

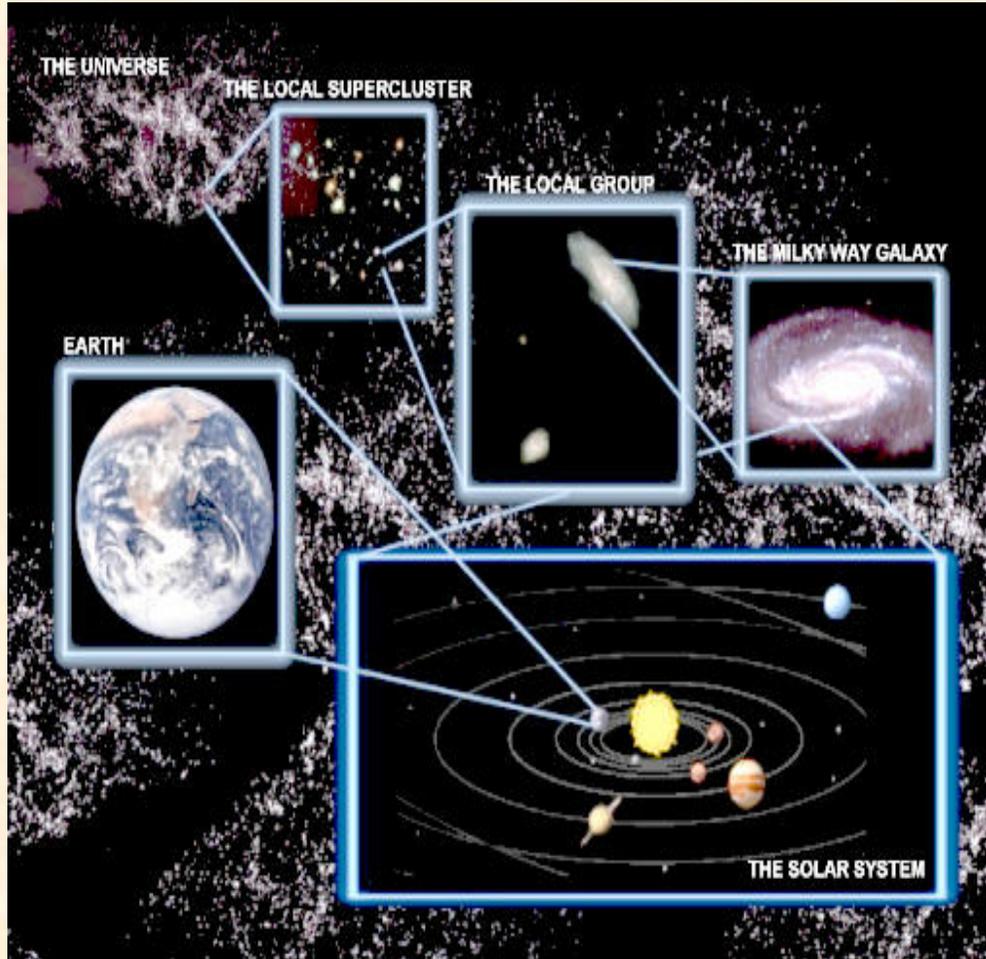
Viaje al Interior del Núcleo



- **La Escala Nuclear**
- **Descubrimiento del Mundo Subatómico**
- **Estructura Nuclear y Reacciones:
Fenómenos Sorprendentes**
- **Aplicaciones: Terapia con hadrones**

Enrique Nácher González
Vicente Pseudo Fortes

Inst. Estructura de la Materia, CSIC



La Vía Láctea mide unos
100.000 años luz.
 $1 \text{ ly} = 9.5 \times 10^{15} \text{ m} \sim$
 $\sim 10^{16} \text{ m}.$

Nuestra Galaxia (no es una
galaxia especial) tiene
unas dimensiones de 10^{21}
m.

100000000000000000000
km

The Earth and the orbit of the Moon.



10^{+9} meters

1 million kilometers

The Western Hemisphere of the Earth.



10^{+7} meters

10.000 kilometers

Southwest Tallahassee, Florida.



10^4 meters

10 kilometers

Top of large Oak tree.



10^1 meters

10 meters

Oak tree leaves at actual size.



10^{-1} meters

10 centimeters

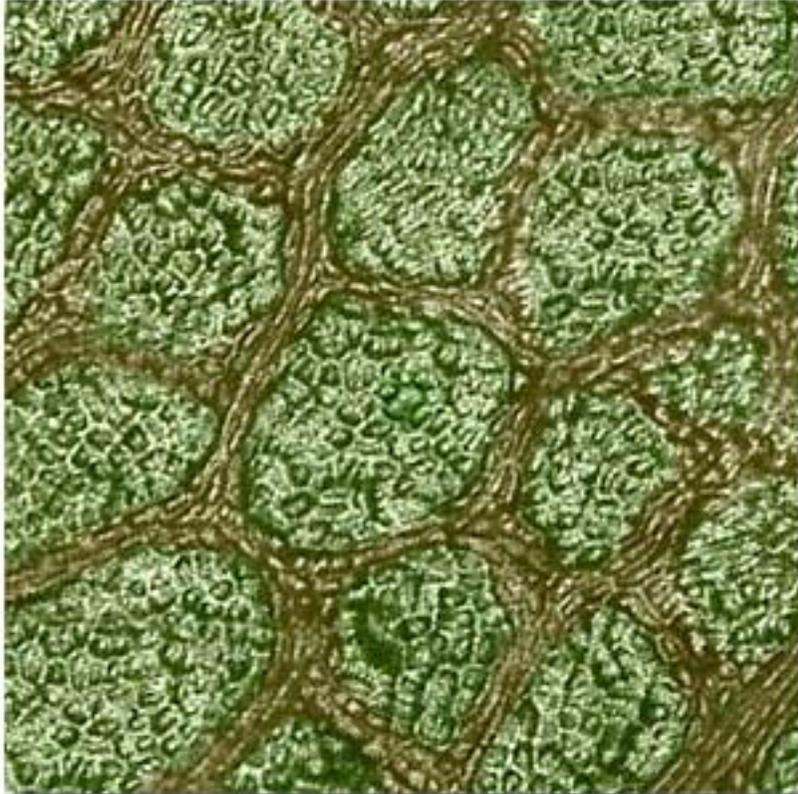
Surface of an Oak leaf magnified 10 times.



