

**SEMANA  
DE LA  
CIENCIA**



**CIENTÍFICO**



[www.forges.com](http://www.forges.com)

**SIGLO  
DE LA  
'CIENCIA INFUSA'**



**MILLON-  
TÍFICO**

¿Por qué el sol  
lleva encendido  
miles de millones  
de años?

¿De dónde  
proviene los  
elementos?



Qué es y cómo  
funciona el  
centro del átomo

# El núcleo:

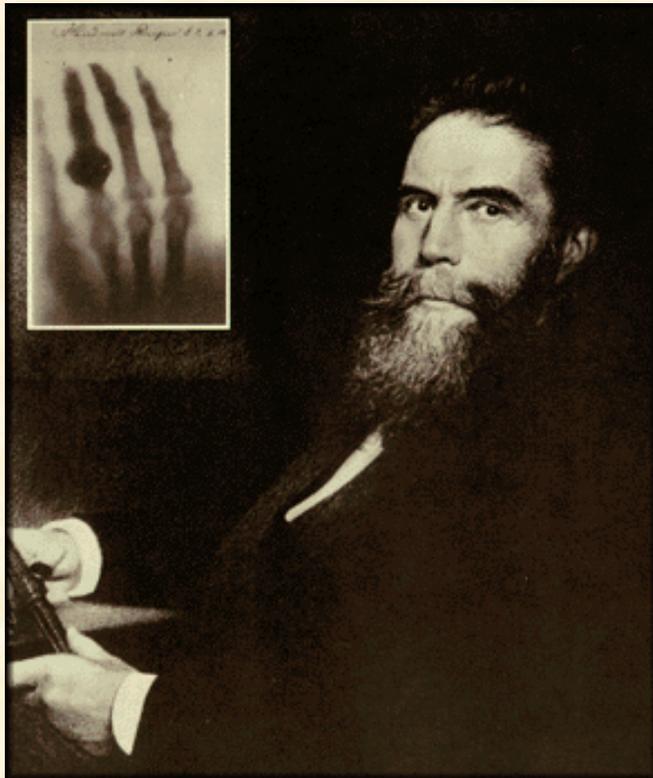
## Un Viaje al Centro de la Materia

- Descubrimiento del Mundo Subatómico
- Temas actuales de Estructura Nuclear
- Aplicaciones

M<sup>a</sup> José García Borge

Insto. Estructura de la Materia

CSIC

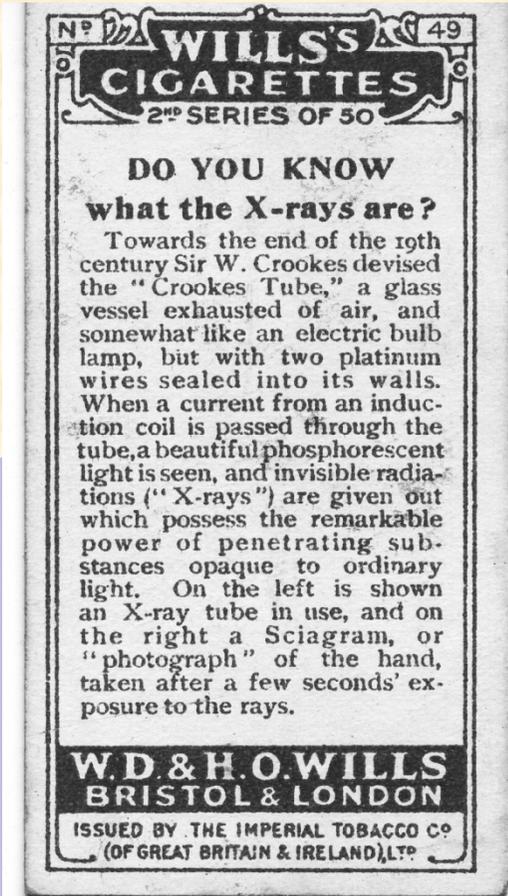
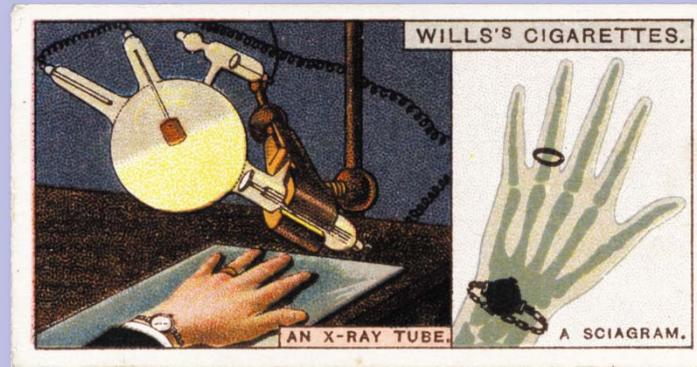


**Wilhelm Röntgen  
(1845-1923)**

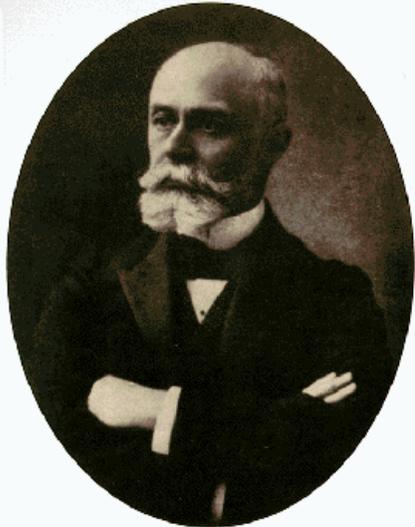
**Premio Nobel 1901**

1895

Estudio de las propiedades de un gas enrarecido al pasar la corriente....



El descubrimiento de los rayos-X despertó gran interés tanto en la comunidad científica como en el público general.



## Henry Becquerel

1896, **Sales de uranio** → radiación penetrante :

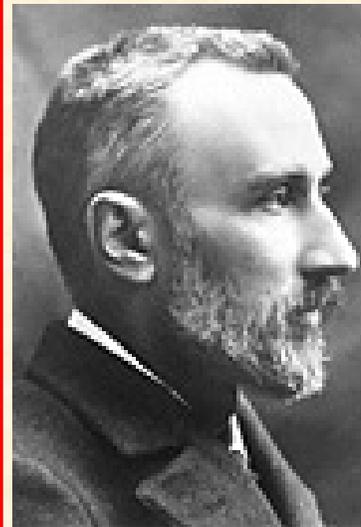
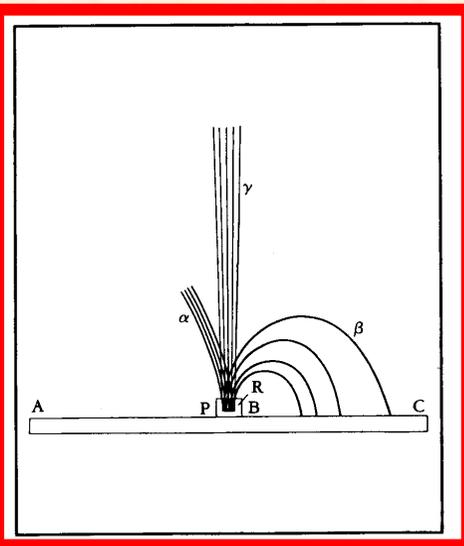
- Independiente del compuesto químico
- En ausencia de descargas

Obtuvieron las mismas propiedades en **sales de torio**

➤ Hipótesis: Radiación propiedad atómica, Radiactividad

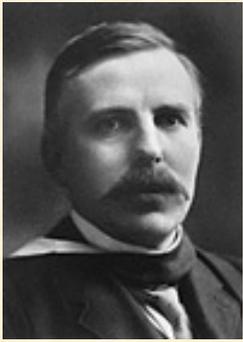
➤ En bismuto descubrió un elemento más activo: **Polonio**. En fragmento de Ba encontró **Radio**

➤ Uso del electrómetro de Curie para identificación química



**Maria Sklodowska**

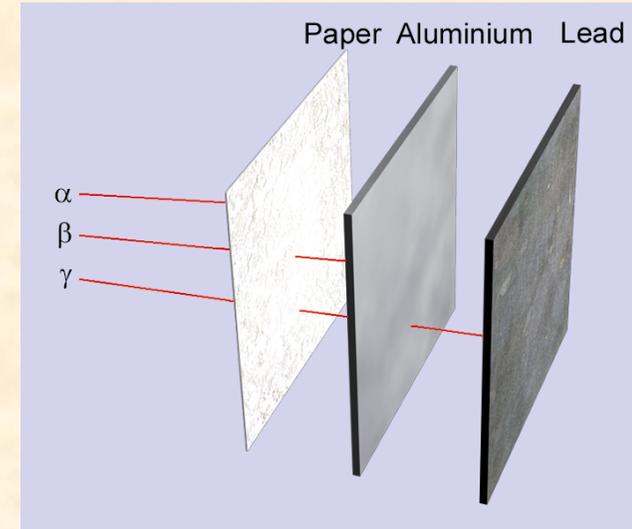
**Pierre**



J. Rutherford

P. Nobel 1908

..y **Rutherford** fue a Cambridge para trabajar con Thomson en propiedades de los rayos X. Interesado por los rayos de Becquerel descubrió que los había de 3 tipos:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$



## Ley de la desintegración exponencial

"No importa que cantidad tengamos de material radioactivo al cabo de un tiempo conocido como semiperiodo ( $T_{1/2}$ ), la mitad del material radioactivo habrá desaparecido (tras  $2T_{1/2}$  quedará  $\frac{1}{4}$ .....)"

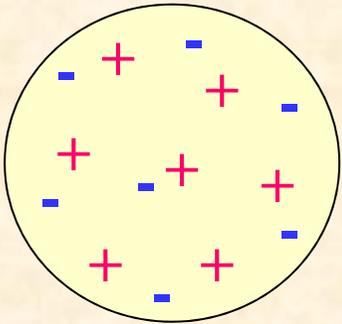
$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

## Transmutación

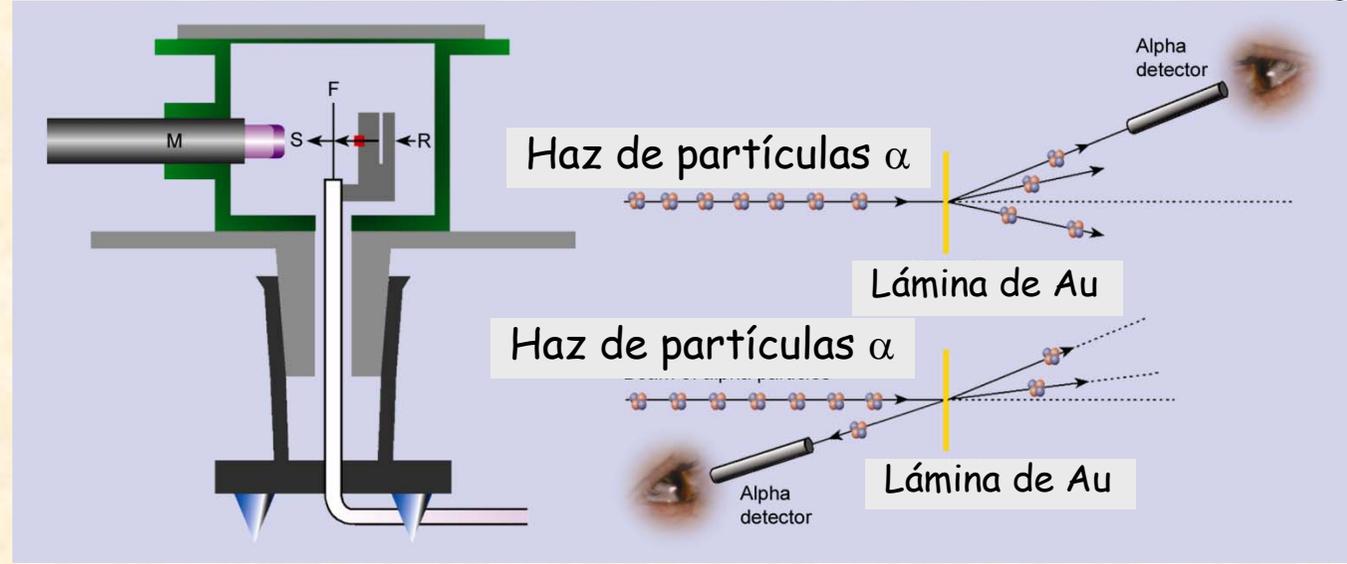
..y **Rutherford** fue a McGill a trabajar con Soddy y descubrieron que **la radioactividad transforma unos elementos en otros**

