

# Introducción a la Física Nuclear 2023

Rodolfo M. Id Betan (Rolo)  
[idbetan@ifir-conicet.gov.ar](mailto:idbetan@ifir-conicet.gov.ar)  
Edificio Ifir, Of. 235 (Esmeralda y Ocampo)  
Tel. 4853200 Int. 486

## Nucleosíntesis y Aplicaciones

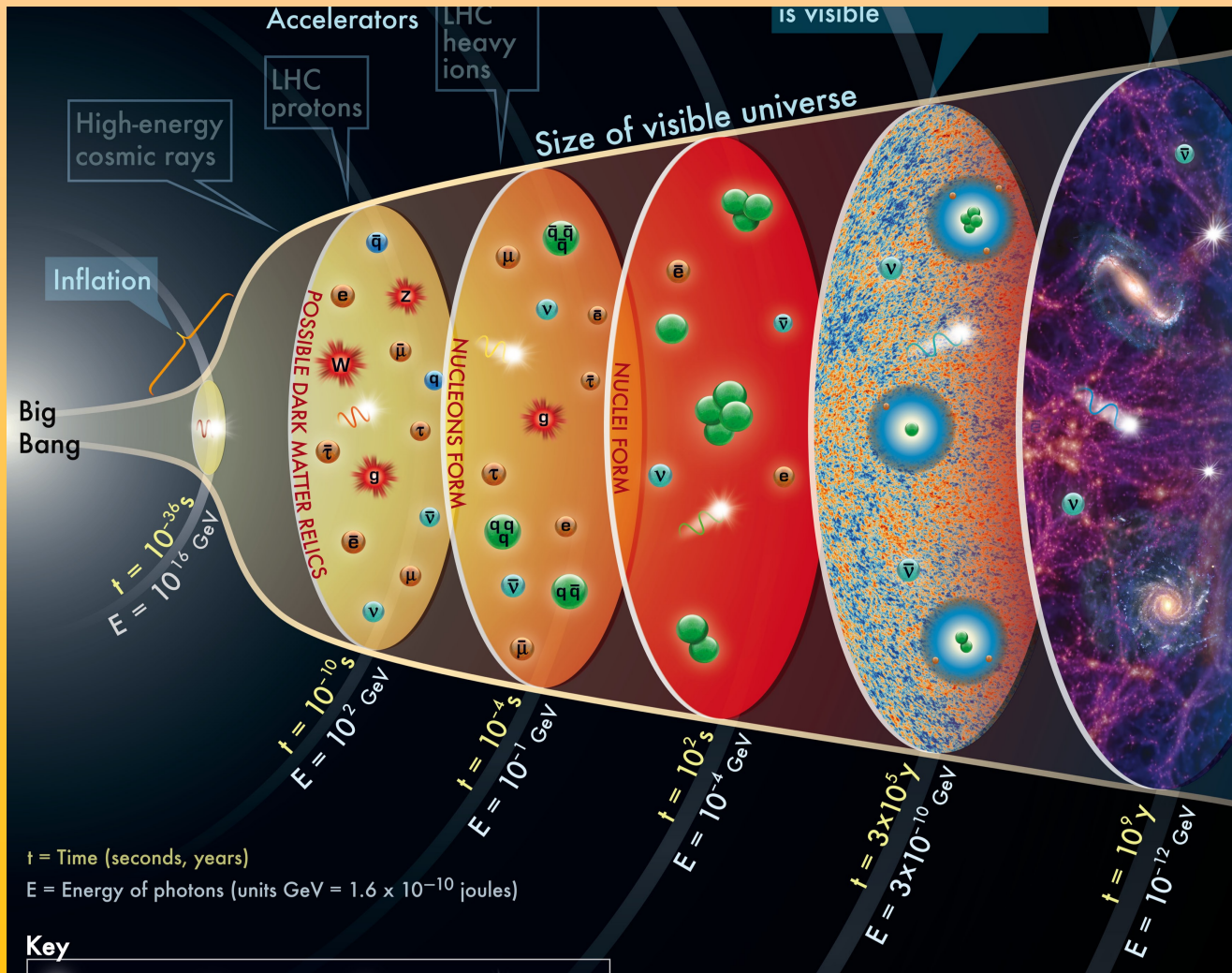
### Contenido:

Nucleosíntesis primordial. Nucleosíntesis en estrellas: cadena p-p, cadena con alfas, reacción triple alfa, ciclo Carbono-Nitrógeno-Oxígeno. Datación por Carbono. Datación de tiempos geológicos.

Medicina nuclear: generalidades en el diagnóstico por imagen y radioterapia, uso del Tecnecio, terapia por captura de neutrón en Boro. Física y funcionamiento del resonador magnético nuclear. Generalidades de reactores de potencia por fisión y fusión.

# Nucleosíntesis primordial

# Relación Tiempo/Energía



Relación  
Temperatura/  
tiempo

$$T_9 \approx \frac{15}{\sqrt{t}}$$

$$[T] = 10^9 \text{ K}$$

$$[t] = \text{s}$$

Relación  
Energía/  
tiempo

$$E \approx \frac{1.3}{\sqrt{t}}$$

$$[E] = \text{MeV}$$

$$[t] = \text{s}$$

$$E > 1 \text{ MeV}$$

$$E < 1 \text{ MeV}$$

$$E < 0.1 \text{ MeV}$$

$E > 1$   
MeV

# Nucleosíntesis para $t < 1$ s: $E > 1$ MeV

Energía MAYOR que la energía para la creación de nucleones

Reacciones  
n-n

Ecuación de Saha

Equilibrio p-n

$E < 1$   
MeV

# Nucleosíntesis $2 \text{ s} < t < 250 \text{ s}$ $E < 1 \text{ MeV}$

Energía MENOR que la  
energía  
para la creación de  
nucleones

Ecuación de Saha

Equilibrio p-n

$E < 1$   
MeV

# Nucleosíntesis $2 \text{ s} < t < 250 \text{ s}$ $E < 1 \text{ MeV}$

No se forman  
diprotones

No se forman  
dineutrones

Sí se forman  
deuterones

Reacciones  
primordiales



Reacciones  
secundarias



$E < 0.1$   
MeV

**Nucleosíntesis  $t > 250$  s**  
 **$E < 0.1$  MeV**

**Decaimiento del neutrón**

$T(n) \rightarrow 10.3min$

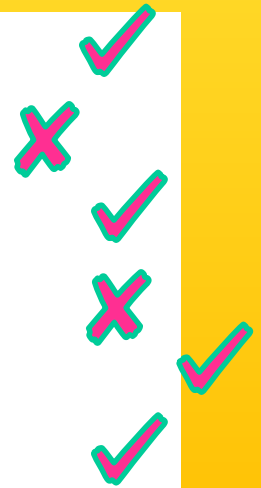
**Decaimiento del tritón**

$T(t) \rightarrow 12.2años$

**Decaimiento del Berilio**

$T(^7Be) \rightarrow 53d$

**Sobrevivientes**



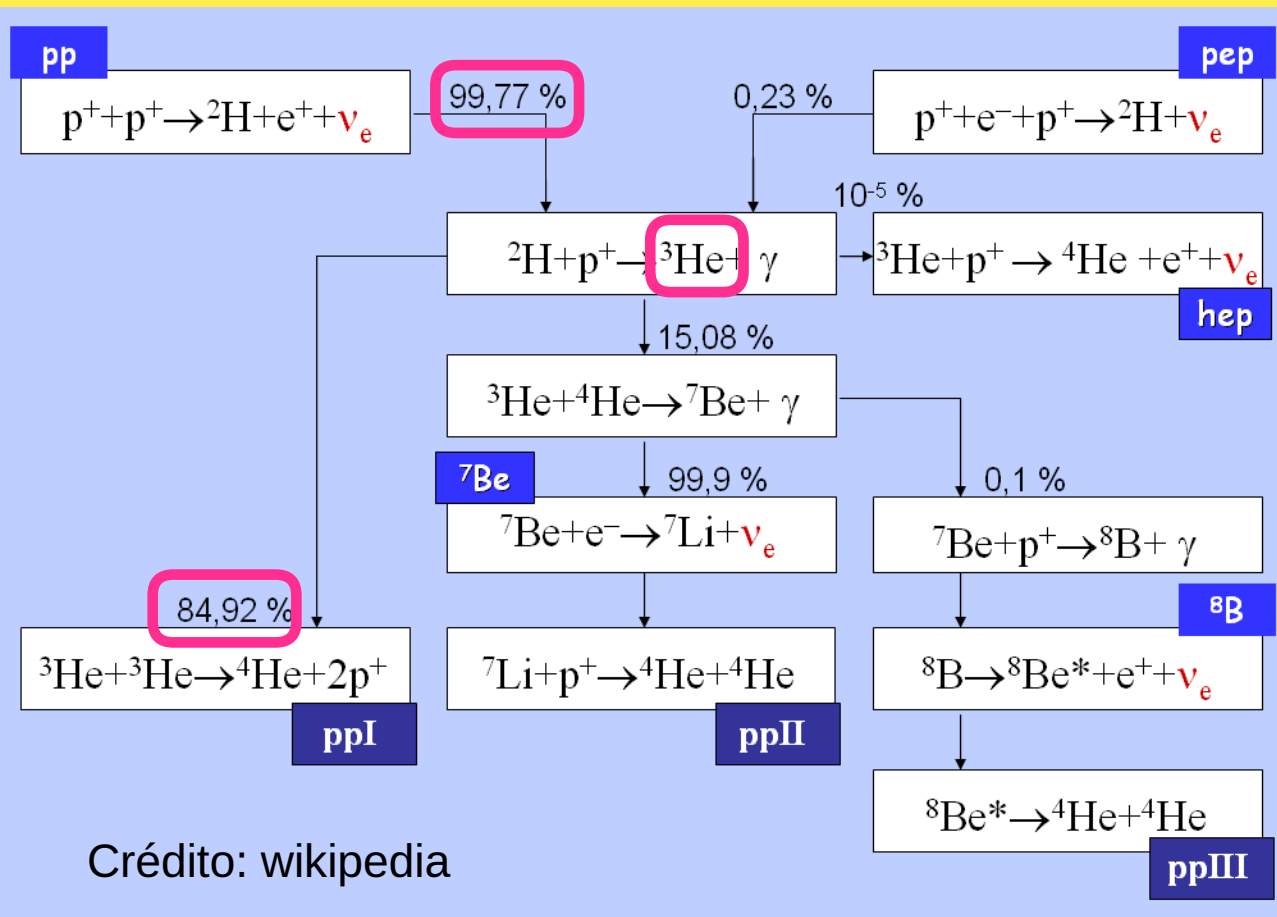
# Abundancias de la nucleosíntesis primordial: p, He, Li



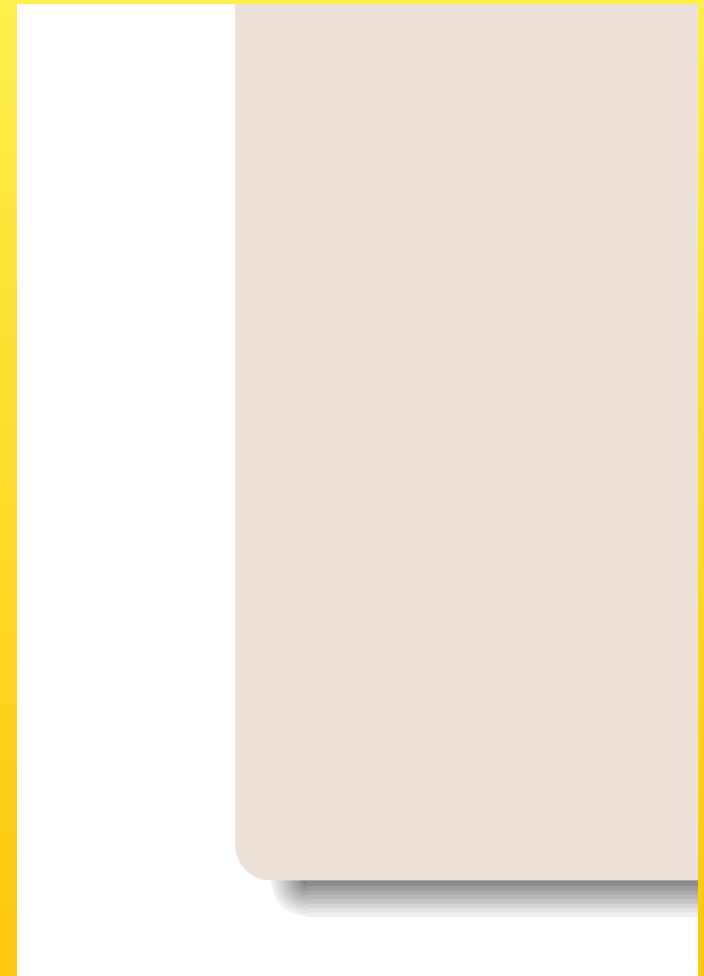


# Nucleosíntesis en estrellas

# Reacciones p-p para producir He



Crédito: wikipedia



Crédito: wikipedia

# Reacciones con alfas

rocas de la Luna.

rocas de la Luna.

