



Escuela José Antonio Balseiro 2016

Nuevas Tendencias en Investigación en Física Médica

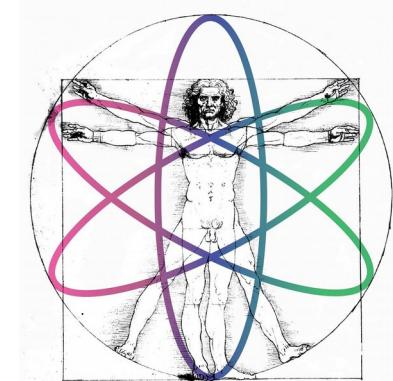
Introducción a muchas cosas

Jueves: Nuclear, Aceleradores y Detectores

Hernán Asorey

asoreyh@cab.cnea.gov.ar

Laboratorio Detección Partículas y Radiación
Centro Atómico Bariloche



Clases en

<https://github.com/asoreyh/intro-nuclear-fisica-medica>

 asoreyh Clase 01 lista	Latest commit db0d282 2 days ago
 clases Clase 01 lista 2 days ago	
 README.md Commit inicial 4 days ago	

 README.md



Curso de Introducción a Física Nuclear y Detectores

Escuela José Antonio Balseiro - Nuevas Tendencias en Investigación en Física Médica

Octubre 2016 - Centro Atómico Bariloche e Instituto Balseiro

(C) 2016 - Hernán Asorey ([@asoreyh](https://github.com/asoreyh))

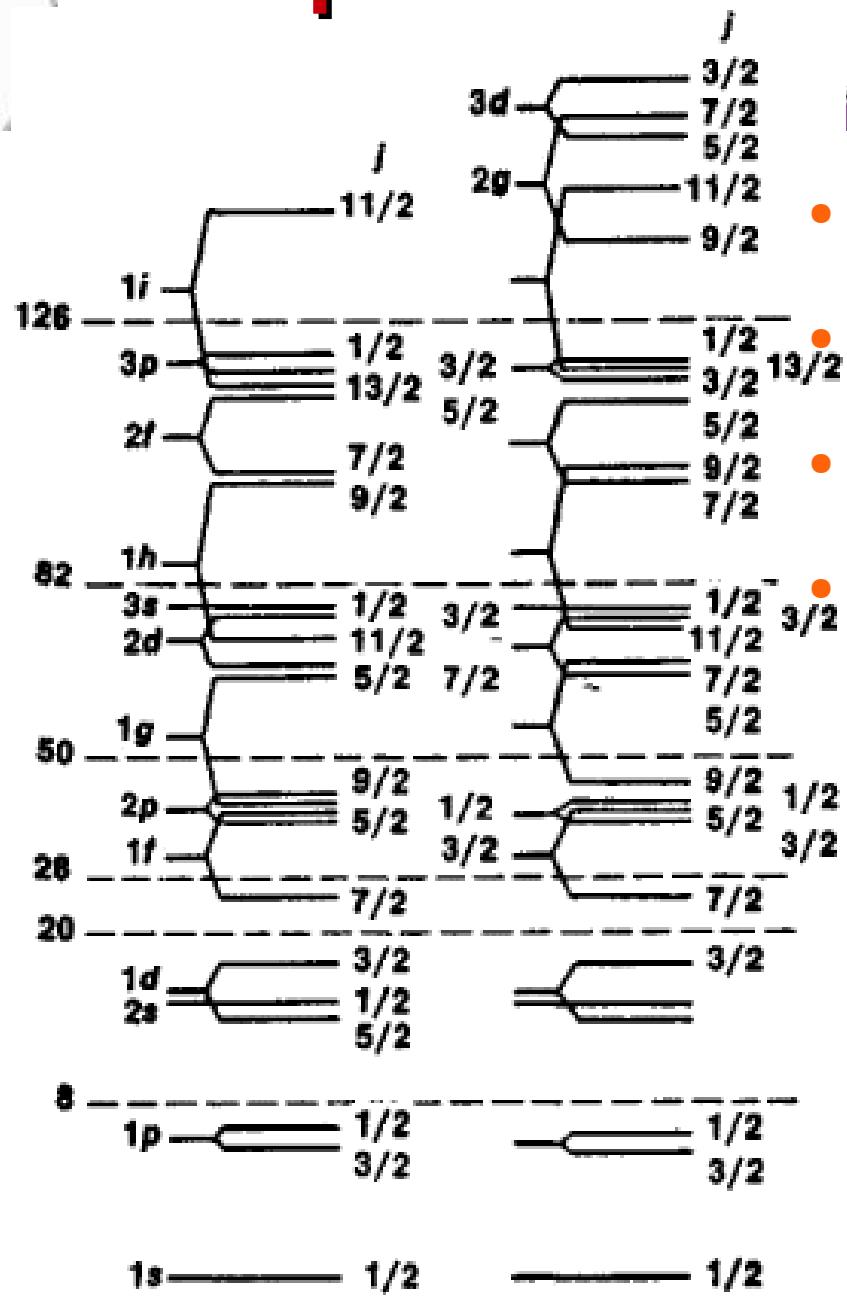


Este trabajo se distribuye en forma gratuita bajo la [Licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

p

n

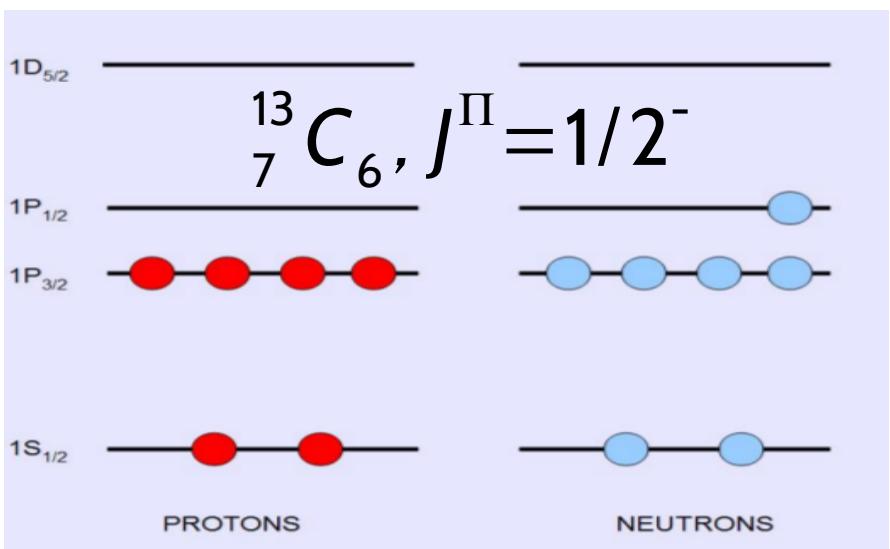
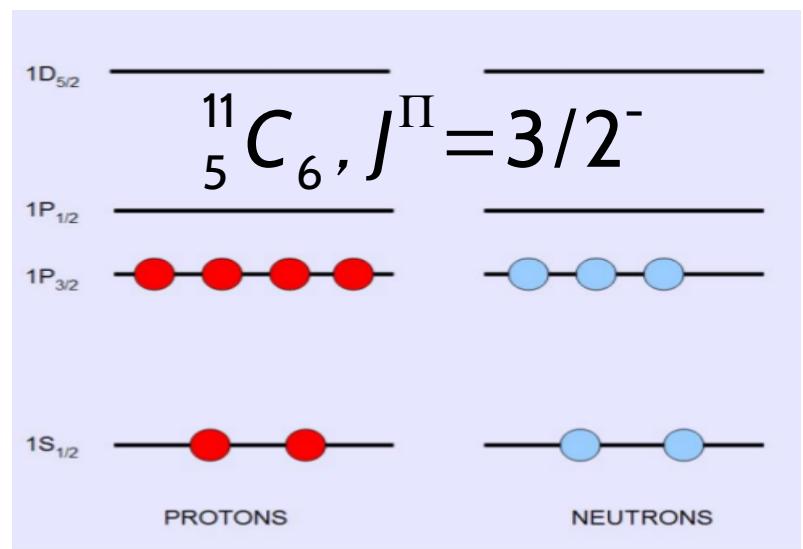
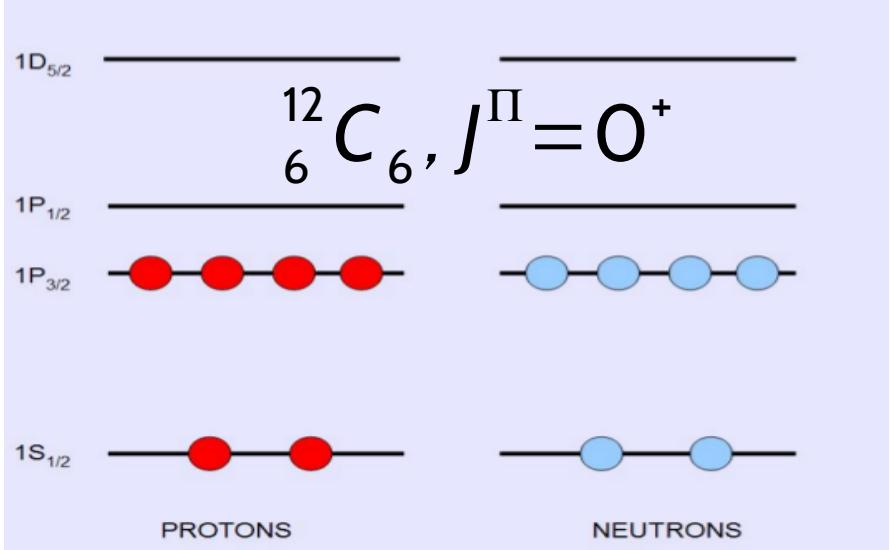
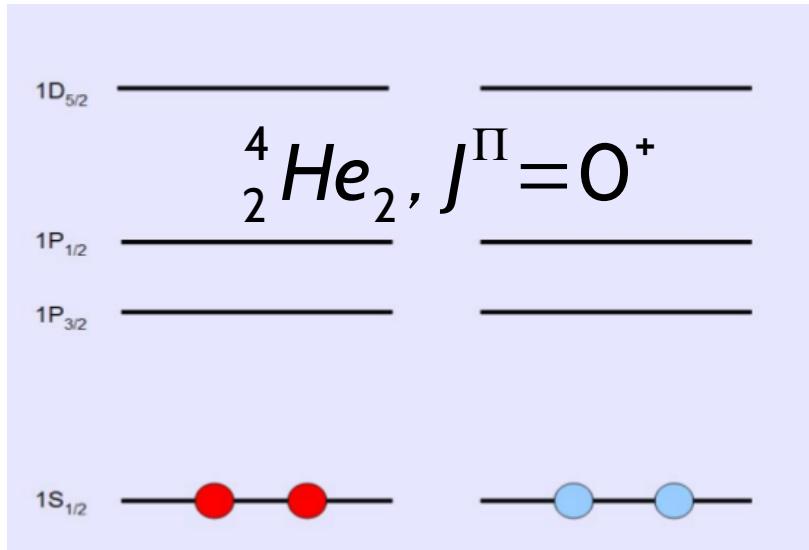
p y n, diferentes capas



- En un nivel l entran $2(2l+1)$ nucleones
- La paridad de ese nivel es $(-1)^l$.
- En un nivel J entran $2J+1$ nucleones
- El estado fundamental de un núcleo
 - **Par-Par** es O^+
 - **Par-Impar** es el del orbital que ocupa el nucleón desapareado, y su paridad es $(-1)^l$.
 - **Impar-impar** es complicado, corresponde a la suma (cuántica) de los momentos angulares del protón, j_p , y del neutrón, j_n :

$$|j_p - j_n| \leq J \leq |j_p + j_n| \quad \Pi = (-1)^{l_p + l_n}$$

Por ejemplo

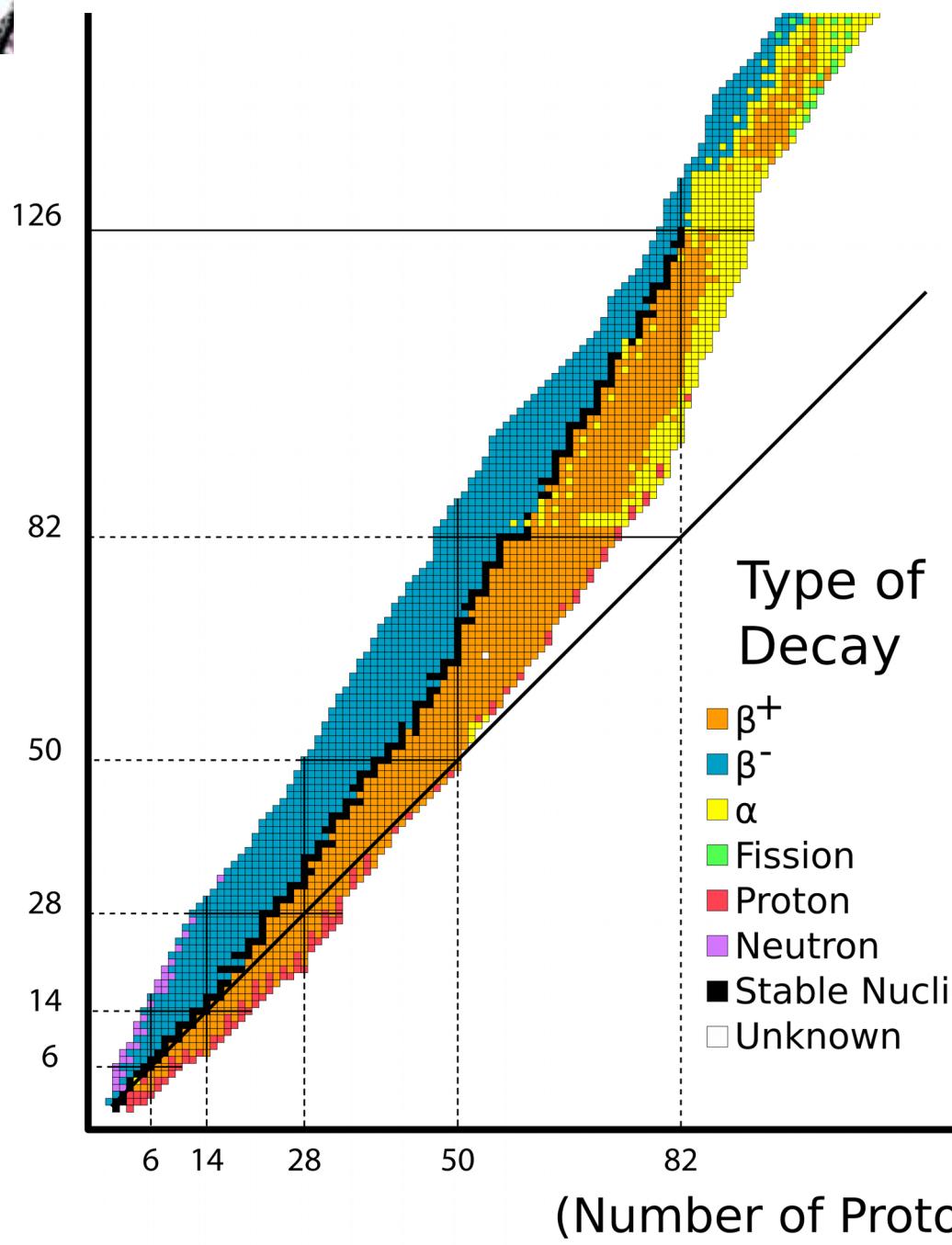


J y paridad de los núcleos

Nuclear Wallet Cards

Nuclide Z E1 A	Jπ	Δ (MeV)	T½, Γ, or Abundance	Decay Mode
5 B		28.96	9.93 ms 7	β_- , $\beta\text{-}n$ 93.6%, $\beta\text{-}2n$ 0.4%
	16 0-	37.12	<190 ps	n
	17 (3/2-)	43.8	5.08 ms 5	β_- , $\beta\text{-}n$ 63%, $\beta\text{-}2n$ 11%, $\beta\text{-}3n$ 3.5%, $\beta\text{-}4n$ 0.4%
	18 (4-)	51.9s	<26 ns	n?
	19 (3/2-)	58.8s	2.92 ms 13	β_- , $\beta\text{-}n$ 72%, $\beta\text{-}2n$ 16%
	20	67.1s		
	21	75.7s		
	6 C	0+	230 keV 50	p, α
	9 (3/2-)	35.08	126.5 ms 9	ε , εp 61.6%, $\varepsilon\alpha$ 38.4%
	10 0+	28.909		
	10 0+	15.608	10.308 s 4	ε
	11 3/2-	10.650	20.334 m 24	ε
	12 0+	0.000	98.93% 8	
	13 1/2-	3.125	1.07% 8	
	14 0+	3.020	5700 y 30	β_-
	15 1/2+	9.873	2.449 s 5	β_-
	16 0+	13.694	0.747 s 8	β_- , $\beta\text{-}n$ 99%
	17 3/2+	21.03	193 ms 13	β_- , $\beta\text{-}n$ 32%
	18 0+	24.92	92 ms 2	β_- , $\beta\text{-}n$ 31.5%
	19 1/2+	32.41	49 ms 4	β_- , $\beta\text{-}n$ 61%
	20 0+	37.6	14 ms +6-5	β_- , $\beta\text{-}n$ 72%
	21 (1/2+)	45.6s	<30 ns	n?
	22 0+	52.1s	6.1 ms +14-12	β_- , $\beta\text{-}n$ 61%, $\beta\text{-}2n$ <37%
	23	62.7s		

Tabla de nucléidos





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 (cuidado, ¡son masas nucleares!).**

$$Q = (m_{\text{reactivos}} - m_{\text{productos}}) c^2$$



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 .

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

Ley de decaimiento radiactivo

→ Un núcleo tiene una tasa de decaimientos λ , $[\lambda] = \text{s}^{-1}$

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

Luego, en un tiempo dt :

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

Aprendamos el procedimiento usual para esta ecuación diferencial:

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

Sea C la constante de integración. Luego:

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

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

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

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**

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

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

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

- 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**

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



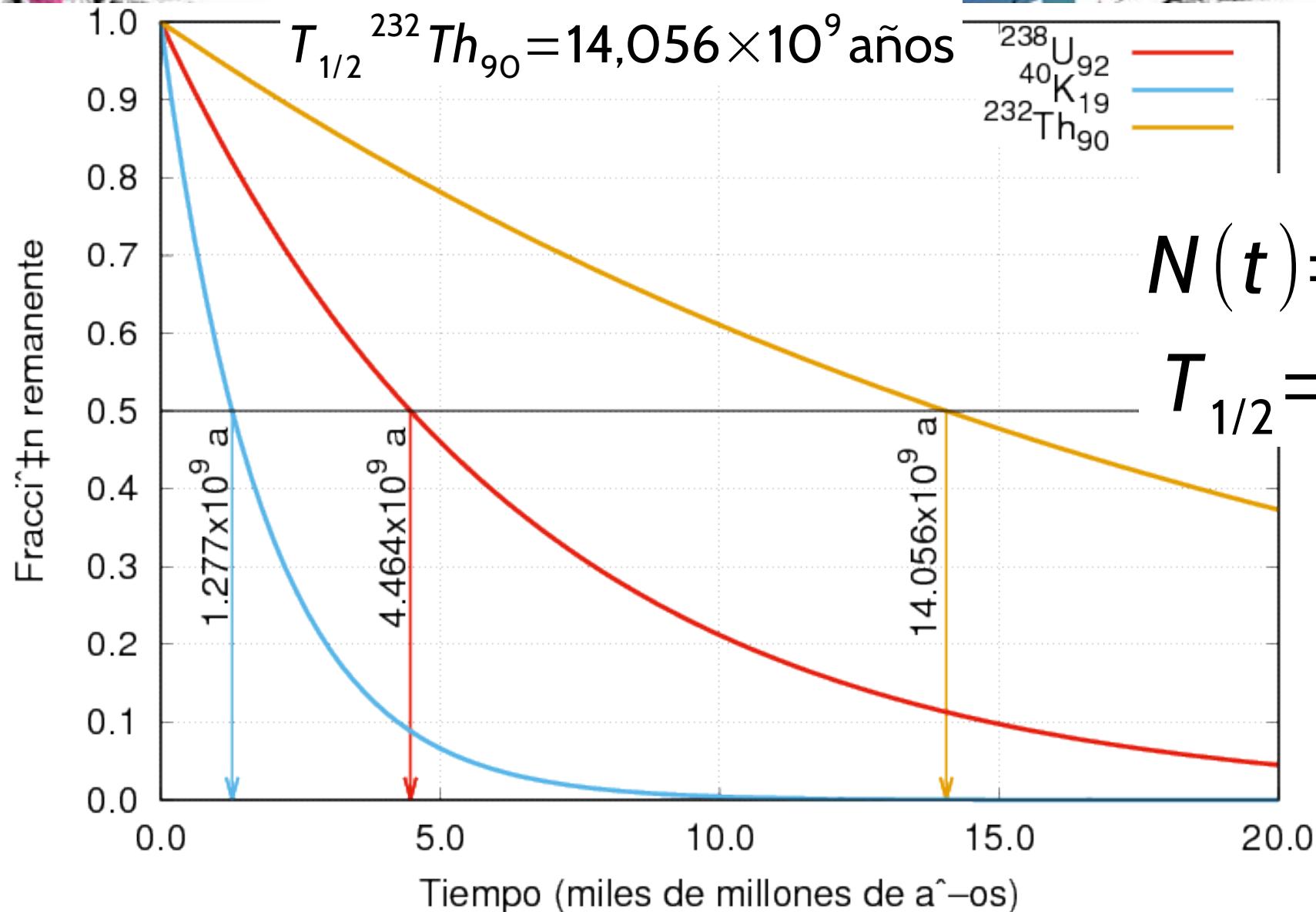
$$T_{1/2}^{40}K_{19} = 1,277 \times 10^9 \text{ años}$$

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

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



$T_{1/2}$



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

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

Abundancia relativa y períodos de semidesintegración, según corresponda

Nuclear Wallet Cards

Nuclide Z E1 A			Δ (MeV)	T $\frac{1}{2}$, Γ , or Abundance	Decay Mode
	J π				
5 B			28.96	9.93 ms 7	β^- , β^-n 93.6%, β^-2n 0.4%
	16	0-	37.12	<190 ps	n
	17	(3/2-)	43.8	5.08 ms 5	β^- , β^-n 63%, β^-2n 11%, β^-3n 3.5%, β^-4n 0.4%
	18	(4-)	51.9s	<26 ns	n?
	19	(3/2-)	58.8s	2.92 ms 13	β^- , β^-n 72%, β^-2n 16%
	20		67.1s		
	21		75.7s		
	6 C	8	0+	230 keV 50	p, α
		9	(3/2-)	126.5 ms 9	ε , εp 61.6%, $\varepsilon\alpha$ 38.4%
	10	0+	15.608	10.308 s 4	ε
	11	3/2-	10.650	20.334 m 24	ε
	12	0+	0.000	98.93% 8	
	13	1/2-	3.125	1.07% 8	
	14	0+	3.020	5700 y 30	β^-
	15	1/2+	9.873	2.449 s 5	β^-
	16	0+	13.694	0.747 s 8	β^- , β^-n 99%
	17	3/2+	21.03	193 ms 13	β^- , β^-n 32%
	18	0+	24.92	92 ms 2	β^- , β^-n 31.5%
	19	1/2+	32.41	49 ms 4	β^- , β^-n 61%
	20	0+	37.6	14 ms +6-5	β^- , β^-n 72%
	21	(1/2+)	45.6s	<30 ns	n?
	22	0+	52.1s	6.1 ms +14-12	β^- , β^-n 61%, β^-2n <37%
	23		62.7s		

En un mol de $^{232}_{\text{Th}}{}_{90}$, ¿Cuántos decaimientos se producen en un segundo?