*"No lo llares Transmutación, Soddy, o querrán nuestras cabezas.."*

## Modelo de Thomson "plumb pudding"



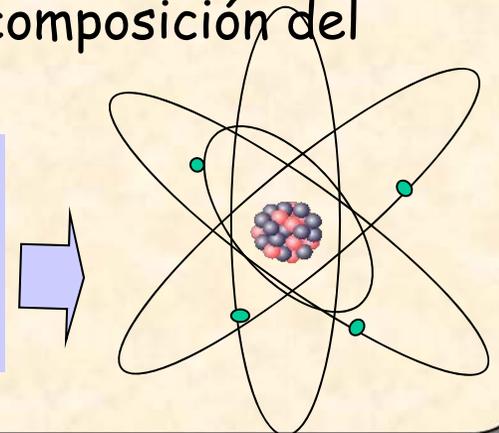
Rutherford



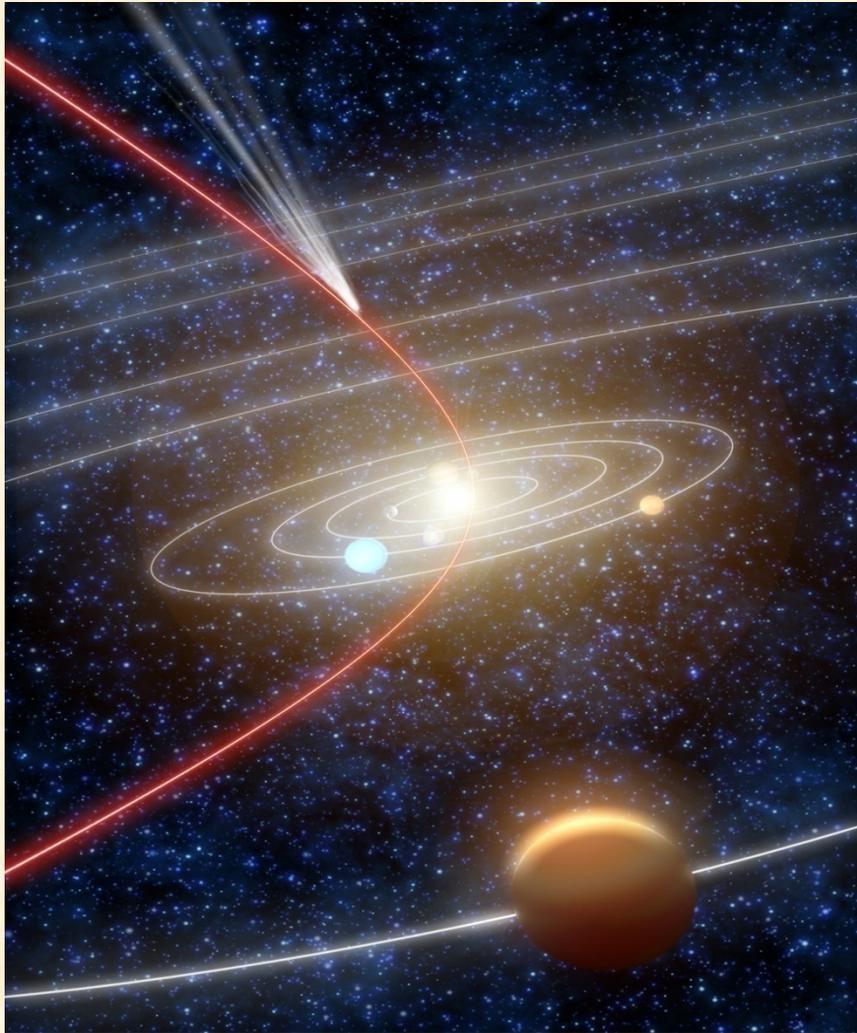
1907, Manchester (UK)

Estudió la dispersión de partículas  $\alpha$  en láminas de mica, Au... Descubrimiento de la composición del átomo 1910

Geiger y Marsden observaron retrodispersión



E. Rutherford, Phil. Mag. 6Th Series, 21 (1911) 669



..pero el modelo de Rutherford hacía aguas...

Si los núcleos estaban en el centro con los electrones orbitando, estos caerían al centro...

En 1913 Bohr propuso que los electrones en órbitas estables no irradiaban

Buen acuerdo con los estudios de dispersión

1919, Primera Reacción Observada  $^{14}\text{N} (\alpha, p)^{12}\text{C}$

## ¿Cuáles son los constituyentes del núcleo?

➤ El núcleo es un sistema cuántico  $\Rightarrow$  No sabemos cuándo se va a desintegrar

➤ Debe cumplir el Principio de Incertidumbre ( $\Delta x \cdot \Delta p > h$ )

➤ La radioactividad nos dice que los núcleos emiten  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ .

- ¿Está el núcleo formado por  $\alpha$ ,  $\beta$ ? Pero  $M_H < M_\alpha$

-¿Cómo consigue un átomo de N de masa 14 ser neutro con 14 protones y 7 electrones?

Un texto de 1920 explicaría que tendría además 7 electrones en el núcleo.  $\Rightarrow$  pero los electrones confinados violarían el Principio de Incertidumbre.

Rutherford propuso la existencia de una partícula neutra

En **1930** se descubrió que al enviar partículas  $\alpha$  sobre  ${}^9\text{Be}$  se emitía una radiación muy penetrante de tipo neutro.

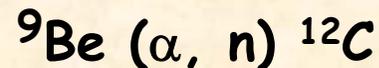
Los Joliot-Curie observaron que tal radiación al atravesar la parafina, rica en H, producía protones de energía medible.



**James Chadwick**  
P Nobel 1935

**Chadwick** en 1932 observó esta misma radiación en otros elementos: **He, Li, C, N, Ar**

➤ Utilizando la hipótesis de Rutherford de existencia de una partícula neutra en el núcleo, calculó el proceso de dispersión con ¿**neutrones**? ⇒ ¡ Buen Acuerdo !



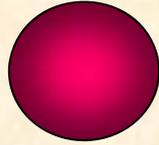
➤ Diferencia de masas ⇒ **masa de neutrón**



Heisenberg propuso que los núcleos están formados únicamente por protones y neutrones...  
 ..Y los electrones ¿dónde vienen?



**Neutrón**



**Protón**

$T_{1/2} = 14 \text{ min}$     $T_{1/2} > 10^{33} \text{ y}$

$$m_p = 1.6727 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m_n = 1.6750 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\Delta m / m_n = 0.137 \%$$



Yukawa  
 P. Nobel  
 1949

## Fuerza Fuerte

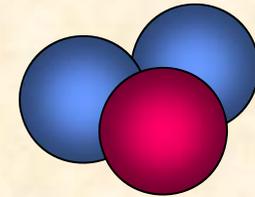
➤ Una fuerza atractiva entre nucleones unidos en el núcleo mediante intercambio de una partícula: **el pión**

➤ **Fuerza Débil (Pauli & Fermi) 1930 & 1934**

➤ Responsable desintegración beta ( $e, \nu$ )

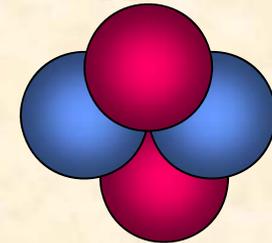
➤ Creación de partículas

Formado únicamente por



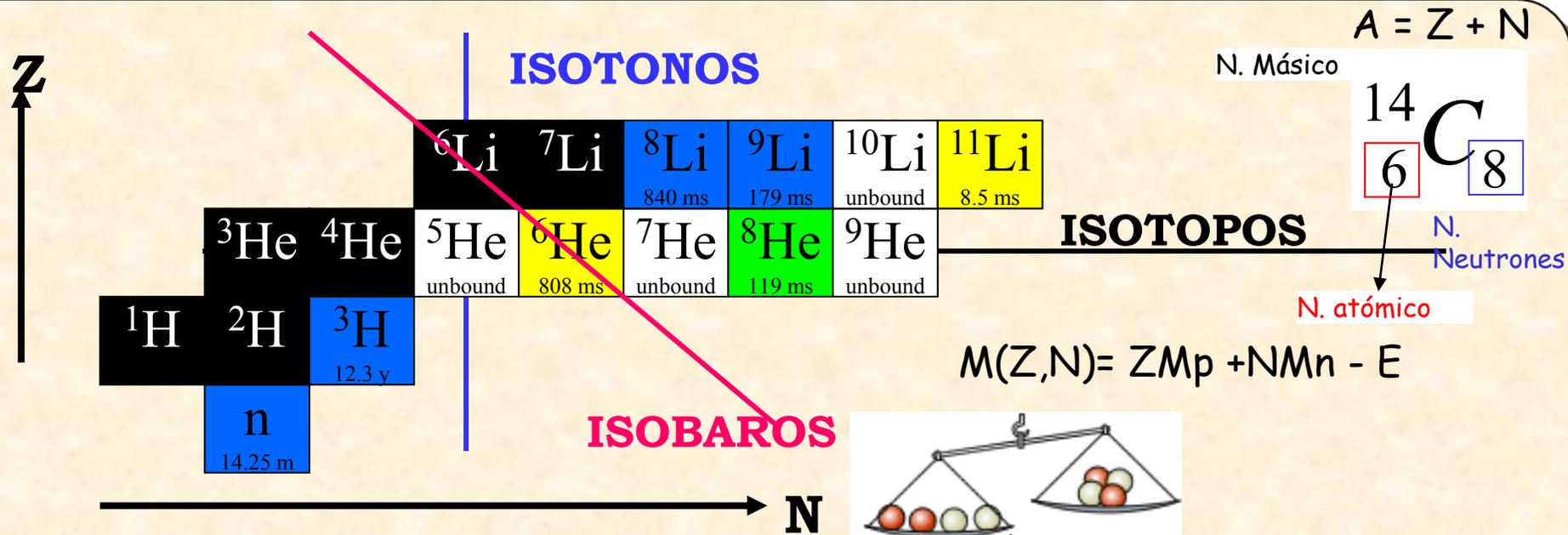
**$^3\text{H}$**

$T_{1/2} = 12,3 \text{ y}$

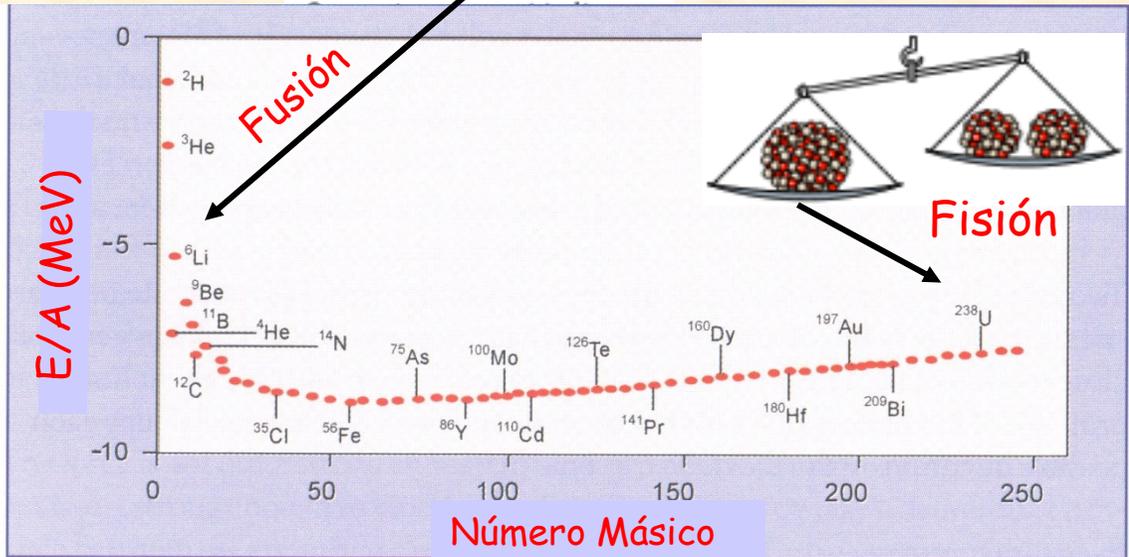
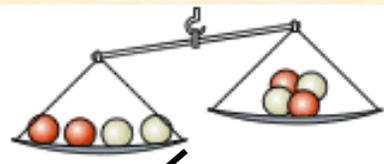


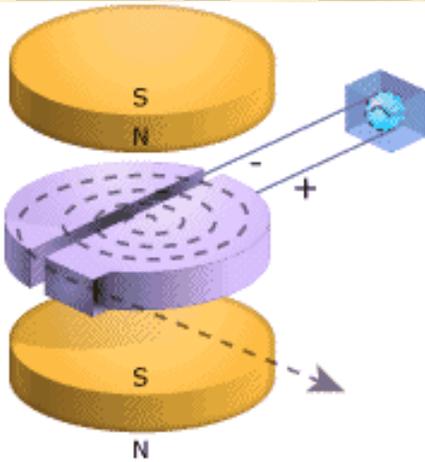
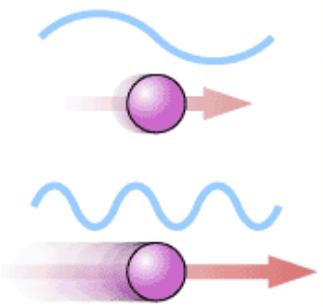
**$^4\text{He}$**

