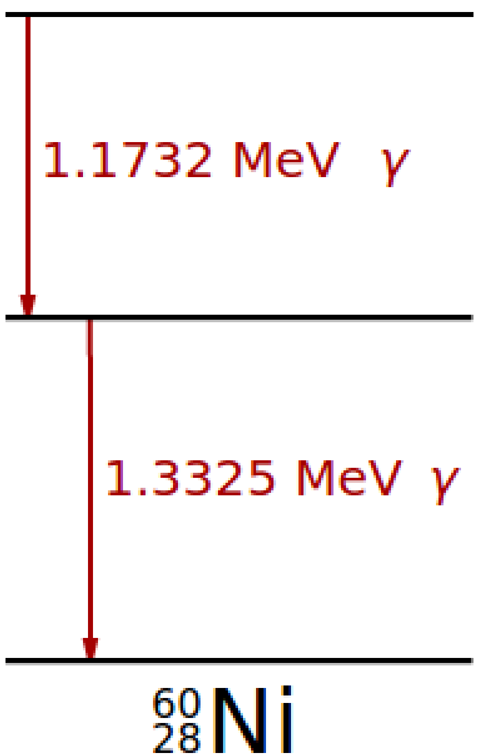
$$\Rightarrow \Delta N = N_0\left(e^{-t/\tau} - 1\right) \Rightarrow \Delta N \simeq -10^{+6}\, at$$ para $t = 1\,s$.

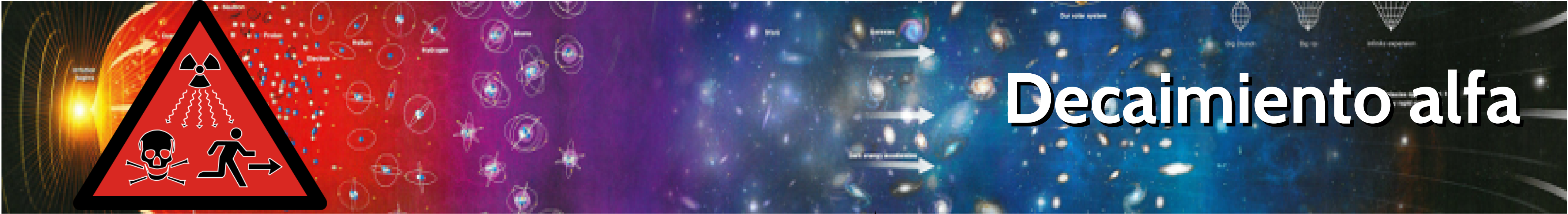
Emisión Gamma

- El núcleo tiene niveles de energía
- El núcleo en un estado excitado se desexcita a través de la emisión de un fotón (gamma) con energía igual a la diferencia de energía entre los estados inicial y final