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

+ La masa del mol es 232 g.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\Rightarrow \Delta N = N_0 (e^{-t/\tau} - 1) \Rightarrow \Delta N \approx -10^{16} \text{ at para } t = 1 \text{ s.}$$

- Cuando tengo 1 núcleo, hablo de probabilidades
- Pero tengo muchos → Ley de los grandes números → valores medios.
- **La actividad de una muestra está dada por el número de decaimientos por unidad de tiempo:**

$$A(t) = \lambda N(t)$$

$[A(t)] = \text{decaimientos } s^{-1} = \text{Bq (bequerel)}$

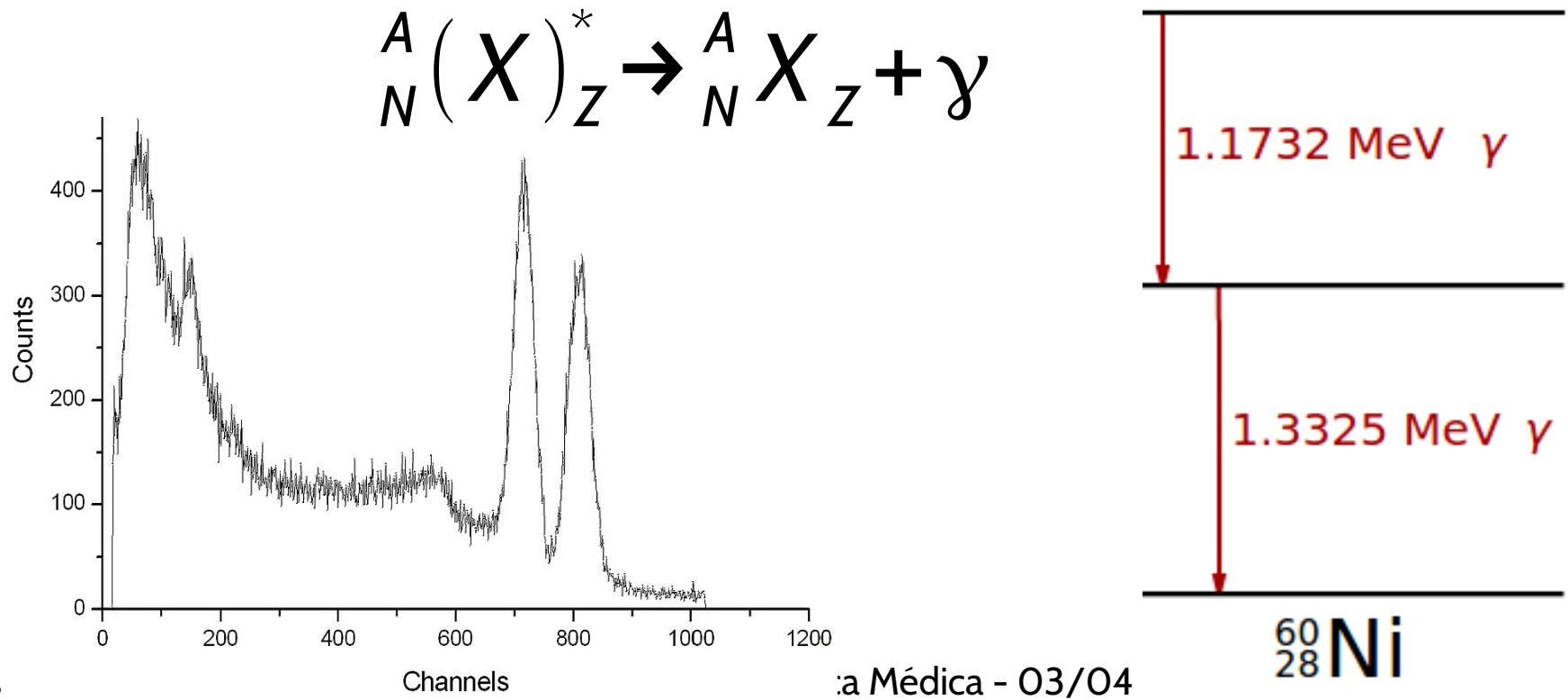
$$1 \text{ Bq} = 27 \text{ pCi} \quad 1 \text{ Ci} = 37 \text{ GBq}$$

- Se puede pensar en que masa se necesita para 1 Bq



Emisión Gamma

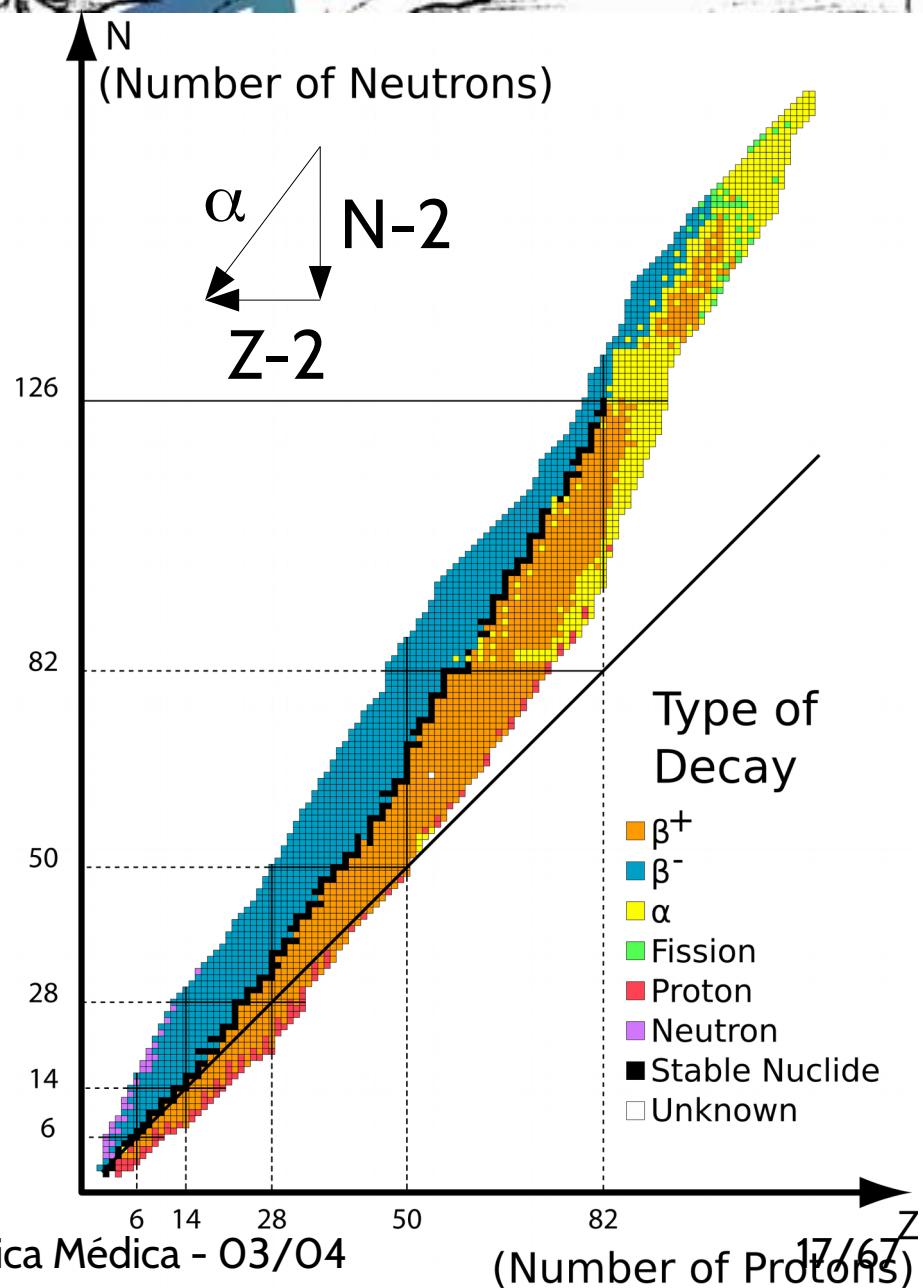
- El núcleo tiene niveles de energía
- El núcleo en un estado excitado se desexcita a través de la emisión de un fotón (gamma) con energía igual a la diferencia de energía entre los estados inicial y final





Decaimiento alfa

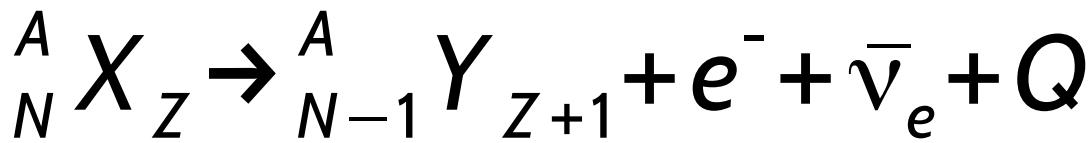
- Corresponde a la emisión espontánea de un núcleo de Helio ${}^4\text{He}_2$ (partícula alfa, 2 neutrones, 2 protones)
- El núcleo pierde dos protones \rightarrow otro elemento!



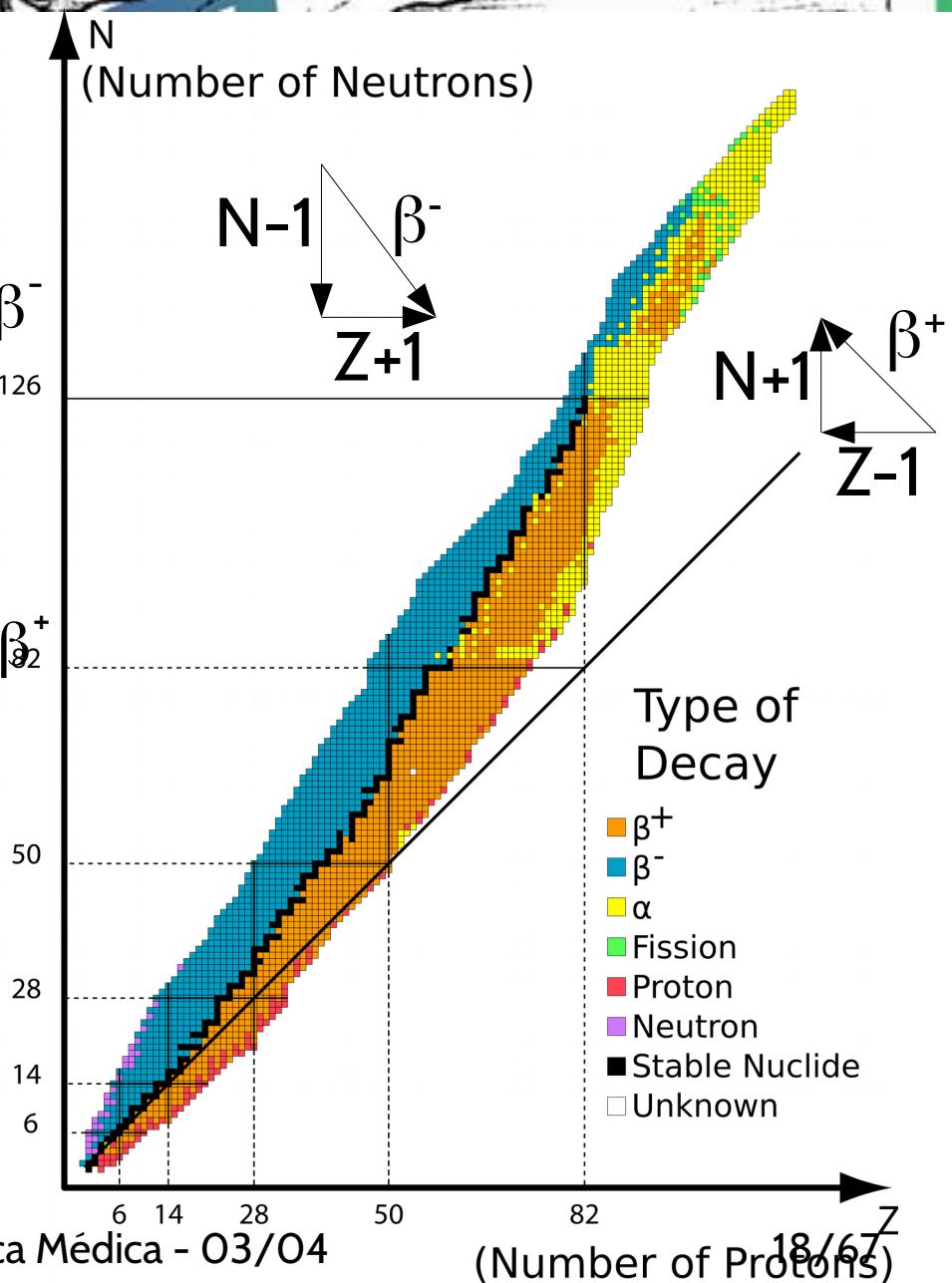
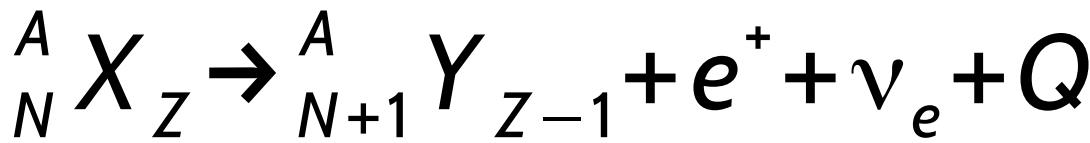


Decaimiento beta

- β^- : emisión de un **electrón**

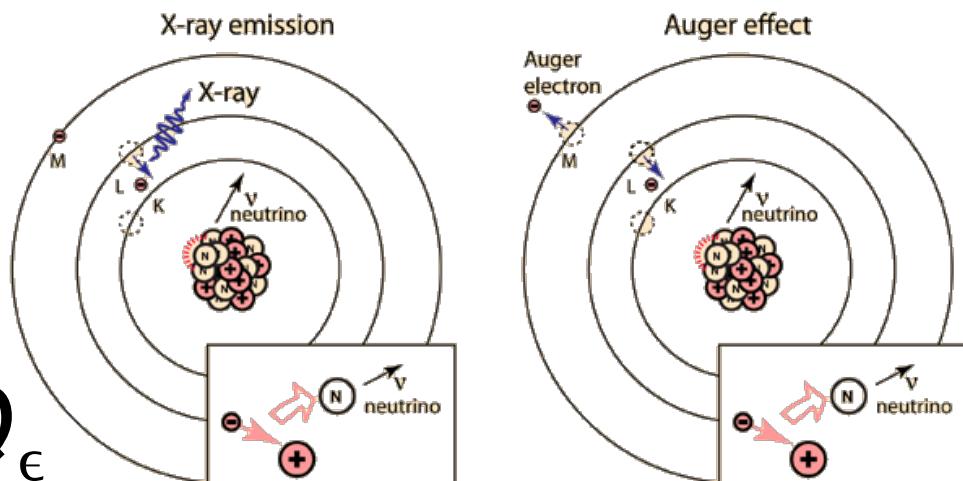
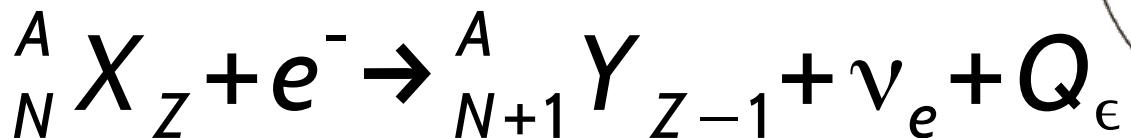


- β^+ : emisión de un **positrón**



Captura electrónica

- En algunos núcleos inestables con exceso de protones, $DE < 2m_e$, el decaimiento beta no es posible (p. ej ^{11}C , ^7Be)
 - Otros núcleos pueden decaer vía beta+ y/o captura
 - Un electrón interno es capturado por el núcleo
- El hueco es completado por un electrón externo y RX
- ó **efecto Auger**: la energía liberada cuando el externo completa el interno es transferida a un electrón externo



Modos de decaimiento

Nuclear Wallet Cards

Nuclide Z E1 A	Jπ	Δ (MeV)	T½, Γ, or Abundance	Decay Mode
5 B 15		28.96	9.93 ms 7	β^- , β^-n 93.6%, β^-2n 0.4%
	16	0-	37.12	<190 ps
	17	(3/2-)	43.8	5.08 ms 5
	18	(4-)	51.9s	<26 ns
	19	(3/2-)	58.8s	2.92 ms 13
	20		67.1s	n?
	21		75.7s	β^- , β^-n 72%, β^-2n 16%
	6 C 8	0+	35.08	230 keV 50
	9	(3/2-)	28.909	126.5 ms 9
	10	0+	15.608	ϵ
	11	3/2-	10.650	10.308 s 4
	12	0+	0.000	20.334 m 24
	13	1/2-	3.125	98.93% 8
	14	0+	3.020	1.07% 8
	15	0+	3.020	5700 y 30
	16	1/2+	9.878	β^-
	17	0+	13.694	2.449 s 5
	18	3/2+	21.03	0.747 s 8
	19	0+	24.92	193 ms 13
	20	1/2+	32.41	92 ms 2
	21	0+	37.6	49 ms 4
	22	(1/2+)	45.6s	β^- , β^-n 61%
	23	0+	52.1s	<30 ns
			6.1 ms +14-12	β^- , β^-n 72%
			62.7s	n?

Núcleos radiactivos

**Nuclear Wallet Cards
for Radioactive Nuclides**

March 2004

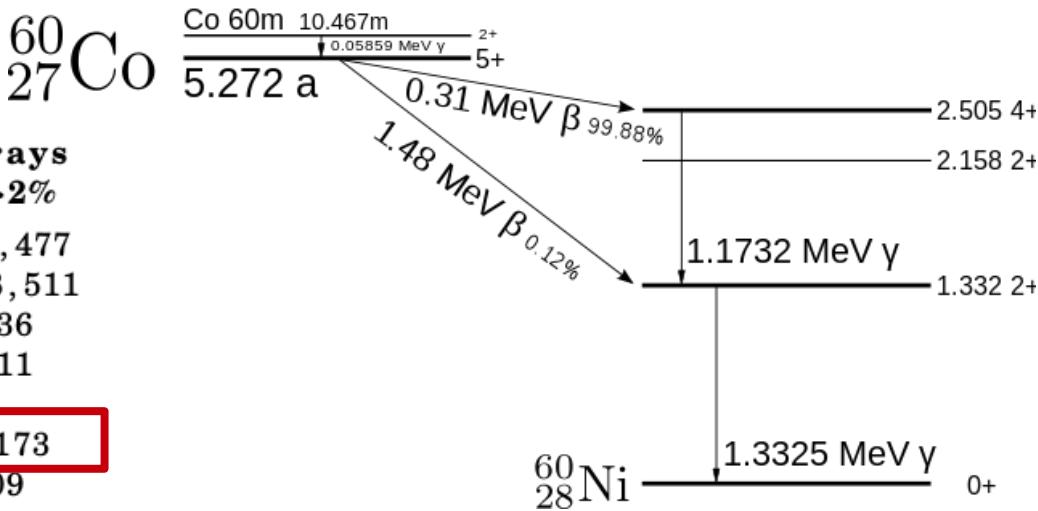
**Jagdish K. Tuli
National Nuclear Data Center
(www.nndc.bnl.gov)**

- Propiedades de núcleos radiactivos con
 - $T_{1/2} > 1\text{h}$
 - $Z < 100$
- Contiene:
 - Nucléido,
 - $T_{1/2}$,
 - principales modos
 - Principales líneas gamma

<http://www.nndc.bnl.gov/wallet/wchome.html>

Cobalto-60: ${}^{60}\text{Co}_{27}$

Nuclide	Half-life	Major Radiations	Major γ -rays (keV) I γ >2%
${}^{55}\text{Co}$	17.53 h	γ	511, 931, 477
${}^{56}\text{Co}$	77.23 d	γ	847, 1238, 511
${}^{57}\text{Co}$	271.7 d	γ	122, 136
${}^{58}\text{Co}$	70.86 d	γ	811, 511
${}^{58m}\text{Co}$	9.04 h	γ	
${}^{60}\text{Co}$	5.271 y	β^-, γ	1332, 1173
61	1.65 h	β^-, γ	67, 909

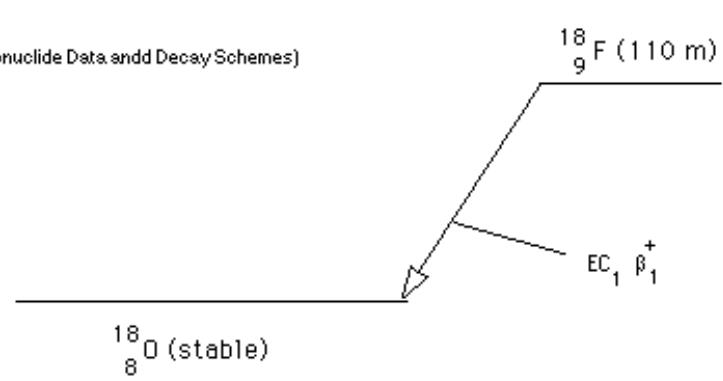


- Beta- a ${}^{60}\text{Ni}$. Emisión de dos líneas muy intensas
- Irradiación de n en ${}^{59}\text{Co}$ en CANDU (Argentina!)
- Gran importancia industrial y médica: esterilización de equipo médico, radiografía industrial, cobalto-terapia, pesticida

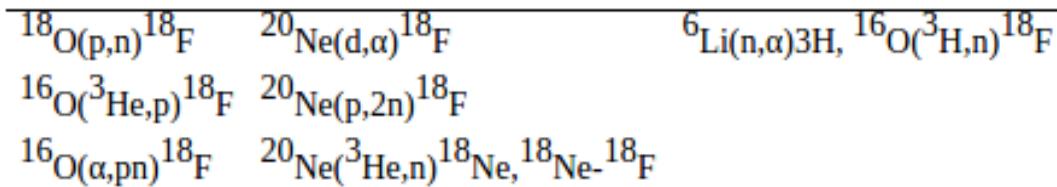
Fluor-18: $^{18}\text{F}_{9}$

FLUORINE-18
ELECTRON CAPTURE AND
POSITRON DECAY

(source: MIRD Radionuclide Data and Decay Schemes)



6	C	14	5700 y	β^-	
9	F	18	1.829 h	γ	511
11	Na	22	2.602 y	γ	511, 1275



- Se produce en ciclotrones (CAB!) irradiando protones sobre muestras de agua enriquecida con ^{18}O : $^{18}\text{O}(\text{p},\text{n})^{18}\text{F}$
- La destrucción de pares e^+/e^- produce 2 gammas de 511 keV
- Reemplaza un OH⁻ en azúcares, p ej, fludeoxiglucosa (2-[^{18}F]fluoro-2-deoxy-D-glucosa) para estudios PET