# Núcleos

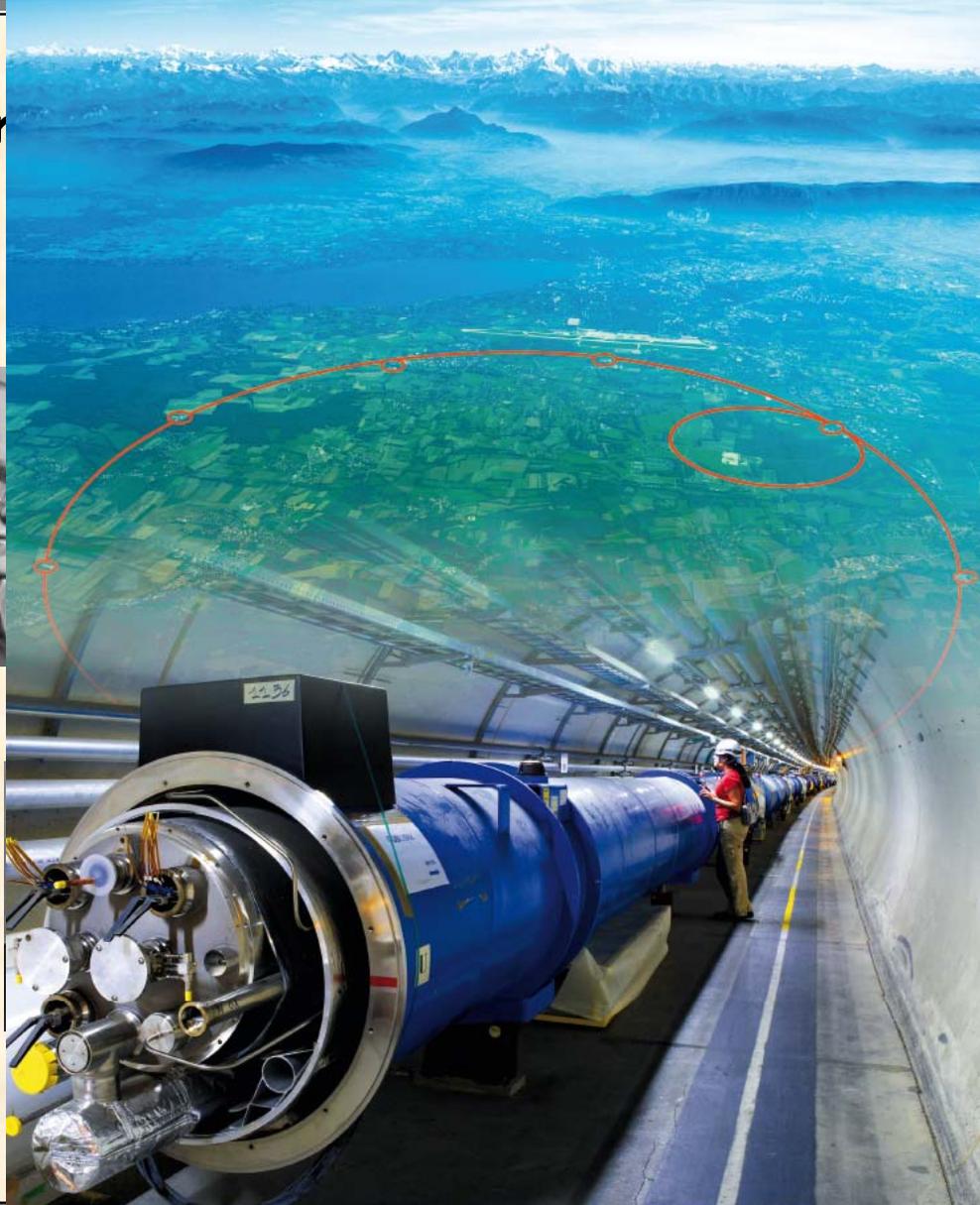


Igual densidad (=  $M/V$ )  
 $r = r_0 A^{1/3}$ ,  $r_0 \approx 1.2 \text{ fm}$



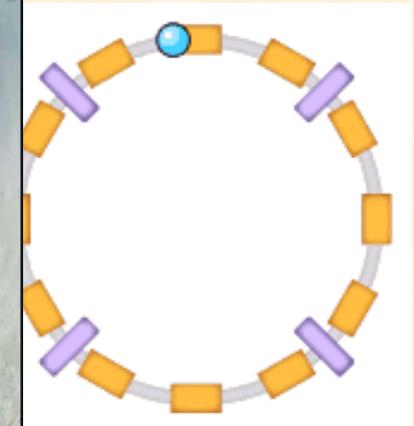
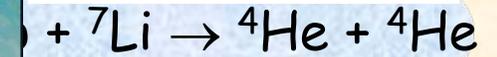


Ciclotrón

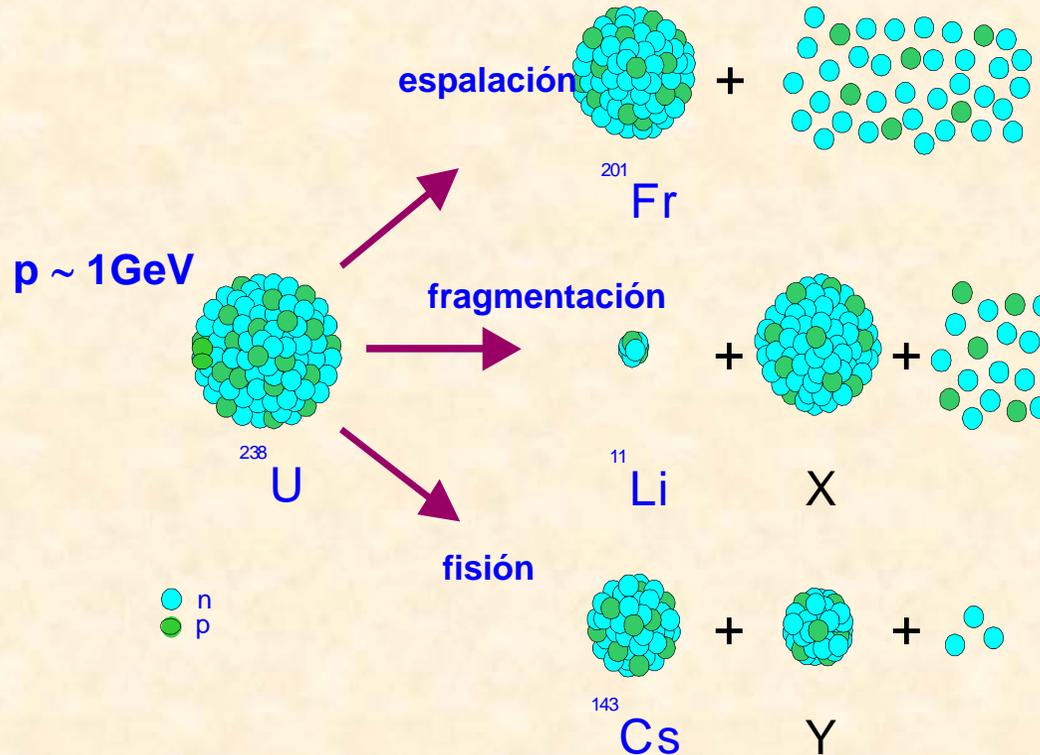


132 Primera Reacción  
con protones

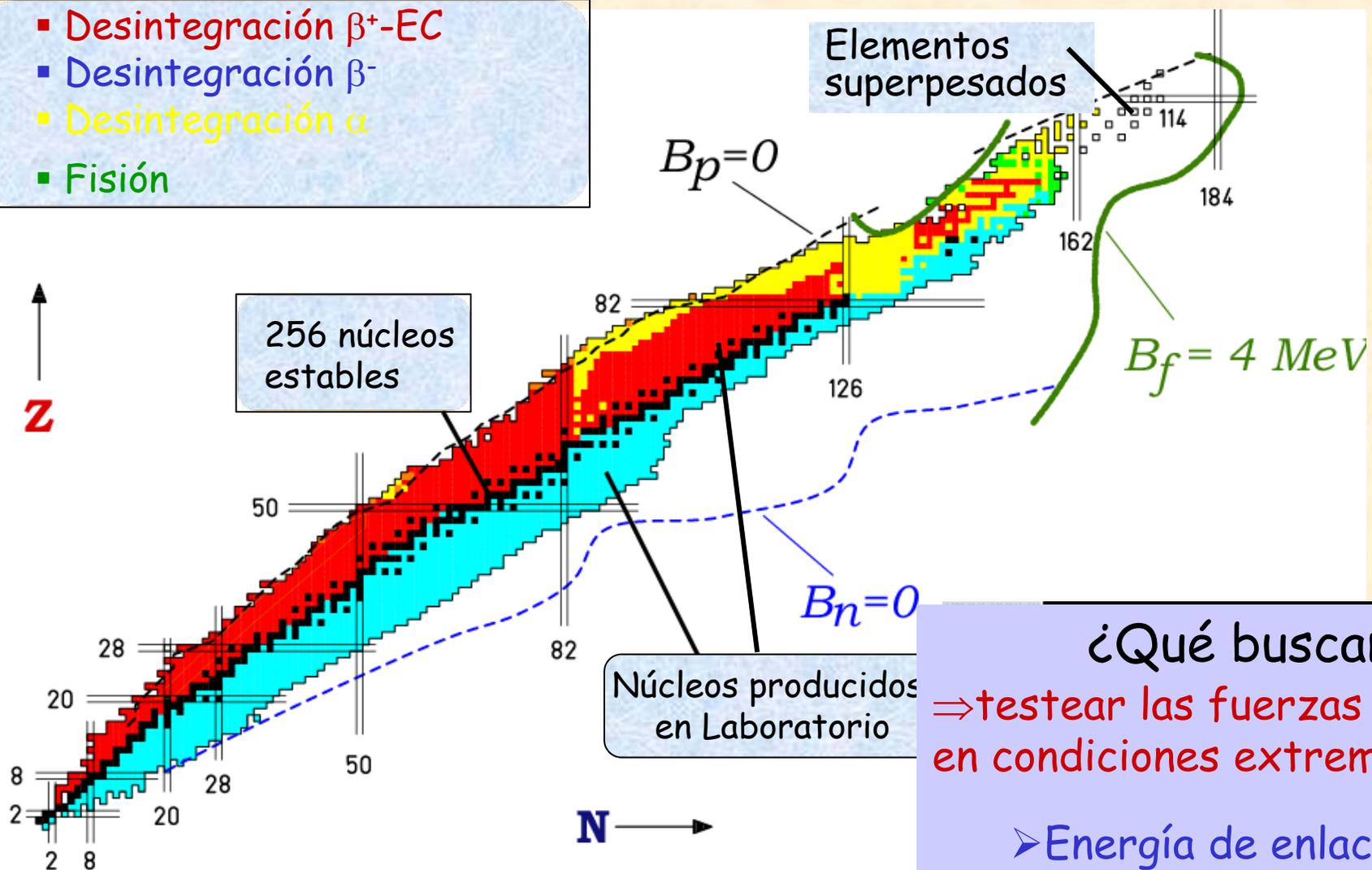
Li



Sincrotrón



- Desintegración  $\beta^+$ -EC
- Desintegración  $\beta^-$
- Desintegración  $\alpha$
- Fisión



**¿Qué buscamos?**  
 ⇒ testear las fuerzas nucleares en condiciones extremas

- Energía de enlace ⇔ límite
- Energía de excitación

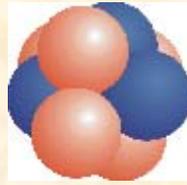
# ¿Qué ocurre en el límite de estabilidad neutrónica?