# Reacciones con alfas: escala de tiempos

## Ejemplo en supernova

H: 7 millones de años

He: 0.5 millones de años

C: 600 años

Ne: 1 año

O: 6 meses

Si: 1 day

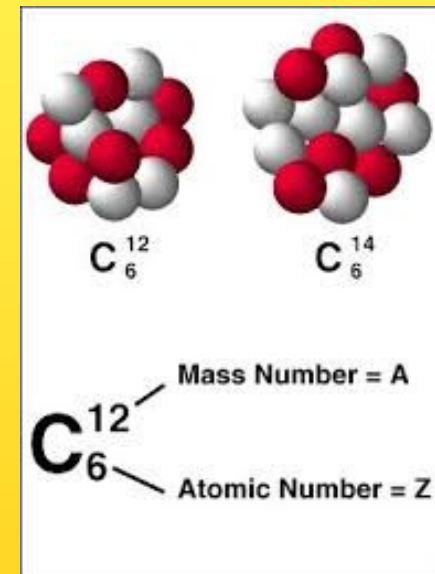
La utilización de  
permite datar, es  
durante su existe  
Para ello necesita  
conteo de los núcl  
el famoso element  
rocas de la Luna.

Crédito: [pendientedemigracion.ucm.es](http://pendientedemigracion.ucm.es)

# Reacciones con alfas: Ppio. Antrópico

## Houston, we've got a problem:

La utilización de  $^{14}\text{C}$  permite datar, es decir, determinar la edad de las rocas durante su existencia. Para ello necesita el conteo de los núcleos de  $^{14}\text{C}$ , el famoso elemento radiactivo de las rocas de la Luna.



## Ppio. Antrópico:

En cosmología el principio antrópico establece que cualquier teoría válida sobre el universo tiene que ser consistente con la existencia del ser humano.

(Fuente: Wikipedia)

# Reacción triple alfa: Resonancia



$$T_{1/2}({}^8_4\text{Be}) \sim 10^{-17} \text{ s}$$

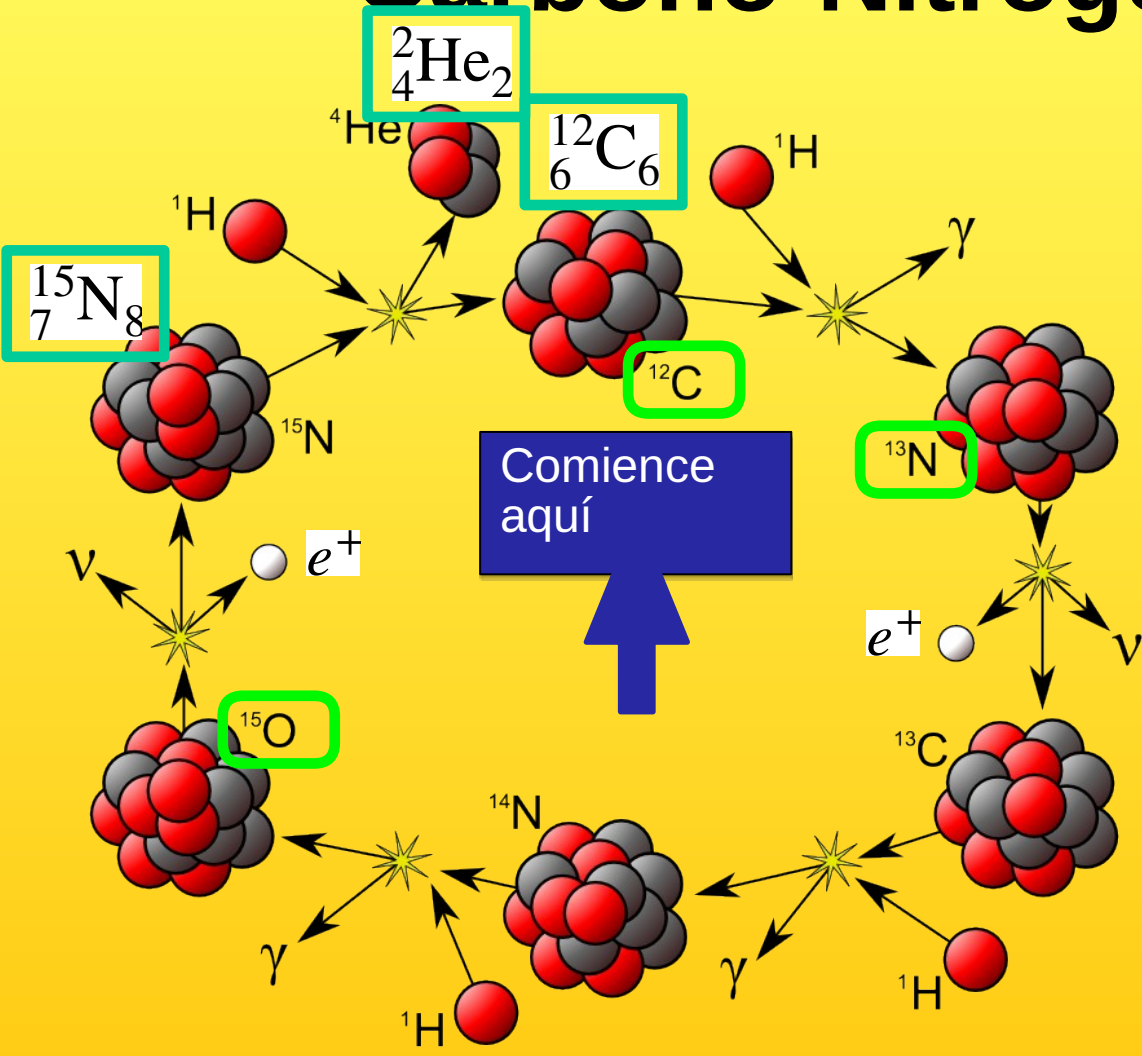
Estado de Hoyle

Para ello necesitamos el  
conteo de los núcleos  
el famoso elemento raro  
rocas de la Luna.

Resonancia

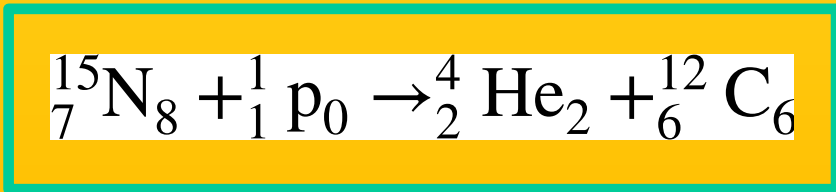
Uno de cada 2500 decae a carbono estable,  
los otros se desintegran en el proceso inverso en tres alfas

# Ciclo CNO: Carbono-Nitrógeno-Oxígeno



	Proton	$\gamma$	Gamma Ray
	Neutron	$\nu$	Neutrino
	Positron		

El juego de la oca



# Datación por Carbono



# Datación Materia orgánica

## Composición

Componente	Símbolo Químico	Concentración aproximada
Nitrógeno	N	78.03%
Oxígeno	O	20.99%
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	0.03%
Argón	Ar	0.94%
Neón	Ne	0.00123%
Helio	He	0.0004%
Criptón	Kr	0.00005%
Xenón	Xe	0.000006%
Hidrógeno	H	0.01%
Metano	CH <sub>4</sub>	0.0002%
Oxido Nitroso	N <sub>2</sub> O	0.00005%
Vapor de Agua	H <sub>2</sub> O	Variable
Ozono	O <sub>3</sub>	Variable
Partículas		Variable

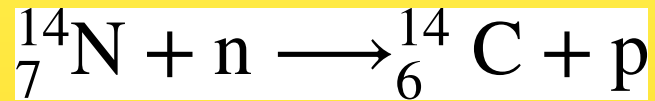
## Concentraciones Carbono

	Isotope		Decay	
	abundance	half-life ( $t_{1/2}$ )	mode	product
<sup>11</sup> C	syn	20 min	$\beta^+$	<sup>11</sup> B
<sup>12</sup> C	98.9%	stable		
<sup>13</sup> C	1.1%	stable		
<sup>14</sup> C	1 ppt	5730 y	$\beta^-$	<sup>14</sup> N