40-Potasio: $^{40}\text{K}_{19}$

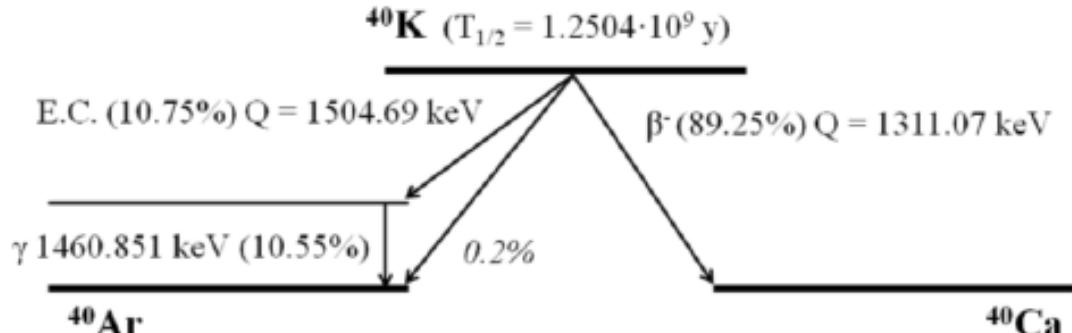
- Isótopo de vida media muy larga (1.251 Gyr)

- 0.012% en el K natural

- En el cuerpo humano hay 160g de K $\rightarrow \sim 19$ mg $^{40}\text{K} \rightarrow$ 4.9 kBq de por vida

- Tres modos:

- β^- a ^{40}Ca (89.3%)
- β^+ a ^{40}Ar (0.001%)
- ϵ a ^{40}Ar (10.7%)



	^{40}K	$T_{1/2}$	β^-	γ	
19	40	1.265×10^9 y	β^-, γ		1461
42		12.36 h	β^-, γ		1525
		22.3 h	β^-, γ		373,617,397



Aceleradores



Campos electromagnéticos

- Sea una carga q. ¿Cómo hacer para incrementar su energía?

$$E = \gamma m \quad \gamma = (1 - \beta^2)^{-\frac{1}{2}} \quad \vec{\beta} = \frac{\vec{v}}{c}$$

- **Campos magnéticos para confinar y campos eléctricos para acelerar.**

$$f_{\mu} \equiv \frac{dp^{\mu}}{d\tau} = q F^{\mu\nu} u_{\nu}$$

$$p^{\mu} = (\gamma mc, p_x, p_y, p_z)$$

$$u_{\mu} = (c, -v_x, -v_y, -v_z)$$

$F^{\mu\nu}$ es el tensor de Maxwell

$$F'^{\rho\sigma} = \Lambda_{\mu}^{\rho} \Lambda_{\nu}^{\sigma} F^{\mu\nu}$$

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Radio de giro

- La componente magnética de la fuerza de Lorentz es perpendicular a la dirección de movimiento:

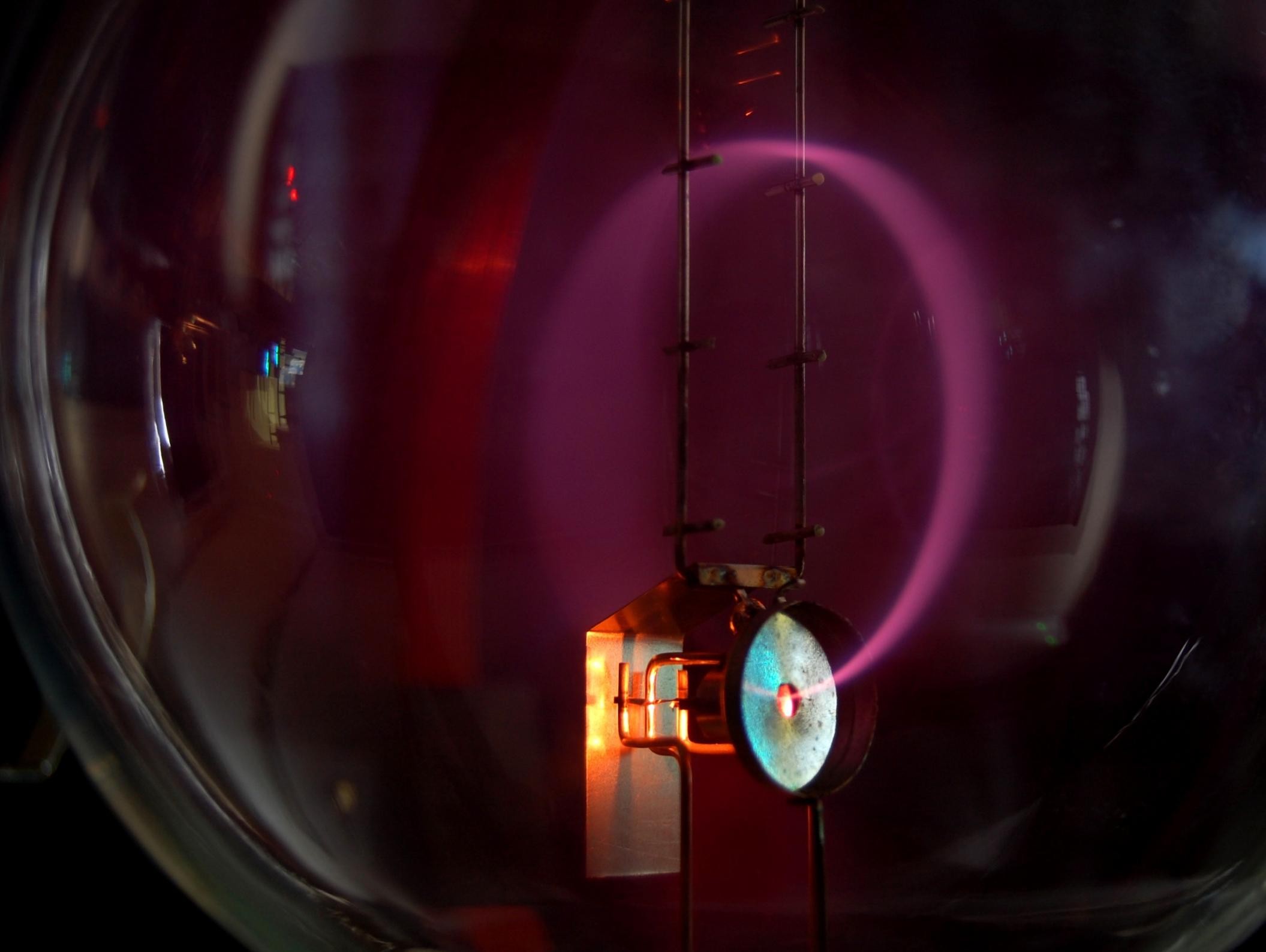
$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B})$$

- Movimiento circular, aceleración centrípeta (¡usar γm para el caso relativista! Gracias Feynmann)

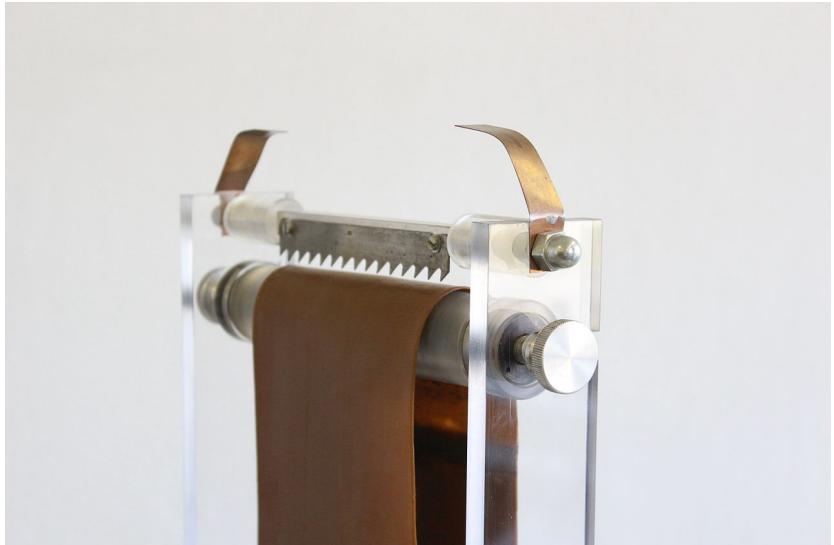
$$r_g = \left(\frac{\gamma m}{|q|} \right) \left(\frac{v_{\perp}}{B} \right)$$

- El período es entonces:

$$t_g = \frac{2\pi\gamma m}{|q|B}$$

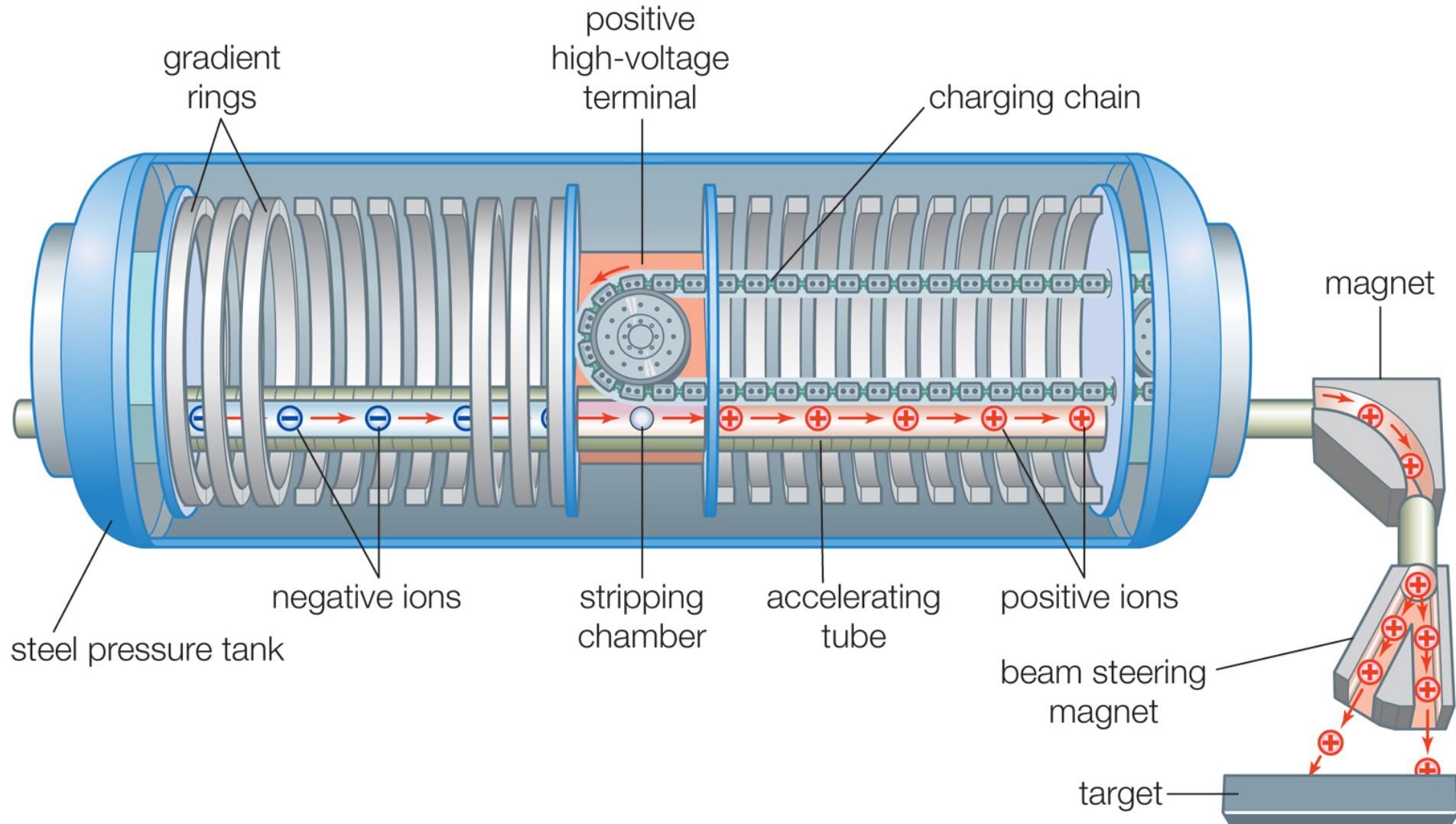


Generador de Van de Graaff



- Generador electrostático
- Fricción
- Limitado por la aislación (aire
~ 30 kV/cm)
- Potenciales típicos
 - aire, $V < 2 \text{ MV} - 5 \text{ MV}$
 - Otros gases (SF_6) $V \sim 14 \text{ MV}$
- Tandem (hasta 30 MV)

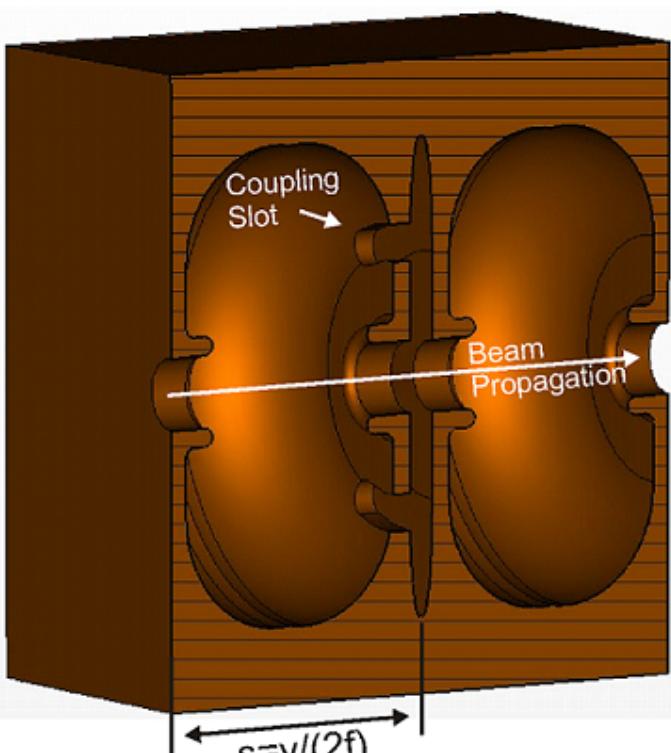
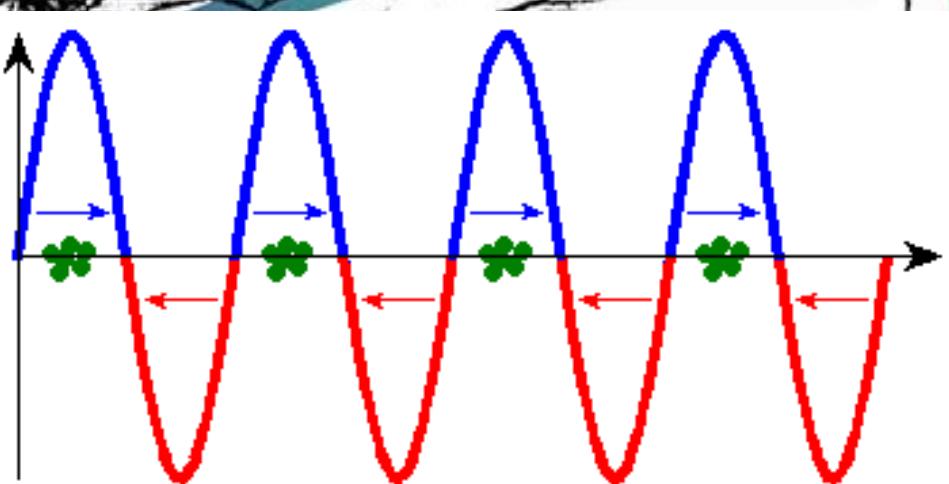
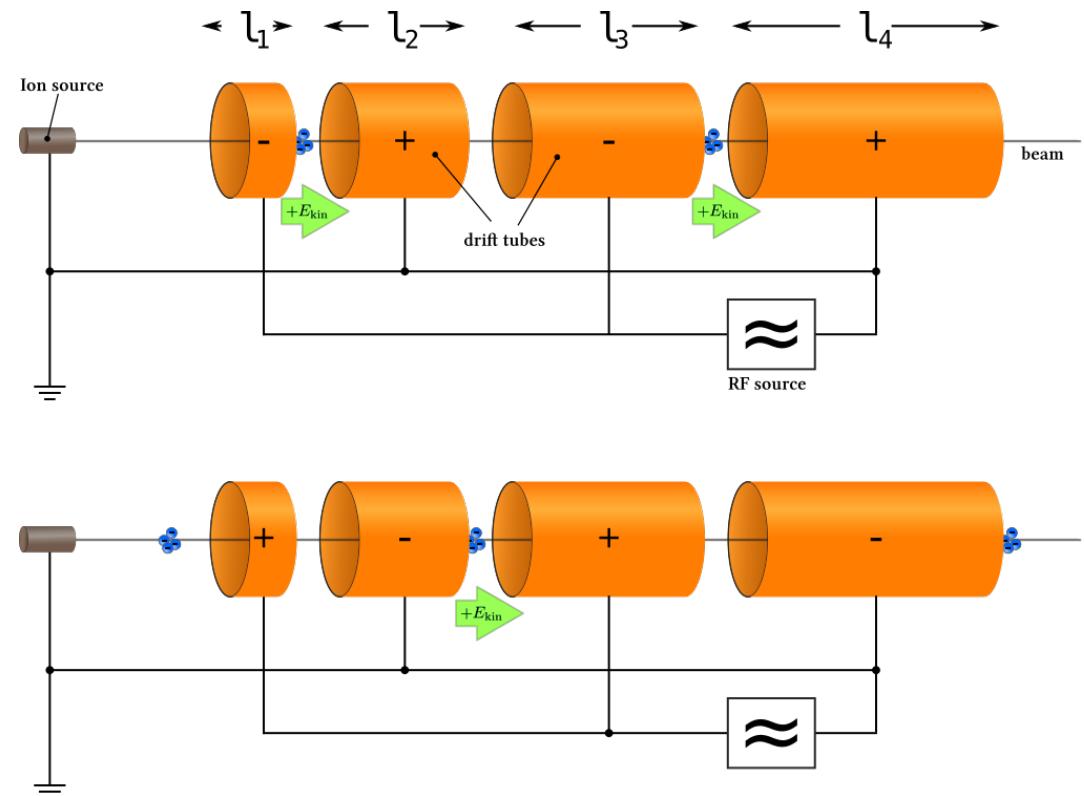
Acelerador Tandem (@CAB 1.7 MV)



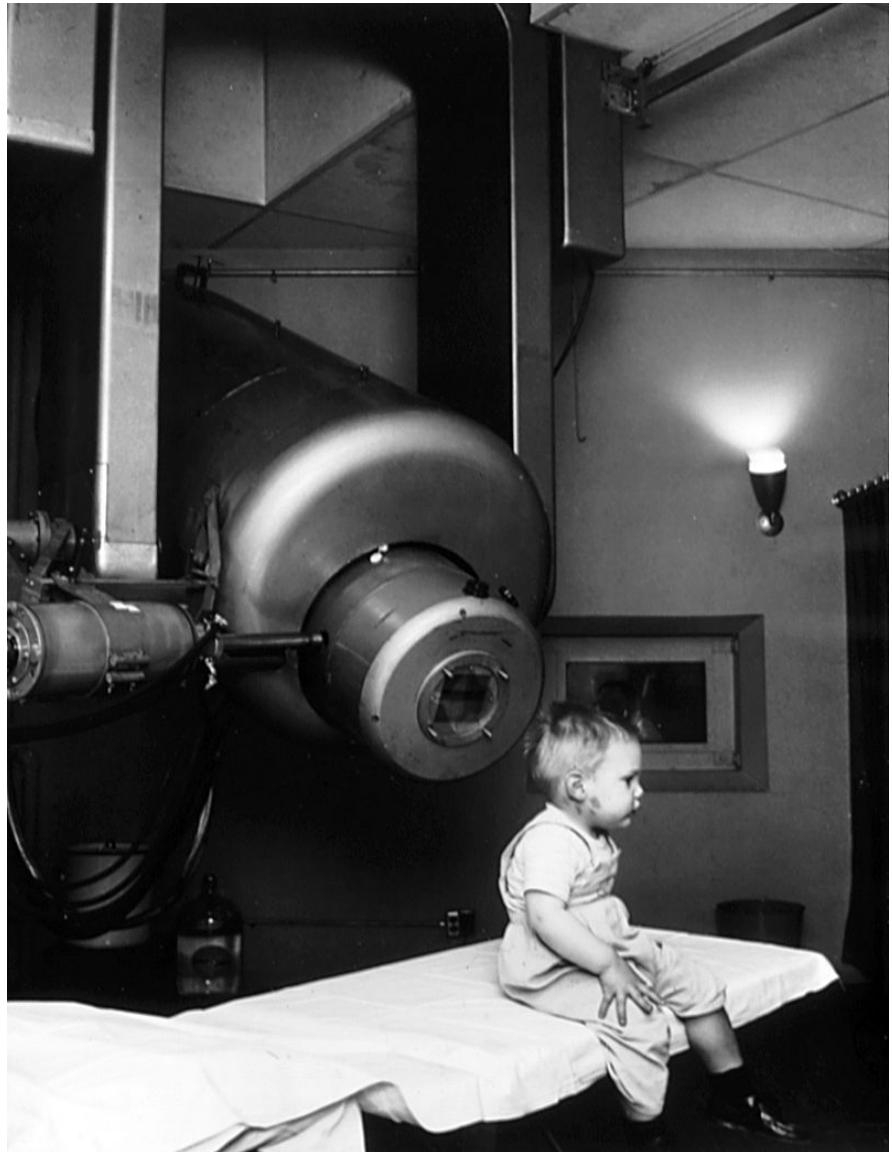
Campos eléctricos para acelerar

- Acelerador lineal (LinAc)