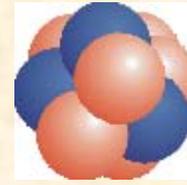
${}^6\text{Li}$



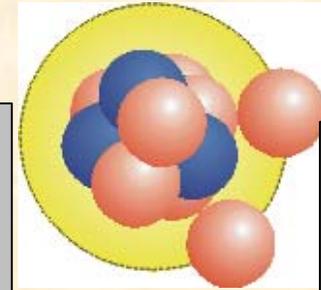
${}^7\text{Li}$



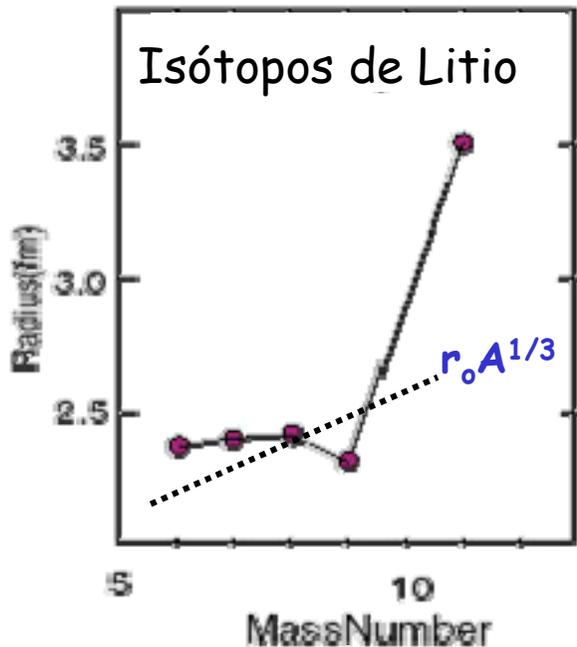
${}^8\text{Li}$



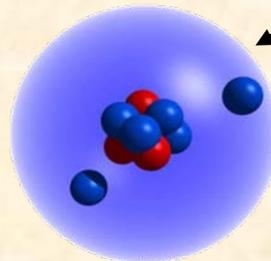
${}^9\text{Li}$



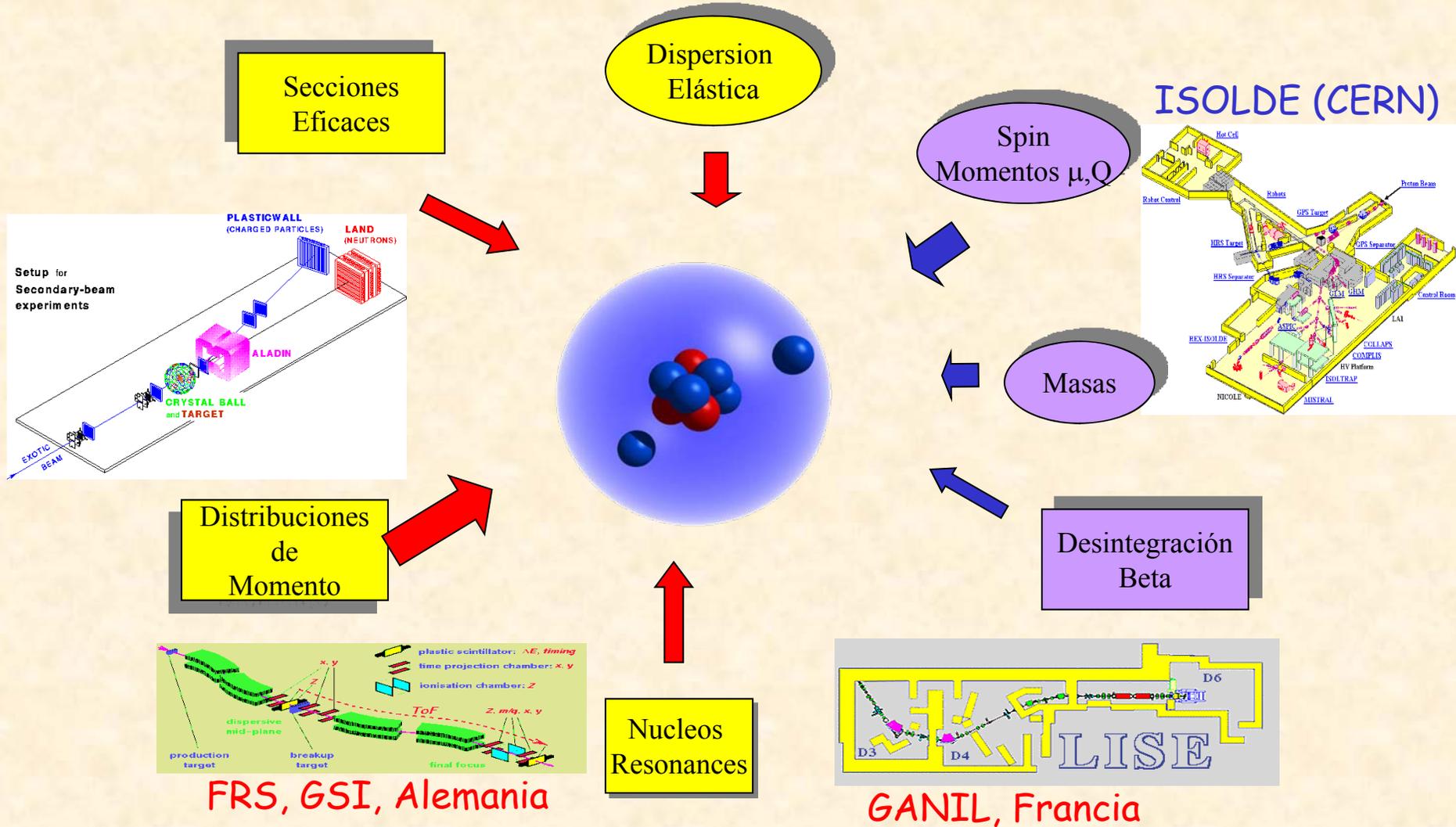
${}^{11}\text{Li}$



- Efecto observado en reacciones
  - Energía de enlace mínima
- Radios cuadráticos medios  
Equivalentes:  ${}^{11}\text{Li}$  y  ${}^{48}\text{Ca}$



# ¿Cómo obtener la información completa ?



# Explorando los límites: límite protónico

1914 Marsden  $^{14}\text{N} (\alpha, p)^{12}\text{C}$

Observado en 1981 en GSI

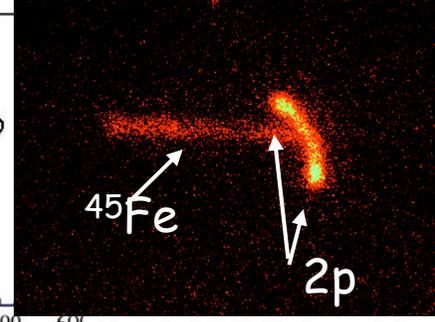
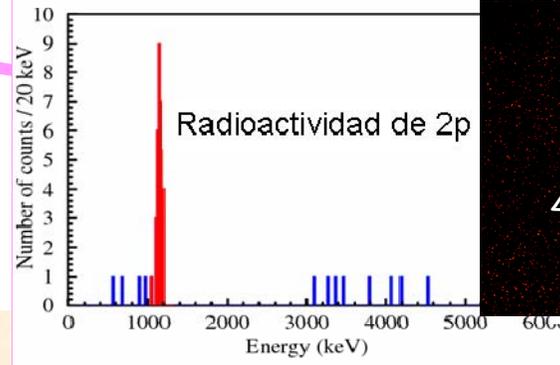
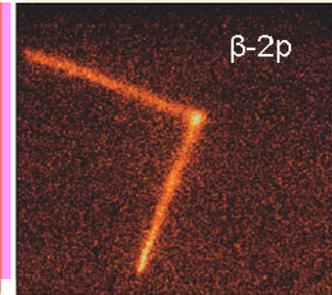
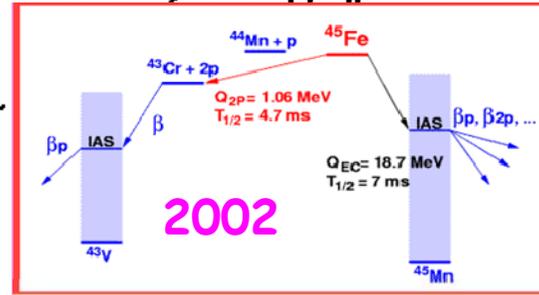
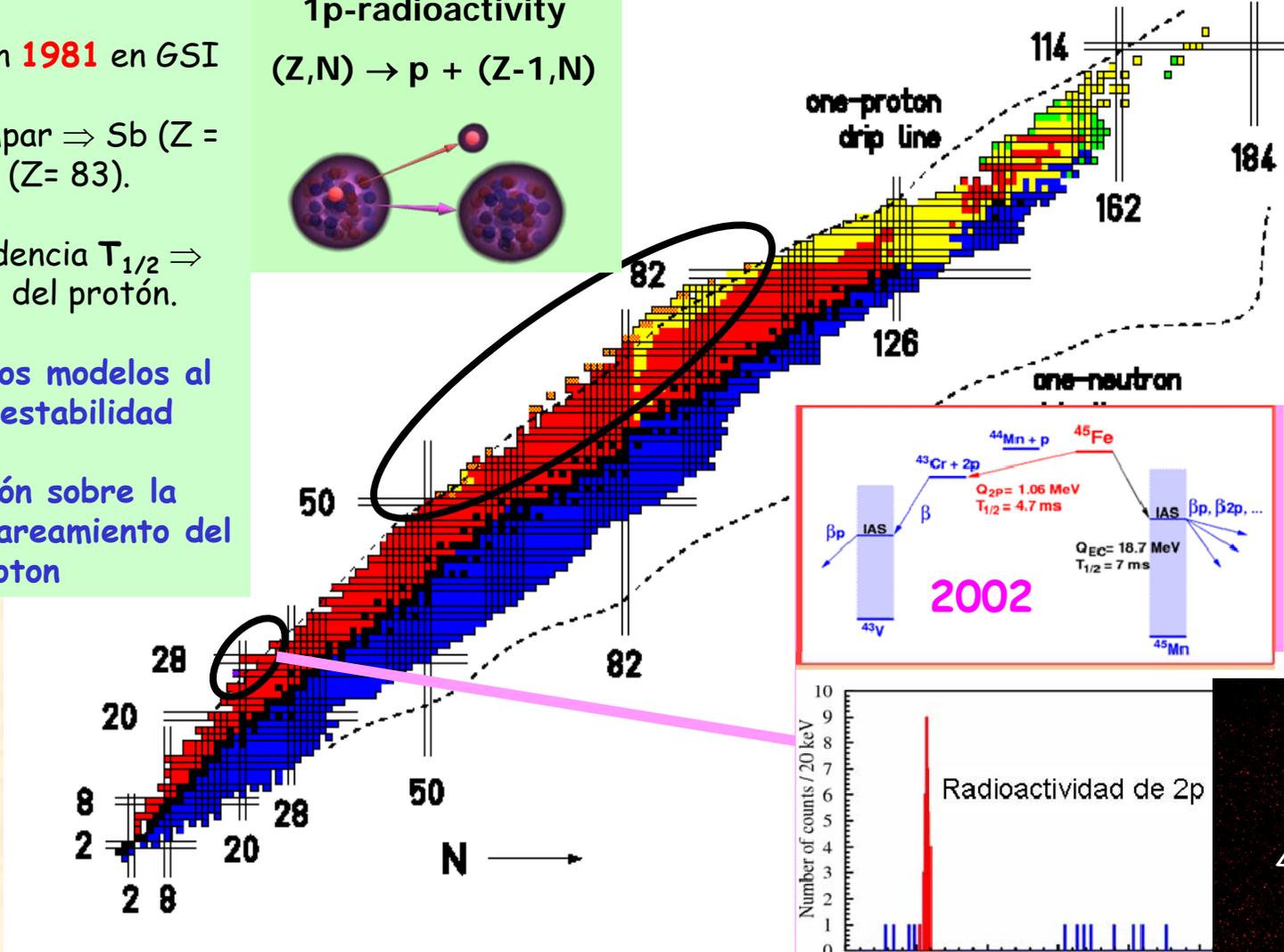
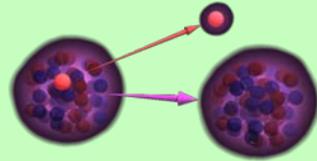
Núcleos Z-impar  $\Rightarrow$  Sb (Z = 51) - Bi (Z = 83).

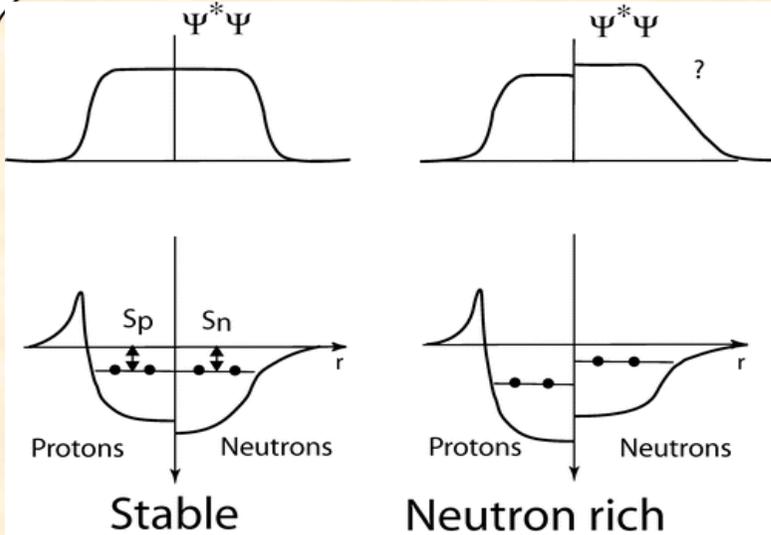
Gran dependencia  $T_{1/2} \Rightarrow$  momento l del protón.