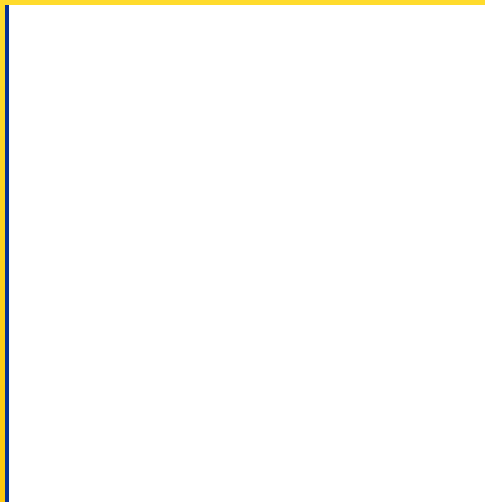
$$1 \text{ ppt} = 10^{-12}$$

# Datación por Carbono: Condiciones durante la vida

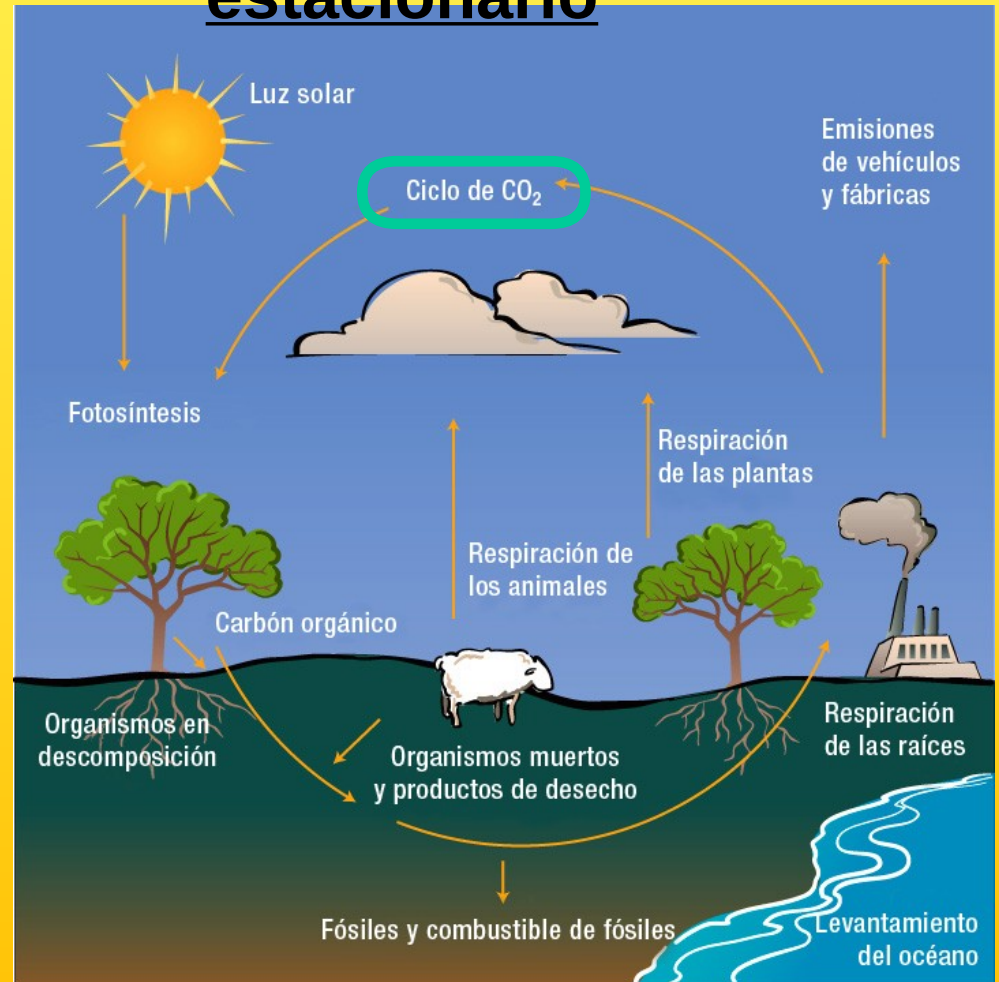
## Reacción de producción



charge exchange  
reaction  
 $Q = -5.927 \text{ MeV} < 0$



## Régimen estacionario



# Decaimiento radiactivo y definiciones(repaso)

## Conjetura de población

$$\frac{dN}{dt} \propto N$$

## Constante de decaimiento

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

## Ley de decaimiento

$$N(t) = N(t_0) e^{-\lambda(t-t_0)}$$

## Vida media

$$N(T_{1/2}) = \frac{N(t_0)}{2}$$

## Vida promedio

$$N(\tau) = \frac{N(t_0)}{e} \quad \tau = \frac{1}{\lambda}$$

## Relación vidas

$$T_{1/2} = \tau \ln 2 = 0.69315 \tau$$

# Datación por Carbono

## Ley de decaimiento

$$N(t) = N(t_0) e^{-\lambda(t-t_0)}$$

$t_0$  es la incógnita

Medido

Conocido por Fuentes de la Fecha

## Método

$$\{N(t_{hoy}), N(t_{pasado}), t_{hoy}, \lambda\} \Rightarrow$$

$$\tau_{14C} = \frac{1}{\lambda}$$

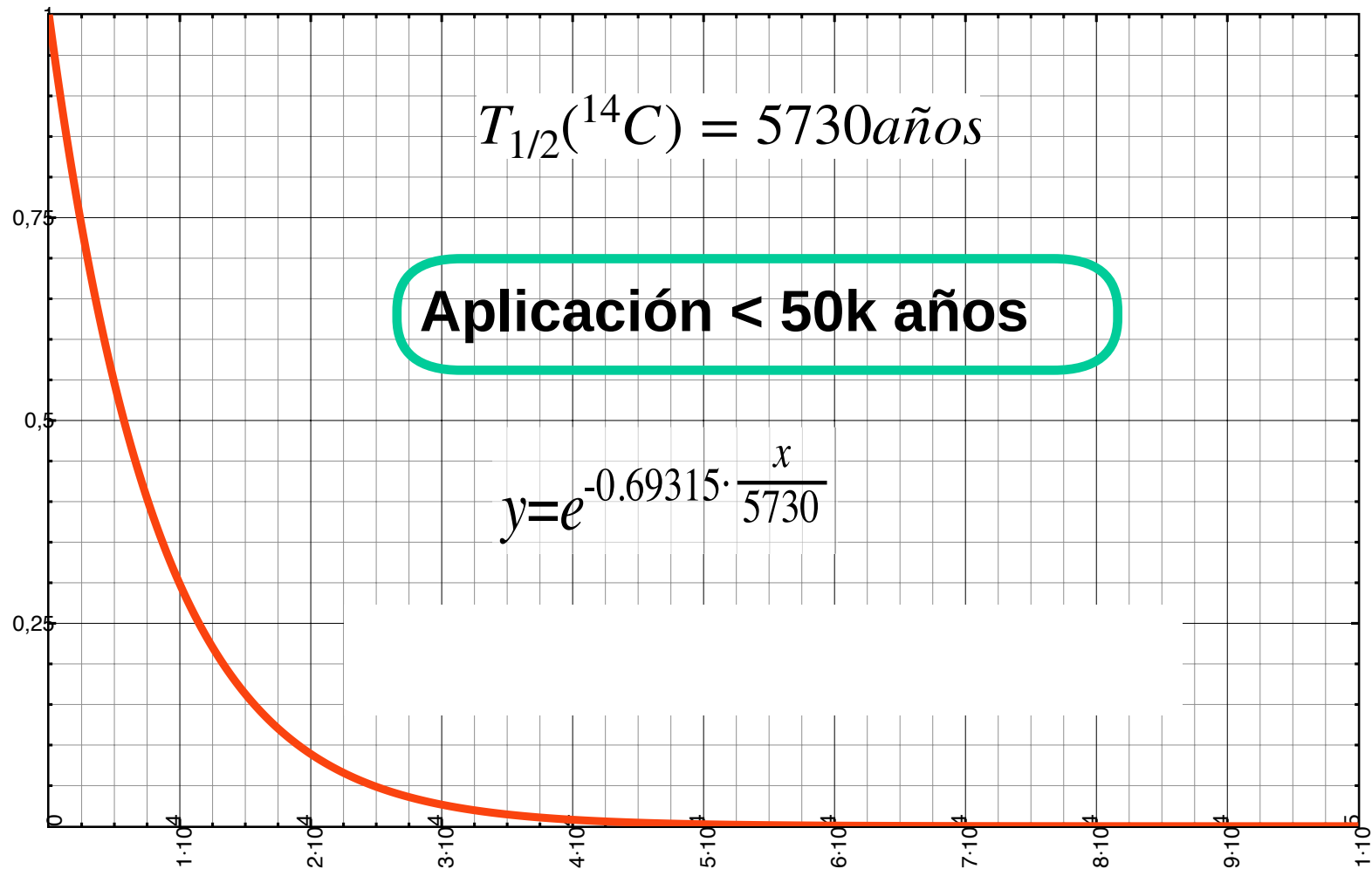
Espectrómetro de masas

Registros

$$N(t_{hoy}) = N(t_{pasado}) e^{-\lambda(t_{hoy}-t_{pasado})}$$

$$\Rightarrow t_{pasado}$$

# Datación por Carbono: Límite de aplicabilidad



# Microscopía de masas

Fotografía de la Sábana Santa en dos versiones: a la izquierda, en positivo; y a la derecha, en negativo.

La espectrometría de masa permite detectar razones isotópicas entre el isótopo radioactivo y el estable del orden de  $10^{-12}$

Sudario de Turín

436 cm x  
113 cm.

Isotope		Decay		
	abundance	half-life ( $t_{1/2}$ )	mode	product
$^{11}\text{C}$	syn	20 min	$\beta^+$	$^{11}\text{B}$
$^{12}\text{C}$	98.9%	stable		
$^{13}\text{C}$	1.1%	stable		
$^{14}\text{C}$	1 ppt	5730 y	$\beta^-$	$^{14}\text{N}$

$$1\text{ppt} = 10^{-12}$$

Crédito:  
wikipedia

# Datación por Carbono: Microscopía de masas

1950-  
650=1300

1950-  
950=1000

**1260-1390**  
**confidencia:**  
**95%**

Relativo a 1950

Sudario de Turín

436 cm × 113 cm.

Crédito: wikipedia

P. E. Damon, D. J. Donahue, B. H. Gore,  
et al. Nature 337, 611, 1989

# Radiometría: Datación por Estroncio



# Datación de tiempos geológicos: Método

## Limitaciones de la ley exponencial

$$N(t) = N(t_0) e^{-\lambda(t-t_0)}$$



## Método alternativo

Objetivo



Tiempo presente

Dos incógnitas!!!

Modo de sortear el problema

Producto de decaimiento con [OBJ]

# Datación de tiempos geológicos: Método

## Método alternativo

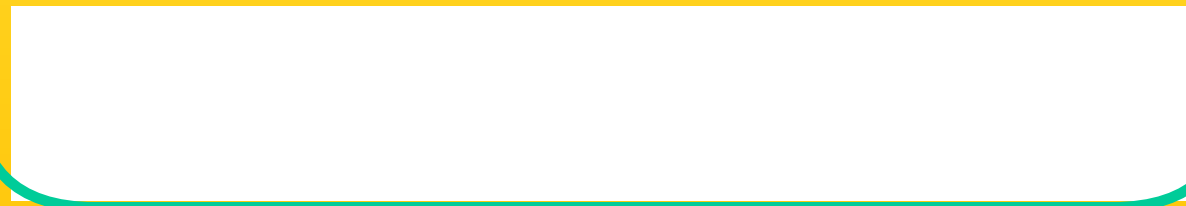


Desconocidos

Objetivo

$$\Delta t = t_0 - t_1$$

Ecuación



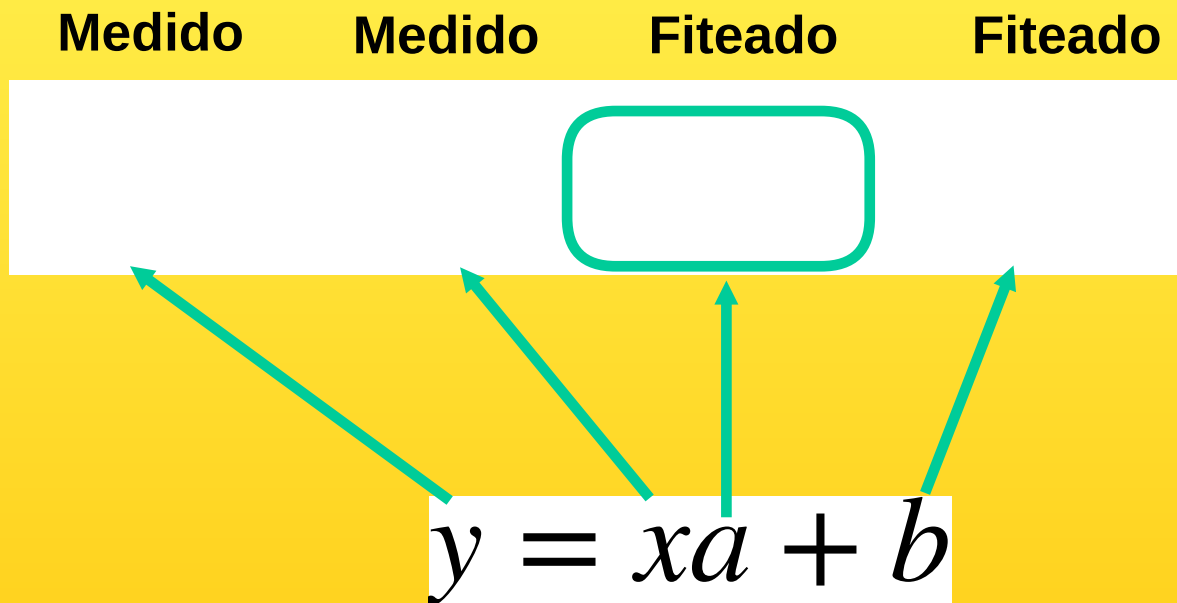
Reducible

Medido

$$y = xa + b$$

Desconocidos

# Datación de tiempos geológicos: Aplicación



# Datación de tiempos geológicos: Aplicación

Conocido

Medido

Medido

Fiteado

Fiteado

$$y = xa + b$$

**Muestra:**

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

*Padre* :  $^{87}\text{Rb} \rightarrow T_{1/2} = 4.8 \times 10^{10} \text{a}$  Cuarenta y ocho mil millones de año

*Hijo D* :  $^{87}\text{Sr}$

*Hijo D'* :  $^{86}\text{Sr}$  (estable)  $\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}} = 0.7003$

# Datación de tiempos geológicos: Aplicación

Conocido

Medido

Medido

Fiteado

Fiteado

Muestras de meteoritos

$$\Delta t = 4.53 \times 10^9 a$$

$$y = xa + b$$

**Muestra:**

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

*Padre* :  $^{87}\text{Rb} \rightarrow T_{1/2} = 4.8 \times 10^{10} a$

*Hijo D* :  $^{87}\text{Sr}$

*Hijo D'* :  $^{86}\text{Sr}$  (estable)

$$\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}} = 0.7003$$

**Para referencia:**

edad Tierra 4.543 miles de millones de años

# Medicina nuclear

## - Generalidades:

Diagnóstico por imagen  
Radioterapia

- Uso de radiaciones gamma

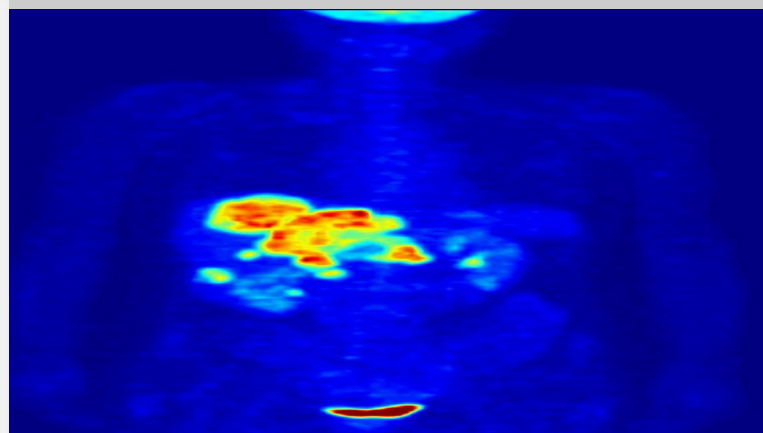
- Terapia por captura de neutrones en Boro

# Generalidades: Diagnóstico por imagen

Se inyecta en el organismo núcleos radioactivos con agua, oxígeno o azúcar (radiofármacos) y se los monitorea.