$$ {}^{A}_{N}(X)^{*}_{Z} \rightarrow {}^{A}_{N}X_{Z} + \gamma $$



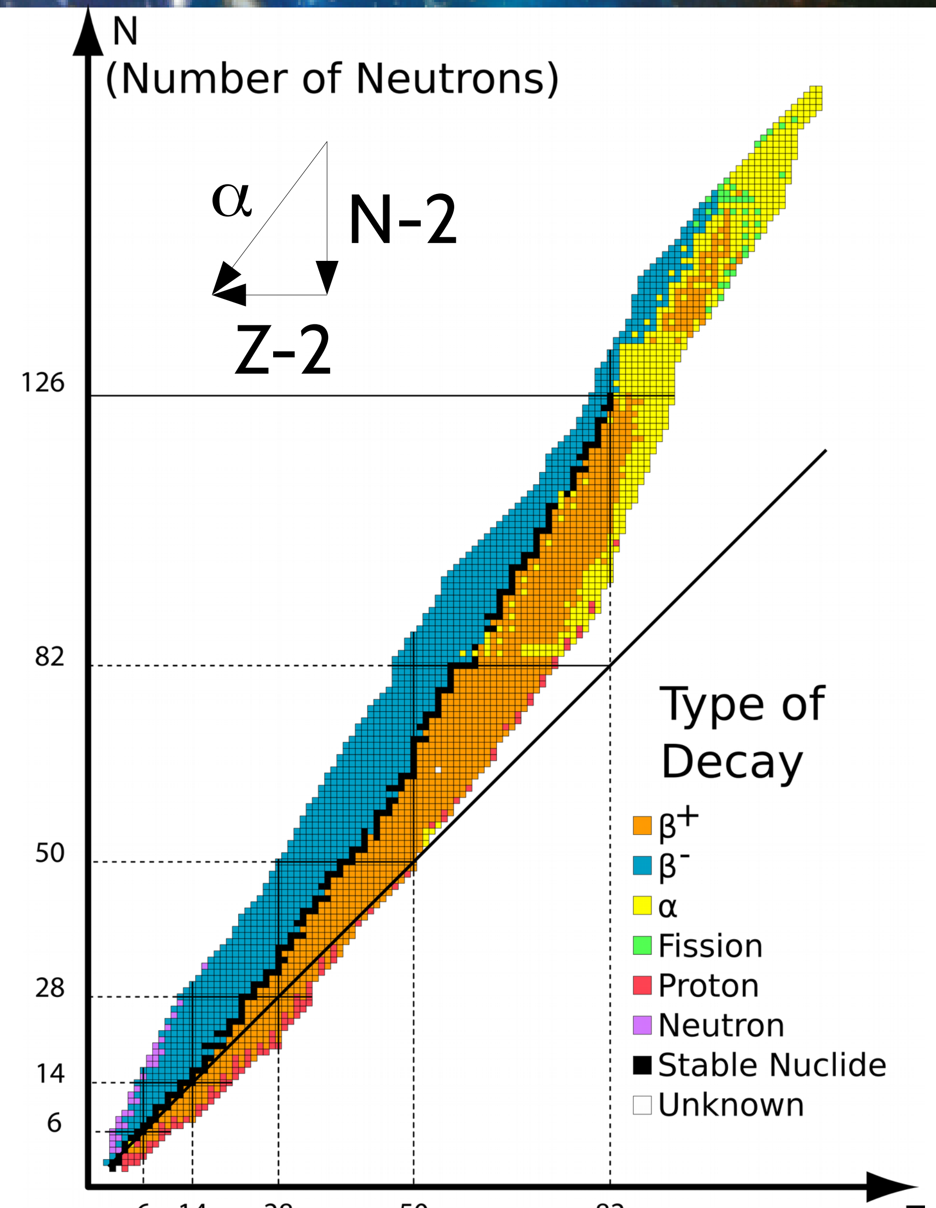


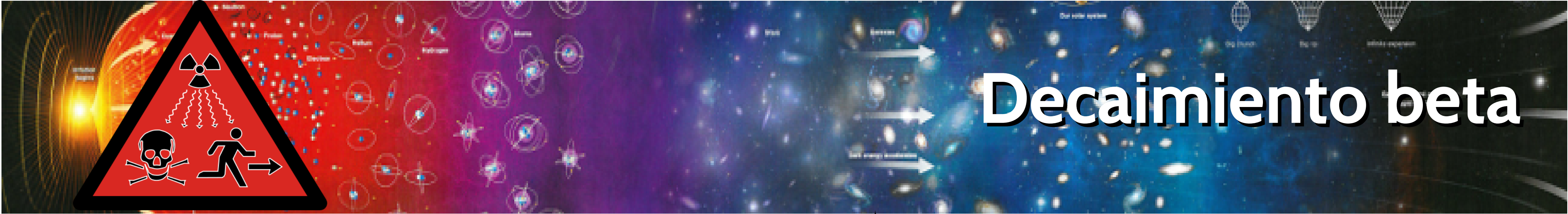


Decaimiento alfa

- Corresponde a la emisión espontánea de un núcleo de Helio ${}^{4}He_{2}$ (partícula alfa, 2 neutrones, 2 protones)
- El núcleo pierde dos protones → ¡otro elemento!

$$ {}^{A}_{N}X_{Z} \rightarrow {}^{A-4}_{N-2}Y_{Z-2} + \alpha + Q_{\alpha} $$





Decaimiento beta

- **β^-**: emisión de un **electrón**

$$ {}^{A}_{N}X_{Z} \rightarrow {}^{A}_{N-1}Y_{Z+1} + e^{-} + \bar{\nu}_{e} + Q_{\beta^-} $$

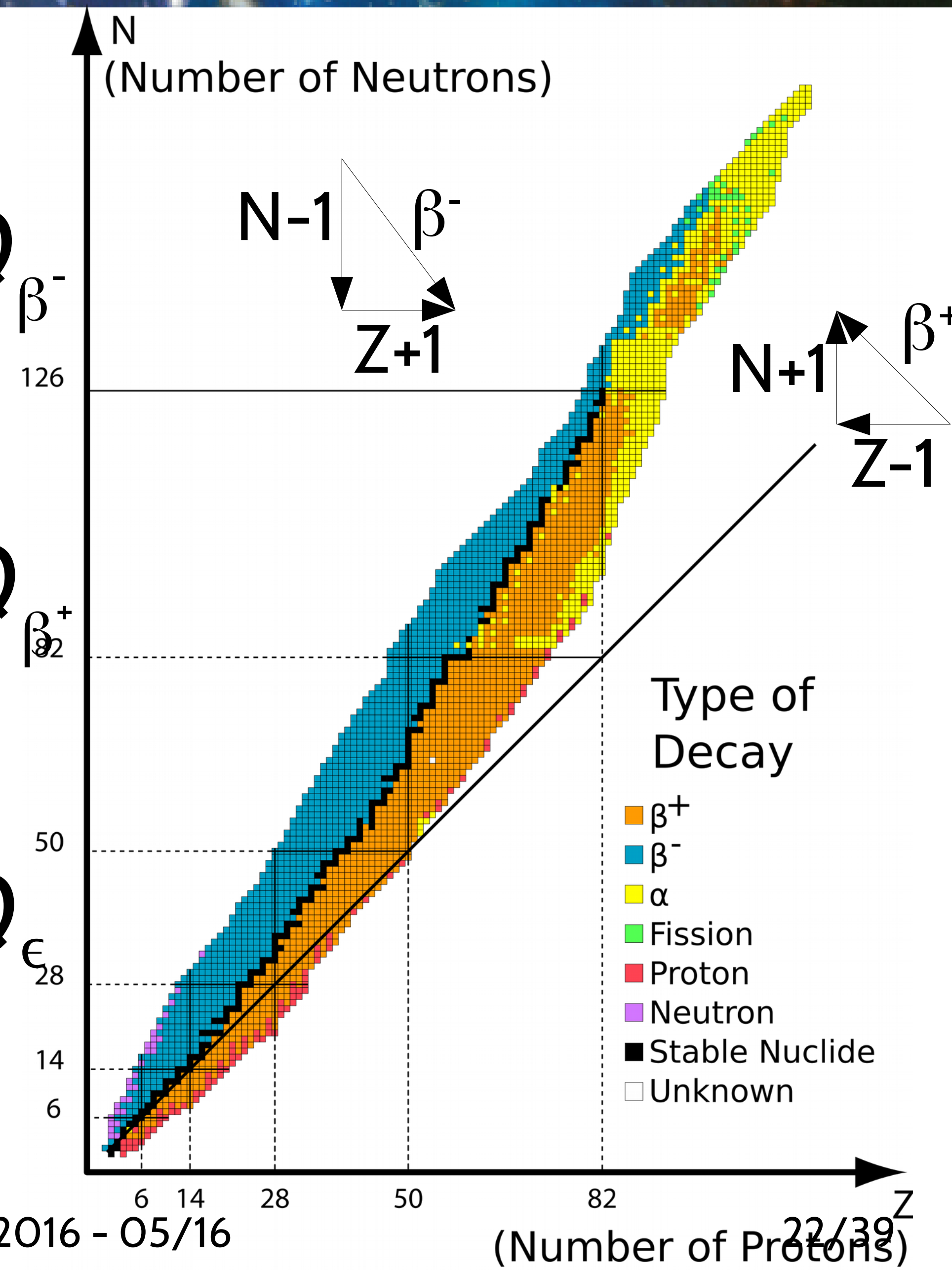
- **β^+**: emisión de un **positrón**

$$ {}^{A}_{N}X_{Z} \rightarrow {}^{A}_{N+1}Y_{Z-1} + e^{+} + \nu_{e} + Q_{\beta^+} $$