Validez de los modelos al límite de estabilidad

Información sobre la fuerza de apareamiento del proton

1p-radioactivity  
(Z,N)  $\rightarrow$  p + (Z-1,N)





M. Goeppert-Mayer & Jensen inventaron hace más de 50 años un modelo de capas que explica el aumento de estabilidad de los núcleos cuando su número de protones y/o neutrones es igual a:  
2, 8, 20, 28, 50, 82;

Núcleo doblemente mágico tiene unas propiedades de estabilidad extraordinarias:  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{40}\text{Ca}$ ,  ${}^{208}\text{Pb}$

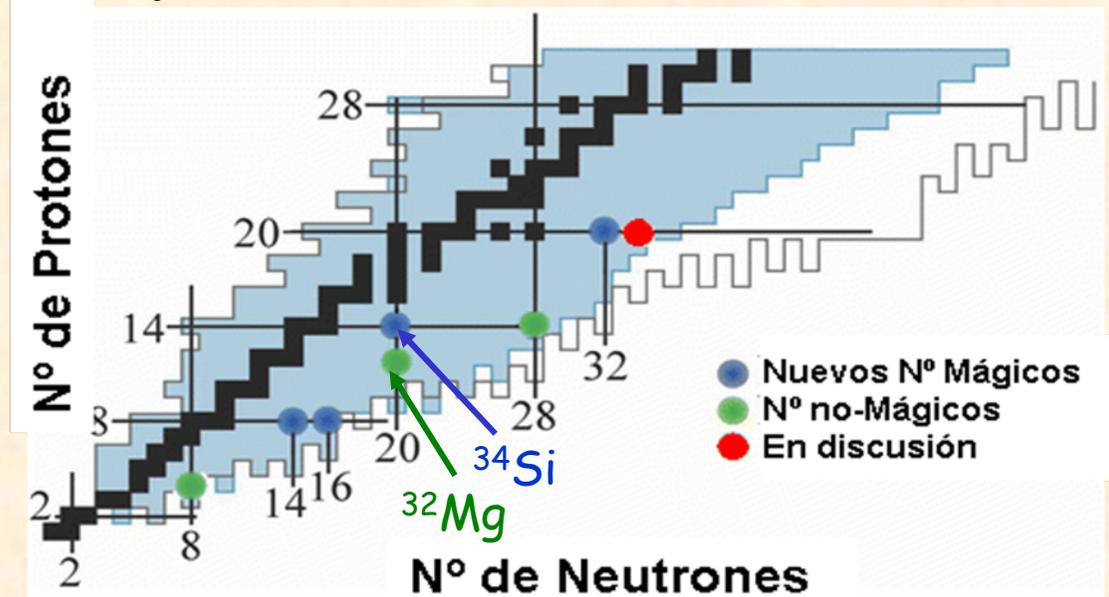
⇒ Lejos de la estabilidad la situación cambia.

**R** Geesaman DF, et al. 2006.  
Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 56:53–92

Experimentalmente:

Medida de  $B(E2)$

Energía del primer estado excitado



¿Cuál es el final de la tabla Periódica?

⇒ información única sobre la interacción Nuclear.

Las teorías predicen una isla de estabilidad alrededor de  $Z=120$

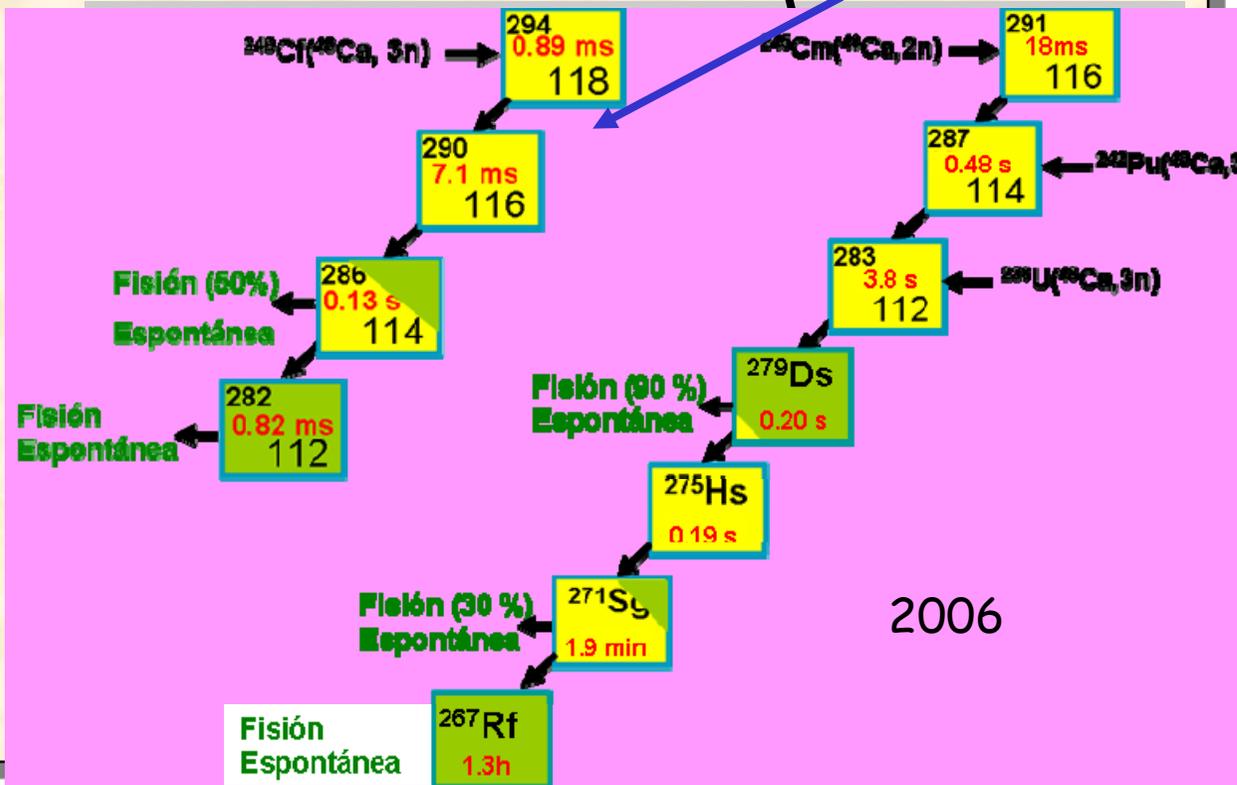
**Fusión fría con haces y blancos estables.**

➤ Realizada hasta  $Z=112$  ( $A=279$ ) en GSI

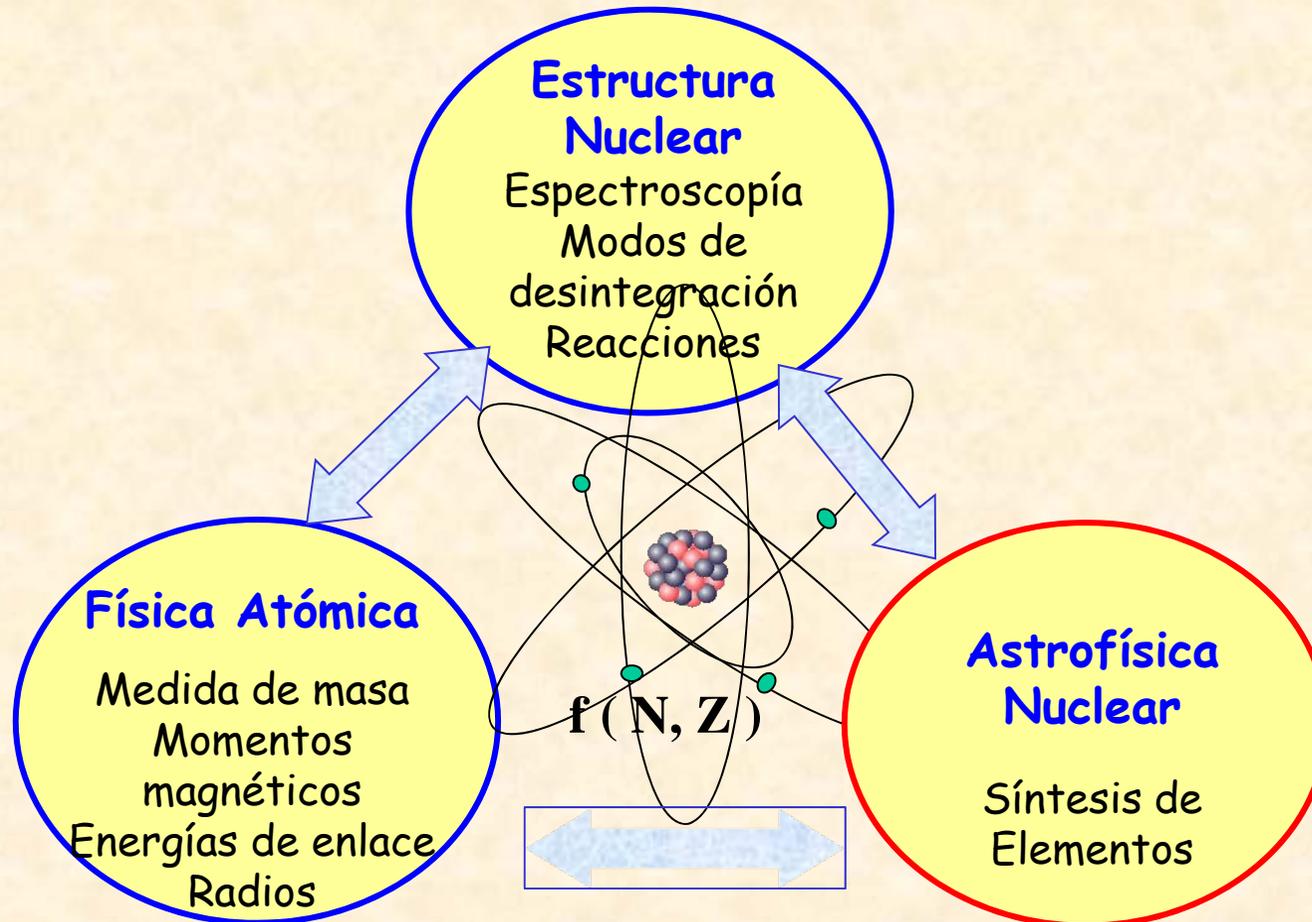
**Fusión con haces estables y blancos radiactivos**

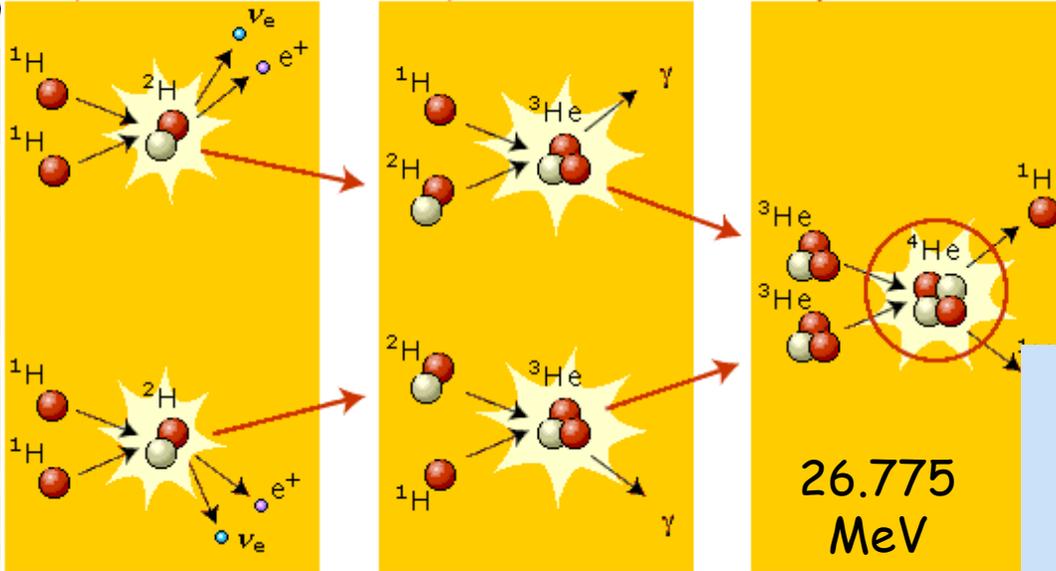
➤ En Dubna (Rusia) se han sintetizado  $Z=113 - 116$  y  $118$  ( $A=294$ ).