10^{-2} meters

1 centimeter

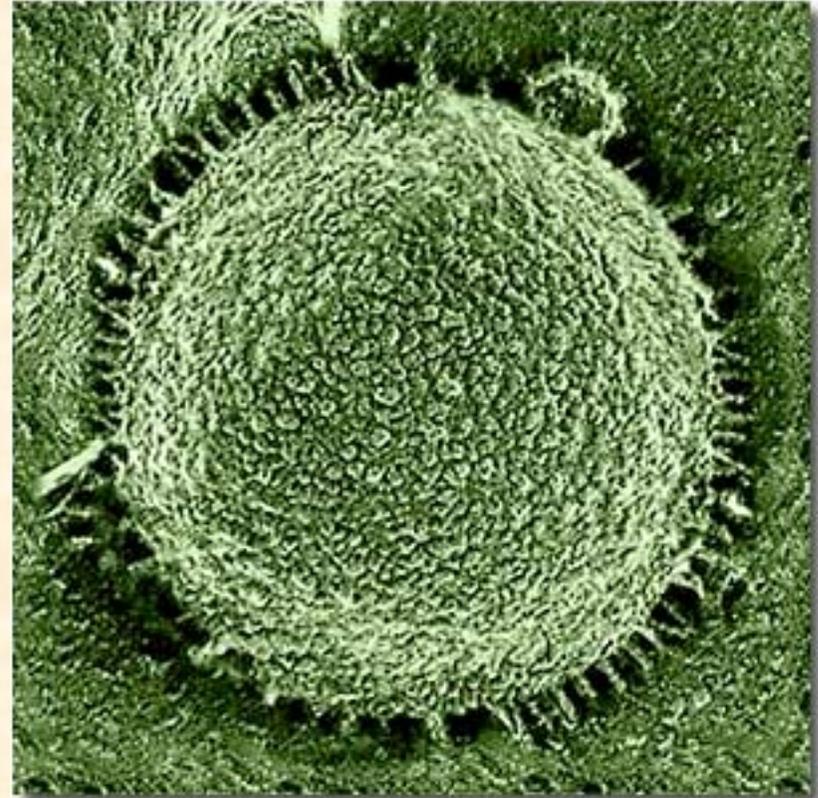
Cells on the leaf surface.



10^{-4} meters

100 micrometers

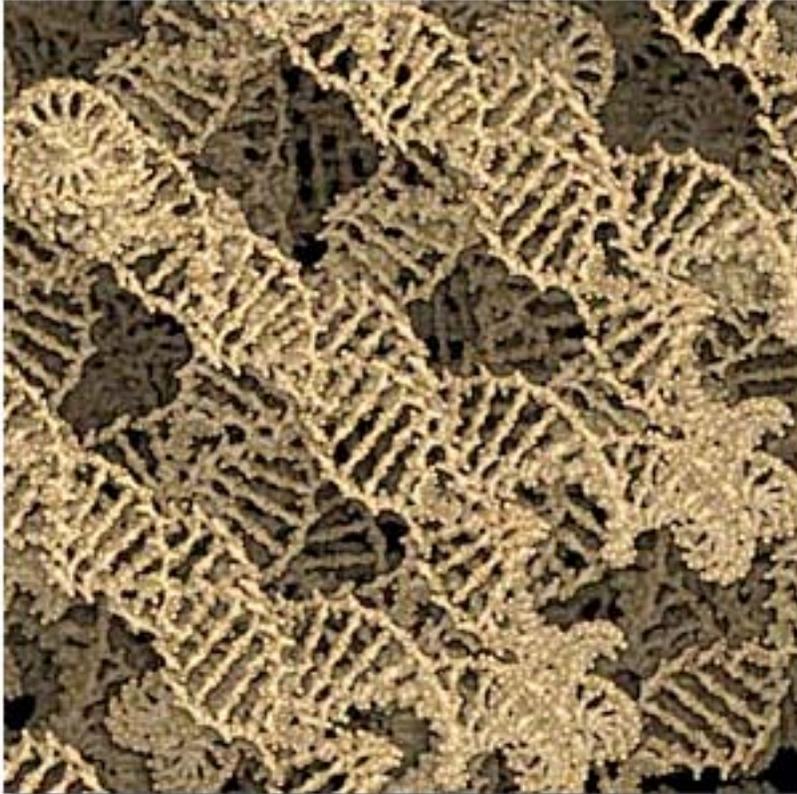
The nucleus of a leaf cell.



10^{-6} meters

1 micrometer

Individual DNA strands.