- **ε: captura electrónica**

$$ {}^{A}_{N}X_{Z} + e^{-} \rightarrow {}^{A}_{N+1}Y_{Z-1} + \nu_{e} + Q_{\epsilon} $$

- **¿Que es ν_e?**



Decaimiento Beta: Energías

- Propuesta para el decaimiento beta del Bismuto-210

$$ {}^{210}_{127}\mathrm{Bi}_{83} \rightarrow {}^{210}_{126}\mathrm{Po}_{84} + e^{-} + Q_{\beta^-} $$

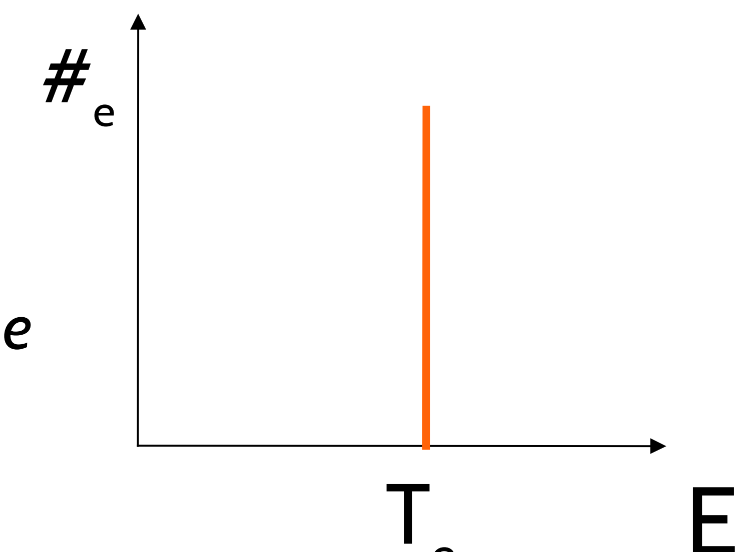
$$ \left(n \rightarrow p^{+} + e^{-} + Q_{\beta^-} \right) $$

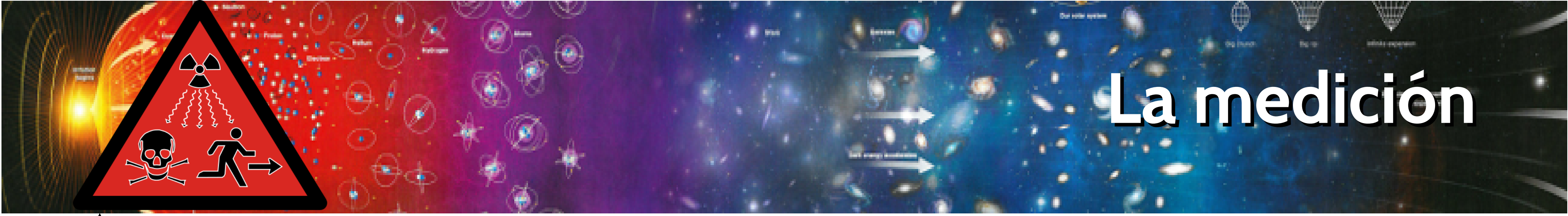
- Luego, la energía liberada debería ser

$$ m_{\mathrm{Bi}} c^2 = \left(m_{\mathrm{Po}} + m_e \right) c^2 + Q $$

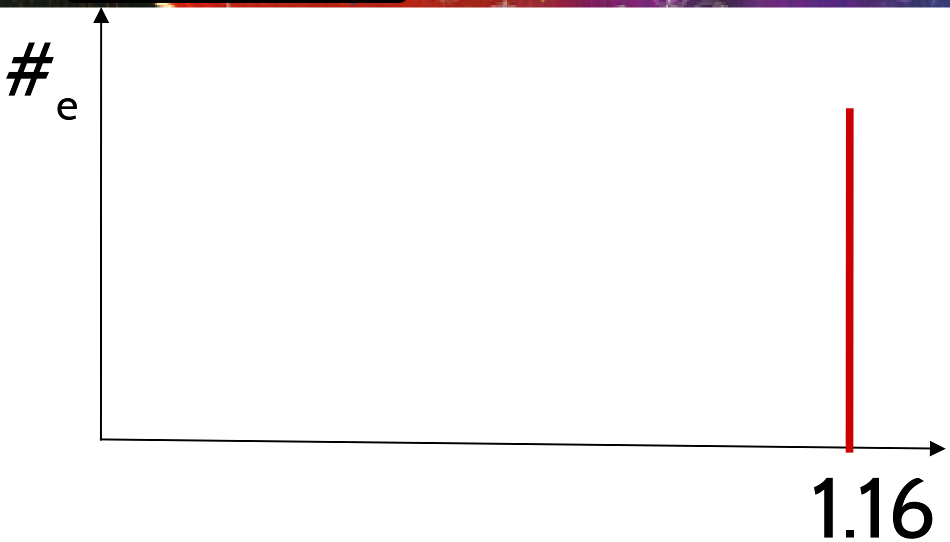
$$ Q = \left(m_{\mathrm{Bi}} - m_{\mathrm{Po}} - m_e \right) c^2 \approx T_e $$