**La Química de  $Z=114$ .**



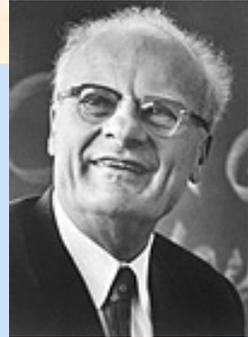
2006





Temperatura en el Sol  $15 \times 10^6 \text{ C}$

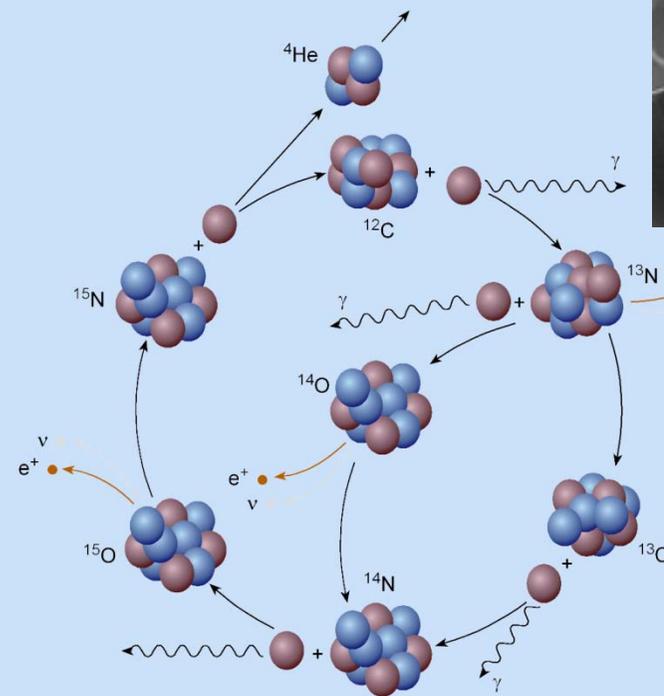
Gas de protones suficientemente caliente para producir fusión de protones: **Cadena-pp**



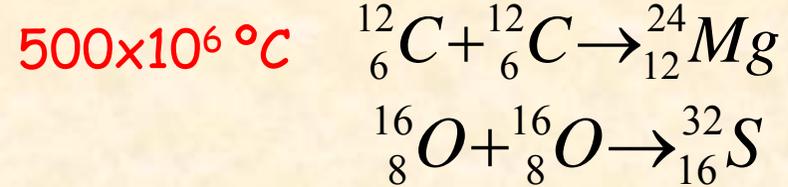
Estrellas más masivas  $\Rightarrow$  alternativa a la cadena-pp: **El ciclo de CNO** (Bethe final 30's , PN 1967).

➤ Presencia trazas C:  $^{12}\text{C}(p,\gamma)^{13}\text{N}...$

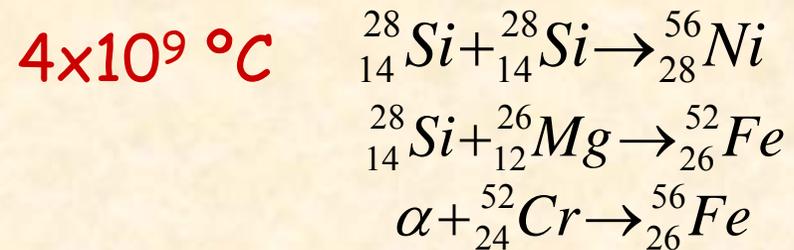
¿Cómo se producen los elementos más pesados que existen en la naturaleza?



....Y todos los elementos ligeros hasta Fe y Ni se distribuyen por todo el Universo



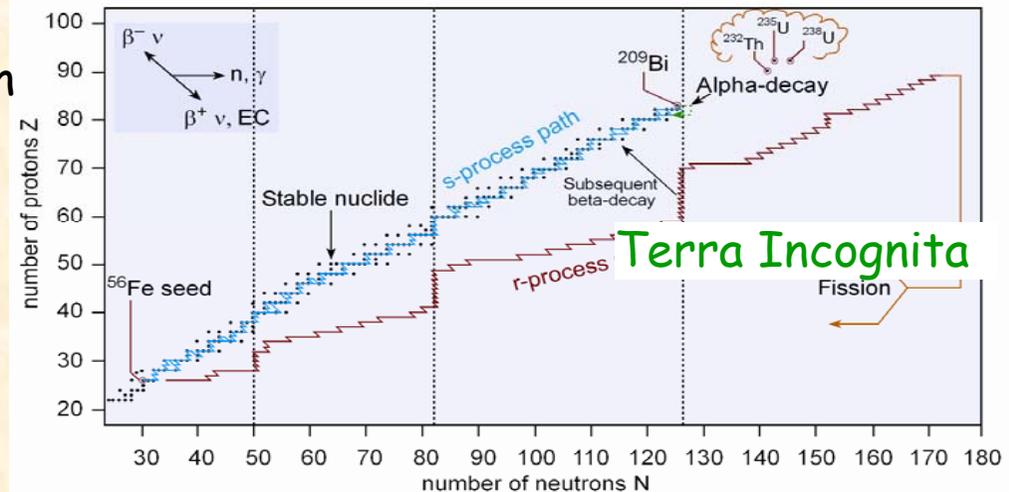
Hay tal flujo de fotones y  $\gamma$  que sólo los núcleos más estables sobreviven.

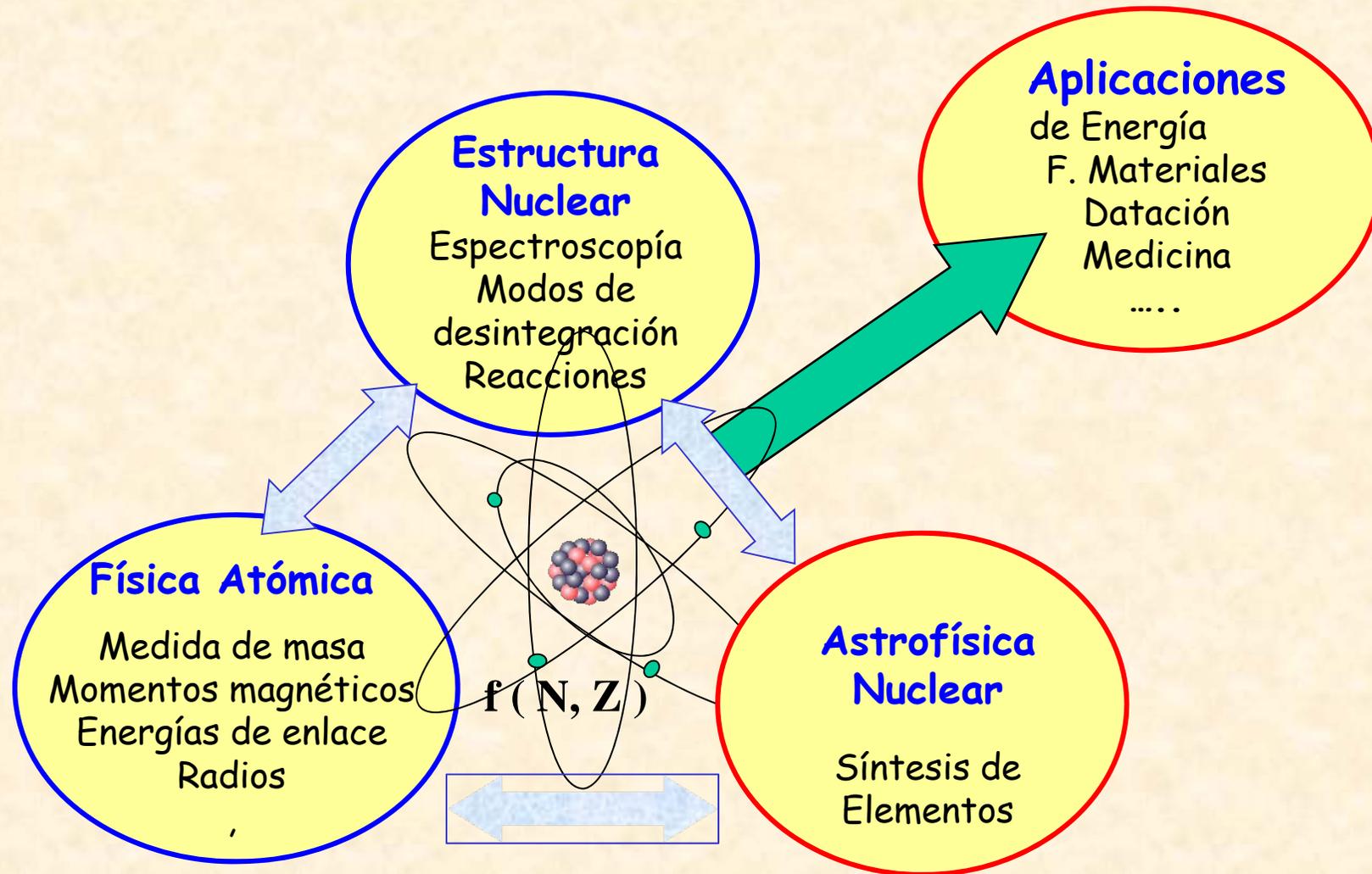


## ¿Y los elementos más pesados?

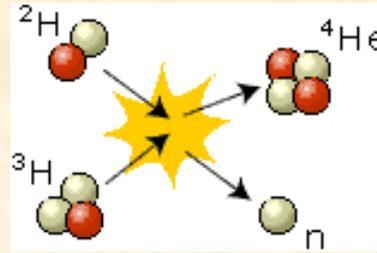
Gigantes Rojas generan gran cantidad de  $n$   
 $\Rightarrow$  absorbidos por núcleos estables generan núcleos próximos hasta Pb (**s-process**).

U y Th y 1/2 estables ( $Z > 28$ ) se producen en grandes explosiones (supernovas) que inician el proceso rápido **r-process**  $\Rightarrow$  **Necesidad de producir éstos núcleos en laboratorio.**





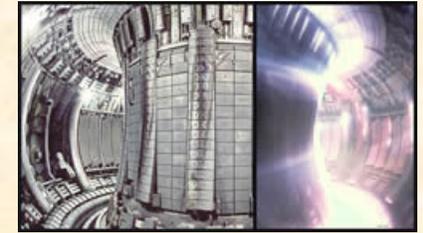
## Reacciones de fusión



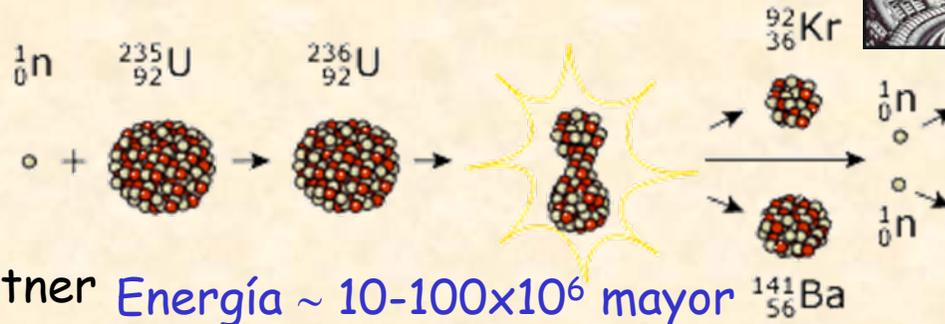
17.6 MeV  $\Rightarrow$  Energía del Futuro

JET, UK

ITER, Fr

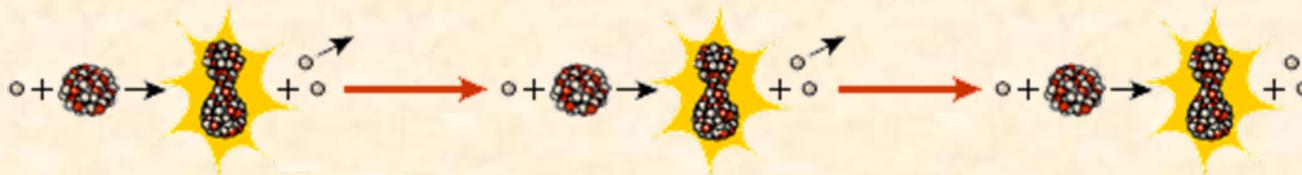


## Reacciones de fisión

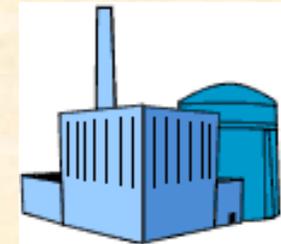


1938, Otto Hahn & Lise Meitner **Energía  $\sim 10-100 \times 10^6$  mayor que en reacciones químicas**

## Reacciones en cadena / primer reactor E. Fermi 1942



## No controlada, 1945



Central Nuclear, 1954 en Obninsk, Rusia

## ➤ Física de Superficies

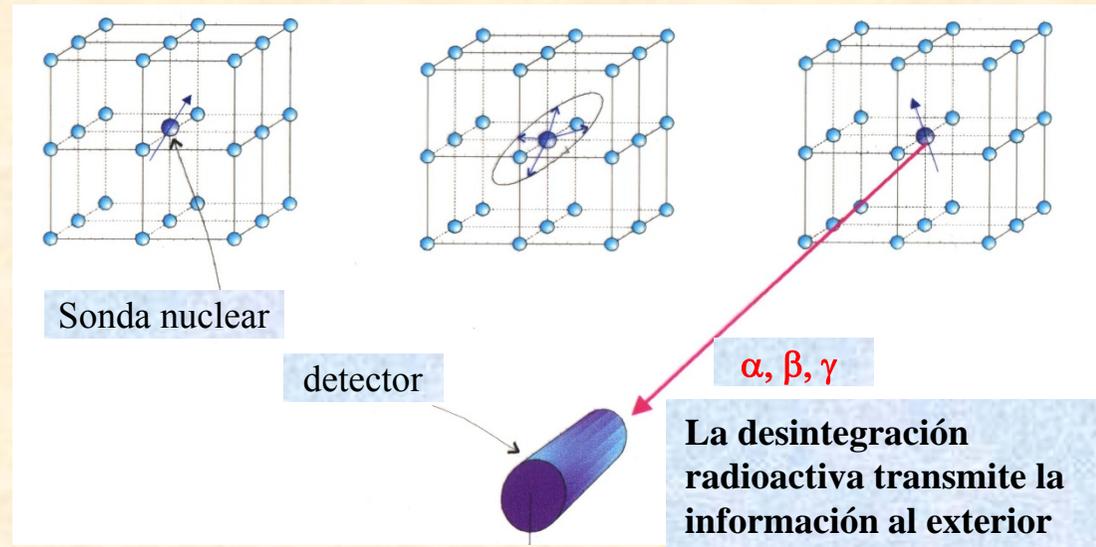
Los núcleos radioactivos se usan como "espías" (PAC) ⇒  
 -semiconductores de alta tec.  
 -como dopantes.