10^{-8} meters

10 nanometers

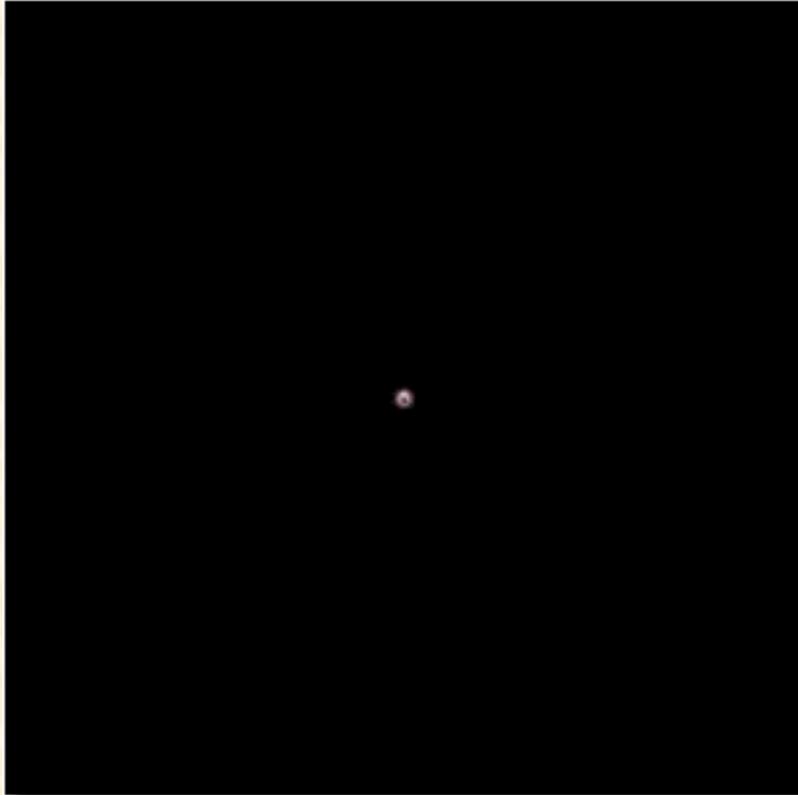
DNA nucleotide building blocks.



10^{-9} meters

1 nanometer

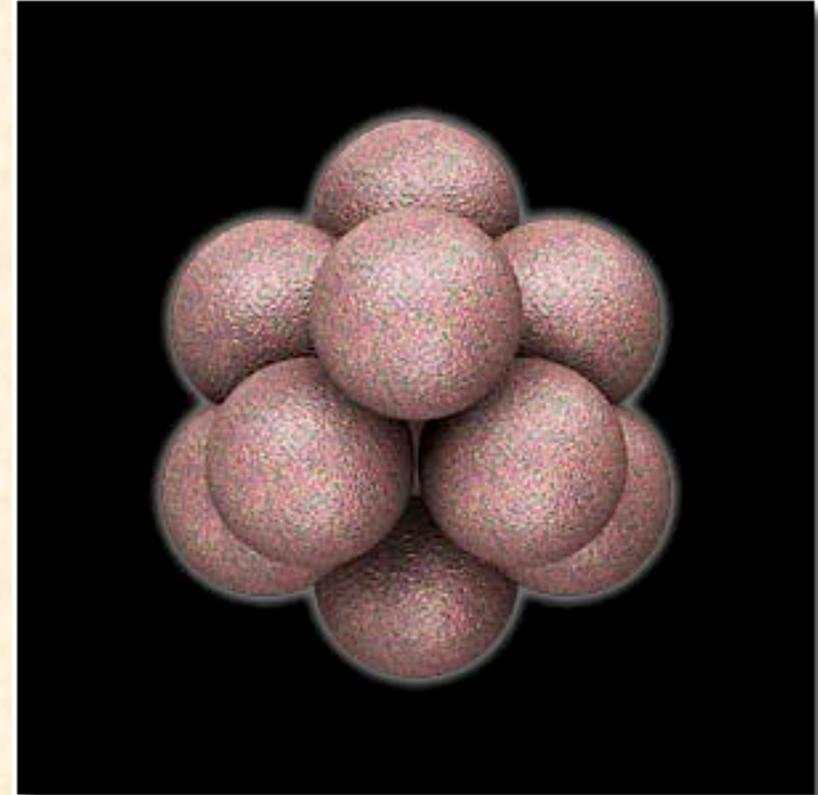
Empty space between inner shell and nucleus.



10^{-12} meters

1 picometer

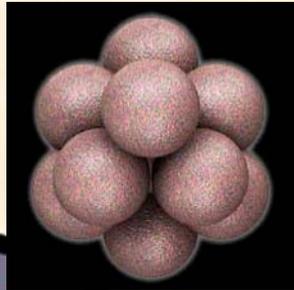
Nucleus of the carbon atom.



10^{-14} meters

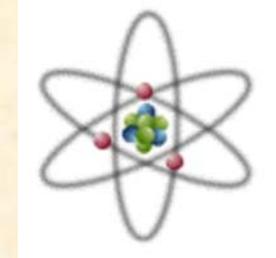
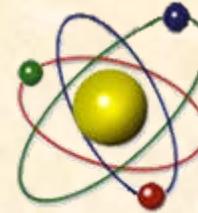
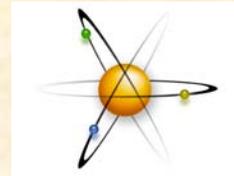
10 femtometers

Núcleo de C

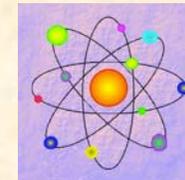
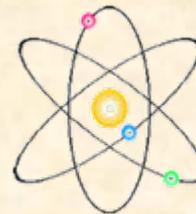


Átomos de C

x 10000

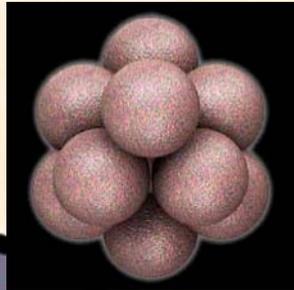


MUY MALA
REPRESENTACIÓN
DEL ÁTOMO !!!