La imagen obtenida da información si algún organismo está dañado o funciona incorrectamente.

Crédito: [wikipedia.org](http://wikipedia.org)



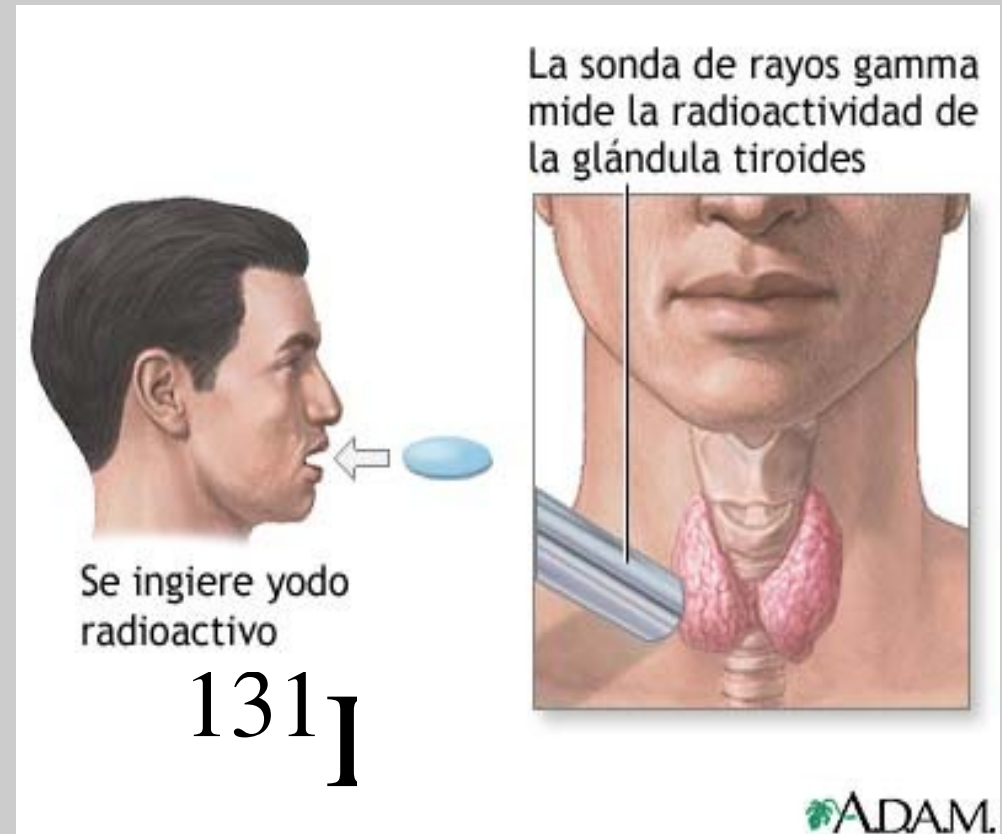
Tomografía con positrones  
(PET)

Imágenes por  
gamma

Resonancia magnética nuclear

# Generalidades: Radioterapia

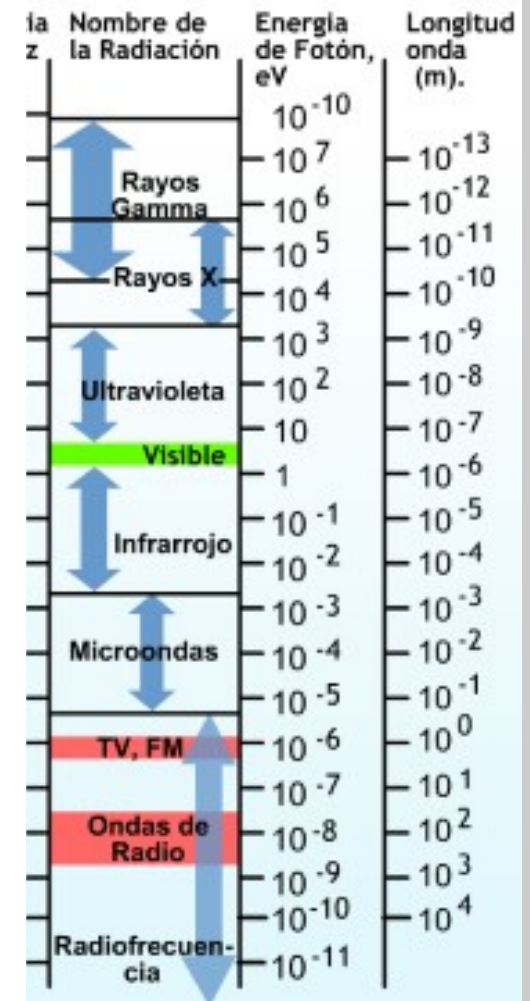
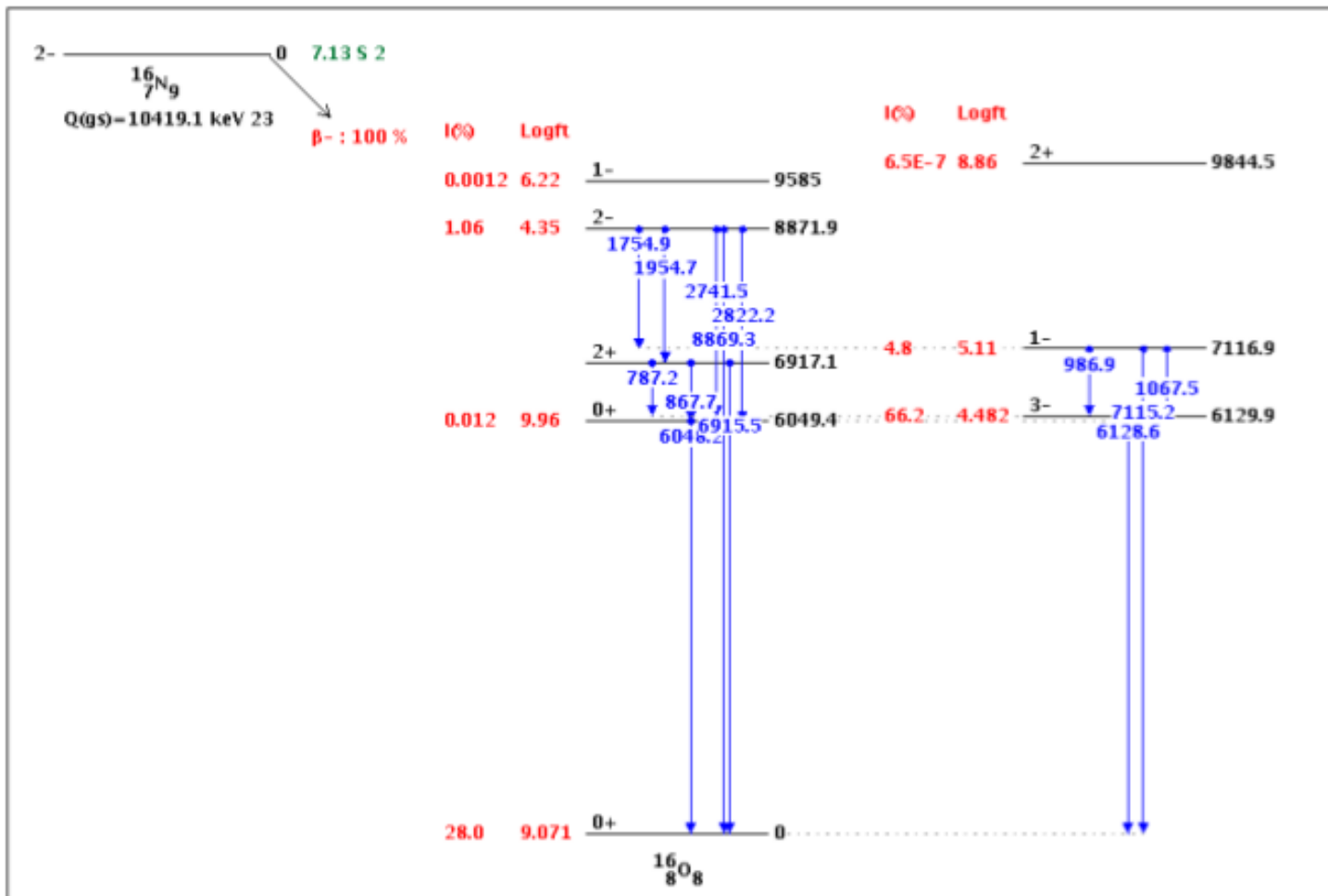
- Consiste en el uso de radiación para destruir las células cancerígenas.
- Se administra un radiofármaco que es absorbido selectivamente por el tejido a destruir.
- El radioisótopo, al decaer, deposita su energía, mayormente, en la vecindad del tejido a destruir.





# Uso de rayos gamma en radioterapia

# Tiempos característicos de estados excitados



Tiempo de transición de estados excitados

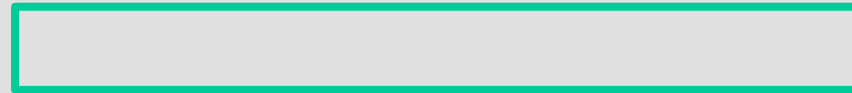
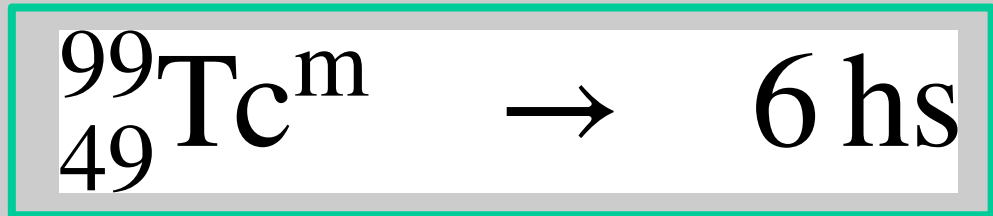
$10^{-12}$  s

# Isómeros

## Ejemplo: Tecnecio

Estados excitados  
metaestables

$> 10^{-9}$



# Aplicación: Diagnóstico por gammas

${}_{49}^{99}\text{Tc}^m \rightarrow 6 \text{ hs}$



El 80% de los diagnósticos por imagen usan Tecnecio (detección de gammas de 140 keV)

Existen alrededor de 31 radiofármacos que usan Tecnecio

Estudio del cerebro, miocardio, glándula tiroidea, pulmones, hígado, vesícula biliar, riñones, esqueleto, sangre, tumores.

Crédito: Raziell~commons/wiki

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=616971>

# FISICA MEDICA

La **SPECT** o tomografía computarizada de emisión monofotónica (en inglés single photon emission computed tomography) es una técnica médica de tomografía que utiliza rayos gamma.