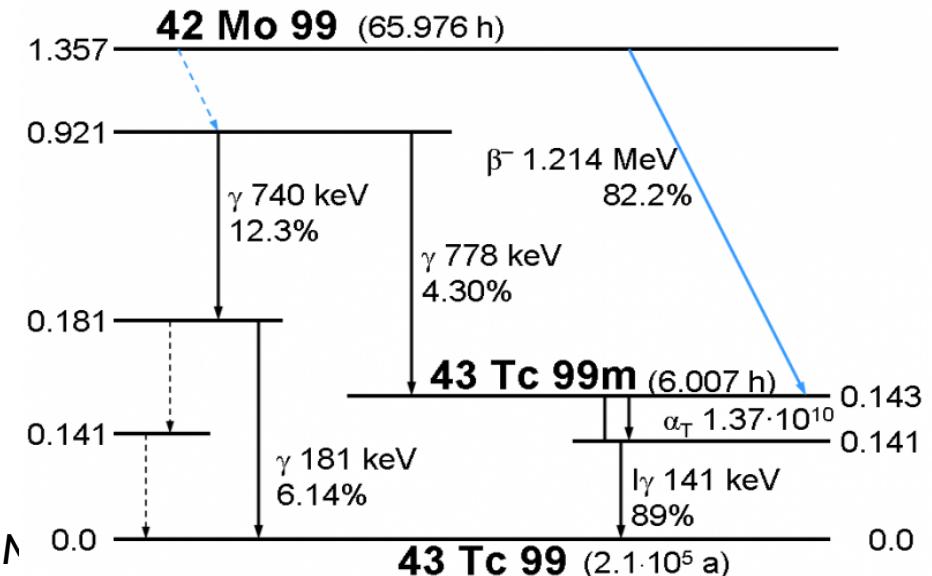
$$E = q V$$



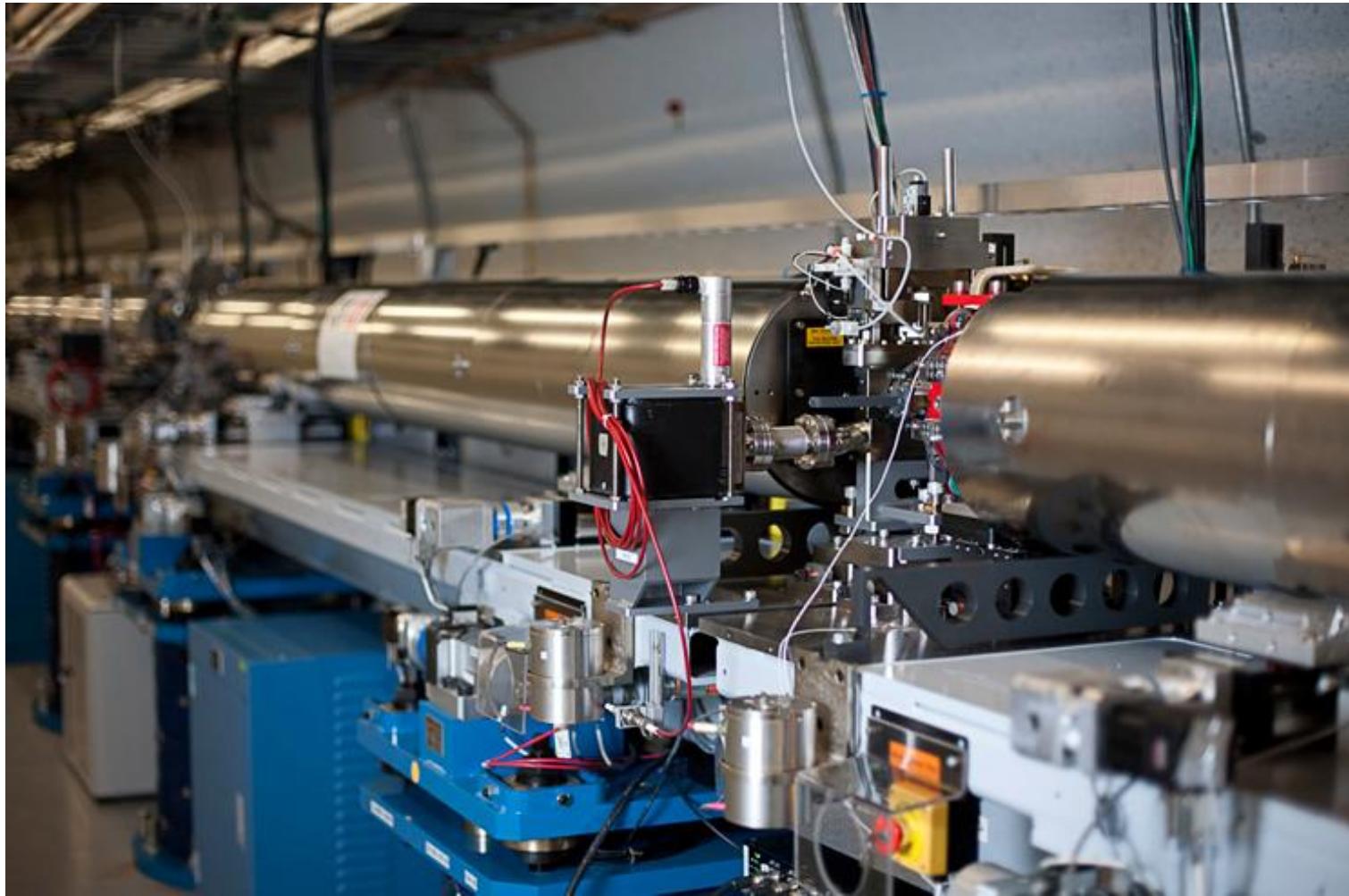
Aplicaciones médicas



- Electrones monoenergéticos (entre 4 MeV y 25 MeV)
- Electrones o RX (producidos con blanco de W refrigerado)
- Producción fotonuclear de ^{99}Mo ($^{99\text{m}}\text{Tc}$):
 - $^{98}\text{Mo}(\text{n},\gamma)^{99}\text{Mo} \leftarrow \text{reactores}$
 - $^{100}\text{Mo}(\gamma,\text{n})^{99}\text{Mo} \leftarrow \text{LinAc } 35\text{MeV}$ (Harvey et al, 2009)

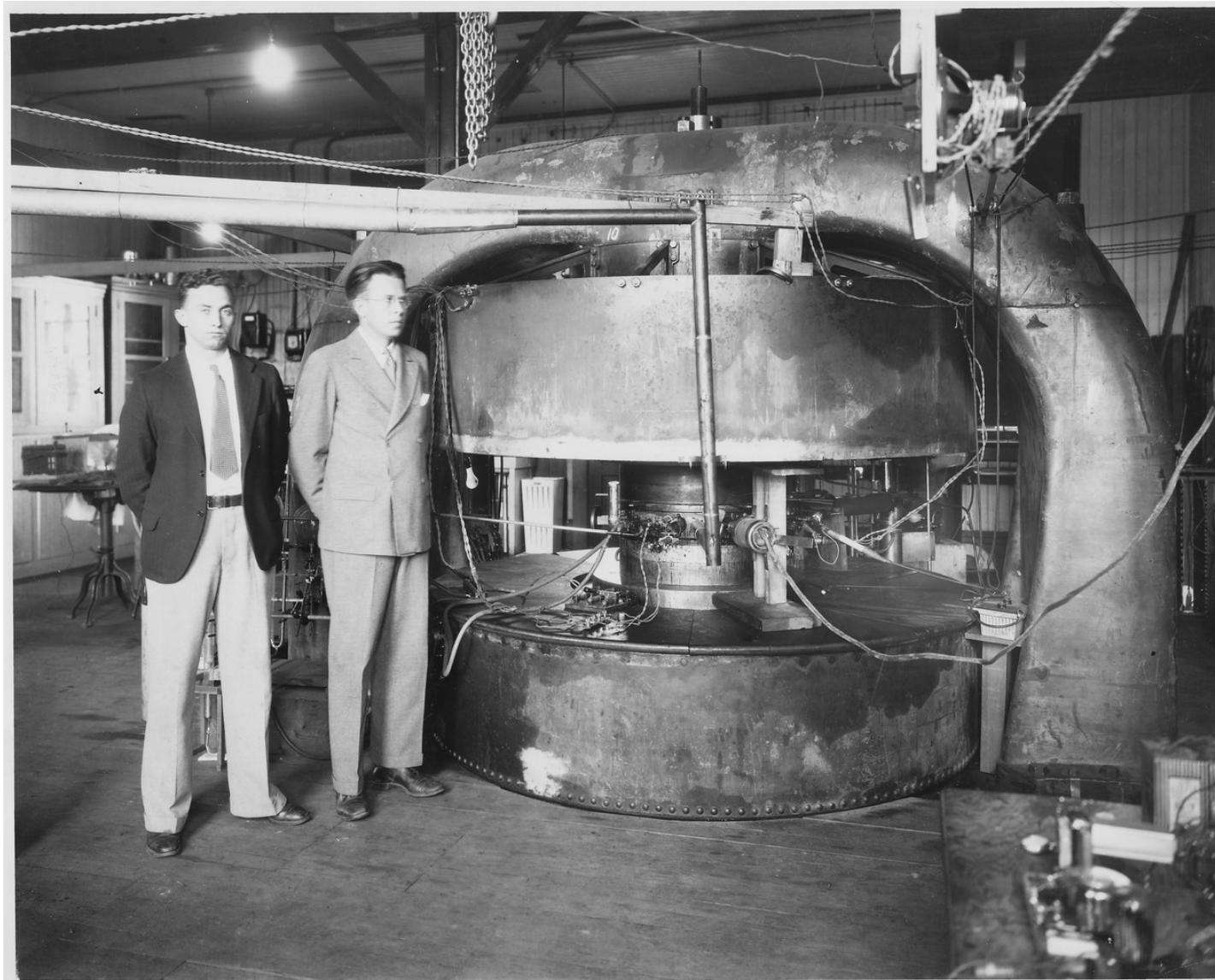


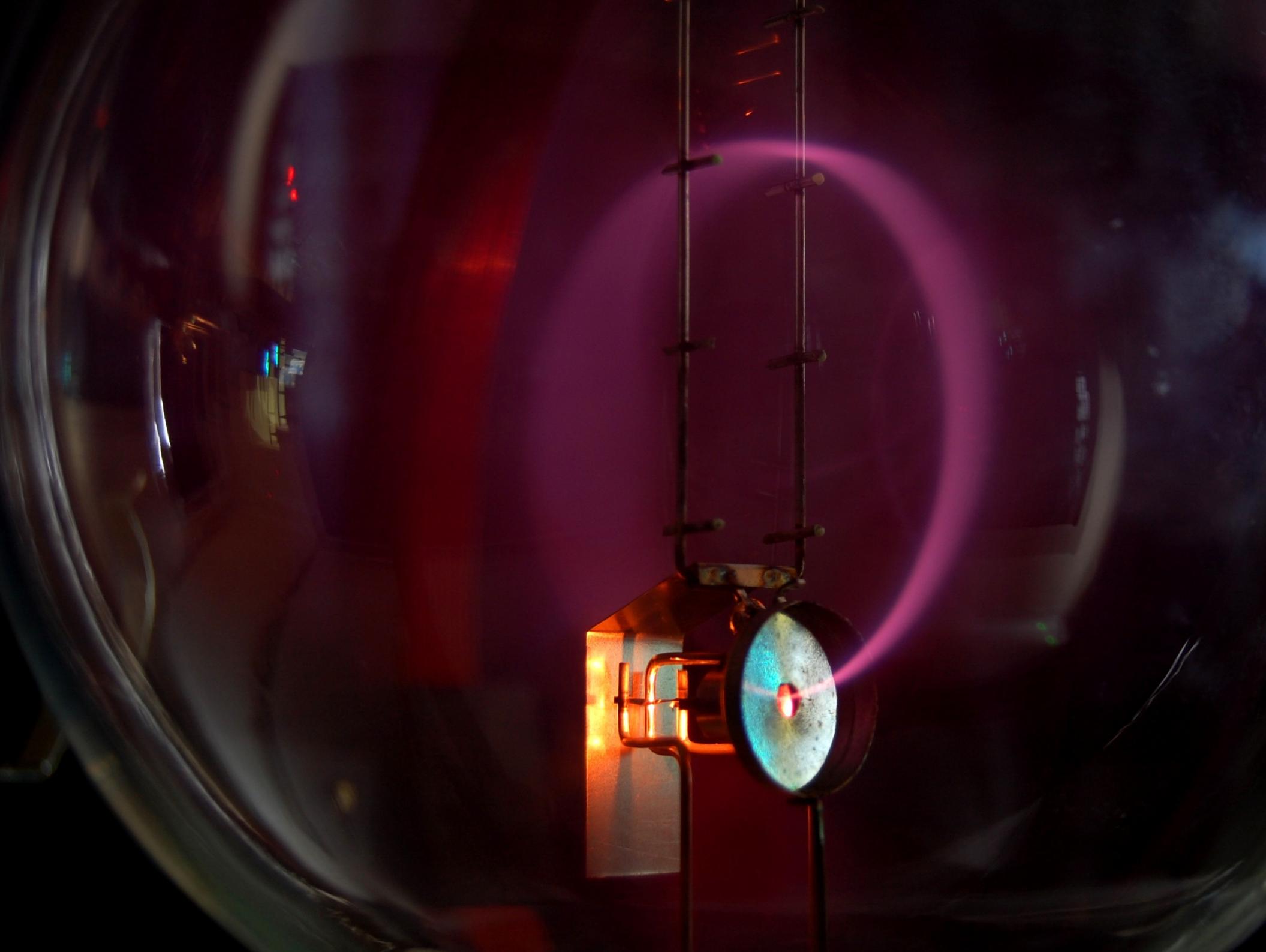
SLAC: 3 Premios Nóbel charm, estructura quarks, leptón tau



- 3.2 km: e^+ y e^- hasta 50 GeV; $E_{cm} \sim m_Z$ (90 GeV)

Ciclotrón (Lawrence)





Ciclotrón IBA Cyclone 18 (CAB, 18 MeV)

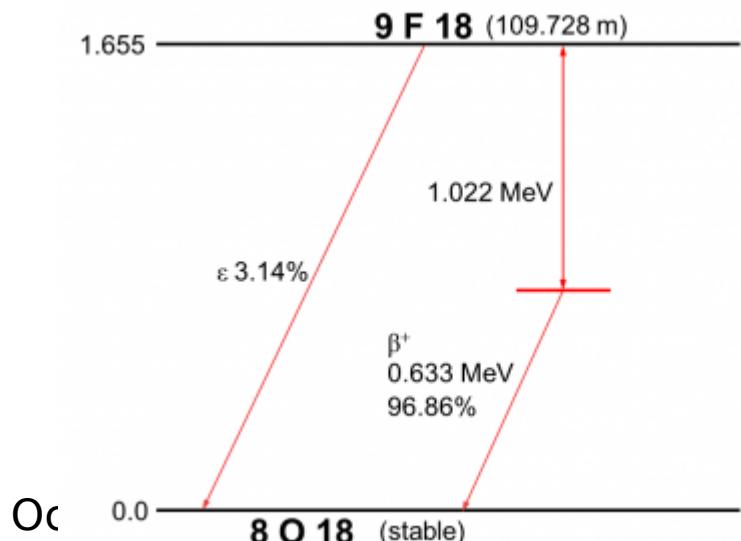


- Acelera iones hasta 18 MeV

- Producción de ^{18}F

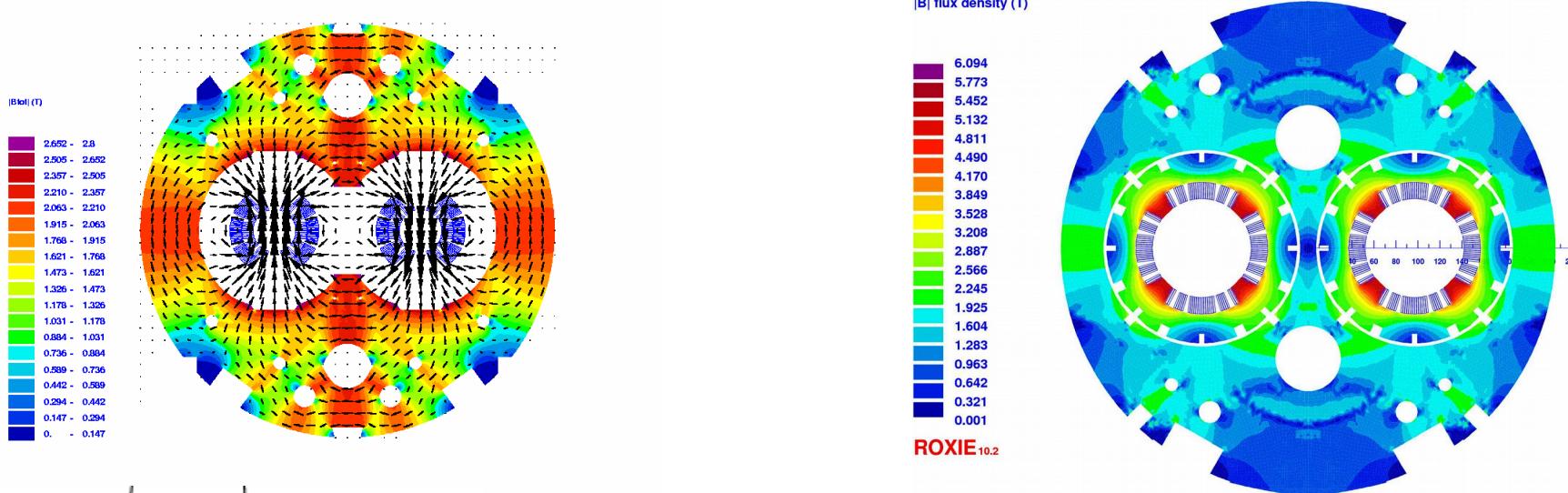


- Energía típica: 12 MeV
- Otras reacciones menos favorables
- $t_{1/2}^{18}\text{F}$: 109.73 minutos





1232 Dipolos (8.3 T) + 506 cuadrupolos (7 T) (y 688 sectupolos y 168 octupolos) en el LHC

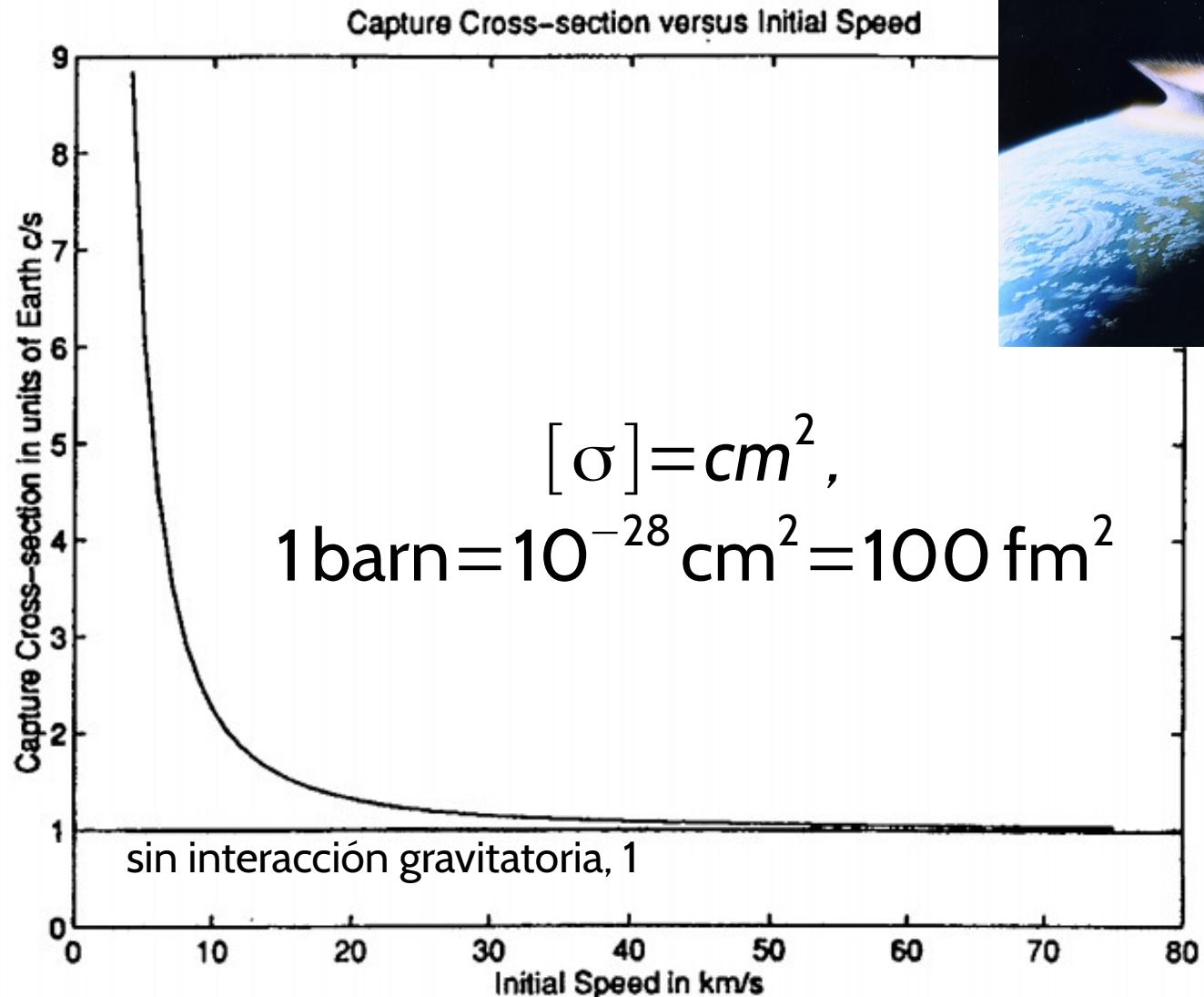


- Strong focussing: FODO
 - F → cuadrupolo, foco vertical
 - O → dipolo, curvatura
 - D → cuadrupolo, foco horizontal
 - O → dipolo, curvatura

Sección eficaz de interacción (σ)



Sección eficaz de captura de asteroides



Luminosidad de un acelerador

- Número de eventos **detectados** (N) como en un cierto tiempo (t) respecto a la sección eficaz de interacción (σ)

$$L = \frac{1}{\sigma} \frac{dN}{dt}, \quad [L] = \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$$

- La luminosidad integrada es la integral en el tiempo:

$$L_{\text{int}} = \int L dt, \quad [L_{\text{int}}] = \text{cm}^{-2}$$

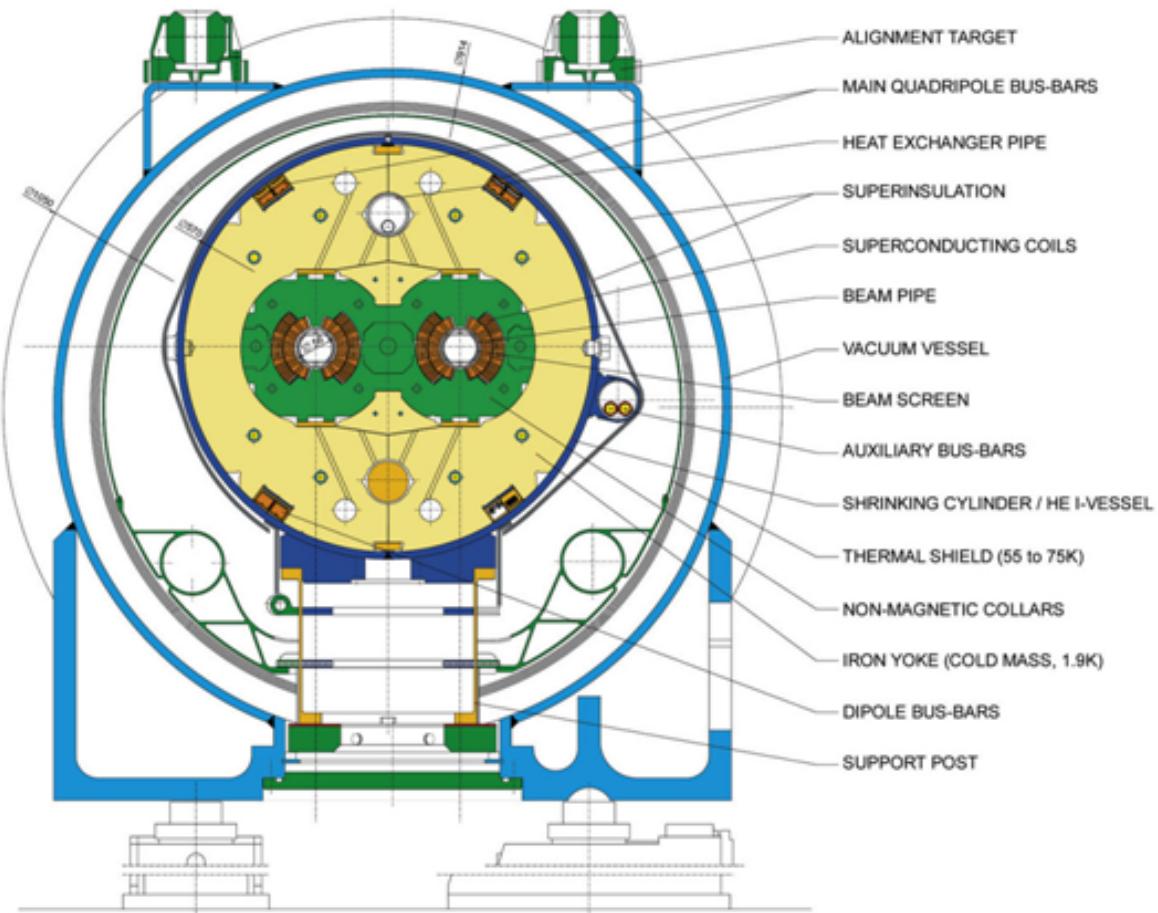
Luminosidad LHC

https://userweb.jlab.org/~parkkj/USC/proposal2009/local_disk/MEIC/lumi_collider.pdf
<http://pdg.lbl.gov/2015/reviews/rpp2015-rev-accel-phys-colliders.pdf>