A escala: si representamos un núcleo de C como una canica en medio del Santiago Bernabeu, un átomo de C equivaldría a tener electrones dando vueltas alrededor de la canica por las gradas del estadio.

Núcleo de C

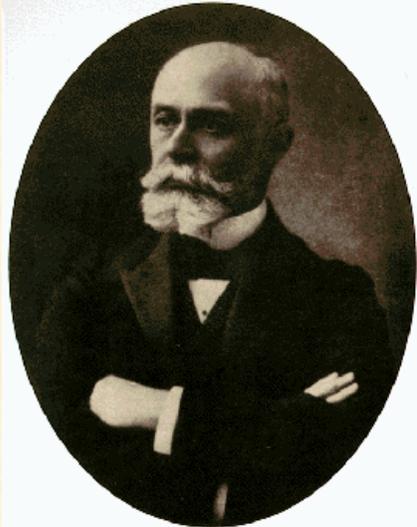


x 10000

Átomos de C



A escala: si representamos un núcleo de C como una canica en medio del Santiago Bernabeu, un átomo de C equivaldría a tener electrones dando vueltas alrededor de la canica por las gradas del estadio.



Henri Becquerel Premio Nobel 1903

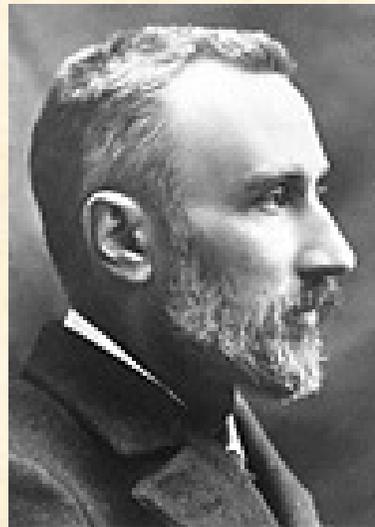
"in recognition of the extraordinary services he has rendered by his discovery of spontaneous radioactivity"

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

- Independiente del compuesto químico
- En ausencia de descargas



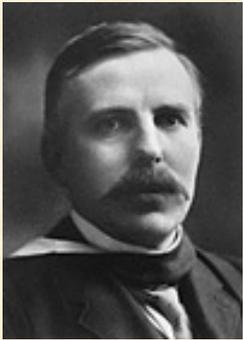
Marie Curie



Pierre Curie

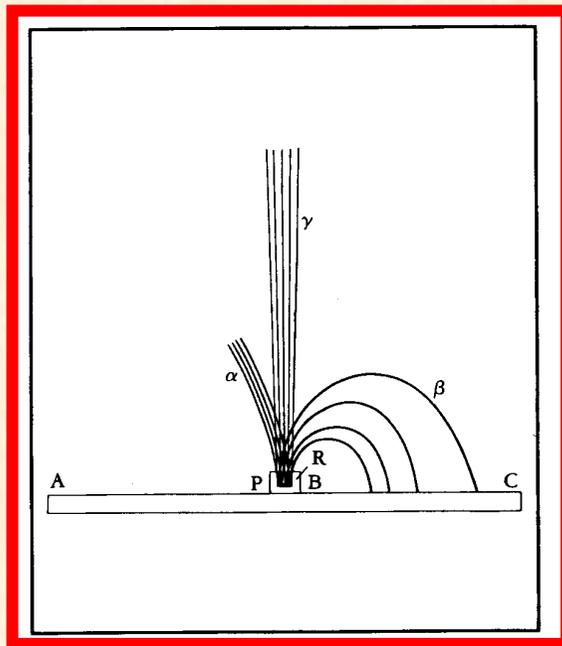
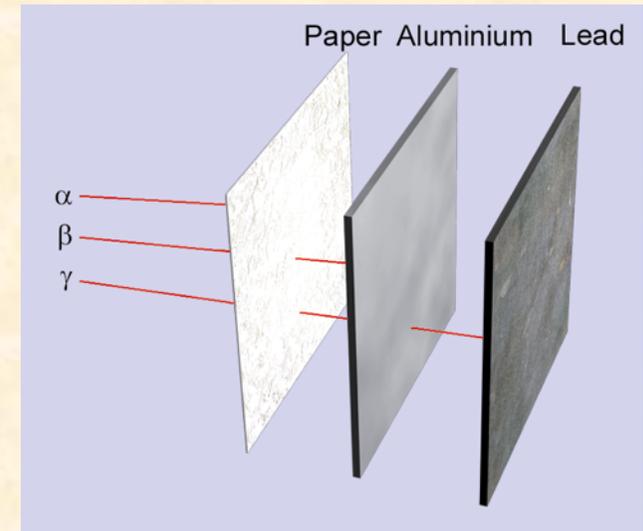
Obtuvieron las mismas propiedades en **sales de Torio**

- Hipótesis: Radiación propiedad atómica, **Radiactividad**
- En Bismuto descubrieron un elemento más activo: **Polonio**. En fragmentos de Bario encontraron **Radio**