$$ T_e \simeq 1.16\,\mathrm{MeV} $$





La medición



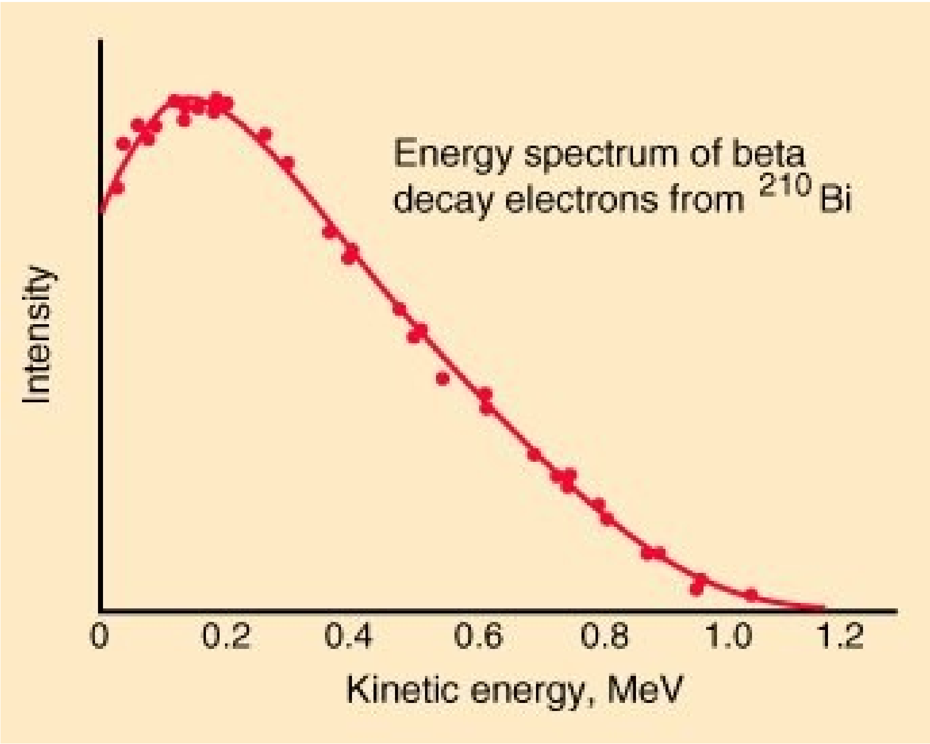
- Bohr: "La energía no se conserva"
- Pauli: La energía se conserva si existe otra partícula: "**neutrino**"
- Decaimiento beta correcto:

$$^{210}_{127}\mathrm{Bi}_{83} \rightarrow {}^{210}_{126}\mathrm{Po}_{84} + e^- + \bar{\nu}_e + Q_{\beta^-}$$

$$\left(n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e + Q_{\beta^-}\right)$$

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

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



El electrón emitido, ¿es relativista?

+ velocidad del electrón emitido en el decaimiento β del 210-Bi

$m_e = 0{,}511\ \mathrm{MeV}/c^2$ y la energía disponible $Q = 1{,}16\ \mathrm{MeV}$

Supongamos que $T_e = Q \Rightarrow T_e = 1{,}16\ \mathrm{MeV}$. Luego.

$$E = mc^2 + T_e \Rightarrow E = 0{,}511\ \frac{\mathrm{MeV}}{\cancel{c^2}} \cdot \cancel{c^2} + 1{,}16\ \mathrm{MeV}$$

$$\Rightarrow E = 1{,}671\ \mathrm{MeV}.$$

Pero $E = m\gamma c^2 \Rightarrow \gamma = E/mc^2 \Rightarrow \gamma = \dfrac{1{,}671\ \mathrm{MeV}}{0{,}511\ \frac{\mathrm{MeV}}{\cancel{c^2}}\ \cancel{c^2}} \Rightarrow \gamma = 3{,}27$

$$\boxed{\gamma = 3{,}27}$$

y $\gamma = \dfrac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \Rightarrow \gamma^2 = \dfrac{1}{1-\beta^2} \Rightarrow \beta^2 = 1 - 1/\gamma^2 \Rightarrow \beta = \sqrt{1 - 1/\gamma^2}$

$$\Rightarrow \beta = 0{,}952 \Rightarrow v_e = \beta c \Rightarrow \boxed{v_e = 0{,}952\ c}$$

Mientras tanto, en la atmósfera...