Tomografía: Se busca reconstruir un corte transversal de un objeto a través de las proyecciones del mismo

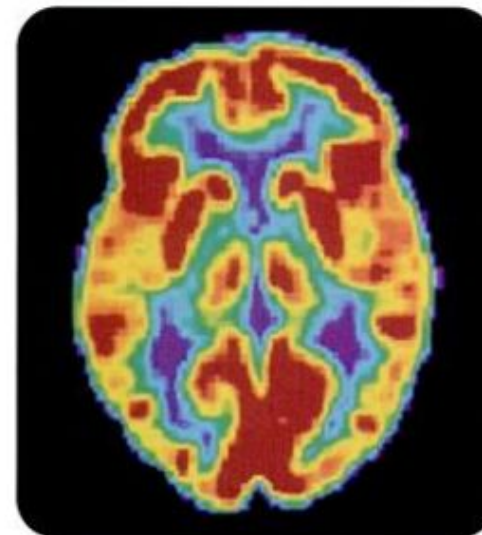
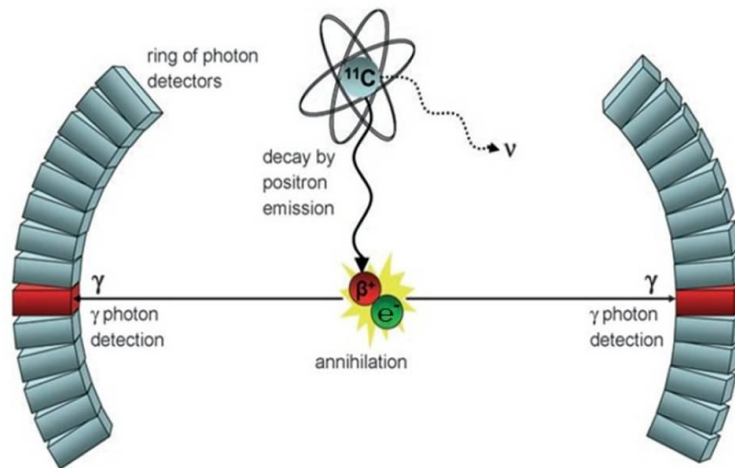
SPECT machine performing a total body bone scan. The patient lies on a table that slides through the machine, while a pair of gamma cameras rotate around her.

Wikipedia

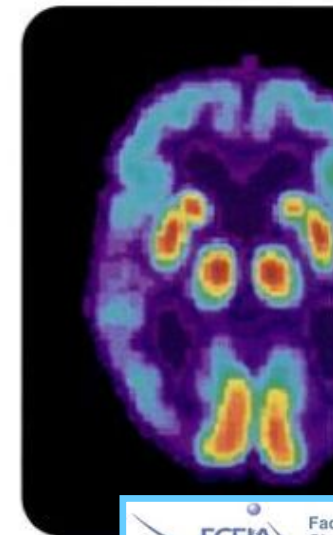
# FISICA MEDICA

## PET

- La tomografía de emisión de Positrones permite el análisis funcional a través de imágenes que representan la "actividad" de un compuesto marcado con un radiofármaco



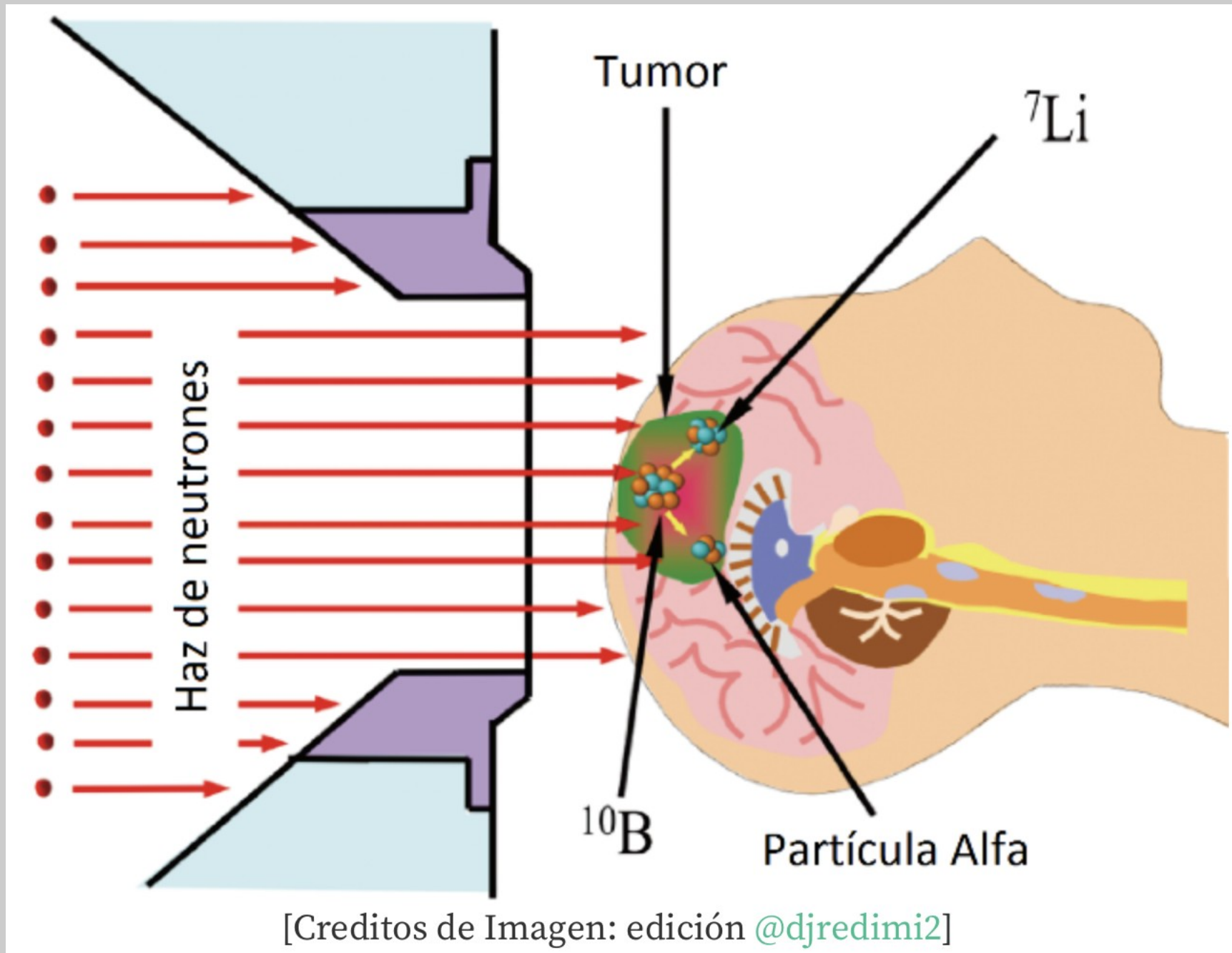
PET Scan of Normal Brain



PET Sc

# Terapia por captura de neutrones en Boro

# Terapia con Boro





# Captura neutrónica en Boro

- Inmunoterapias
- Otros Inhibidores
- Conjugados
- Misceláneos
- Radiaciones
- Nanotecnología
- Experimentación
- Alternativos
- Sin clasificar

0.4 eV

**Cánceres más visitados**

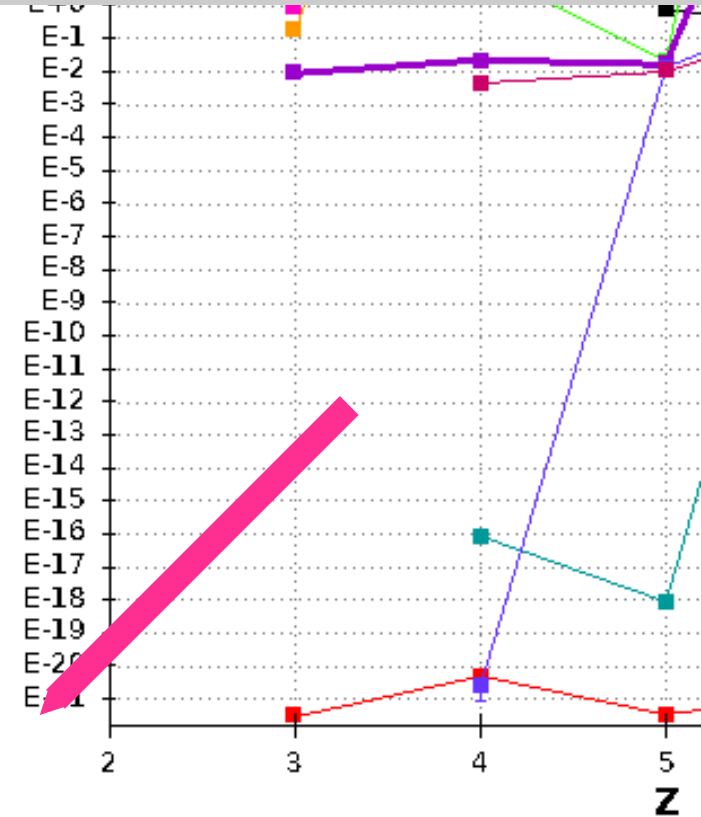
Significa

Después

10B n  $\bar{\nu}$

En un 9  
4He (pa  
diámetro  
ocurre p  
bajas co

Half-life (s)



Credito

<http://canceres.info/?farmaco=captura-neutronica-boro-bnct>

# Captura neutrónica en Boro

- Inmunoterapias
- Otros Inhibidores
- Conjugados
- Misceláneos
- Radiaciones
- Nanotecnología
- Experimentación
- Alternativos
- Sin clasificar