E. Rutherford

..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: α , β , γ

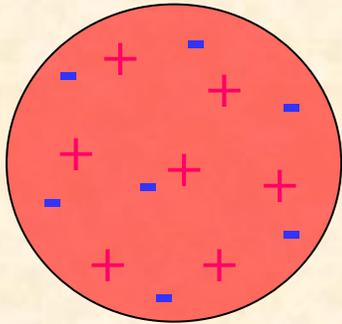


Transmutación

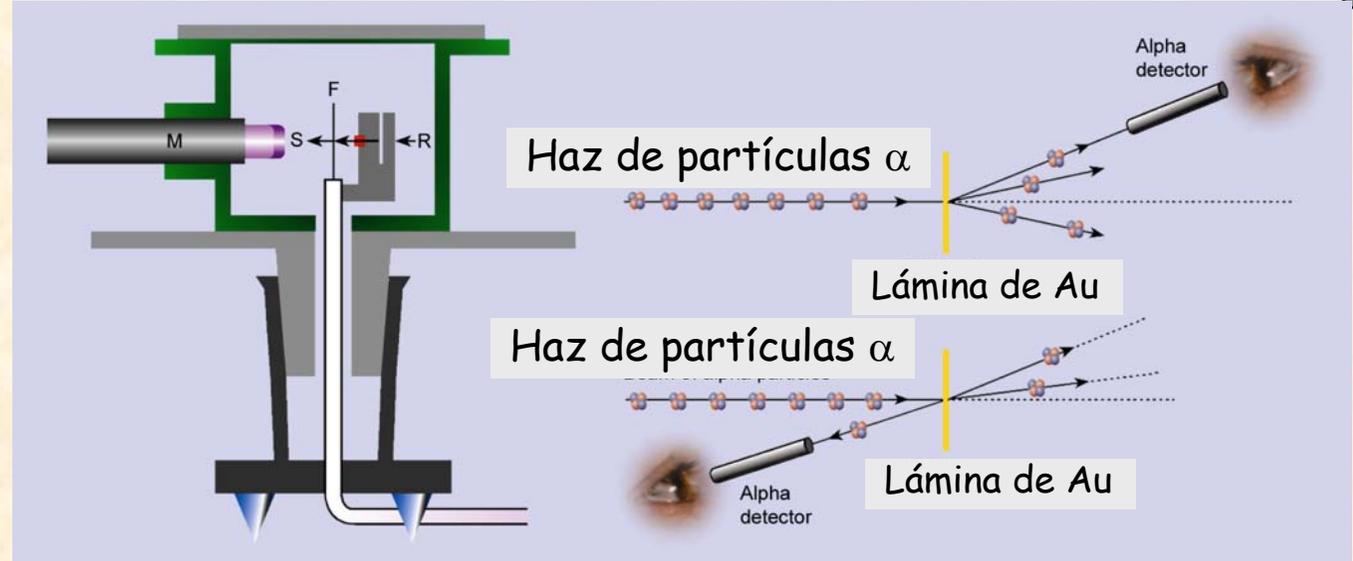
..y **Rutherford** fue a McGill a trabajar con Soddy y descubrieron que **la radioactividad transforma unos elementos en otros (P. Nobel 1908)**

"¡Por Dios, Soddy, no lo llares 'transmutación'! ¡Acabarán con nosotros por alquimistas!"

Modelo de Thomson "plumb pudding"



Rutherford

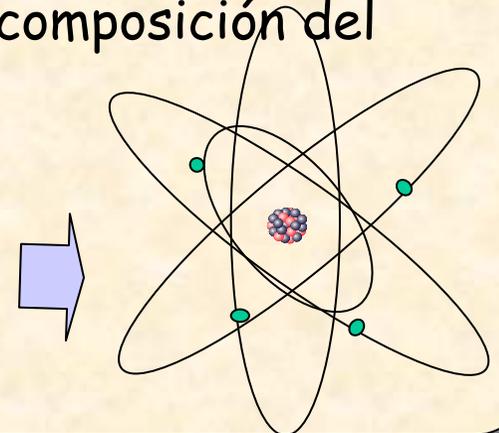


1907, Manchester (UK)

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

Geiger y Marsden observaron
Retrodispersión 1 de cada 20000

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



¿Cuáles son los constituyentes del núcleo?

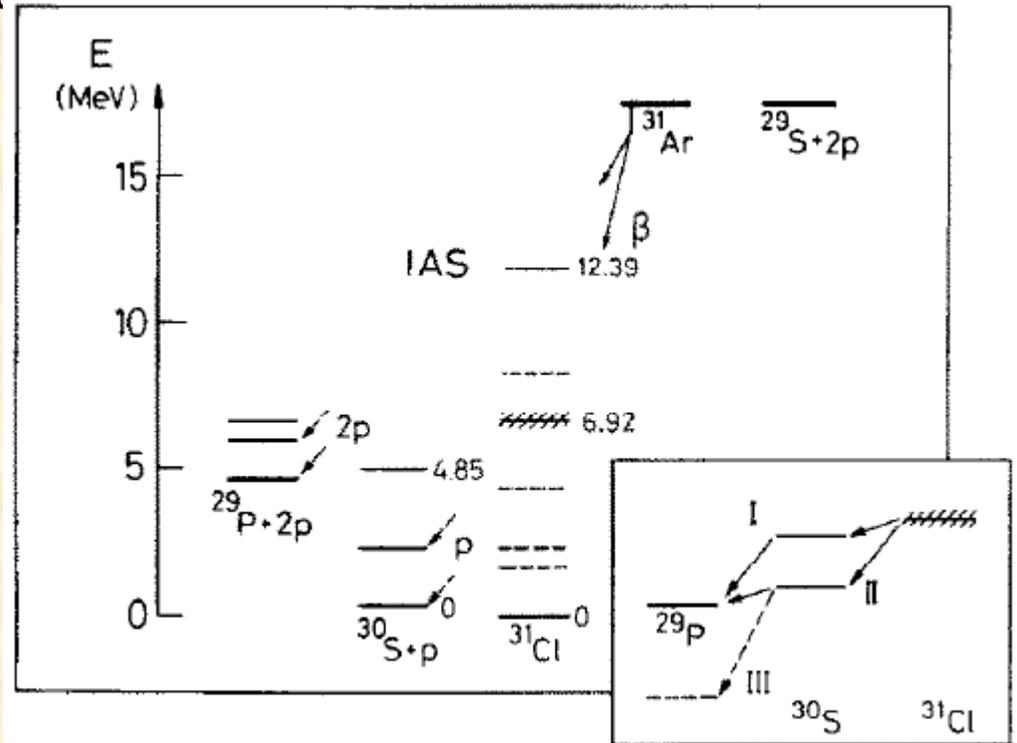
➤ La radioactividad nos dice que los núcleos emiten α , β , γ .