- ... caen rayos cósmicos
- Anderson descubre una

partícula m/q ~ 200 m_e/e

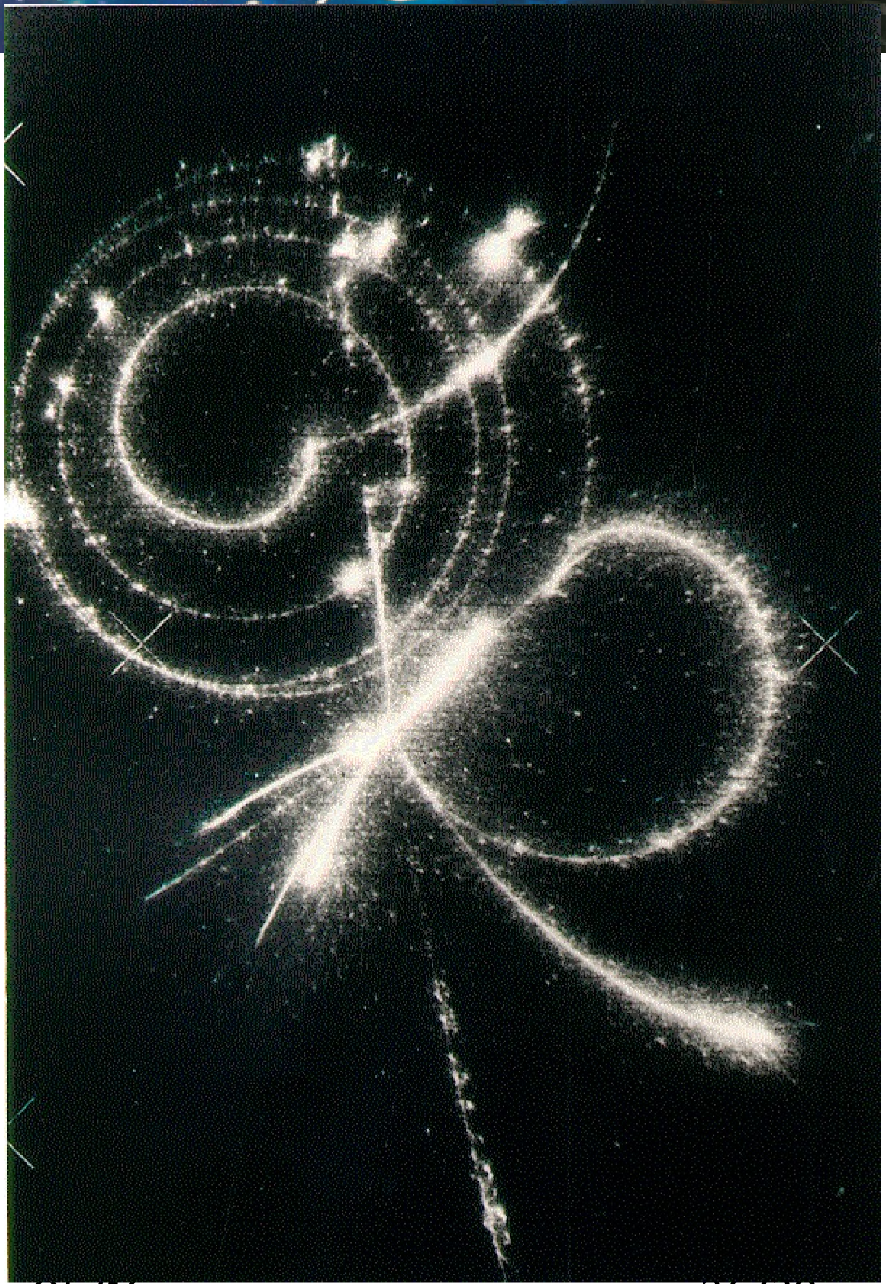
→ m ~ 100 MeV

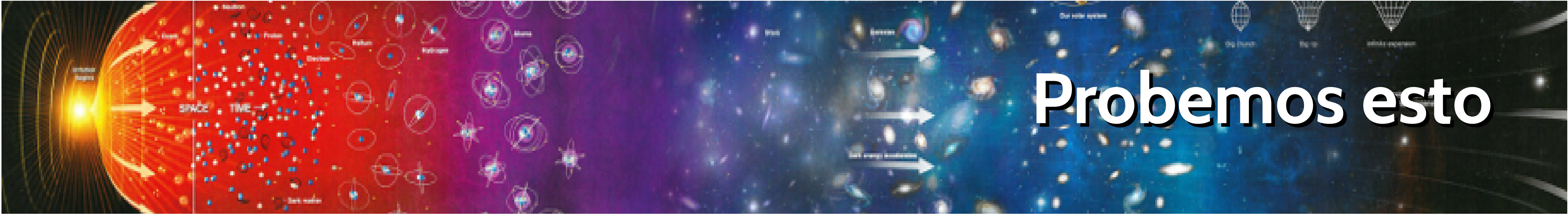
- Luego, se observa

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

que también violaba la E

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





Probemos esto

- Sección eficáz neutrinos

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

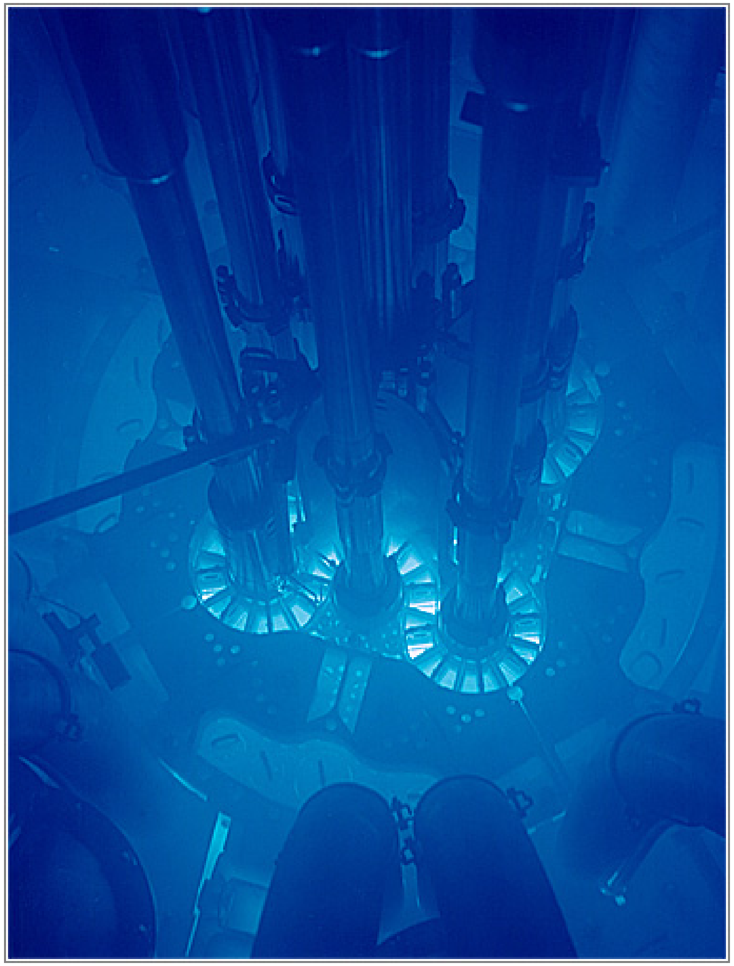
~250 años luz de agua (~2 x 10^20 cm)

- Usemos 10^20 neutrinos en 1 cm de agua

$$\bar{\nu}\, p^{+} \rightarrow n e^{+}$$

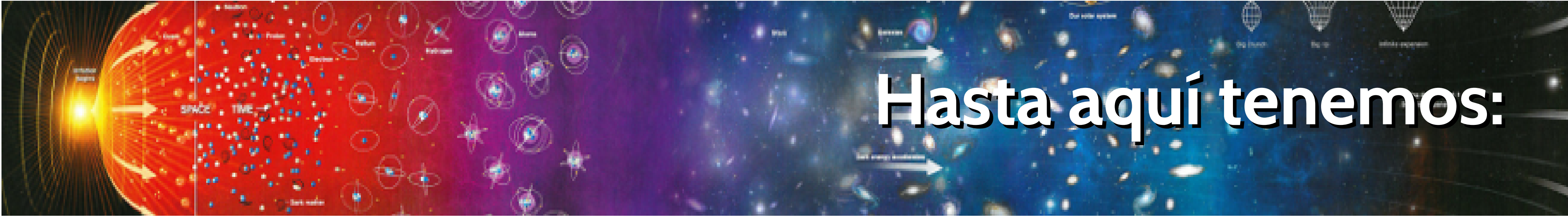
$$\cancel{\bar{\nu}\, p^{+} \rightarrow n \mu^{+}}$$