## ➤ Datación

- Obras de arte
- Arqueología..

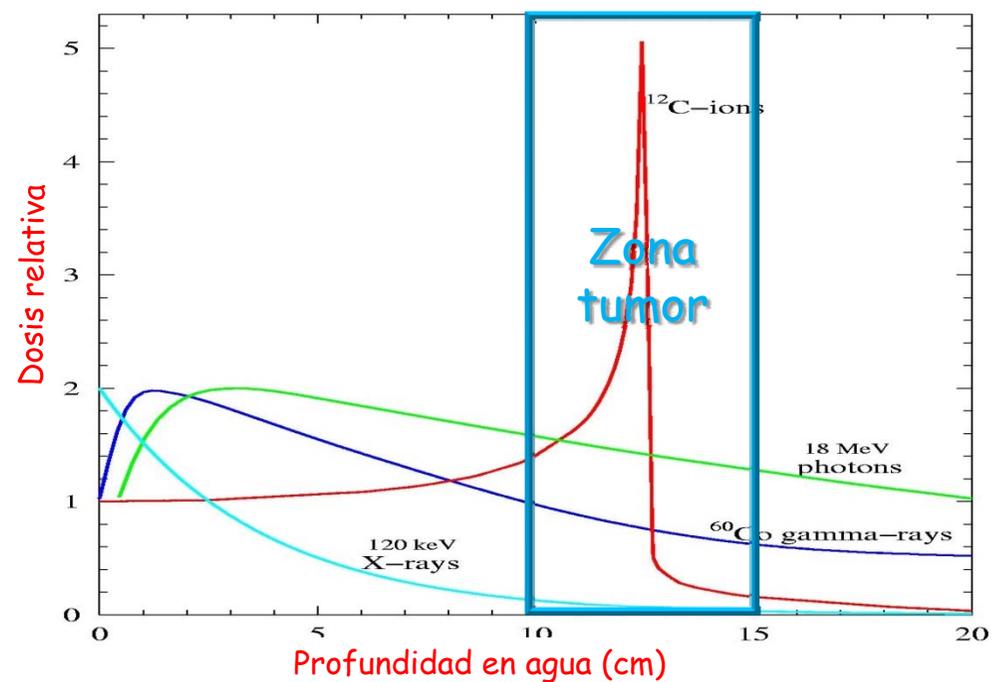
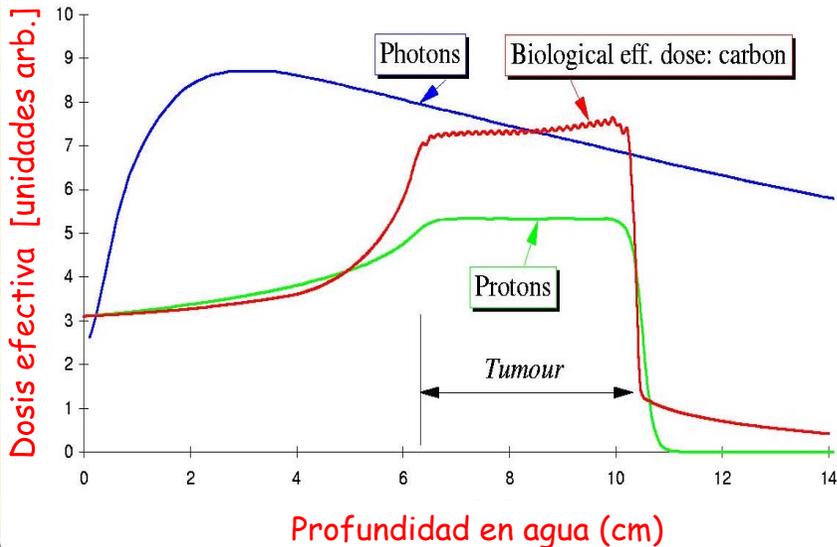
## ➤ Ciencias de la Vida

- Trazadores (1925...)
- Diagnóstico
- **Terapia**



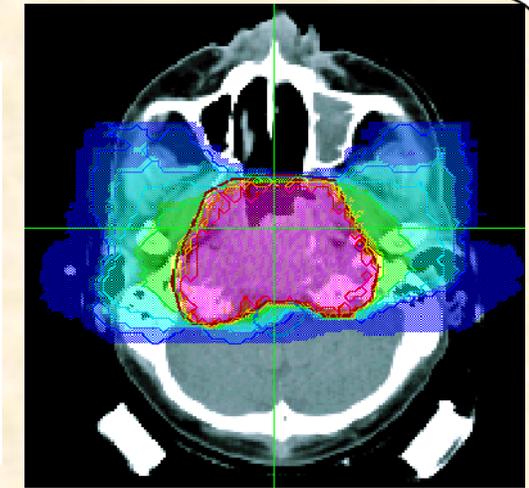
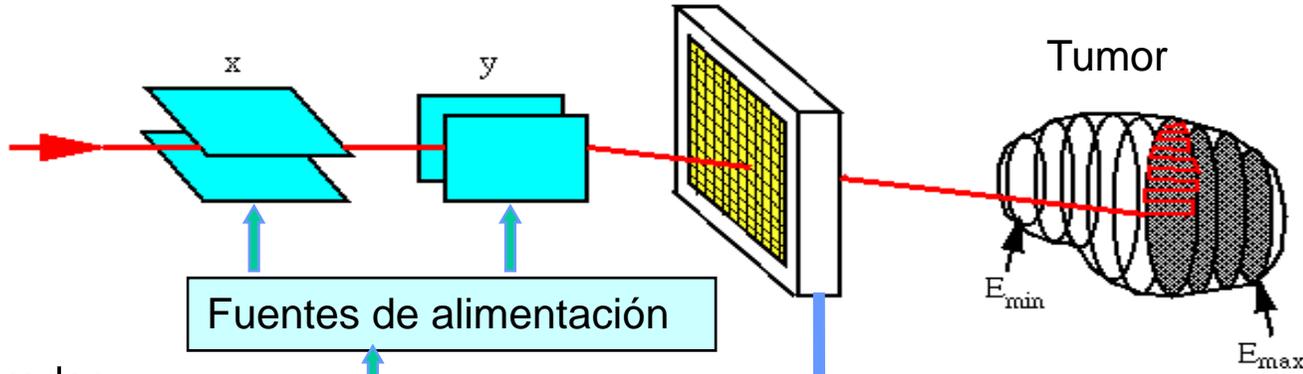
50 pacientes tratados anualmente desde dic. 1997

Propiedades clínicas importantes de los iones pesados



Mejora en la eficiencia biológica

Imanes de barrido rápido



Tratamiento Tumor cerebral

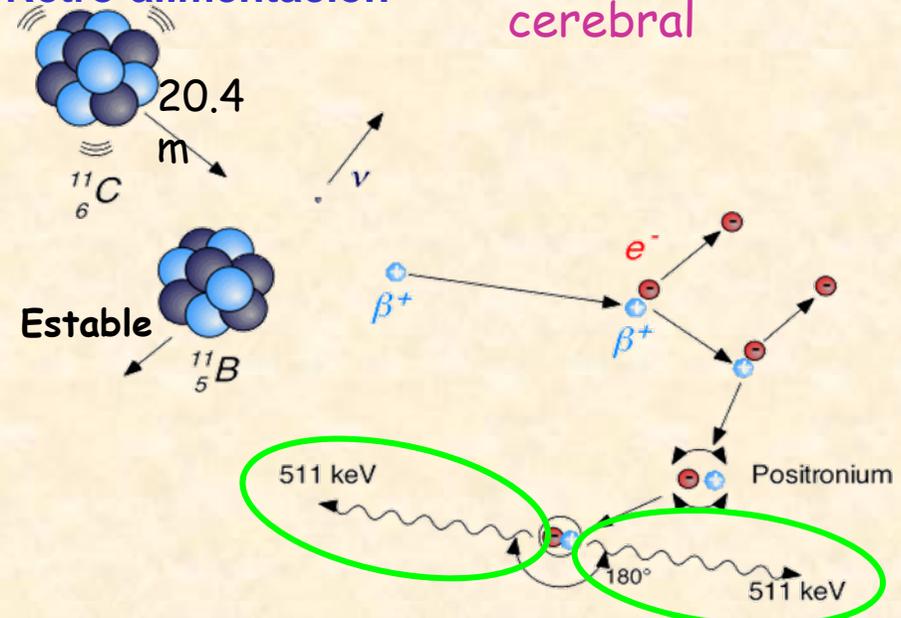
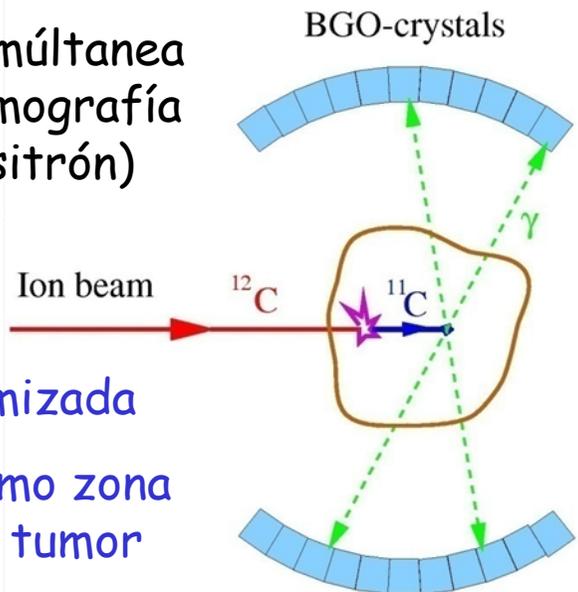
Operador