- ¿Está el núcleo formado por α , β ? ii Pero $M_H < M_\alpha$!!
 - Debe estar formado por partículas positivas más pequeñas que la α y que son además constituyentes de ésta: protones
- Si está formado por protones, ¿Cómo puede el N ser neutro si tiene masa $14 \times m_p$ y 7 electrones?
 - Rutherford propuso la existencia de una partícula neutra: el neutrón

Heisenberg propuso que el núcleo era un sistema cuántico que estaba formado únicamente por protones y neutrones.



Naturaleza Clásica



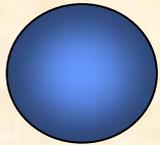
Naturaleza Cuántica

Determinista
Estadística

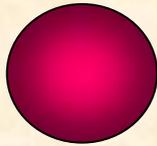


Heisenberg propuso que el núcleo era un sistema cuántico que estaba formado únicamente por protones y neutrones.

...Y los electrones emitidos, ¿de dónde vienen ?



Neutrón



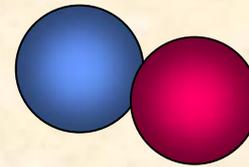
Protón

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

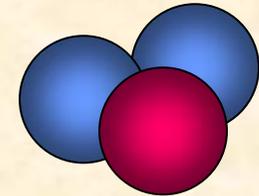
$$m_p = 1.6727 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

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

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

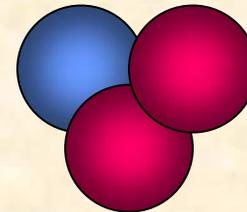


^2H

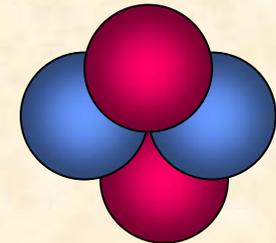


^3H

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

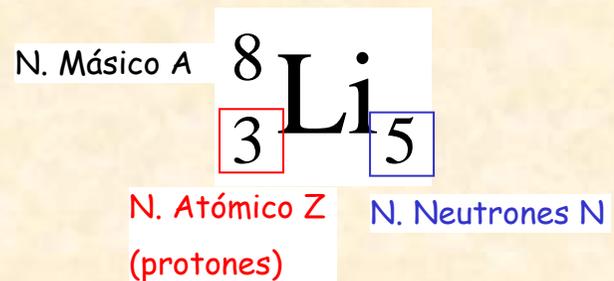
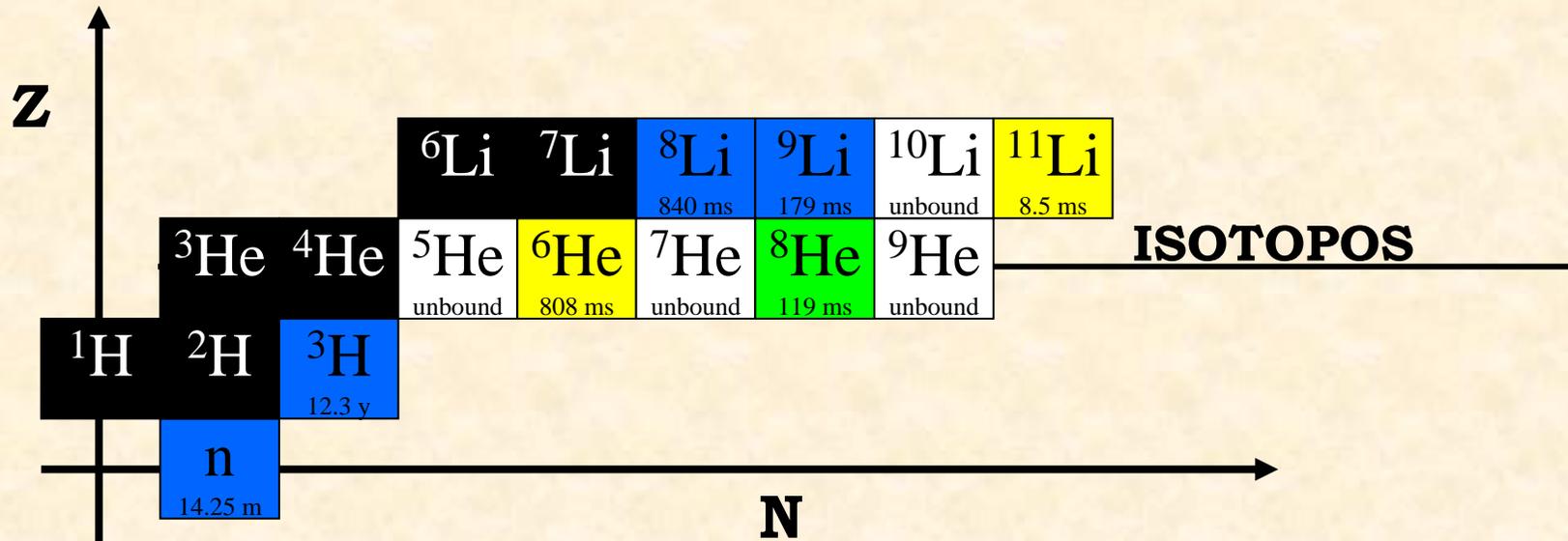