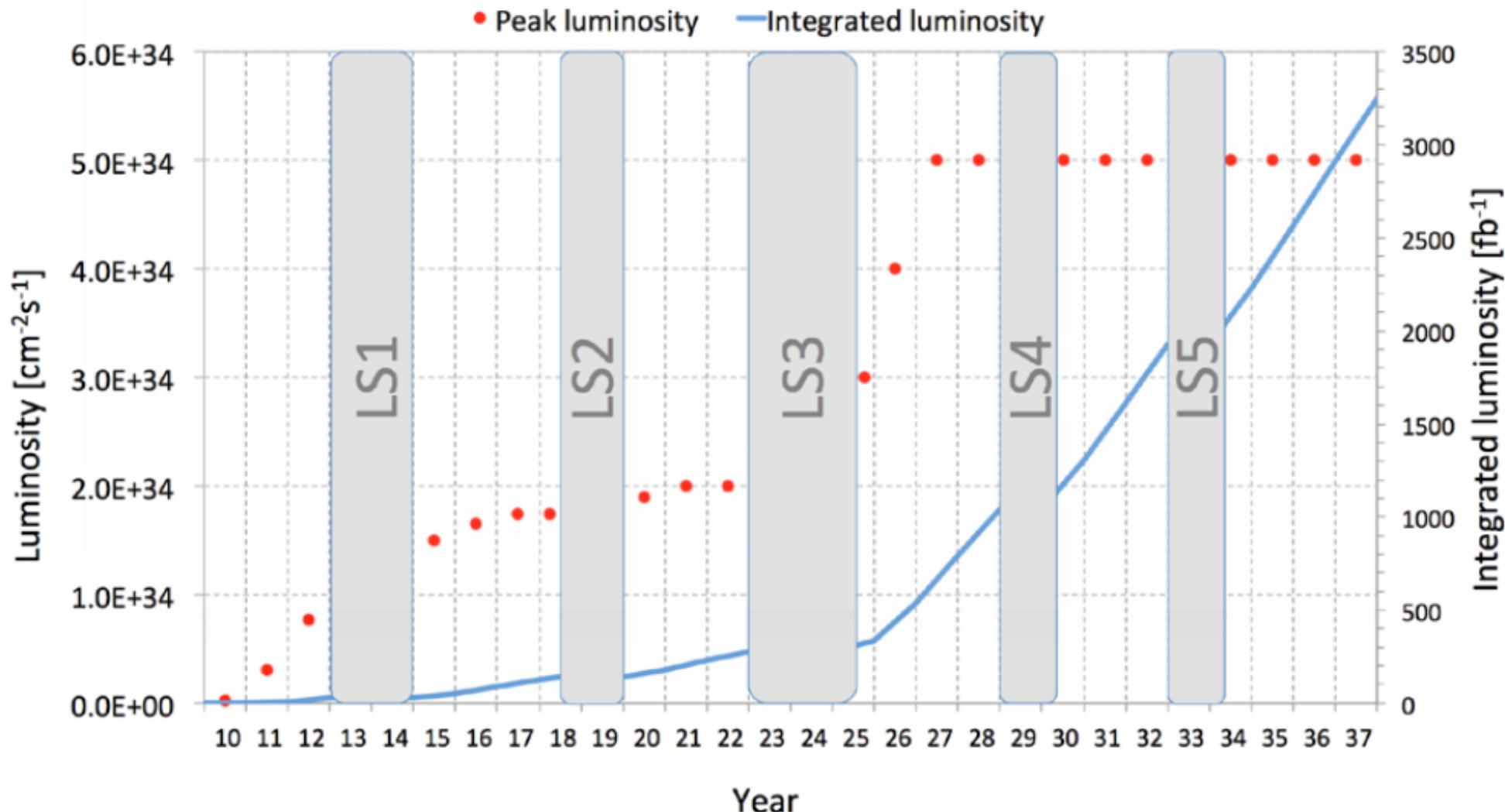
HL-LHC: key 25 ns parameters

Protons per bunch	2.2×10^{11}
Number of bunches	2750
Normalized emittance	2.5 micron
Beta*	15 cm
Crossing angle	590 microrad
Geometric reduction factor	0.305
Virtual luminosity	$2.4 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
Levelled luminosity	$5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
Levelled <pile-up>	140

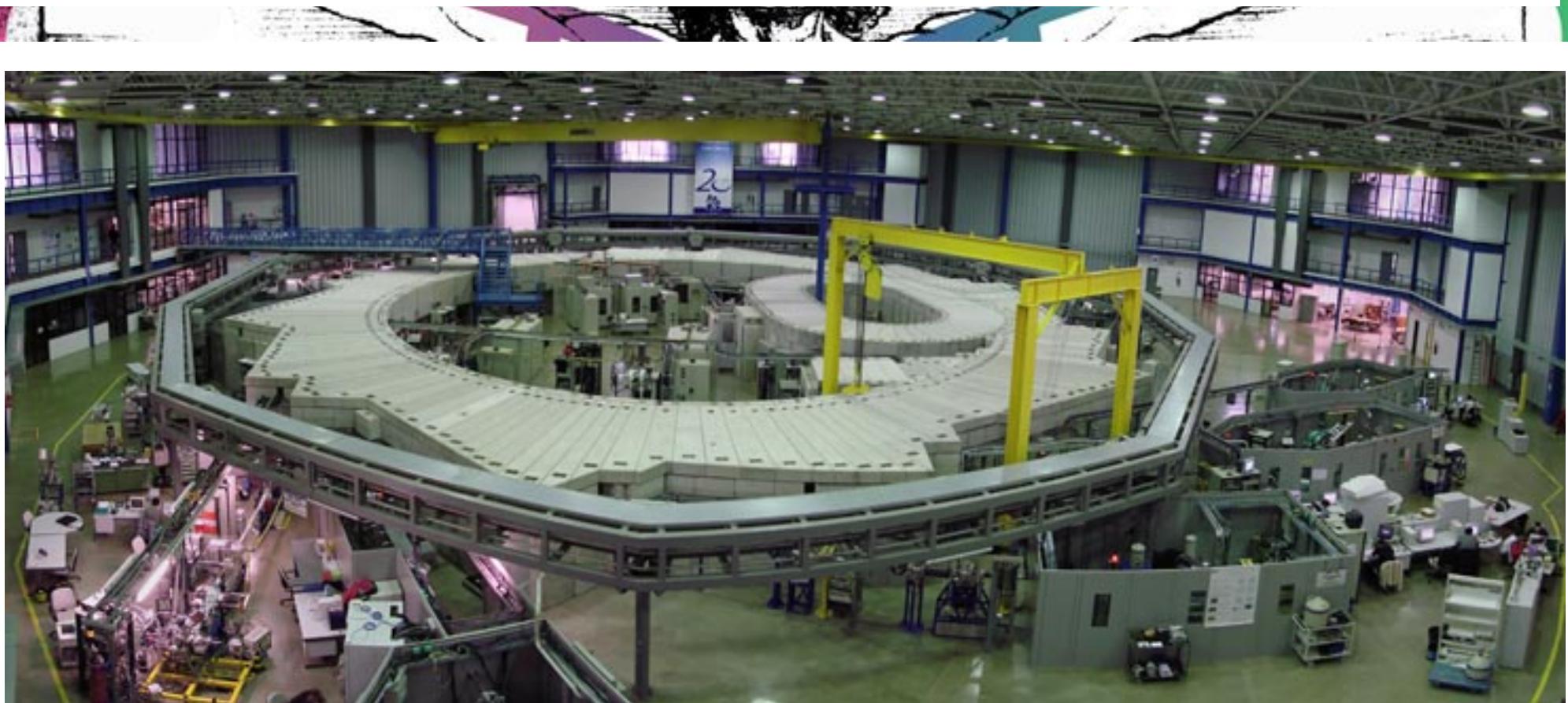
LHC DIPOLE : STANDARD CROSS-SECTION



LHC, luminosidad y luminosidad integrada

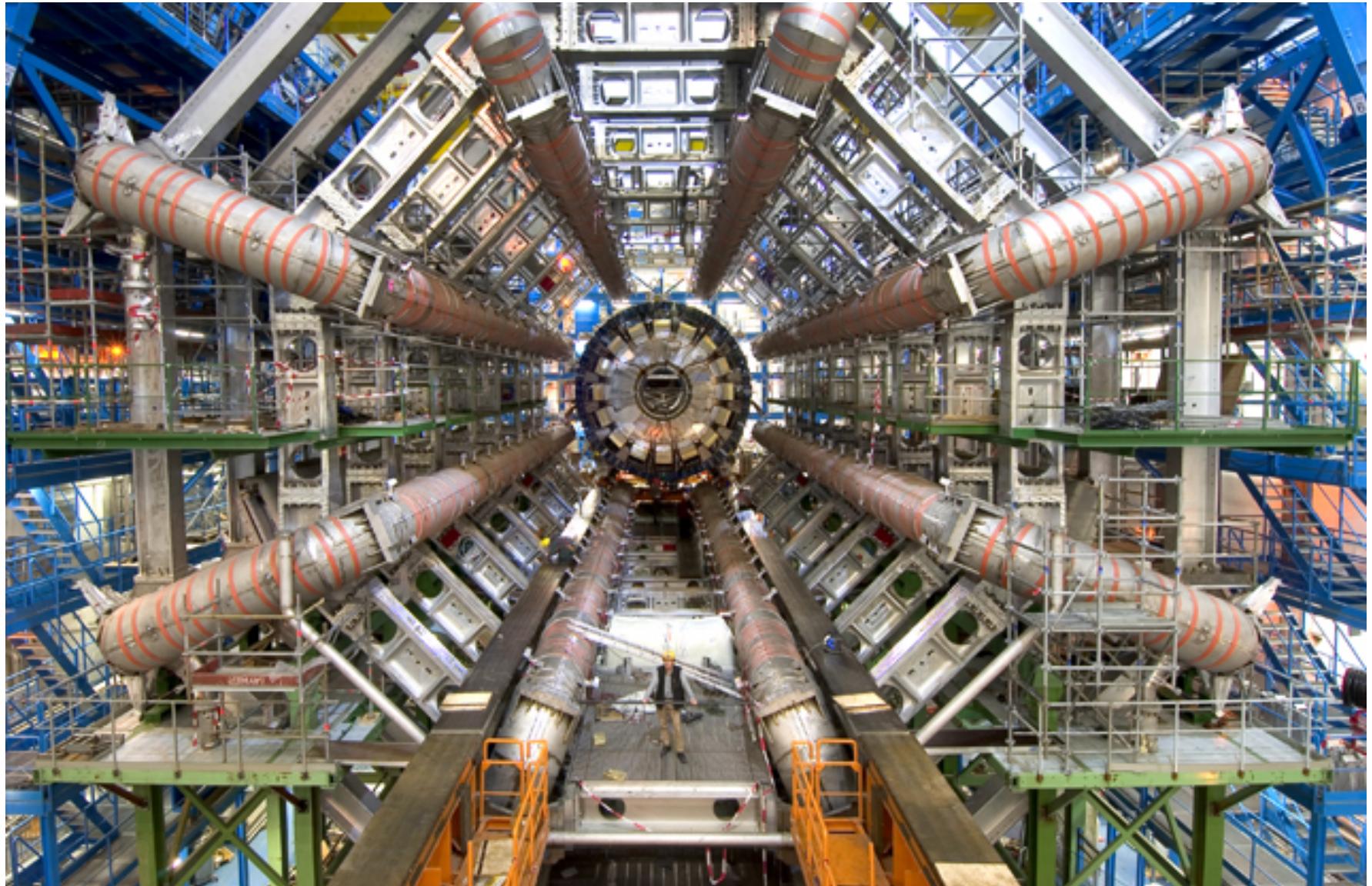


Radiación sincrotrón (LNLS, Brasil)



- electrones; $E=1.37 \text{ GeV}$; $R=29.7 \text{ m}$; $B=1.62 \text{ T}$
- $I=250 \text{ mA}$; RF: 476.066 MHz ;

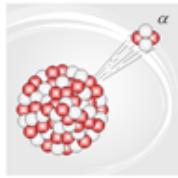
Detectores, porque medir es interactuar



Radiación y Unidades

Radioactivity and Ionizing Radiation

Radioactive decay

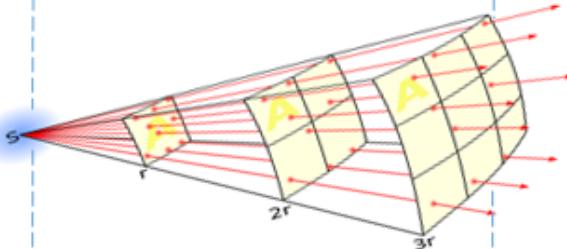


Measurement quantity

- becquerel (Bq)

The becquerel is the SI unit of activity.
1 becquerel = 1 decay per second

Ionizing radiation

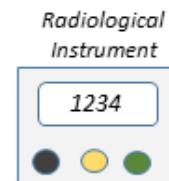


Transmission factors

- Distance (Inverse square law)
- Scattering
- Absorption

Ionizing radiation strength from a point source decreases with the square of distance it travels.
The intervening medium can also absorb and scatter radiation.

Detection



Measurement quantities

Dose

- gray (Gy)
- sievert (Sv)

Particle counts

- per second (cps)
- per minute (cpm)

Both dose and counts are used:
depending on the application and the
radiation type.
Physical dose is measured in grays, and
biological dose in sieverts.

Poder de frenado

- Es igual a la **energía perdida (por partículas cargadas) por unidad de camino recorrido** en el medio

$$S(E) = -\frac{dE}{dL}, \quad S(E) > 0, \text{ y } [S] = \text{MeV cm}^{-1}$$

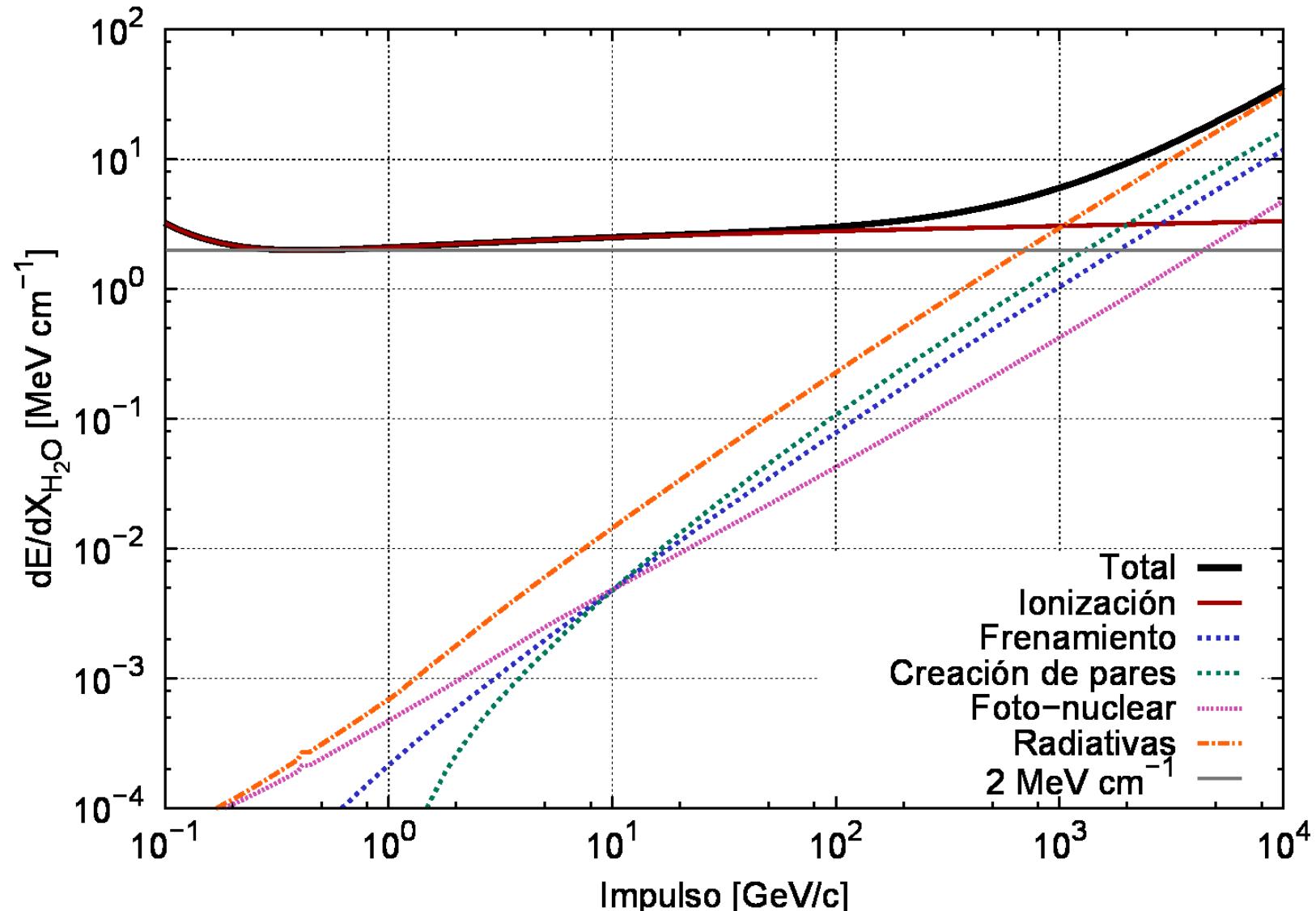
- Luego el **rango** recorrido depende de la energía inicial E_0 (CSDA: continuous slowing down approximation)

$$R(E) = \int_0^{E_0} \frac{dE}{S(E)}$$

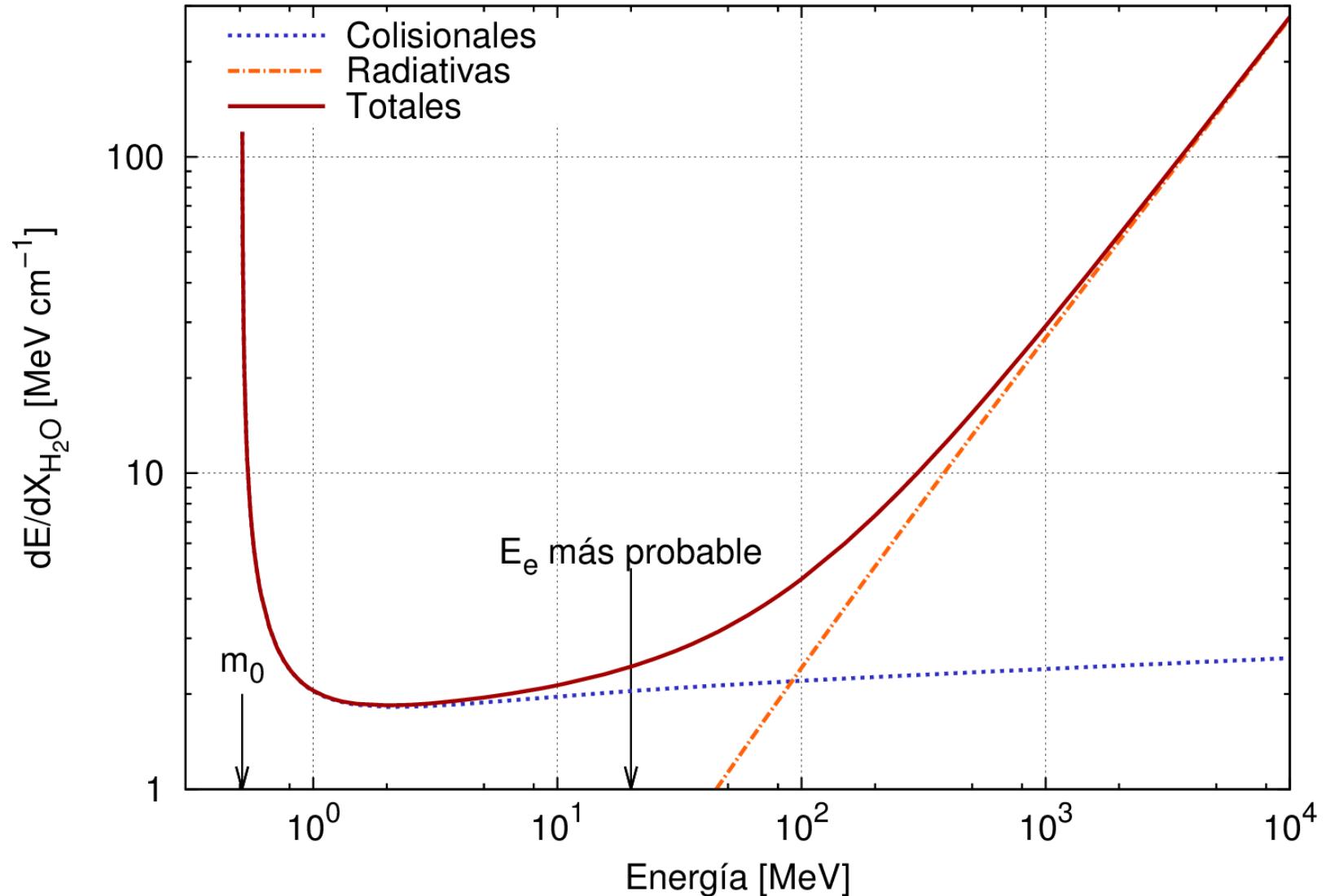
- X:

$$X = \int_0^L \rho(l) dl, \text{ si } \rho \text{ cte, } X = \rho L \quad [X] = \text{g cm}^{-2}$$