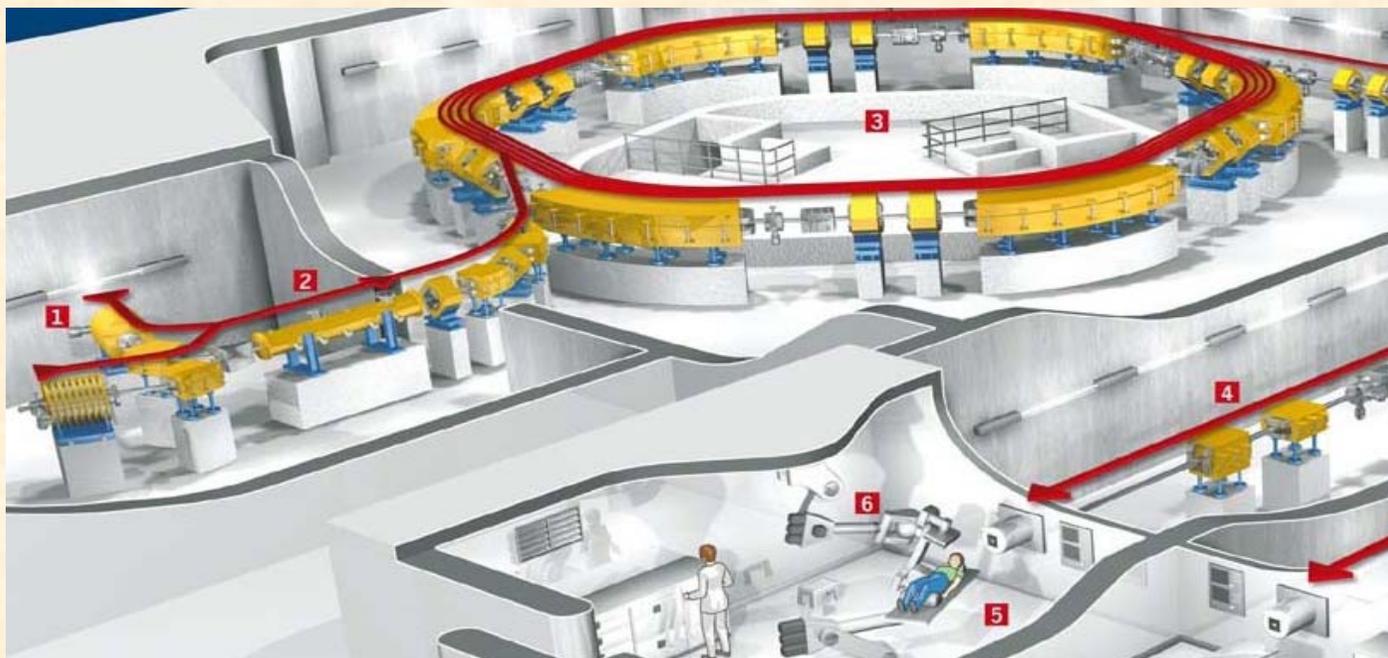
**Sistema de Control de Terapia**

Intensidad + posición  
Retro-alimentación

Diagnosis simultánea con PET (tomografía electrón-positrón)

Dosis minimizada  
Ajuste máximo zona irradiada a tumor





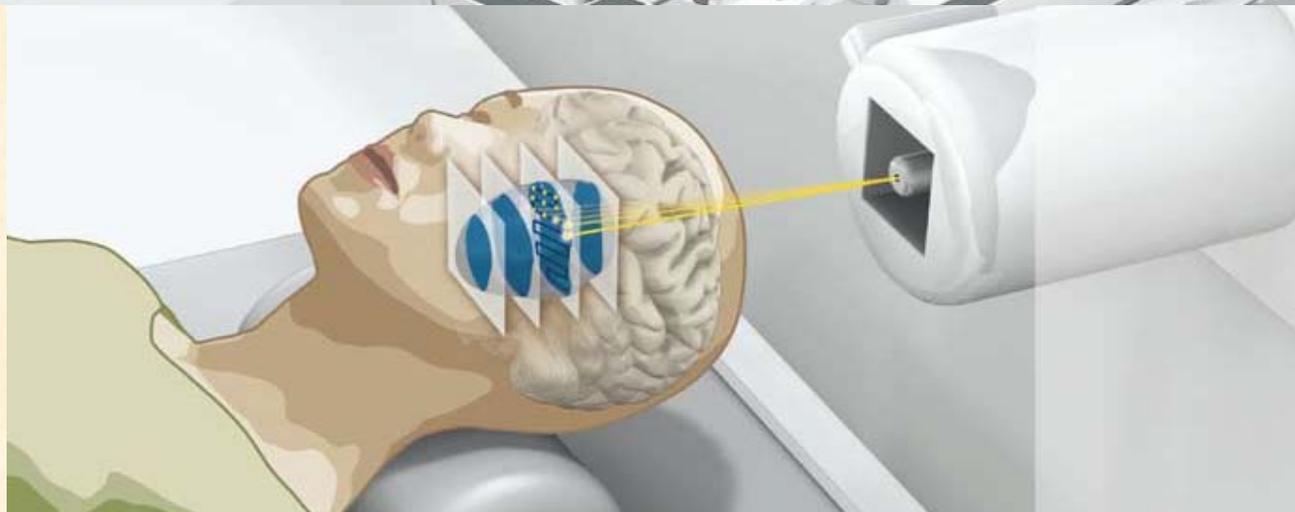
Este centro, realizará terapia con protones e iones pesados.

Tiene permiso para tratar pacientes desde 2 Nov 2009

Esperado 1300 Pacientes/año

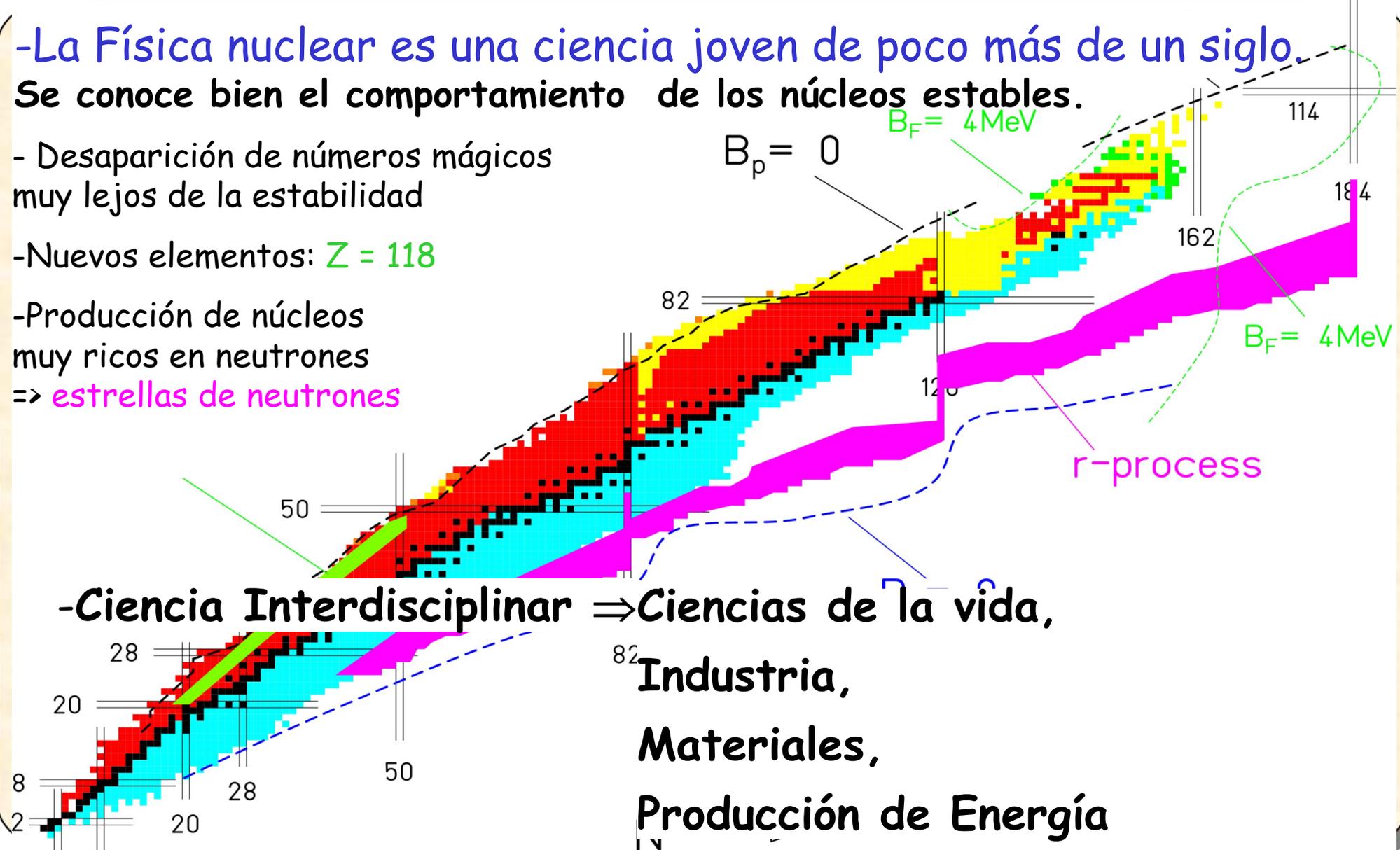
Tratará tumores de difícil acceso hasta 30 cm.

1. Fuente de Iones de  $\text{CO}_2$ , libera  $\text{C}_2$  ionizado.
2. Acelerador lineal a 10 % de la velocidad de la luz,  $c$ .
3. Síncrotrón acelera iones de  $\text{C}_2$  hasta 73 % de  $c$ .

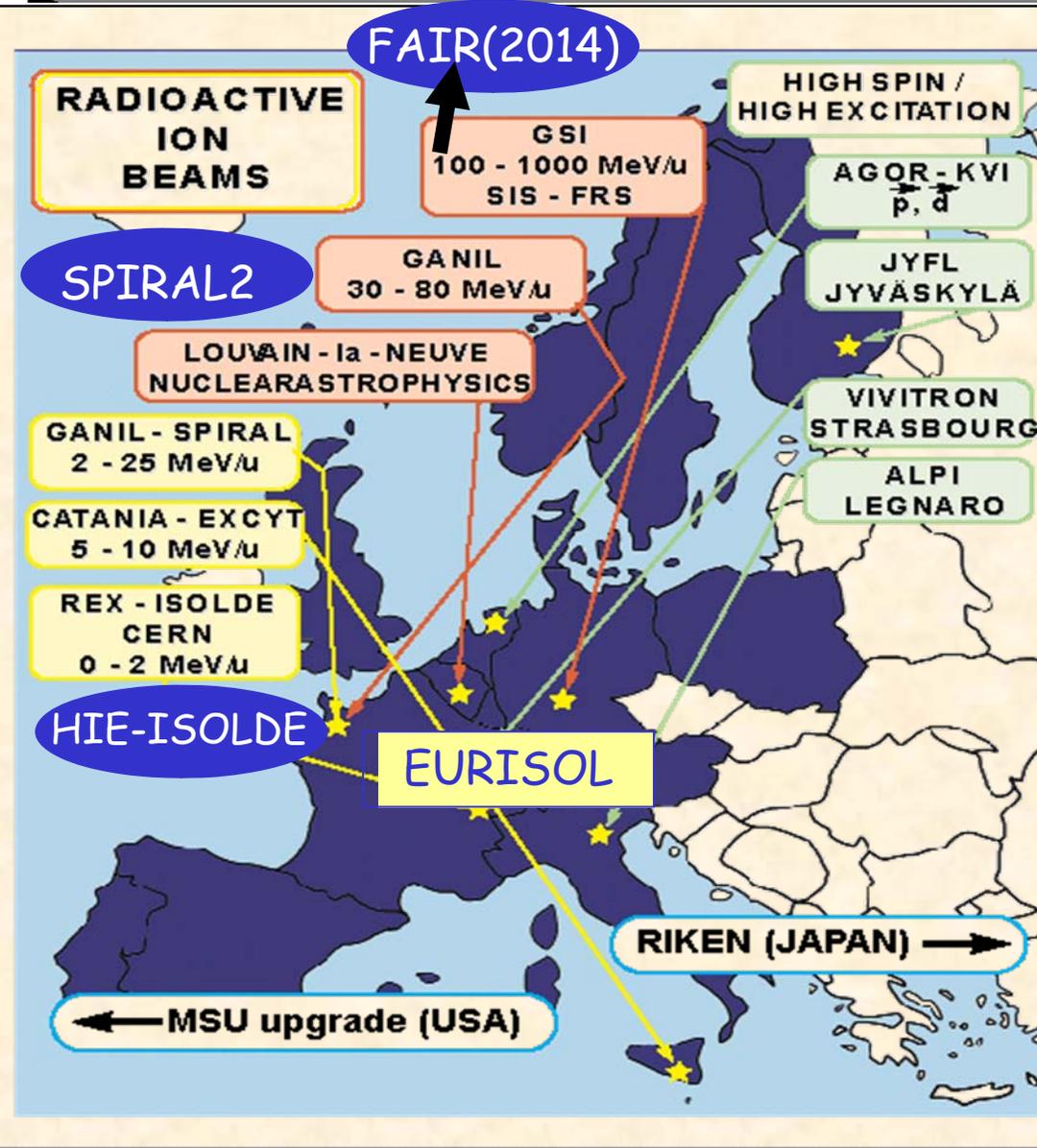


-La Física nuclear es una ciencia joven de poco más de un siglo.  
Se conoce bien el comportamiento de los núcleos estables.

- Desaparición de números mágicos muy lejos de la estabilidad
- Nuevos elementos:  $Z = 118$
- Producción de núcleos muy ricos en neutrones  $\Rightarrow$  *estrellas de neutrones*



-Ciencia Interdisciplinaria  $\Rightarrow$  Ciencias de la vida,  
Industria,  
Materiales,  
Producción de Energía



Sin grandes inversiones en desarrollo y mejora de aceleradores

Y detectores

⇒ El avance será muy difícil

**i Gracias por vuestra atención!**

[3w.nobel.se/physics/laureates/](http://3w.nobel.se/physics/laureates/)

[3w.nobel.se/physics/educational/index.html](http://3w.nobel.se/physics/educational/index.html)