^3He



^4He

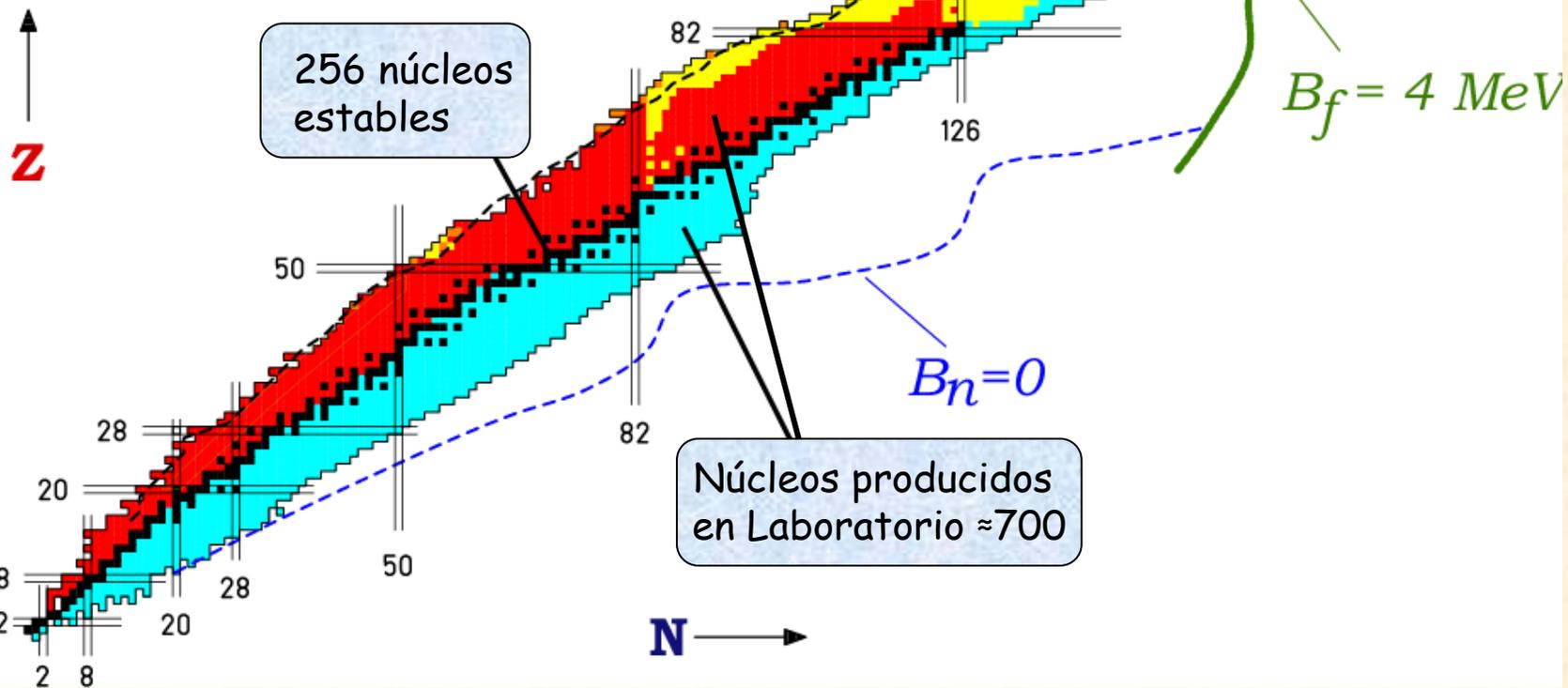
La Tabla de Núclidos: nuestra t. periódica



$$A = Z + N$$

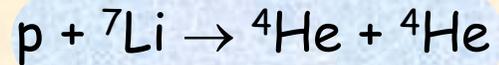
$$M(Z,N) = Zm_p + Nm_n - E$$

- Desintegración β^+ -EC (exceso de p)
- Desintegración β^- (exceso de n)
- Desintegración α (exceso de p y A)
- Fisión (núcleos muy pesados)