- Tiempos "largos": Corto alcance. Interaccion Débil



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

$$\pi^{+} \rightarrow n \mu^{+} \nu_{\mu}$$



Hasta aquí tenemos:

- Sin fuerza fuerte: e, μ, ν_e, ν_μ, $\leftarrow$ Leptones
- Con fuerza fuerte: p, n, π, $\leftarrow$ Hadrones
- Y sus antipartículas. **Total: 14** (empezamos con **2**)
- Fuerzas: γ, g, W, (G) $\leftarrow$ Mediadores (Calibre)

Con los aceleradores

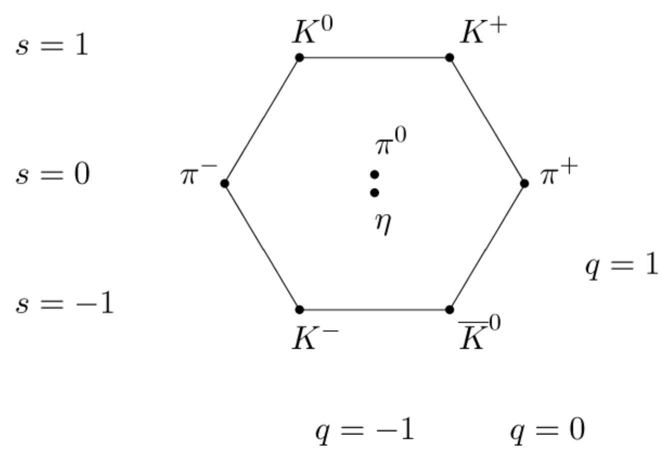
Con los aceleradores

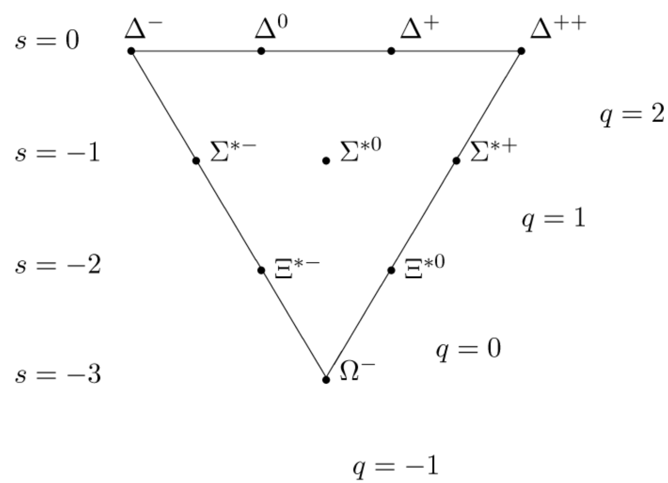
Con los aceleradores

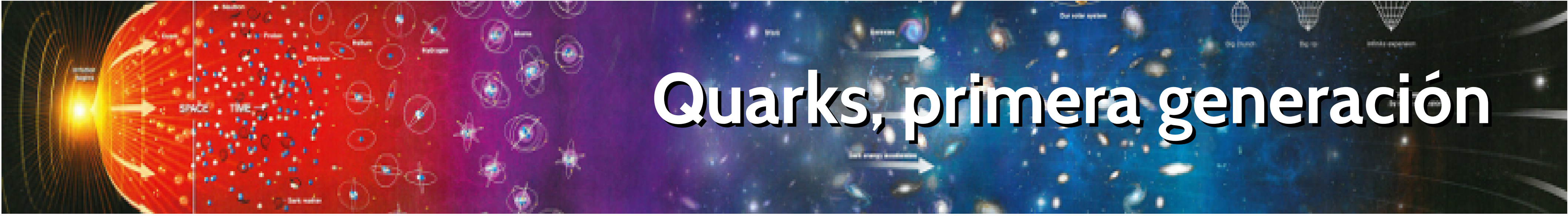
Hoy se conocen ~ 1000 hadrones

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

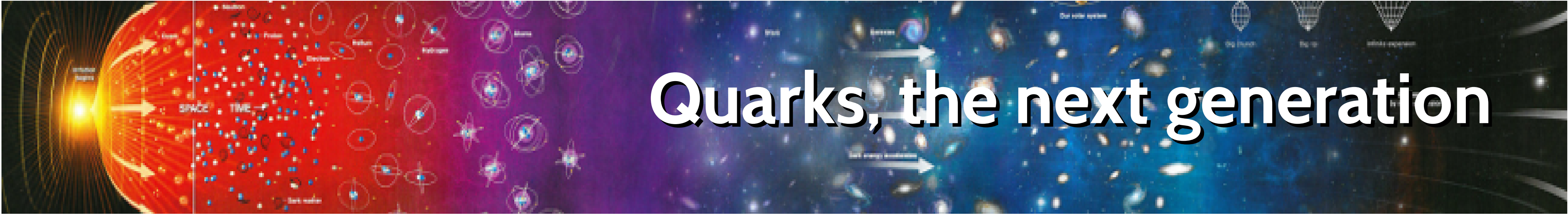
- Hadrones:
  - 3 quarks: bariones
  - 2 quarks: mesones
- Primera generación
  - “up” y “down”
    - Carga eléctrica
      - u: +2/3 e
      - d: -1/3 e
    - masa
      - m_u: 1.7-3.3 MeV
      - M_d: 4.1-5.8 MeV

- Bariones:

$$p:\left(uud\right)$$
$$n:\left(udd\right)$$
$$\bar{p}:\left(\bar{u}\,\bar{u}\,\bar{d}\right)$$

- Mesones:

$$\pi^{+}:\left(u\,\bar{d}\right)$$
$$\pi^{-}:\left(\bar{u}\,d\right)$$
$$\pi^{0}:\left(u\,\bar{u}+d\,\bar{d}\right)$$



Quarks, the next generation

- Segunda generación
  - "charm" y "strange"
    - Carga eléctrica
      - c: +2/3 e
      - s: -1/3 e
    - masa
      - m_c: (1.27 +- 0.07) GeV
      - m_s: (101 +- 29) MeV