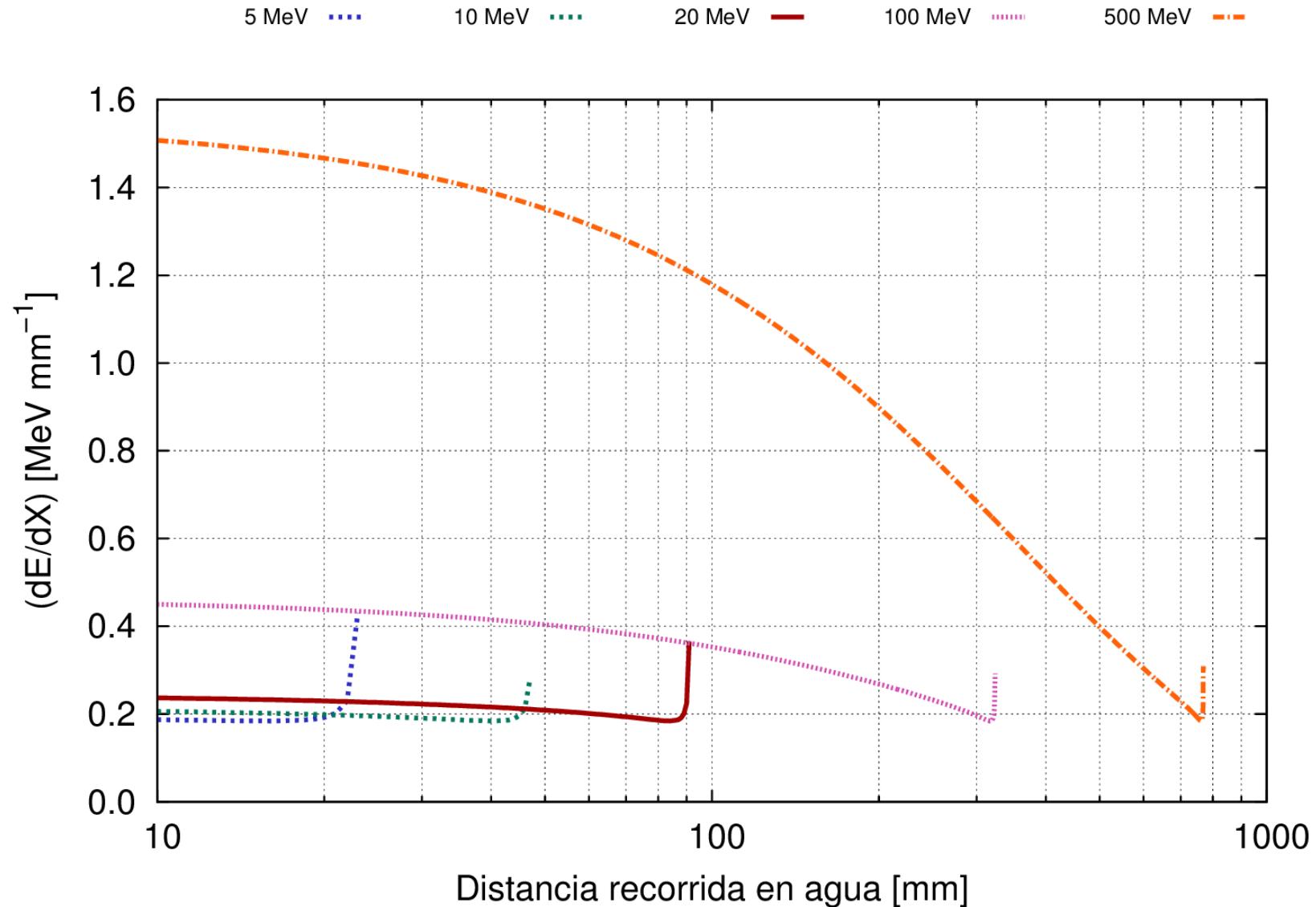
dE/dX Muones en agua



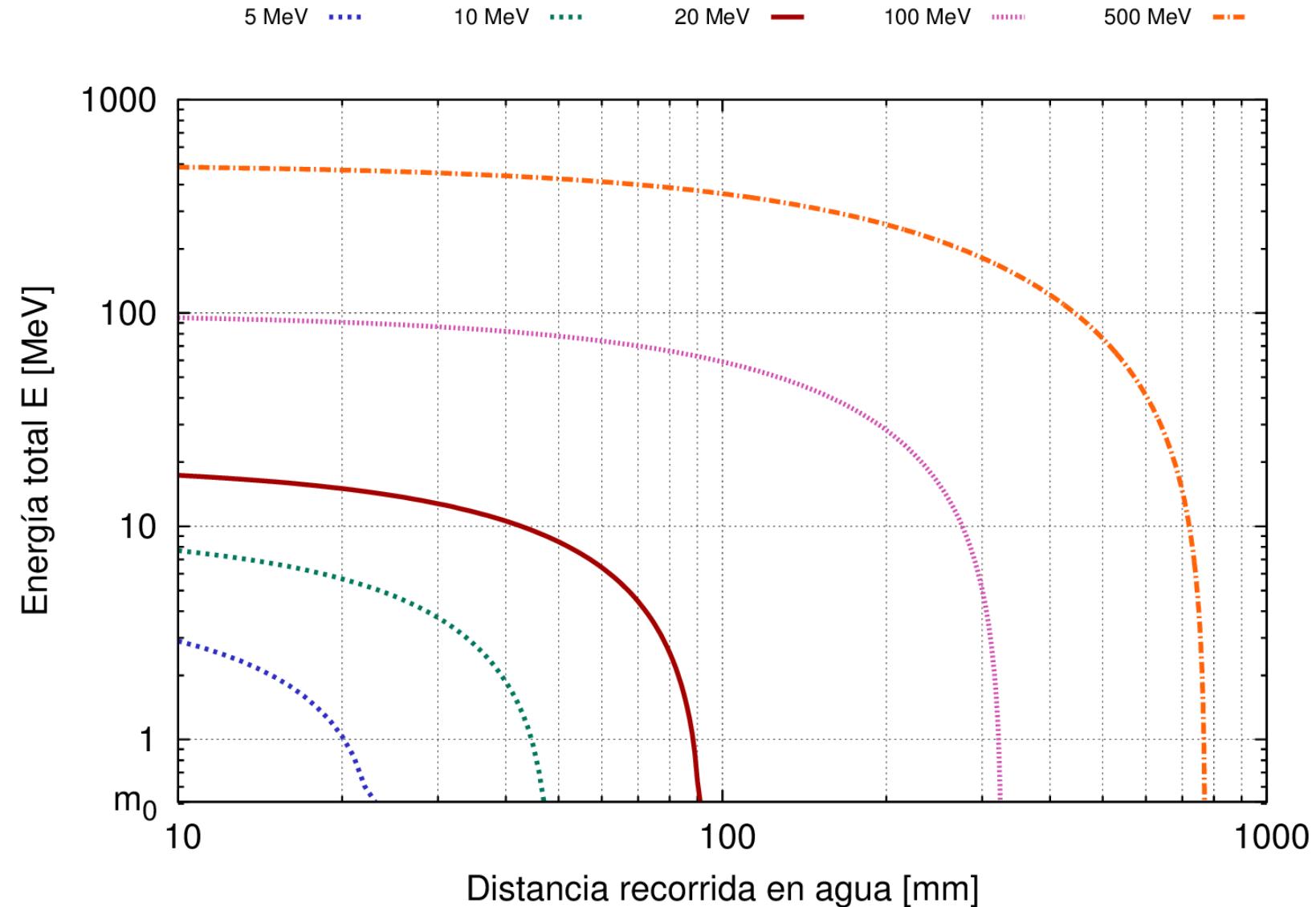
dE/dX Electrones en Agua



Poder de frenado

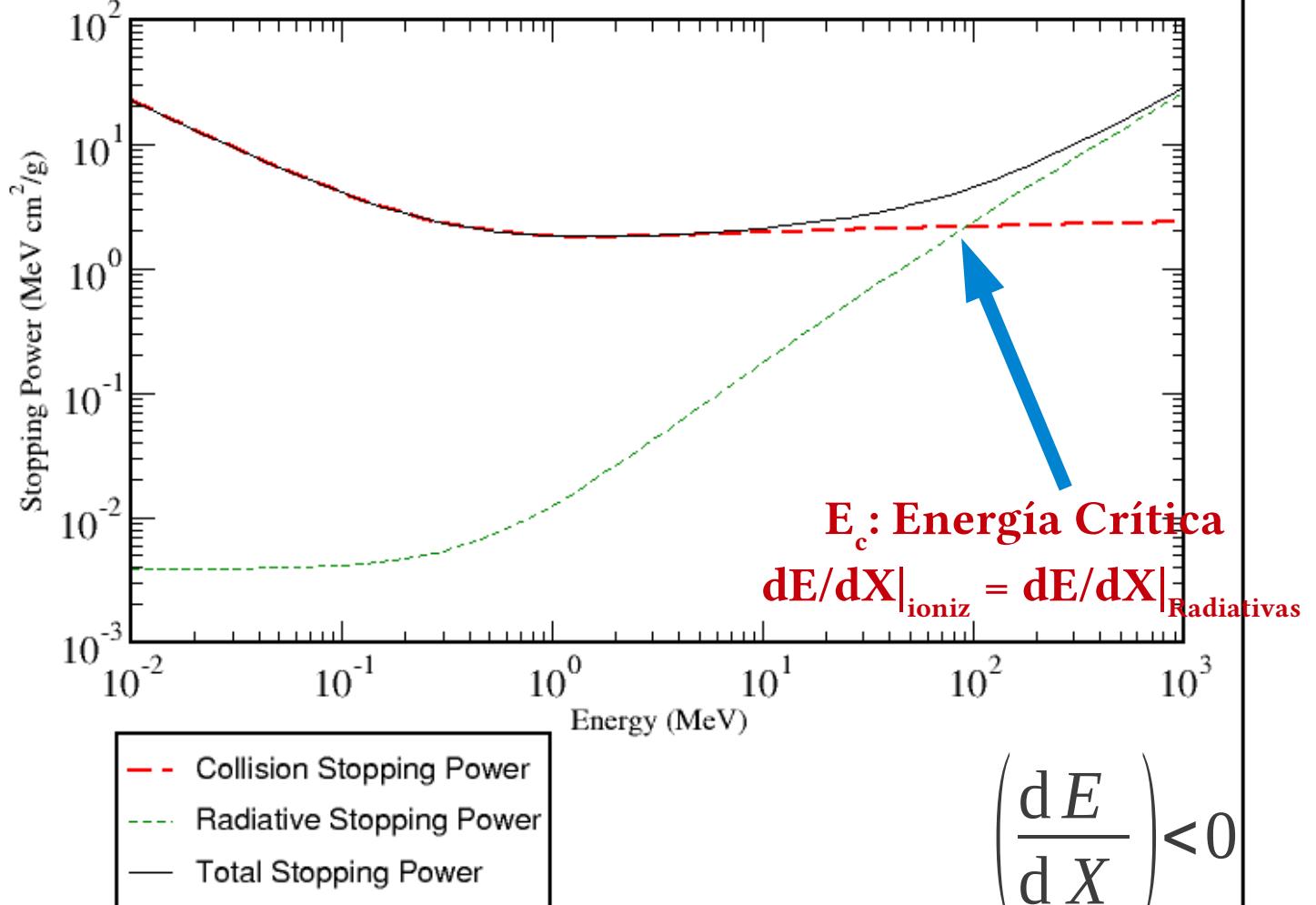


Rango de electrones en agua



Poder de frenado

CHALLENGE ACCEPTED



Si $E > E_c \rightarrow$ Nuevas partículas

Si $E < E_c \rightarrow$ Absorción en el medio

Oct, 2016

Asorey - Balseiro 2016 Física I

$$E_c^{EM} \approx \frac{710 \text{ MeV}}{Z + 0.92} = 86 \text{ MeV}$$

estar/pstar/astar, NIST (2012)

estar/pstar/astar/XCOM

NIST
National Institute of
Standards and Technology
Physical Meas. Laboratory



The ESTAR program calculates stopping power, density effect parameters, range, and radiation yield tables for electrons in various materials. Select a material and enter the desired energies or use the default energies. Energies are specified in MeV, and must be in the range from 0.001 MeV to 10000 MeV.

[Help](#)

[Text version](#)

[Material composition data](#)

Select a common material:

Muscle, Skeletal
or enter a [unique material](#)

Graph stopping power:
 Total Stopping Power
 Collision Stopping Power
 Radiative Stopping Power

Graph density effect parameter

Graph CSDA range

Graph radiation yield

No graph

Additional Energies (optional):
Use energies from a file*
 No file chosen

or

Use energies entered below (one per line)

Include default energies

Note: Only stopping powers and the density effect parameter will be calculated if additional energies are used.

* Your browser must be file-upload compatible.

<https://www.nist.gov/pml/stopping-power-range-tables-electrons-protons-and-helium-ions>

Longitud de interacción X_{EM}

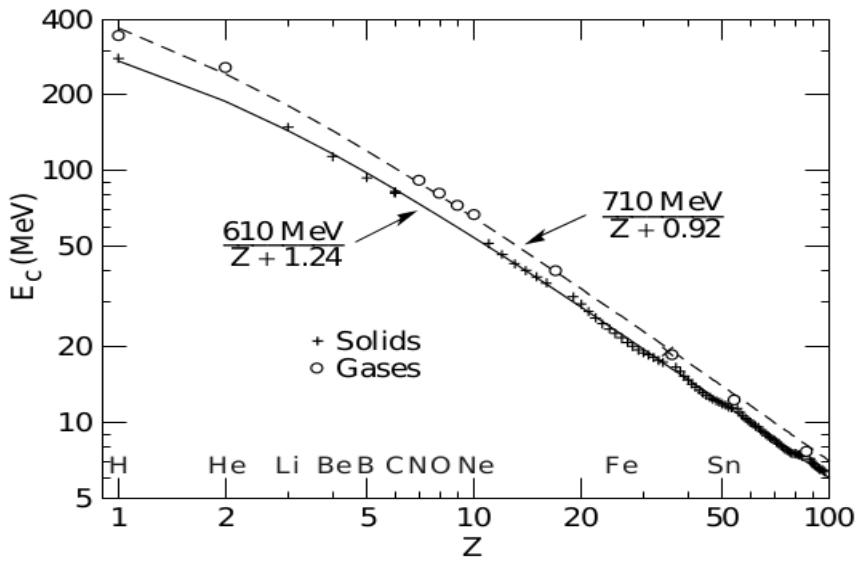
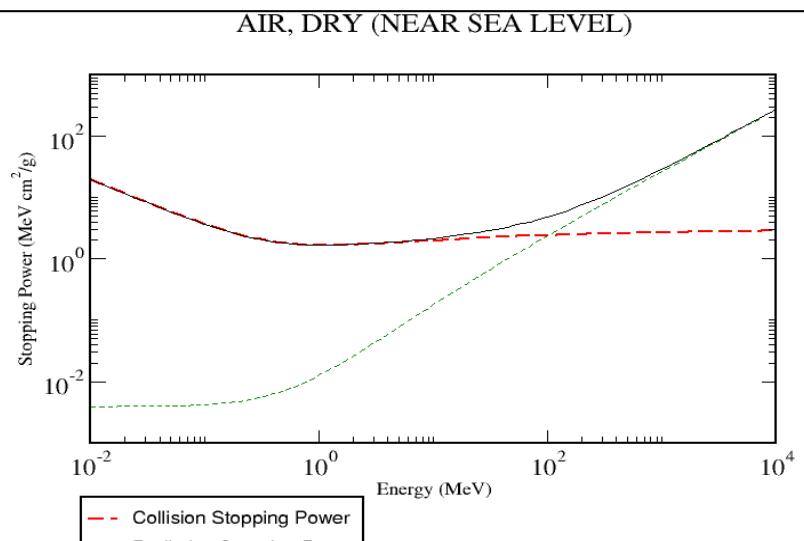
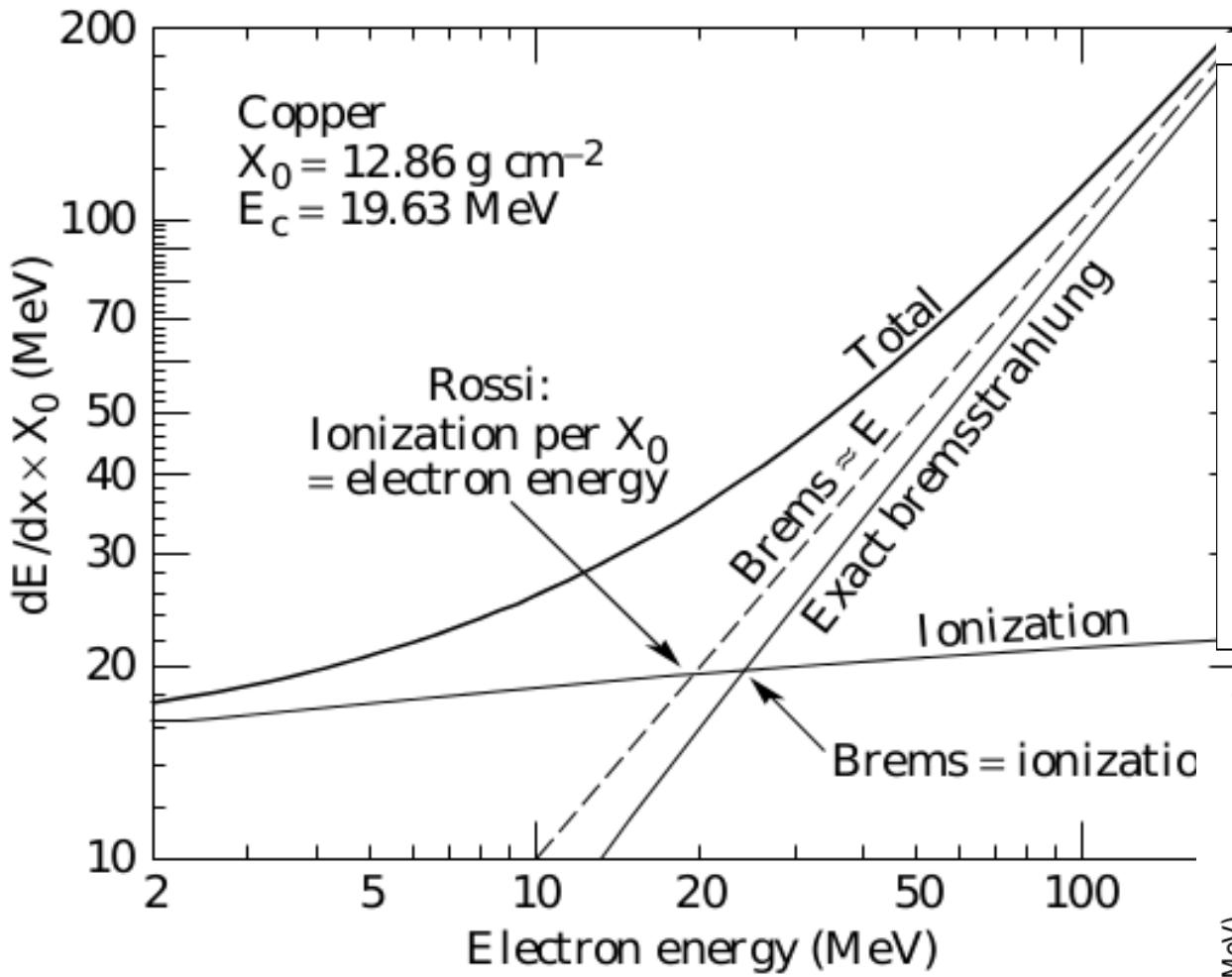
- A medida que la partícula avanza, pierde energía
 - Ionización → Colisiones
 - Radiativas → Producción de nuevas partículas
- En general, se define:

“Longitud interacción de electromagnética X_{EM} ”

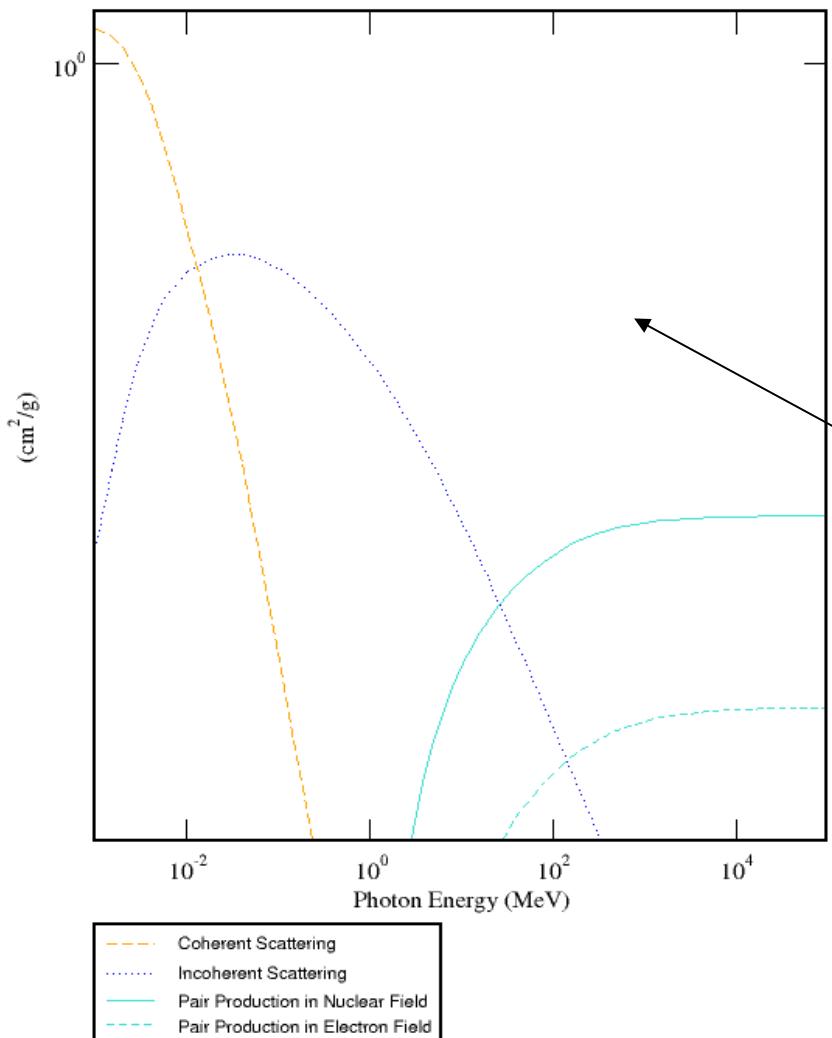
- Cantidad de materia atravesada (en g/cm²) cuando un electrón pierde una fracción $1-e^{-1}$ (~63%) de su energía original
- 7/9 del camino libre medio de producción de pares para un fotón

- Energía crítica es la energía a la cuál las pérdidas por ionización luego de recorrer una longitud de interacción son iguales a la energía del electrón
ó
- Energía a la cuál las pérdidas por frenado se igualan a las pérdidas por ionización

Energía critica para electrones



¿Qué pasa con los fotones?