0.4 eV

Cánceres más visitados

significa

Después

10B n  $\bar{\nu}$

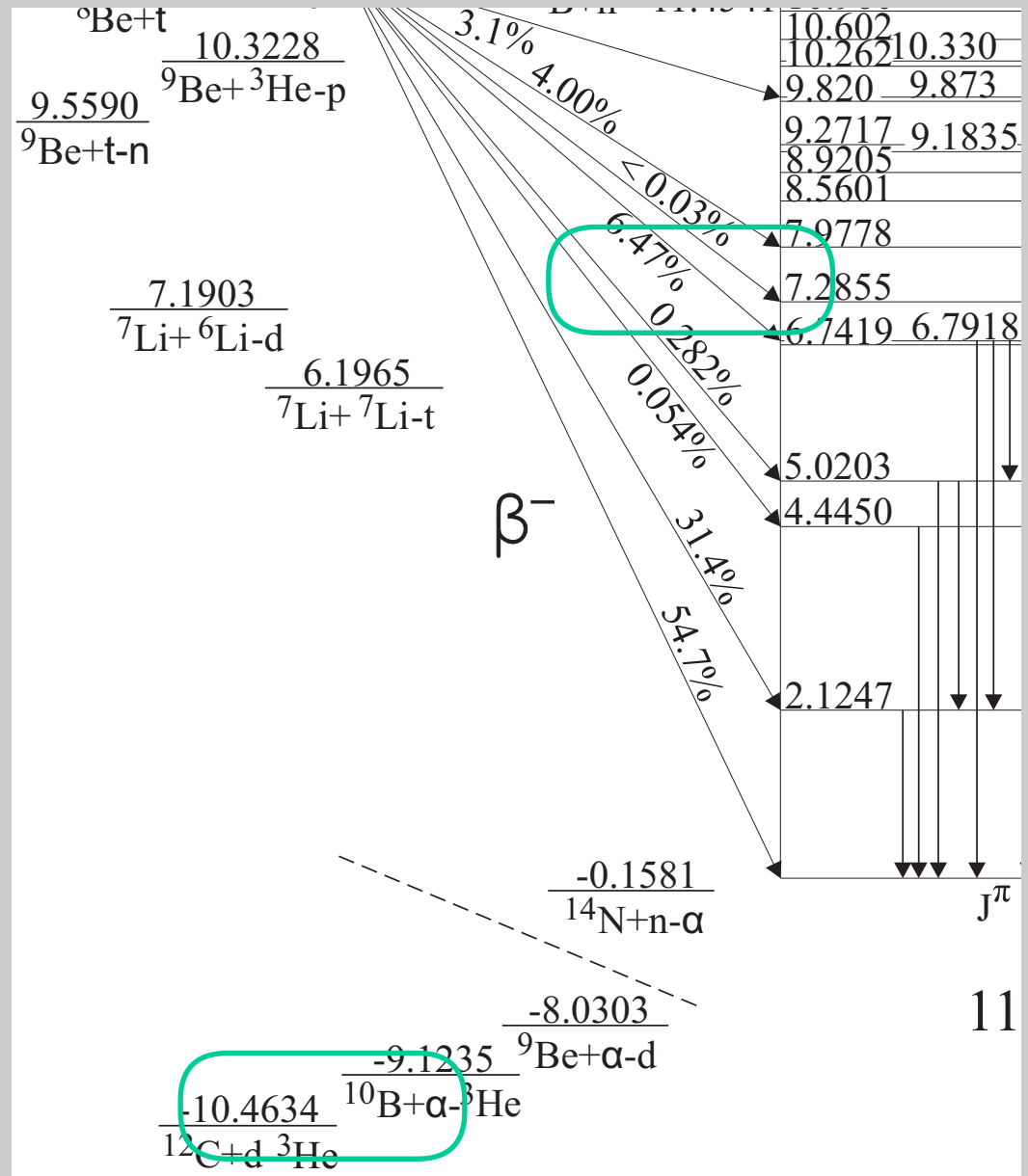
En un 9

4He (pa

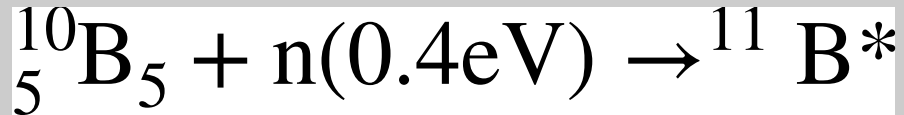
diámetr

ocurre p

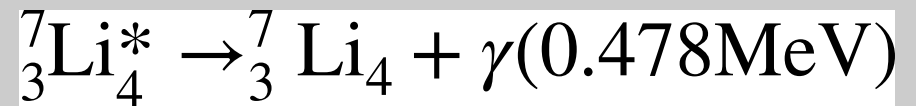
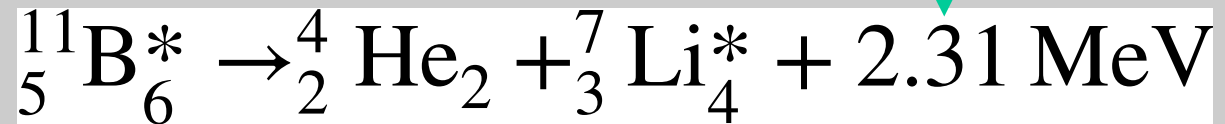
bajas co



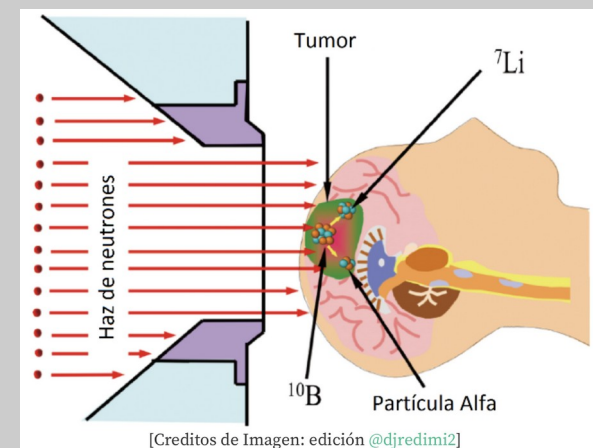
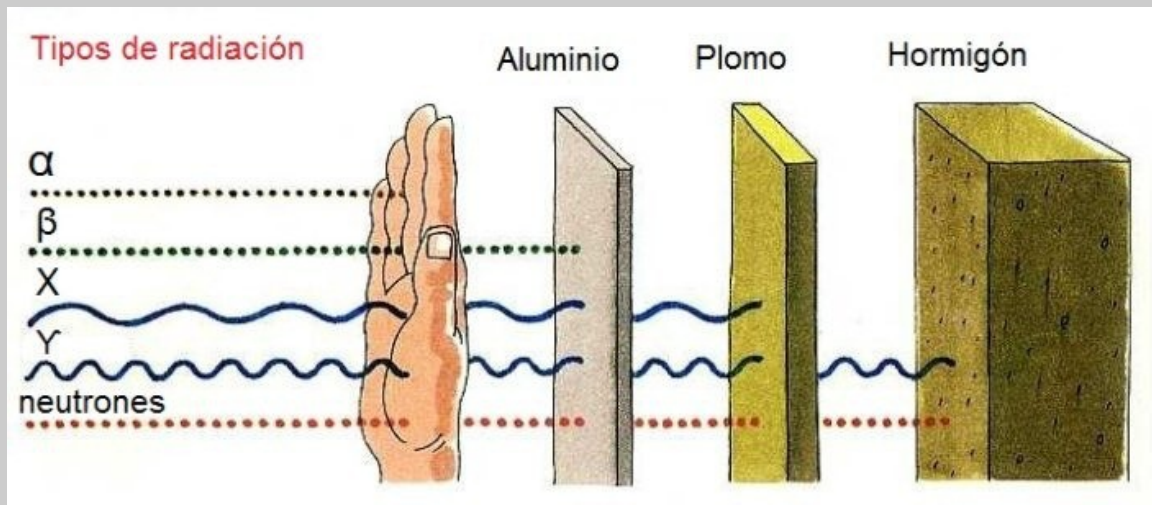
# Captura neutrónica en Boro



$$1.47 \text{ MeV}(\alpha) + 0.840 \text{ MeV}(\text{Li})$$



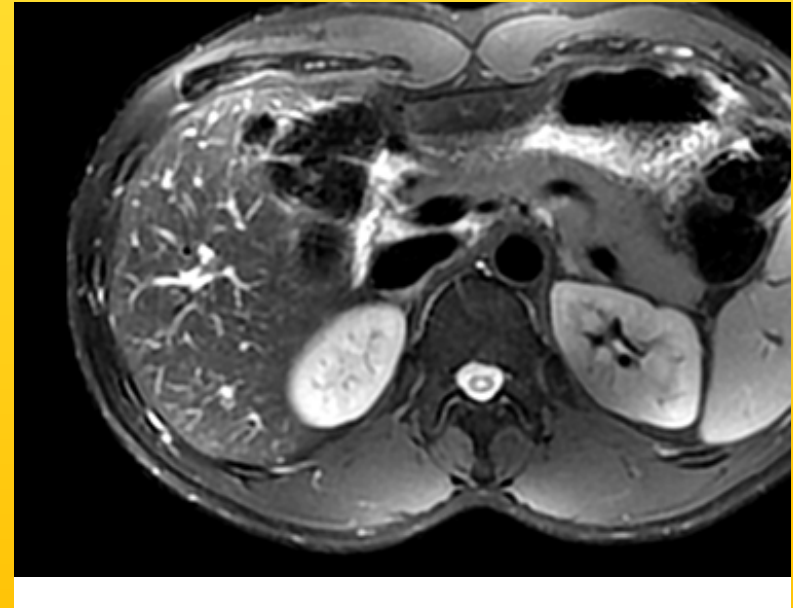
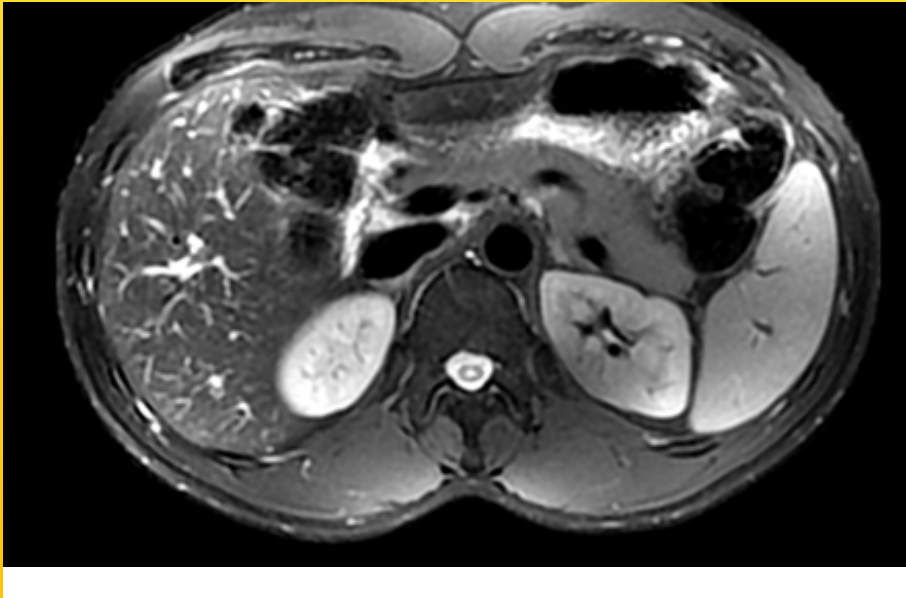
Un alfa de 3MeV  
recorre en aire 2.8 cm



# Imagen por resonancia magnética nuclear

# FISICA MEDICA

La resonancia magnética nuclear fue descrita y medida en rayos moleculares por Rabi en 1938 (Premio Nobel en 1944) y refinada por Bloch y Mills Purcell en 1946, por lo que compartieron el Premio Nobel de Física en 1952. Su uso en obtención de imágenes permite una definición anatómica sin precedentes



# FISICA MEDICA.

## Tomografía RM

Una **imagen por resonancia magnética (IRM)**, también conocida como **tomografía por resonancia magnética (TRM)** o **imagen por resonancia magnética nuclear (IRMN, o *NMRI*** por sus siglas en inglés *Nuclear Magnetic Resonance Imaging*) es una técnica no invasiva que utiliza el fenómeno de la resonancia magnética nuclear para obtener información sobre la estructura y composición del cuerpo a analizar. Esta información es procesada por ordenadores y transformada en imágenes del interior de lo que se ha analizado.

Es usada principalmente en medicina para observar alteraciones en los tejidos y detectar cáncer y otras patologías. También es utilizada industrialmente para analizar la estructura de materiales tanto orgánicos como inorgánicos.

La IRM no debe ser confundida con la espectroscopia de resonancia magnética nuclear, una técnica usada en química que utiliza el mismo principio de la resonancia magnética para obtener información sobre la composición de los materiales

A diferencia de la Tomografía axial computarizada (TC), no usa radiación ionizante, sino campos magnéticos para alinear la magnetización nuclear de (habitualmente) núcleos de hidrógeno del agua en el cuerpo. Estos núcleos resuenan a una frecuencia proporcional al campo magnético ejercido de forma que se puede aplicar un campos de radiofrecuencia (RF) para alterar sistemáticamente el alineamiento de los espins de esa magnetización, causando que los núcleos de hidrógeno produzcan un campo magnético rotacional detectable por el escáner. Esa señal puede ser manipulada con campos magnéticos adicionales y así construir con más información imágenes del cuerpo.<sup>1</sup>

# FISICA MEDICA.

## Espectroscopía RMN

La espectroscopía de resonancia magnética nuclear (RMN) es una técnica empleada principalmente en la elucidación de estructuras moleculares, aunque también se puede emplear con fines cuantitativos y en estudios cinéticos y termodinámicos

Algunos núcleos atómicos sometidos a un campo magnético externo absorben radiación electromagnética en la región de las frecuencias de radio o radiofrecuencias. Como la frecuencia exacta de esta absorción depende del entorno de estos núcleos, se puede emplear para determinar la estructura de la molécula en donde se encuentran estos