- Tercera generación
  - "top" y "bottom"
    - Carga eléctrica
      - t: +2/3 e
      - b: -1/3 e
    - masa
      - m_t: (172 +- 2) GeV
      - M_b: (4.19 +- 0.18) GeV

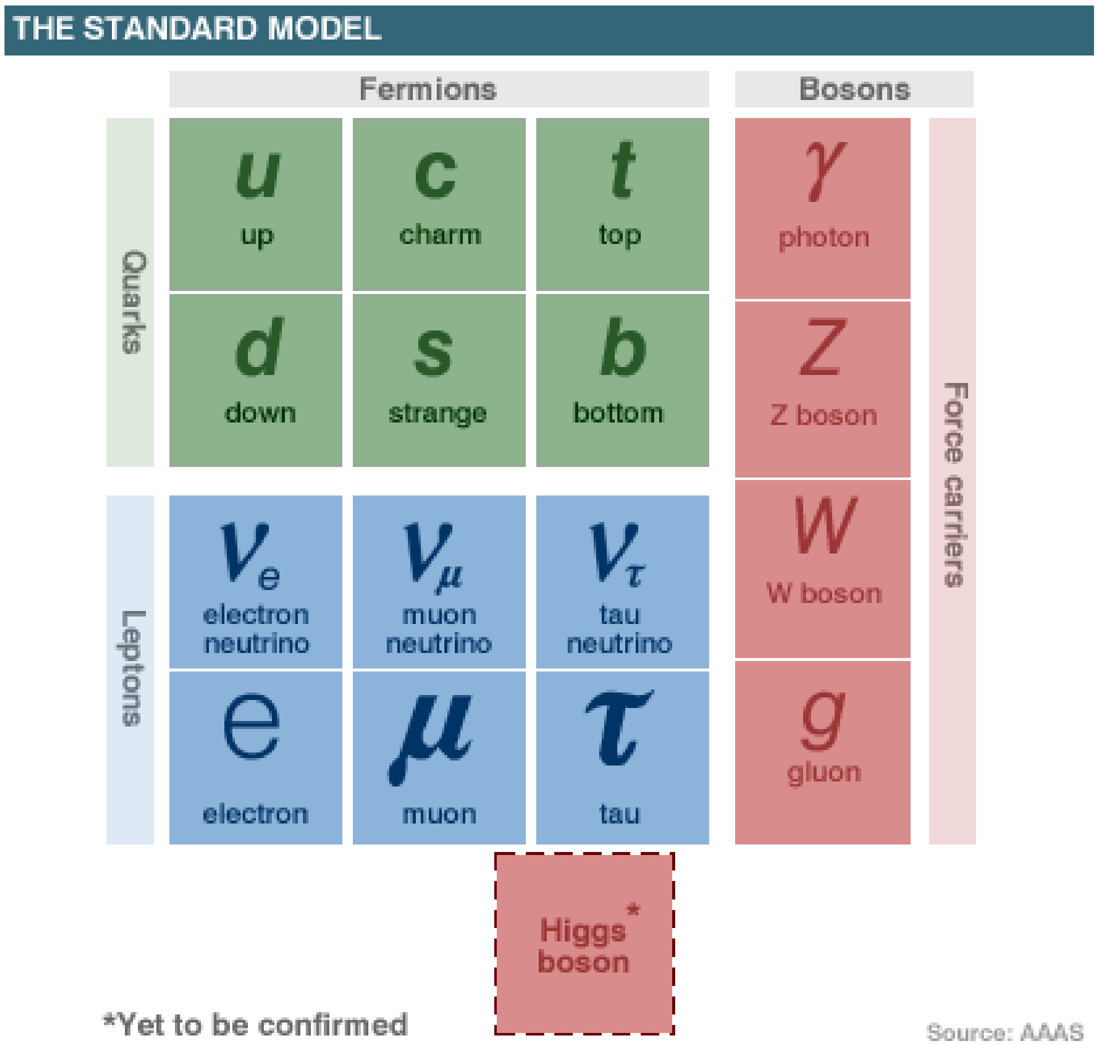
Interacción fuerte: carga de “color”

- 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 antirojo), ...

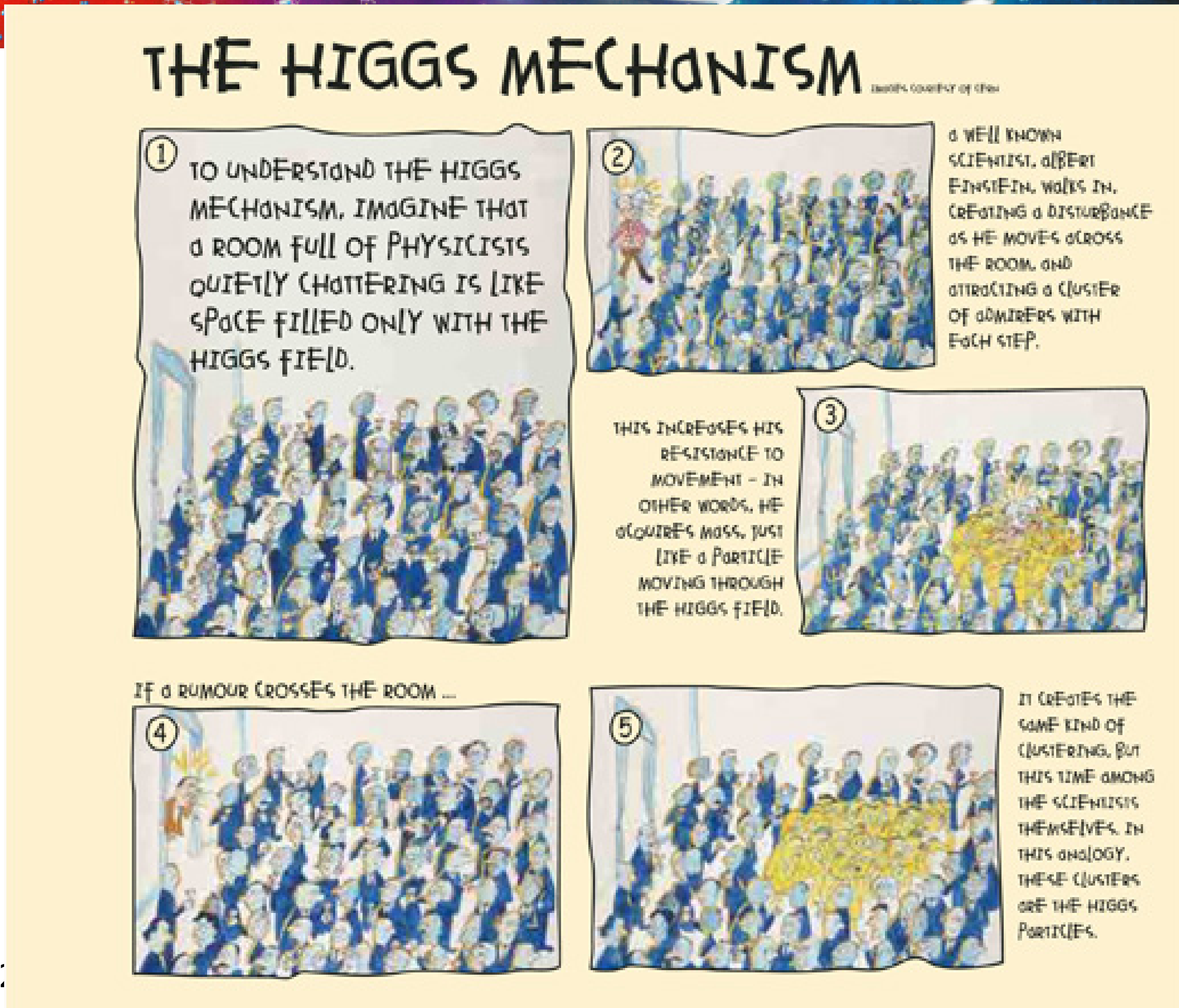
¿y los leptones?