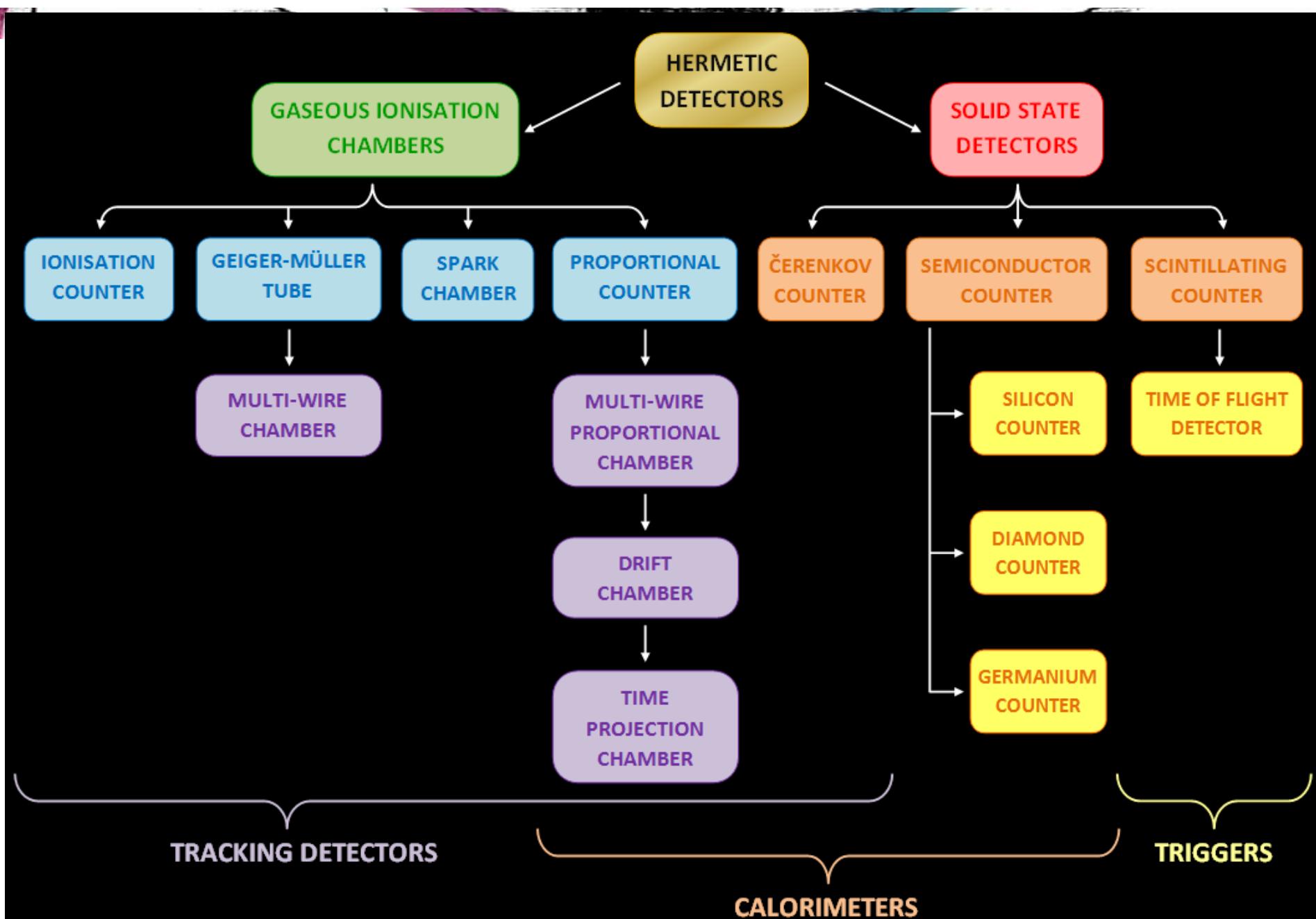


Partículas sin carga

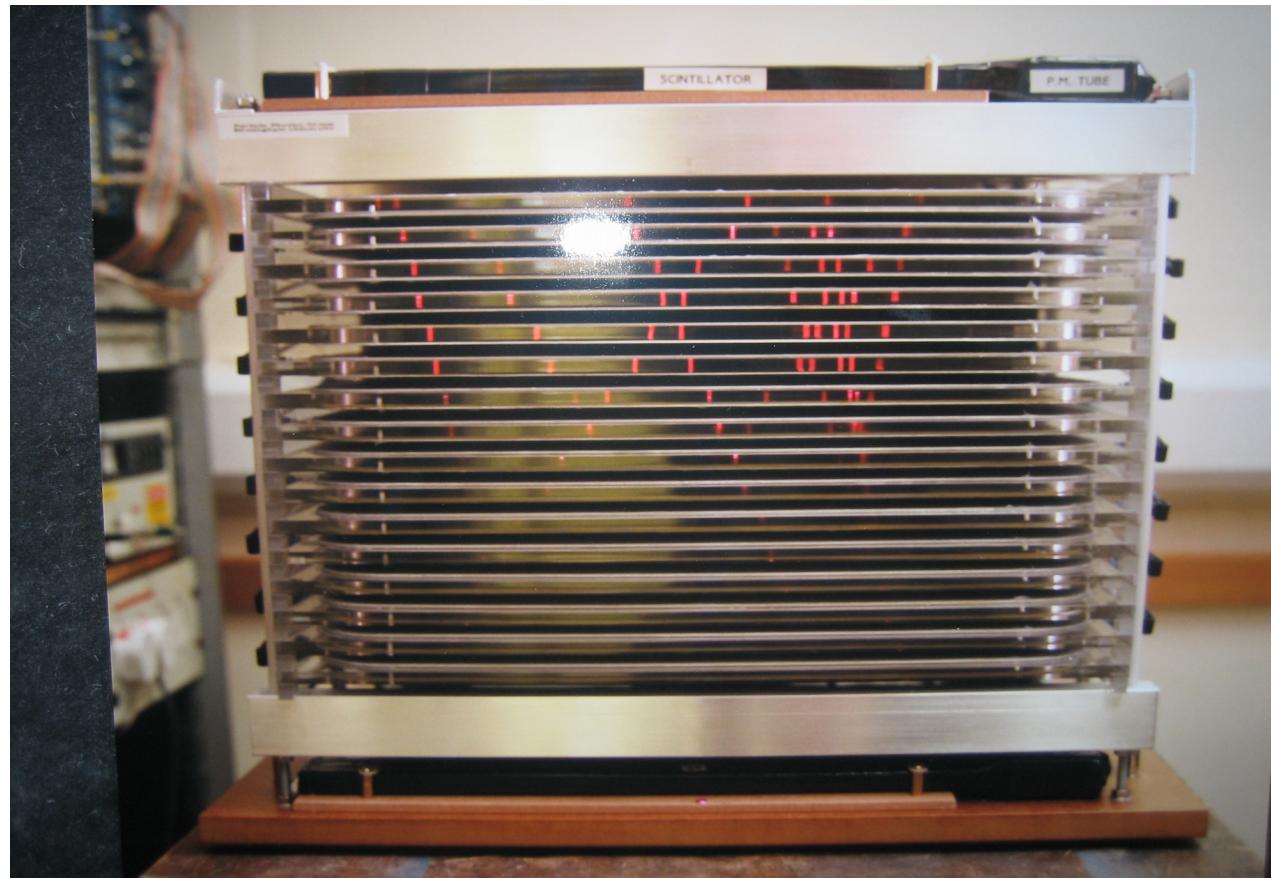
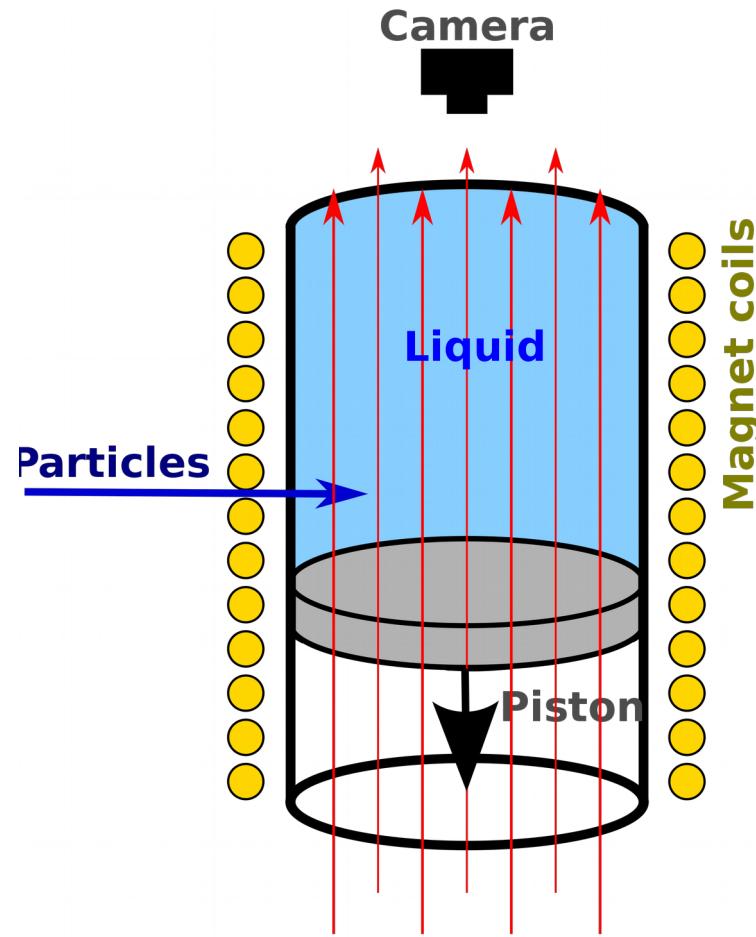
Pero hay dos efectos adicionales:

- 1) Producción de pares: un fotón puede producir un par que produzca señal
- 2) Compton: por scattering compton un electrón puede ser promovido

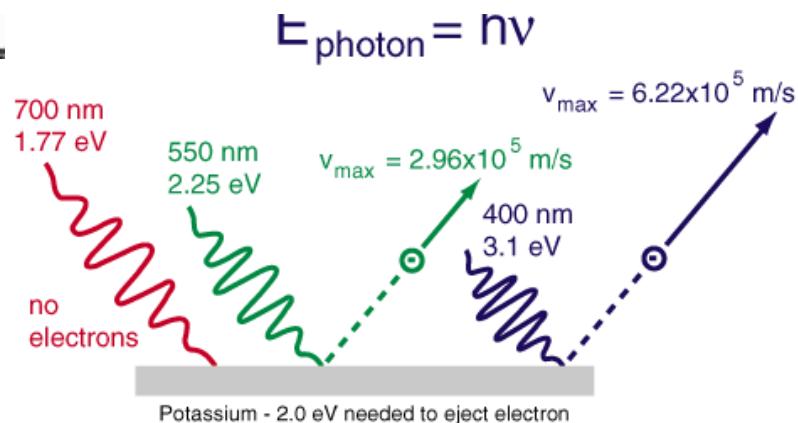
Detectores de radiación y partículas



- Registro o inferencia de
 - Posición, tiempo de arribo, Tipo (carga, masa), Energía



Fototubo, alias “PMT”



Photoelectric effect

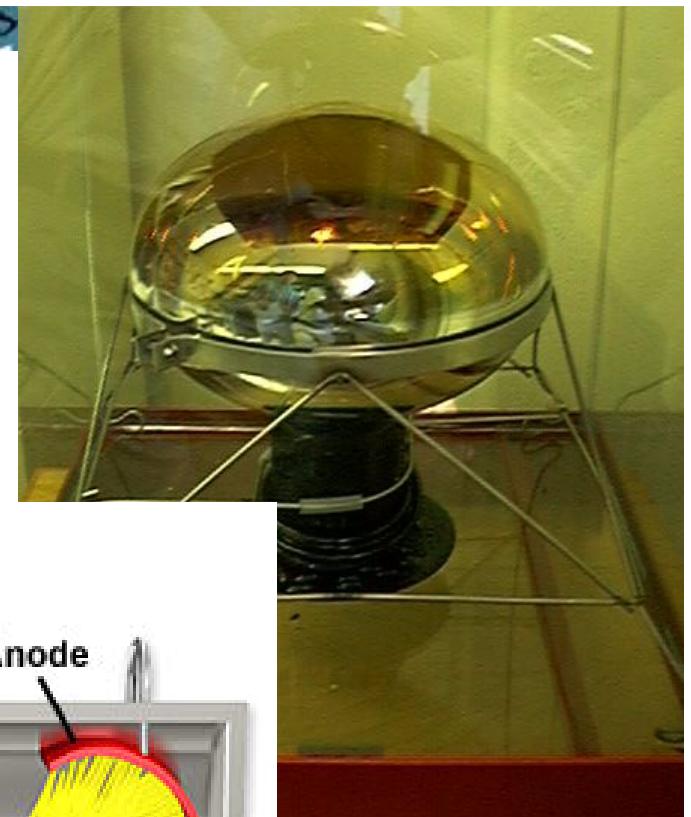
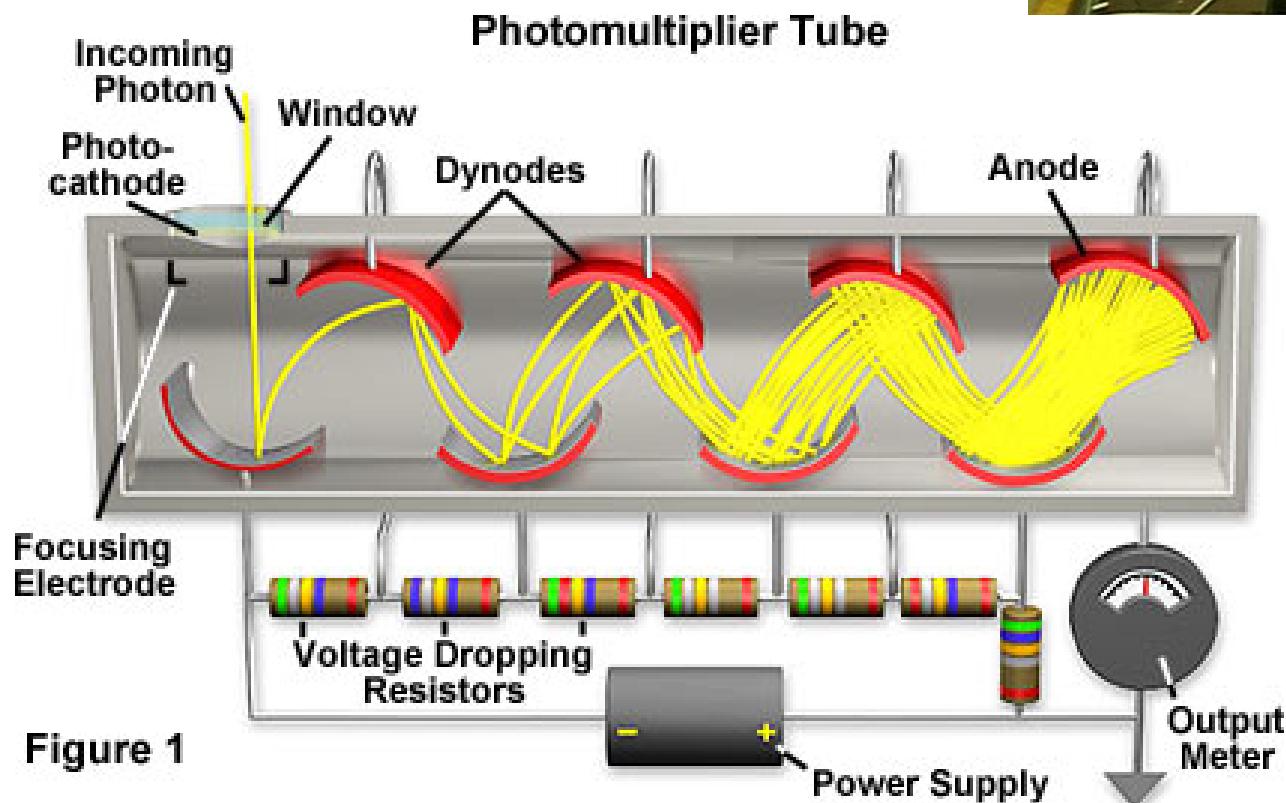
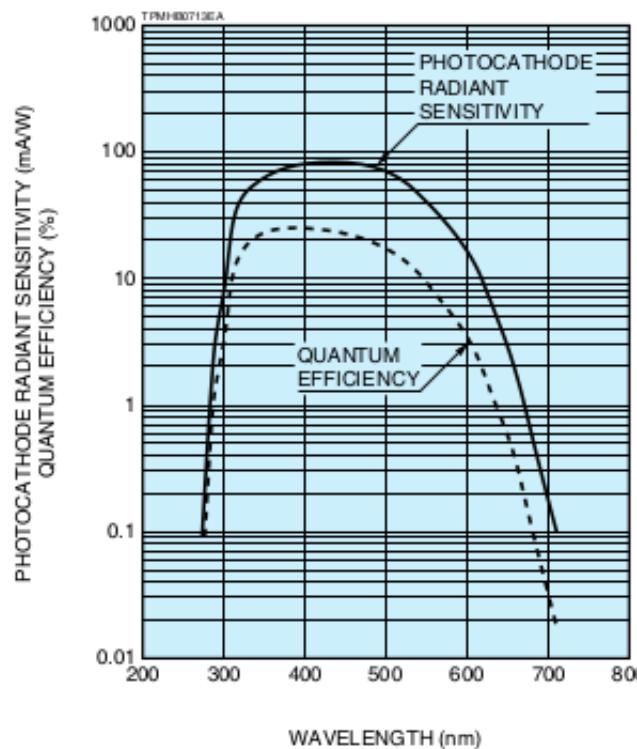