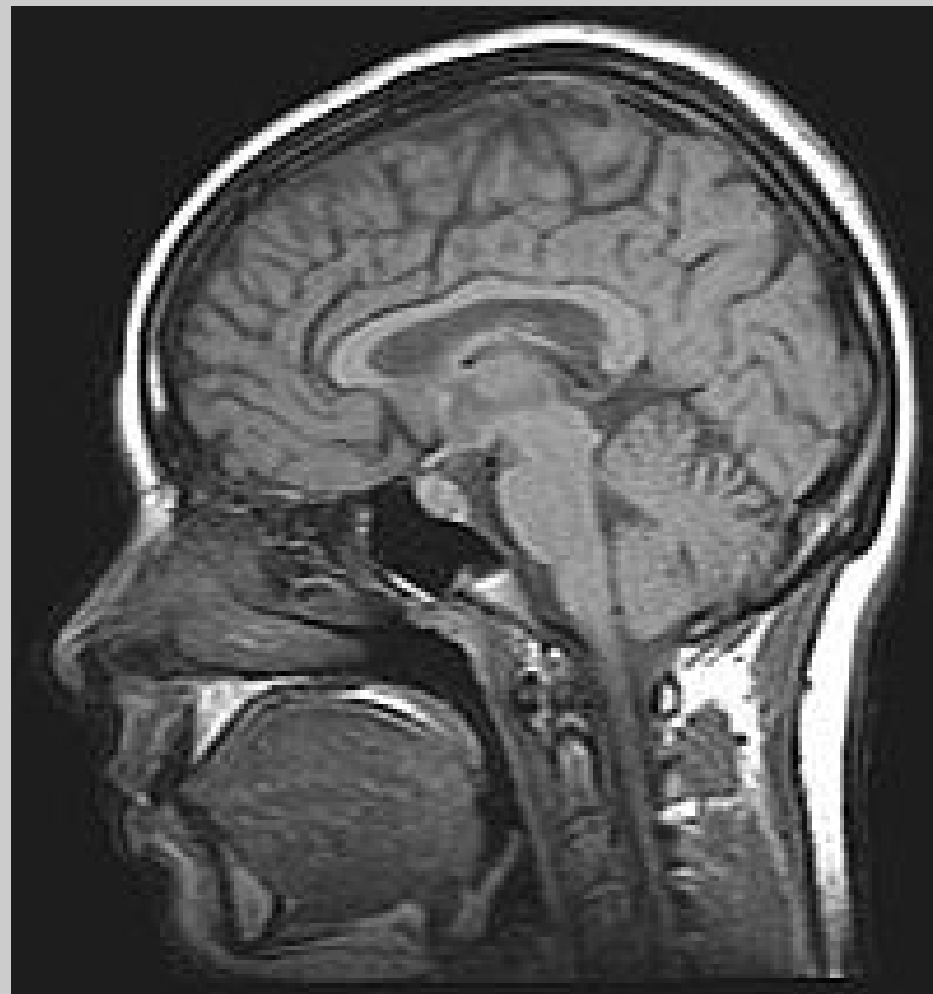
Para que se pueda emplear la técnica los núcleos deben tener un momento magnético distinto de cero. Esta condición no la cumplen los núcleos con número másico y número atómico par (como el  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{32}\text{S}$ ). Los núcleos más importantes en química orgánica son:  $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{31}\text{P}$ ,  $^{19}\text{F}$  y  $^{15}\text{N}$ . Otros núcleos importantes:  $^7\text{Li}$ ,  $^{11}\text{B}$ ,  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{29}\text{Si}$ ,  $^{77}\text{Se}$ ,  $^{117}\text{Sn}$ ,  $^{195}\text{Pt}$ ,  $^{199}\text{Hg}$ ,  $^{203}\text{Tl}$ ,  $^{205}\text{Tl}$ ,  $^{207}\text{Pb}$

Se prefieren los núcleos de número cuántico de espín nuclear igual a  $1/2$ , ya que carecen de un momento cuadrupolar eléctrico que produce un ensanchamiento de las señales de RMN. También es mejor que el isótopo sea abundante en la naturaleza, ya que la intensidad de la señal dependerá de la concentración de esos núcleos activos. Por eso, uno de los más útiles en la elucidación de estructuras es el  $^1\text{H}$ , dando lugar a la espectroscopia de resonancia magnética nuclear de protón. También es importante en química orgánica el  $^{13}\text{C}$ , aunque se trata de un núcleo poco abundante y poco sensible.

# Diagnóstico por resonancia nuclear



Crédito: Evert J. Blink



Crédito: Wikipedia



# Ecuaciones en la resonancia magnética nuclear

# Momento magnético

## Momento magnético

$$\boldsymbol{\mu} = \frac{g}{2mc} q \mathbf{s}$$

## Campo magnético

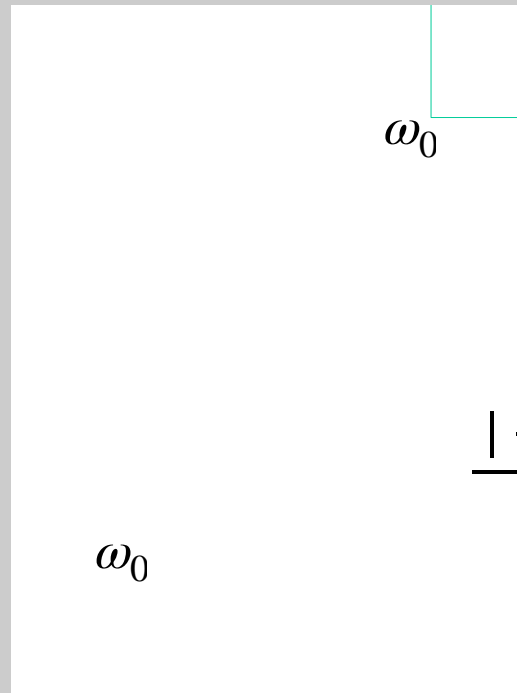
$$\mathbf{B} = B_0 \hat{k}$$

## Interacción

$$H = -\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B}$$

$$H = \omega_0 S_z$$

Frecuencia de Lamor



## Solución Hamiltoniano

$$H | \pm \rangle = E_{\pm} | \pm \rangle$$

$$E_{\pm} = \pm \frac{\omega_0 \hbar}{2}$$

$$\omega_0 = -\frac{g}{2mc} q B_0$$

$$\frac{|-\rangle - |+\rangle}{|-\rangle} \sim \frac{6}{10^6} \Big|_{(B_0=1\text{T})}$$

Para referencia:

$$B_0(\text{Tierra}) \sim 30 - 70 \mu\text{T}$$

Crédito: Evert J. Blink

# Campo magnético dependiente del tiempo

## Campo magnético

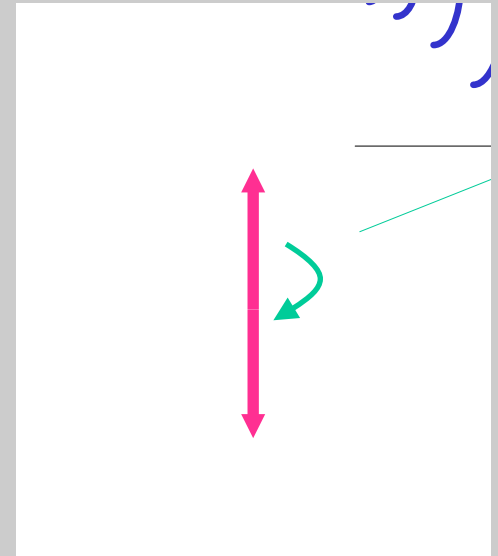
$$\mathbf{B} = B_1 \cos \omega t \hat{i}$$

$$B_1 \ll B_0$$

## Resonancia

$$\omega \rightarrow (E_- \rightarrow E_+)$$

## Estado excitado



## Interacción

$$H = \omega_0 s_z - \frac{gqB_1}{2mc} \cos \omega t s_x$$

$$H = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} \omega_0 & \omega_1 \cos \omega t \\ \omega_1 \cos \omega t & -\omega_0 \end{pmatrix}$$

$$\omega_1 = -\frac{g}{2mc} qB_1$$

$$|\omega_1| \ll |\omega_0|$$

# Campo magnético dependiente del tiempo: solución

## Hamiltoniano

$$H\Psi(t) = i\hbar \frac{d\Psi(t)}{dt}$$

$$H = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} \omega_0 & \omega_1 \cos \omega t \\ \omega_1 \cos \omega t & -\omega_0 \end{pmatrix}$$

## Ansatz

$$\Psi(t) = e^{-i\frac{\omega_0}{2}t} a(t) | + \rangle + e^{i\frac{\omega_0}{2}t} b(t) | - \rangle$$

$$\frac{d^2 b}{dt^2} + i(\omega_0 - \omega) \frac{db}{dt} + \left( \frac{\omega_1}{4} \right)^2 b = 0$$

# Campo magnético dependiente del tiempo: solución

## Solución

$$\Psi(t) = e^{-i\frac{\omega_0}{2}t} a(t) | + \rangle + e^{i\frac{\omega_0}{2}t} b(t) | - \rangle$$

Condición contorno

$$a(t=0) = 1; \quad b(t=0) = 0$$

$$|a(t)|^2 + |b(t)|^2 = 1$$

$$a(t) = 2A \frac{\omega_0 - \omega_1}{\omega_1} e^{i\frac{(\omega_0 - \omega)}{2}t} \left( -\sin \Omega t - i \sqrt{1 + \frac{\omega_1^2}{4(\omega_0 - \omega)^2}} \cos \Omega t \right)$$

$$b(t) = A e^{-i\frac{(\omega_0 - \omega)}{2}t} \sin \Omega t$$

$$\Omega = \frac{1}{2} \sqrt{(\omega_0 - \omega)^2 + \frac{\omega_1^2}{4}}$$

## Breit-Weigner

$$|A|^2 = \frac{(\omega_1/2)^2}{(\omega_0 - \omega)^2 + (\omega_1/2)^2}$$

# Probabilidad transición de un nucleón en un campo

## Evolución temporal

$$\Psi(t) = e^{-i\frac{\omega_0}{2}t} a(t) | + \rangle + e^{i\frac{\omega_0}{2}t} b(t) | - \rangle$$

## Condición inicial

$$a(t = 0) = 1; \quad b(t = 0) = 0$$

## Probabilidad transición

$$|b(t)|^2 = \frac{(\Gamma_1/2)^2}{(E_0 - E)^2 + (\Gamma_1/2)^2} \sin^2 \Omega t$$

$$\Omega = \frac{1}{2} \sqrt{(E_0 - E)^2 + \frac{\Gamma_1^2}{4}}$$

$$E = \hbar\omega; \quad \Gamma_1 = \hbar\omega_1$$

# Tiempo de relajación al quitar la perturbación

## Evolución temporal

$$\Psi(t) = e^{-i\frac{\omega_0}{2}t} a(t) | + \rangle + e^{i\frac{\omega_0}{2}t} b(t) | - \rangle$$

## Condición inicial

$$a(t = 0) = 1; \quad b(t = 0) = 0$$

## Resonancia

$$|b(t)|^2 = \frac{(\Gamma_1/2)^2}{(E_0 - E)^2 + (\Gamma_1/2)^2} \sin^2 \Omega t$$

## Tiempo de relajación

$$| + \rangle \rightarrow | - \rangle$$

## Resonancia

$$\omega \rightarrow (E_- \rightarrow E_+)$$

$$T = \frac{\hbar}{\Gamma_1} = |\omega_1| = \frac{2mc}{g|q|B_1}$$

Cada sustancia emite un fotón con energía característica

$$E_{\pm} = \pm \frac{\omega_0 \hbar}{2}$$

# Funcionamiento

- El campo B0 alinea mayormente lo momentos magnéticos de los protones

$$\mathbf{B} = B_0 \hat{k}$$

- El campo débil B1 excita algunos protones mediante un proceso resonante

$$\mathbf{B} = B_1 \cos \omega t \hat{i}$$

$$\omega \rightarrow (E_- \rightarrow E_+)$$

Al quitar el campo débil B1 la resonancia decae con un tiempo de relajacion

$$|b(t)|^2 = \frac{(\Gamma_1/2)^2}{(E_0 - E)^2 + (\Gamma_1/2)^2} \sin \Omega$$

$$T = \frac{2mc}{g |q| B_1}$$

La energía del fotón en la transición depende del tejido donde se encuentre el protón

$$h\nu = E_+ - E_-$$



# Producción de energía:

- Generalidades
- Reactores de fisión
- Reactores de fusión

# Generalidades sobre reactores de potencia

Producción de energía por **fisión**: 435 plantas nucleares en el mundo (17%), 3 en Argentina (7%)

- No produce gases contaminantes

- Produce material radiactivo peligroso

Producción de energía por **fusión**: pequeño sol.

- Combustible agua. No contamina

- Lleva más de 70 años de investigación.