- Tenemos 3 generaciones de quarks
- 3 generaciones de leptones:
  - e, ν_e
  - μ, ν_μ
  - τ, ν_τ
- m_τ = 1776.99 MeV

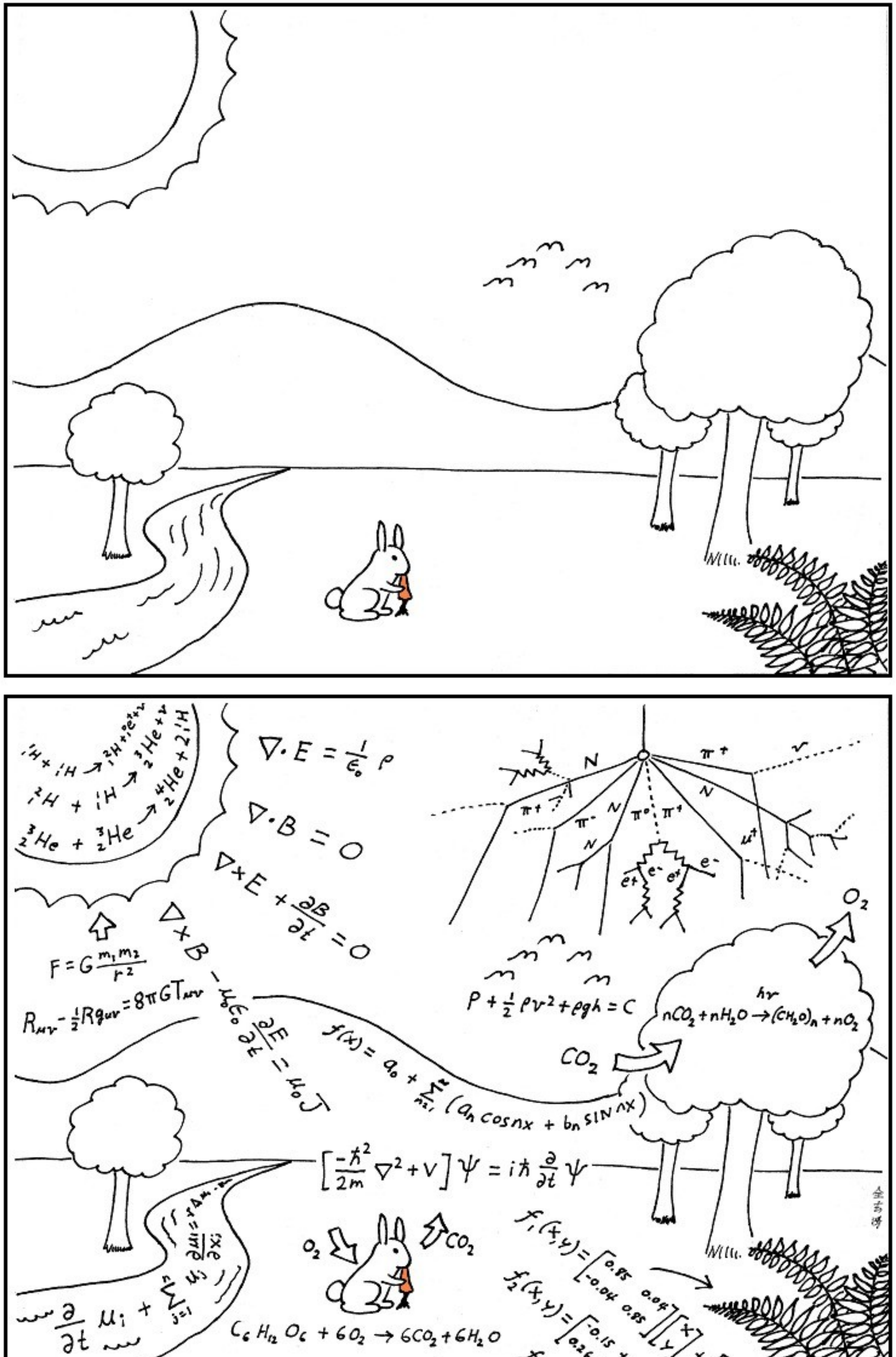
La foto de la familia



Para terminar, el Higgs



No se olviden



This is how scientists see the world.