Figure 1

Hamamatsu R5912

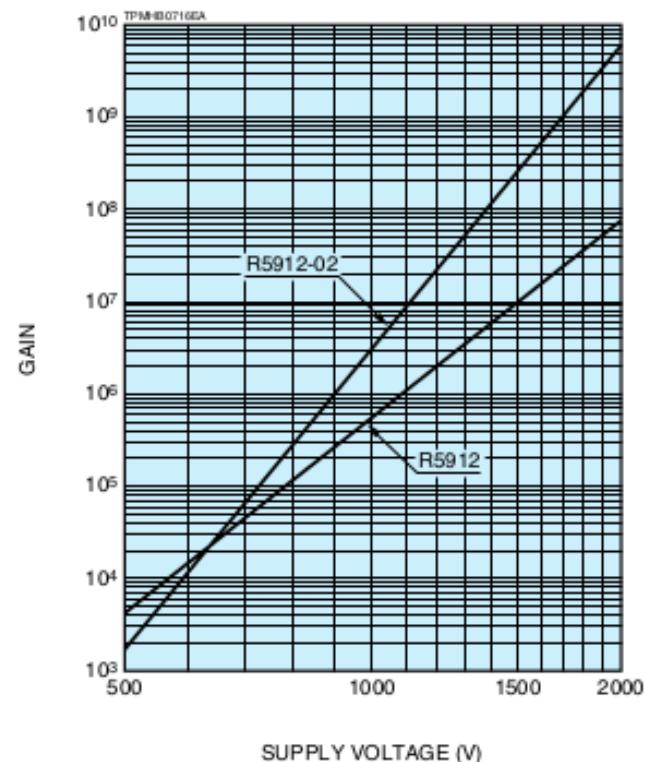
SPECTRAL RESPONSE

- R5912, R5912-02
- R7081, R7081-20



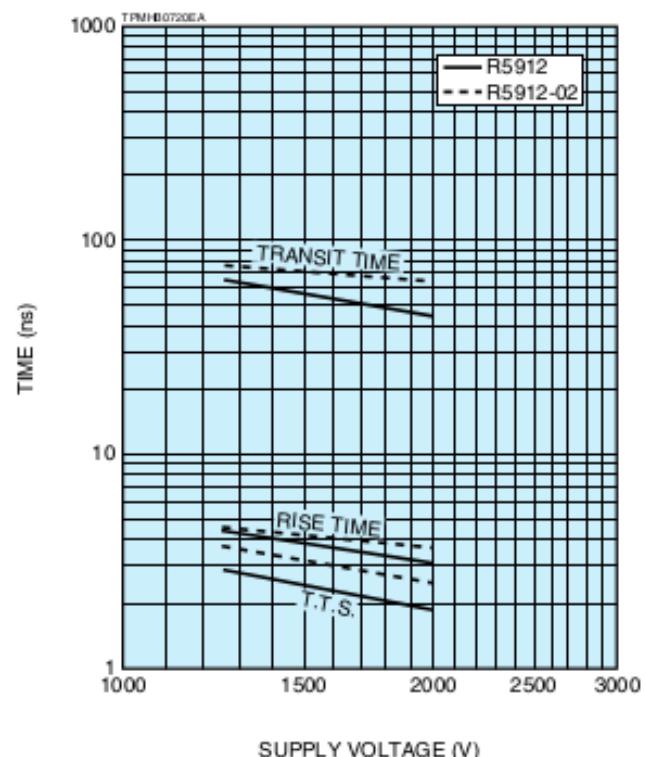
GAIN

- R5912, R5912-02



TYPICAL TIME RESPONSE

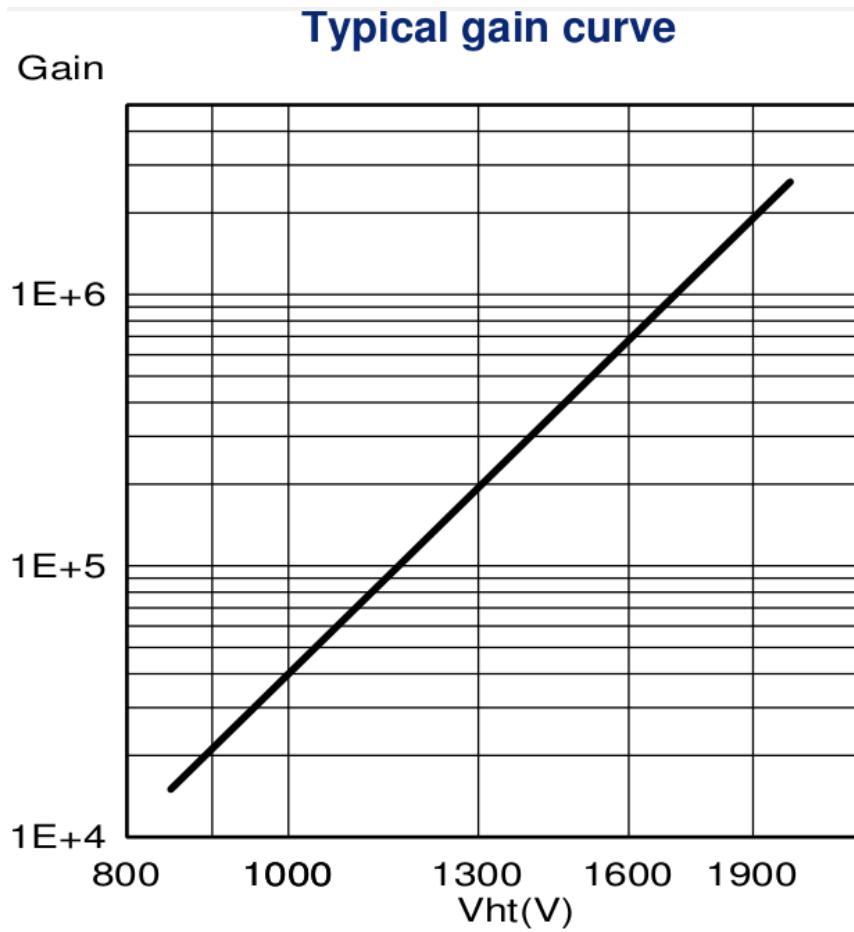
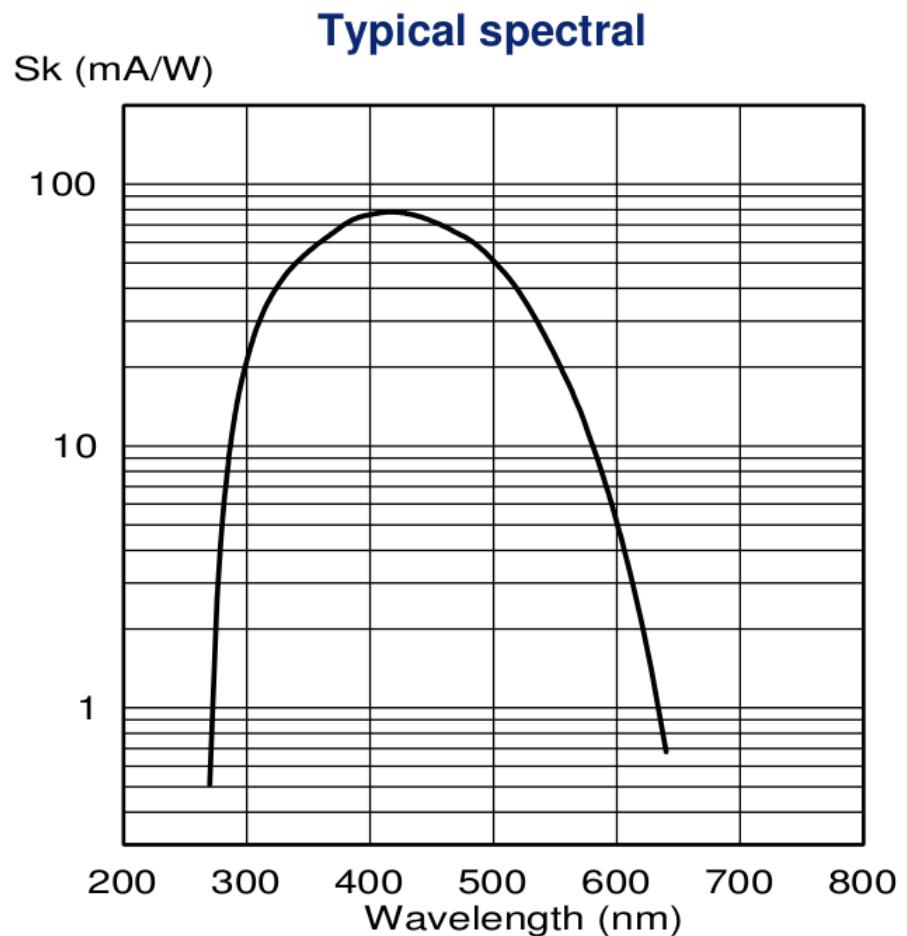
- R5912, R5912-02



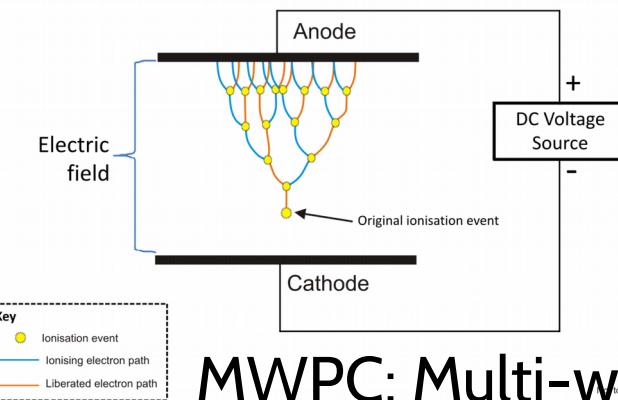
SPECIFICATIONS

Type No.	Diameter (mm) / (inch)	Minimum Effective Area (mm)	Surface Area		Dynode		Weight (g)
			Min. (cm ²)	Typ. (cm ²)	Structure	Number of Stages	
R5912	202 / 8	φ190	330	380	Box & Line	10	approx. 1100
R5912-02	202 / 8	φ190	330	380	Box & Line	14	approx. 1100

Photonis XP-1805, 202 mm diámetro

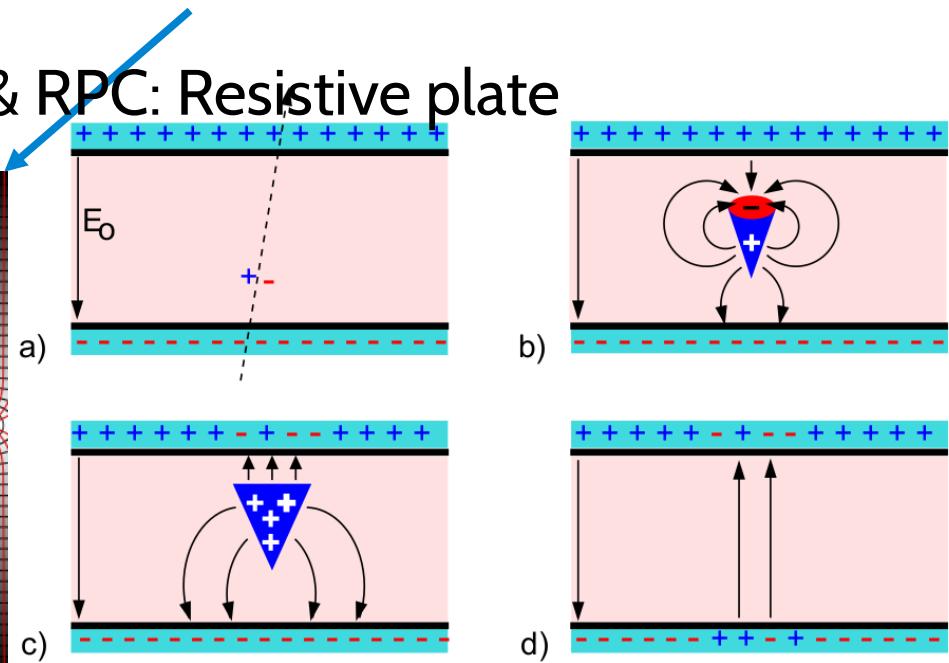
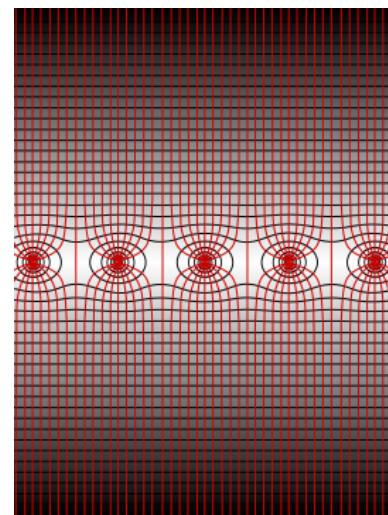
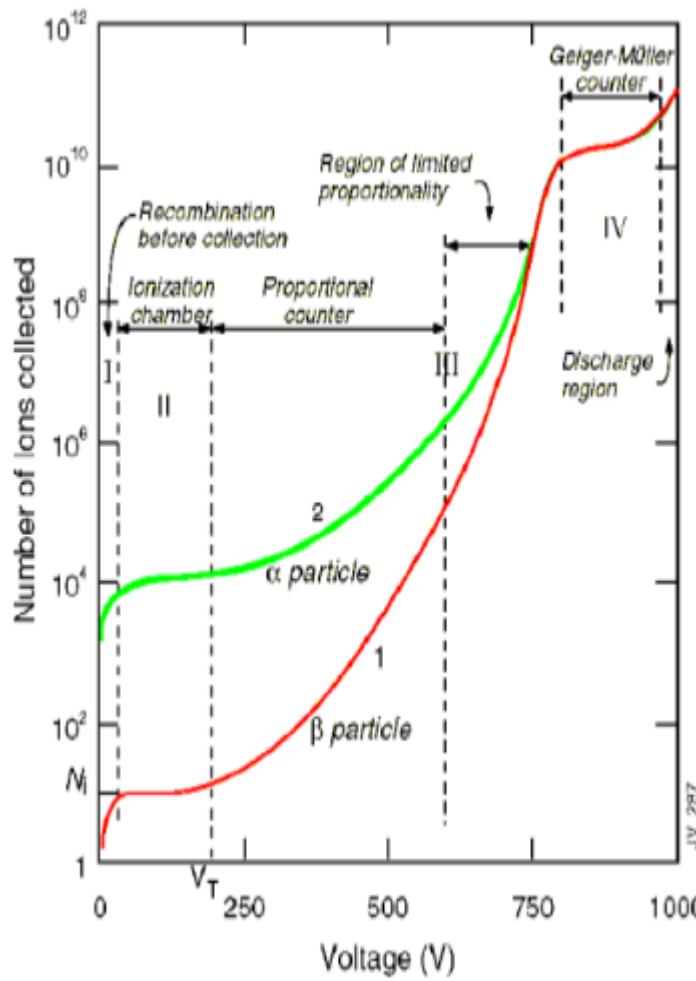


Visualisation of a Townsend Avalanche

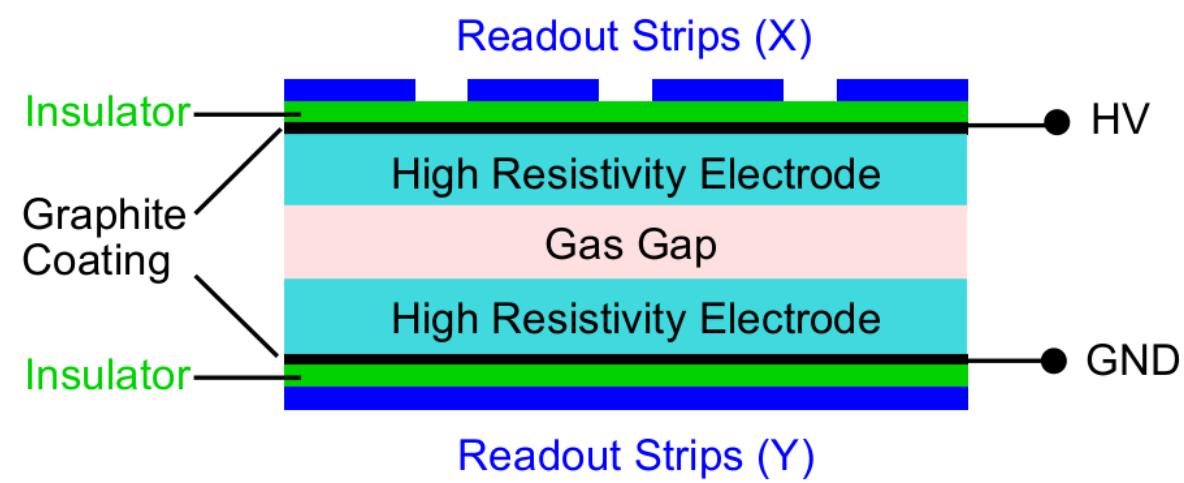


chambers

MWPC: Multi-wire proportional & RPC: Resistive plate



- Bals



Readout Strips (Y)

Centelladores plásticos

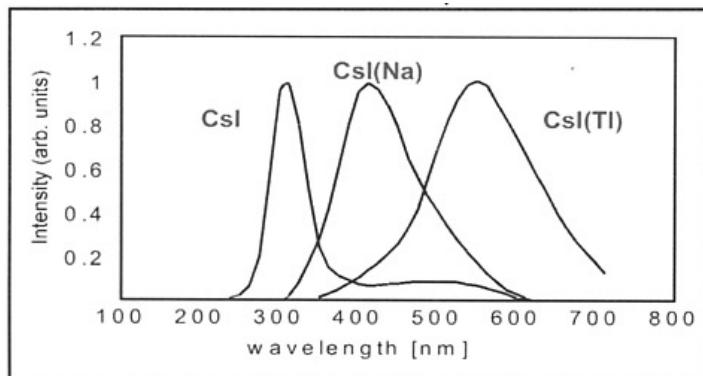
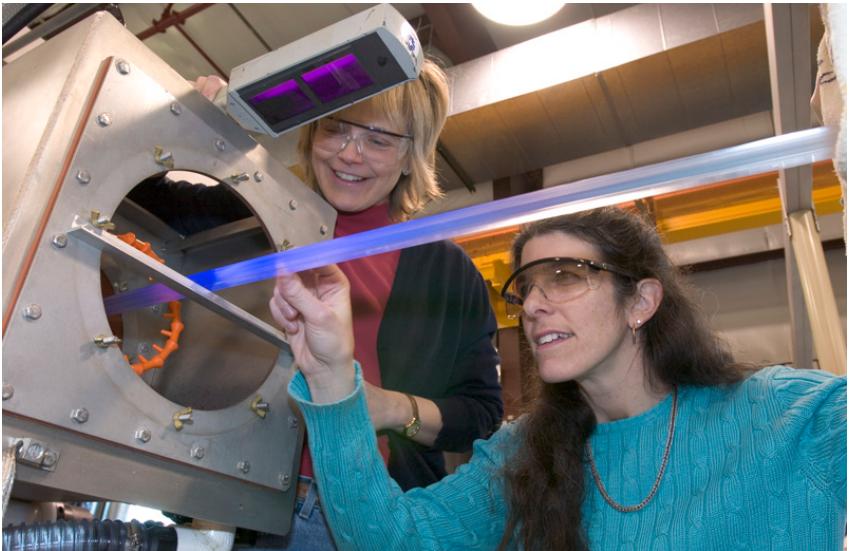
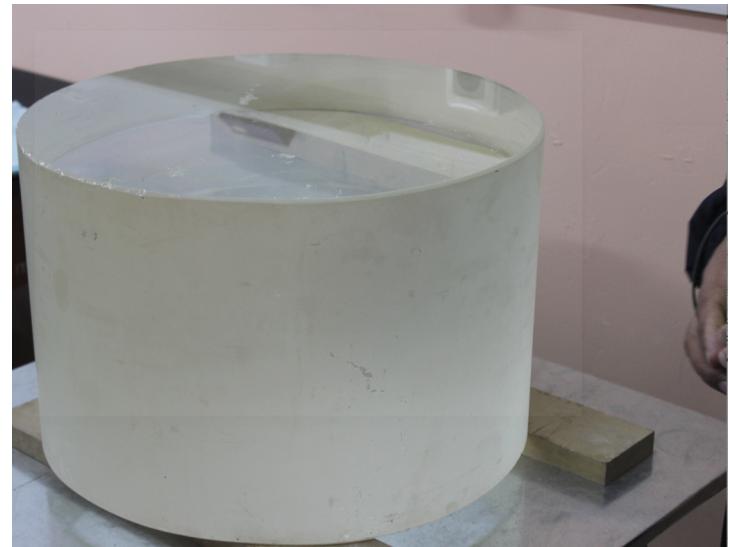
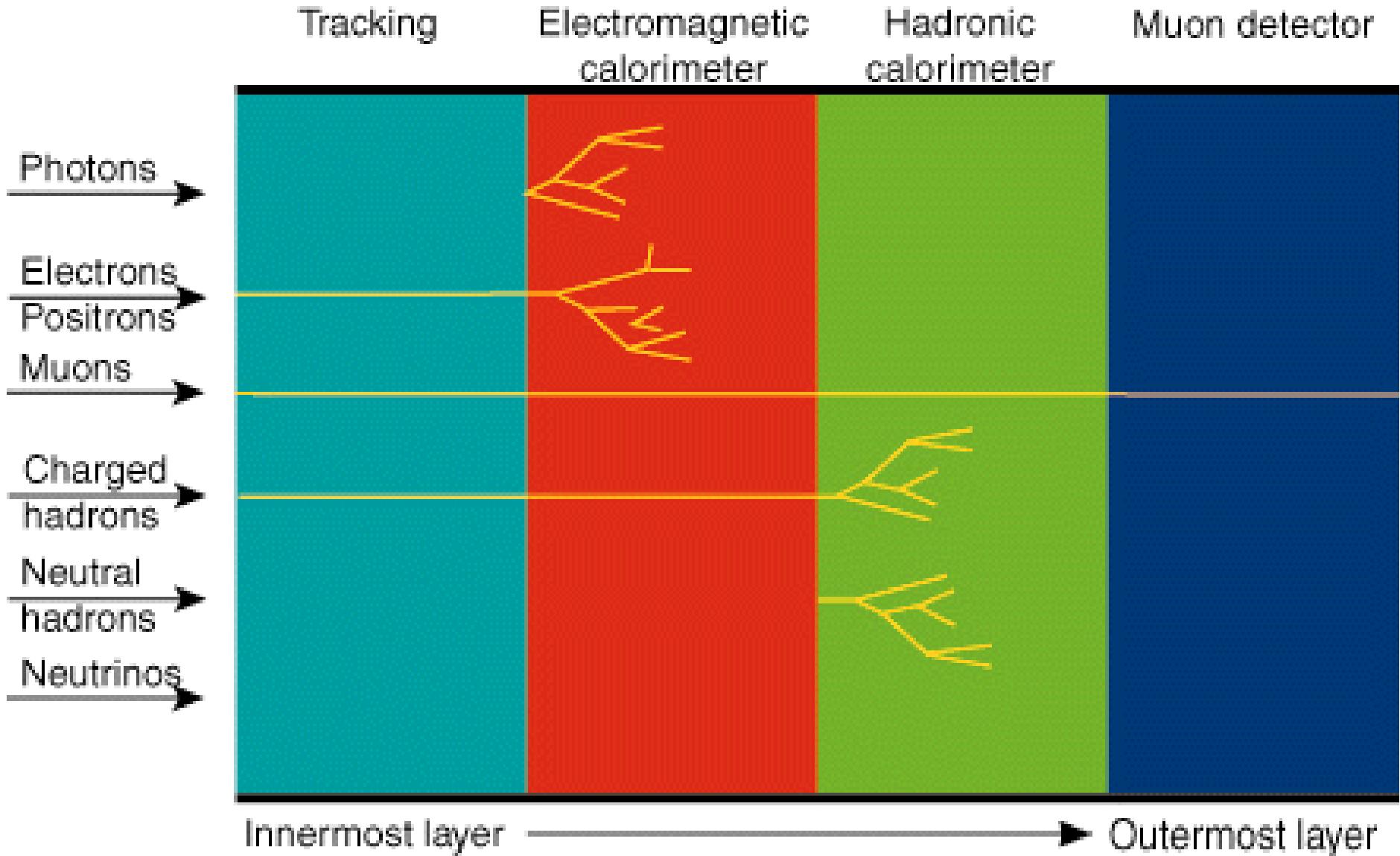


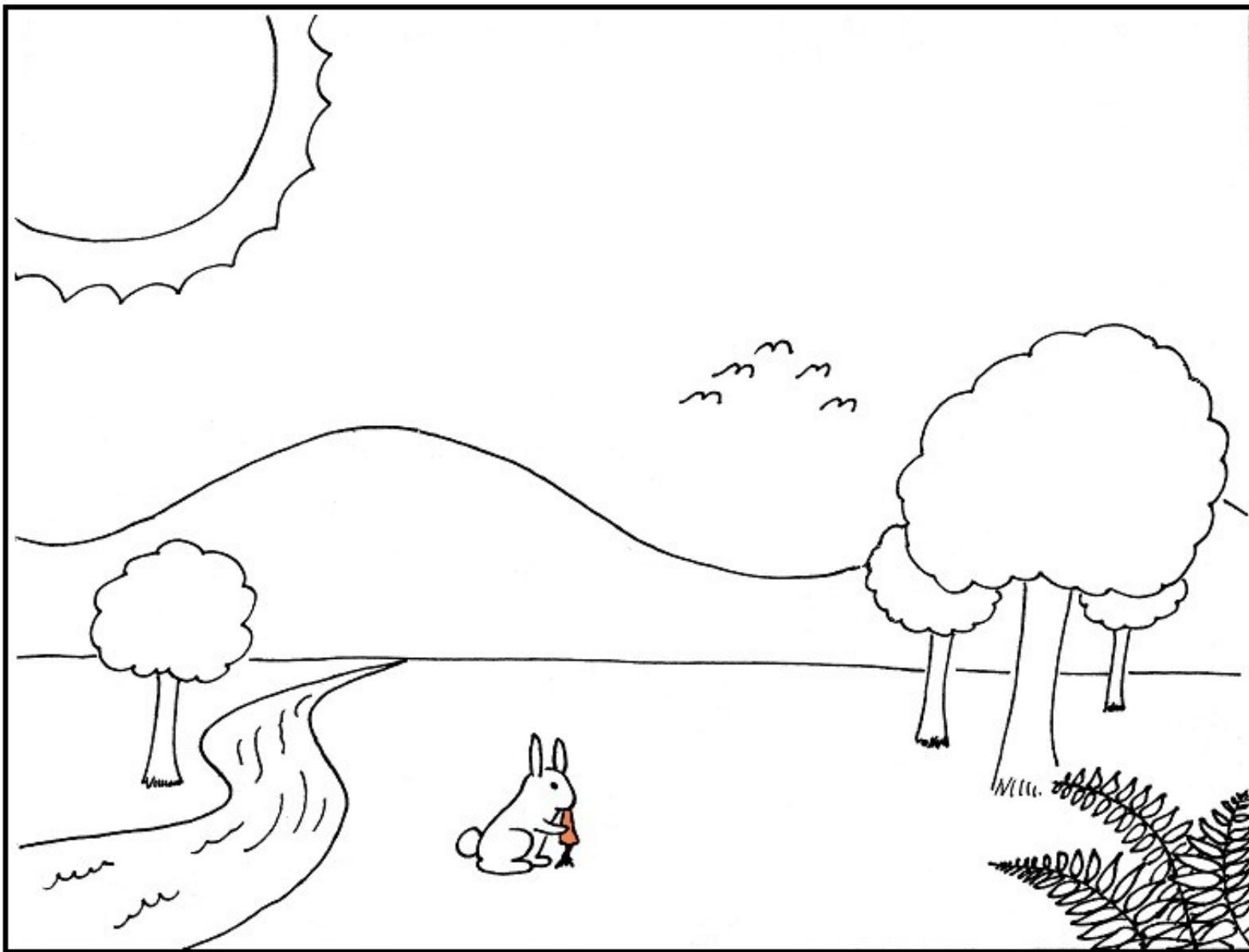
Fig. 3.2 Emission spectra of CsI, CsI(Na) and CsI(Tl) scaled on maximum emission intensity. Also a typical quantum efficiency curve of a bialkali photocathode is shown.



calorímetros



Tratamos de describir la naturaleza



Hacemos lo que podemos