- Difícil de controlar

- Etapas de extraer más energía que la que se le suministra

**Recomendación:** libro El Secreto Atómico de Huemul de Mario Mariscotti

# Fisión

# Aplicaciones de la Fisión Nuclear

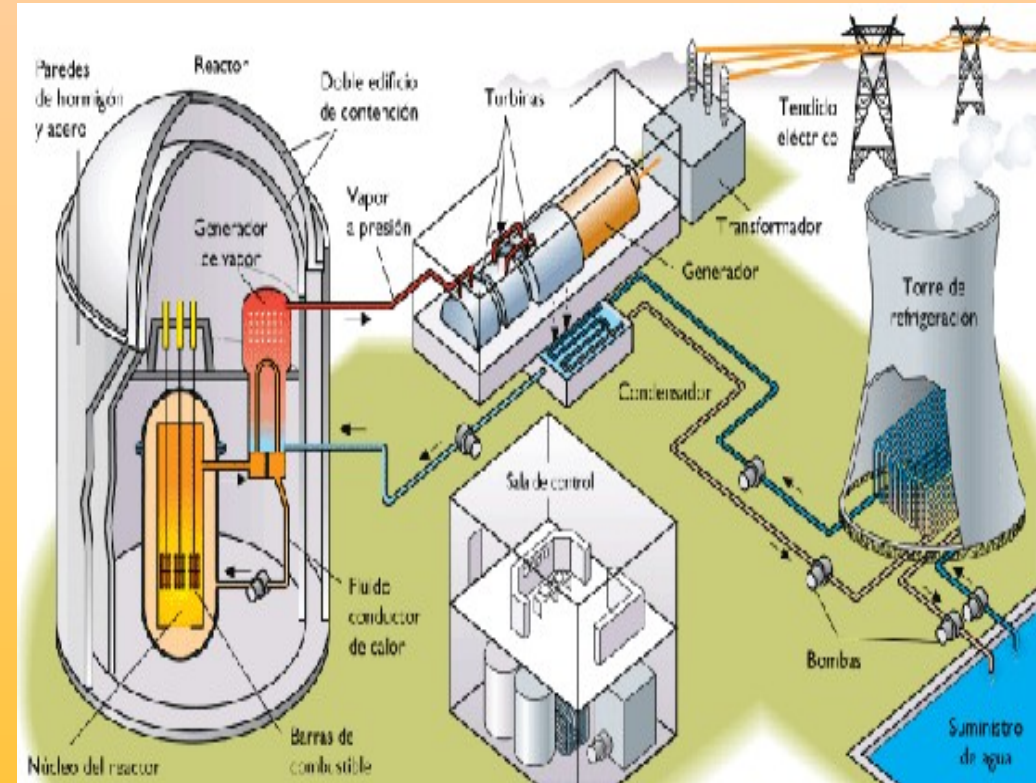
Fisión nuclear para la generación de energía:

- No produce gases contaminantes
- Produce material radiactivo peligroso

Reactores de investigación

Transmutación de los residuos radiactivos





Armamentos...



Crédito: [cl.kalipedia.com](http://cl.kalipedia.com)

# Generalidades sobre la Fusión Nuclear

Producción de energía: un pequeño sol.

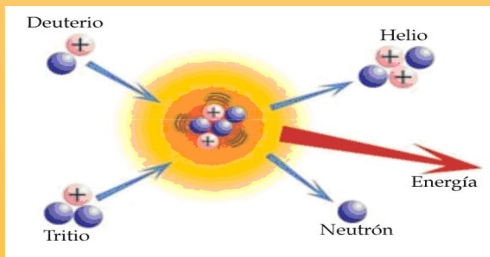
- Combustible agua. No contamina 
- Lleva casi 70 años de investigación. 
- Difícil de controlar 
- Estado actual: Final construcción prototipo para verificar tecnología para extraer más energía que la que se suministra: Proyecto ITER 

Producción de armamento: bomba de hidrógeno. 

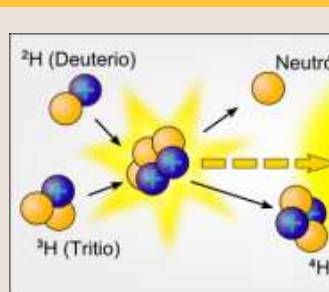
Antecedente en Argentina (Ronald Richter) Libro: El Secreto Atómico de Huemul de Mario Mariscotti  

# Producción de energía por fusión: Proyecto ITER

## Fusión



Crédito:  
[bejar.biz](http://bejar.biz)

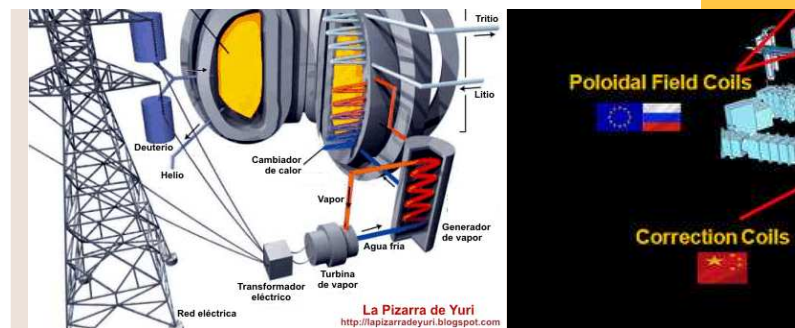


Créditos: [sputnik87.v](http://sputnik87.v)

[iter.org](http://iter.org)



Crédito: [lapizarradeyuri.blogspot.com](http://lapizarradeyuri.blogspot.com)



Crédito: [lapizarradeyuri.blogspot.com](http://lapizarradeyuri.blogspot.com)

# Otras aplicaciones

## Nuclear Science

**Nuclear Science** is the study of the structure, properties, and interactions of the atomic nuclei. Nuclear scientists calculate and measure the masses, shapes, sizes, and decays of nuclei at rest and in collisions. They ask questions, such as **Why do nucleons stay in the nucleus?** What combinations of protons and neutrons are possible? What happens when nuclei are compressed or rapidly rotated? What is the origin of the nuclei found on Earth?

**Legend**

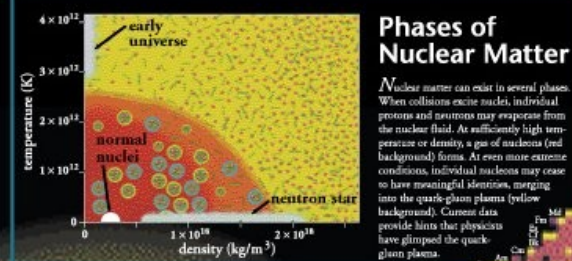
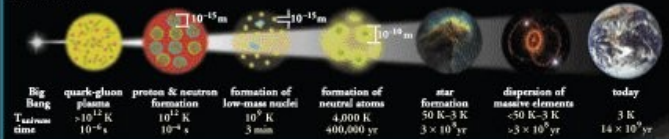
- electron ( $e^-$ )
- quark
- photon ( $\gamma$ )
- positron ( $e^+$ )
- gluon field
- neutrino ( $\nu$ )
- gluon
- antineutrino ( $\bar{\nu}$ )
- photon ( $\gamma$ )

**Atomic Notation**

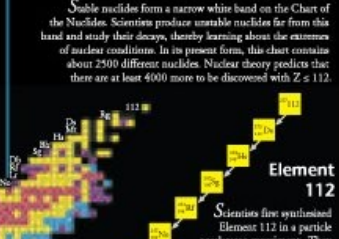
$A$  mass number  
 $Z$  atomic number  
 $C$  chemical symbol  
 $N$  neutron number  
 $P$  proton number  
 $A - Z$  neutron number

### Expansion of the Universe

After the Big Bang, the universe expanded and cooled. At about  $10^{-42}$  second, the universe consisted of a soup of quarks, gluons, electrons, and neutrinos. When the temperature of the Universe,  $T_{universe}$ , cooled to about  $10^{12}$  K, this soup condensed into protons, neutrons, and electrons. As time progressed, some of the protons and neutrons formed deuterium, helium, and lithium nuclei. Still later, electrons combined with protons and these low-mass nuclei to form neutral atoms. Due to gravity, clouds of atoms contracted into stars, where hydrogen and helium fused into more massive chemical elements. Exploding stars (supernovae) form the most massive elements and disperse them into space. Our earth was formed from supernova debris.



### Unstable Nuclei



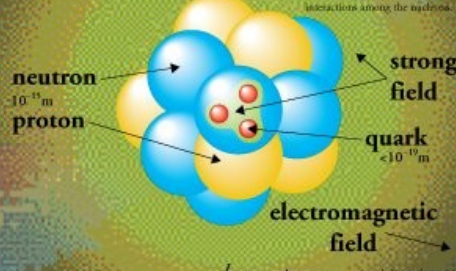
### Radioactivity

Radioactive decay transforms a nucleus by emitting different particles. In alpha decay, the nucleus releases a  $^4_2\text{He}$  nucleus—an alpha particle. In beta decay, the nucleus either emits an electron and antineutrino (for a positron and neutrino) or captures an atomic electron and emits a neutrino. A positron is the name for the antiparticle of the electron. Antimatter is composed of antiparticles. Both alpha and beta decays change the original nucleus into a nucleus of a different chemical element. In gamma decay, the nucleus lowers its internal energy by emitting a photon—a gamma ray. This decay does not modify the chemical properties of the atom.

- Alpha Decay:**  $^{252}_{108}\text{Sg} \rightarrow ^{248}_{106}\text{Rf} + ^4_2\text{He}$
- Beta Minus Decay:**  $^{14}_6\text{C} \rightarrow ^{14}_7\text{N} + e^- + \bar{\nu}_e$
- Beta Plus Decay:**  $^{11}_6\text{C} \rightarrow ^{11}_5\text{B} + e^+ + \nu_e$
- Gamma Decay:**  $^{162}_{67}\text{Dy} \rightarrow ^{162}_{67}\text{Dy} + \gamma$

### The Nucleus

$(1-10) \times 10^{-15}$  m



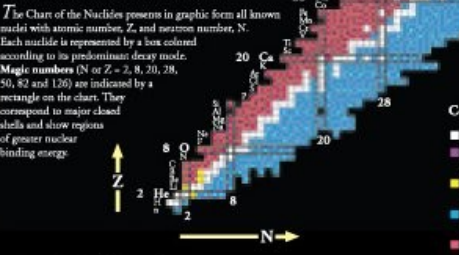
In an atom, electrons curve around the nucleus at distances typically up to 10,000 times the nuclear diameter. If the electron cloud were shrunk to scale, the electron would curve around twice.

### Nuclear Energy

**Fission:** Nuclear reactions release energy when the total mass of the products is less than the sum of the masses of the initial nuclei. The "lost mass" appears as kinetic energy of the products ( $E = mc^2$ ). In fission, a massive nucleus splits into two major fragments that usually eject one or more neutrons. In fusion, low mass nuclei combine to form a more massive nucleus plus one or more ejected particles—neutrons, protons, photons, or alpha particles.

**Fusion:** In the early stages of stellar evolution of our sun and other stars, hydrogen fuses to form helium, releasing energy in the form of photons (light) and neutrinos. During the later stages of stellar evolution, more massive nuclei up to and beyond uranium are synthesized by fusion. By measuring the number of neutrinos that come from the Sun, scientists recently have demonstrated that neutrinos must have a mass greater than zero.

### Chart of the Nuclides



**Color Key**

- Stable
- Spontaneous fission
- Alpha particle emission
- Beta minus emission
- Beta plus emission or electron capture

www.CPEPweb.org

### Applications

- Radioactive Dating:** Naturally occurring radioactive isotopes such as  $^{14}\text{C}$  are used to date objects that were once living, such as wood. For example, in a study of artifacts found at the site, scientists determined that Stonehenge was built nearly 4,500 years ago.
- Space Exploration:** Scientists used alpha particles to identify chemical elements present in Martian rocks. On Earth, nuclear reactions are used in many ways from criminal investigations to air decontamination.
- Nuclear Reactors:** Nuclear reactors use the fission of  $^{235}\text{U}$  or  $^{239}\text{Pu}$  nuclei to produce electric power. Reactors use most other nuclear applications generate radioactive waste; disposal of this waste is a subject of current research.
- Smoke Detectors:** Many smoke detectors use a small amount of the alpha emitter  $^{241}\text{Am}$  to ionize the air. Smoke entering the detector reduces the current and sets off the alarm.
- Nuclear Medicine:** Radioactive isotopes such as  $^{201}\text{Tl}$ ,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , and  $^{131}\text{I}$  are commonly used in the diagnosis and treatment of disease. Positron emitters such as  $^{18}\text{F}$  are used in Positron Emission Tomography (PET) to generate images of brain activity.
- Magnetic Resonance Imaging:** Magnetic Resonance Imaging (MRI) makes use of atomic transitions involving the magnetic field of a nucleus to study the local chemical environment. This technique accurately maps the density of hydrogen to produce three-dimensional images of the human body.

**Fin Total**