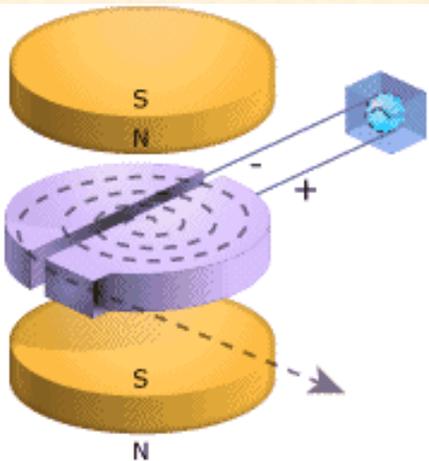




1932 Primera Reacción con protones:



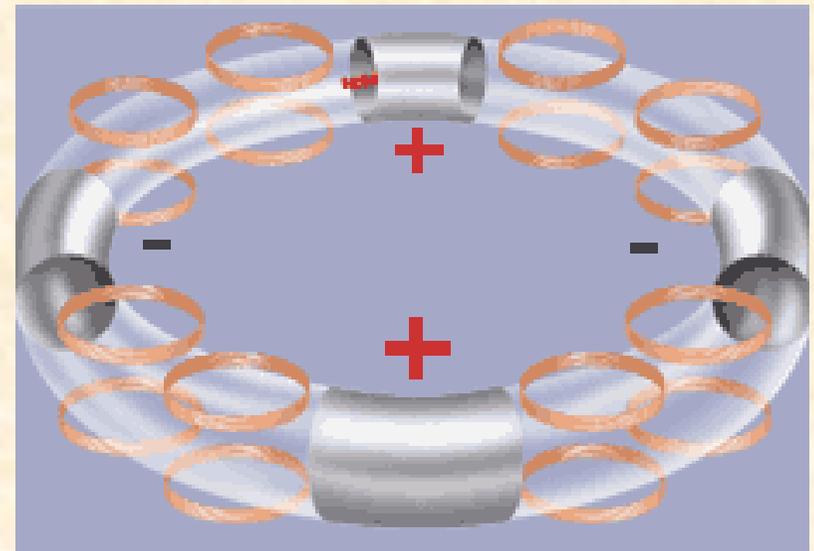
Cockcroft & Walton (PN 1951)
 Construyeron (1930) el primer acelerador para explorar el núcleo



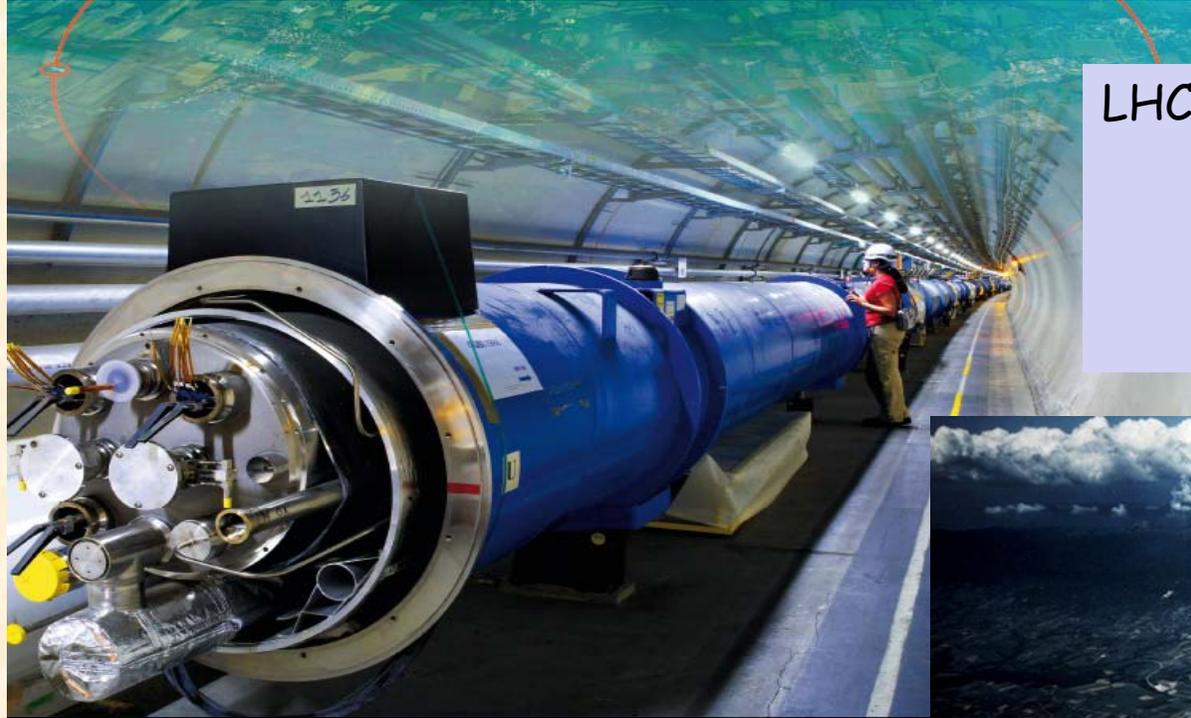
Ciclotrón



Lawrence (PN 1939)
 propuso el ciclotrón



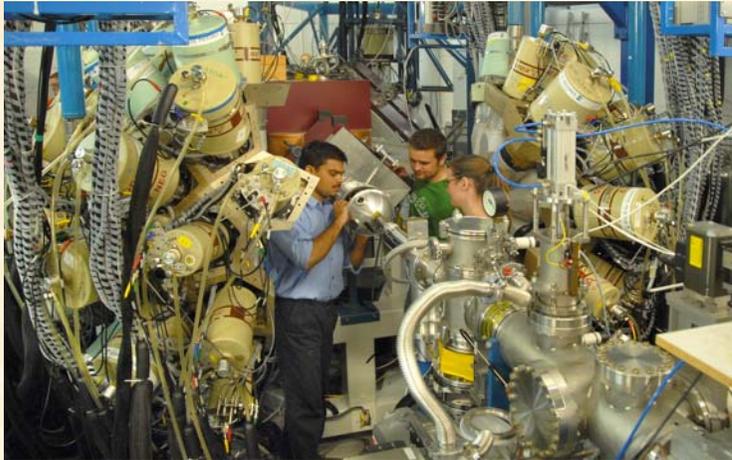
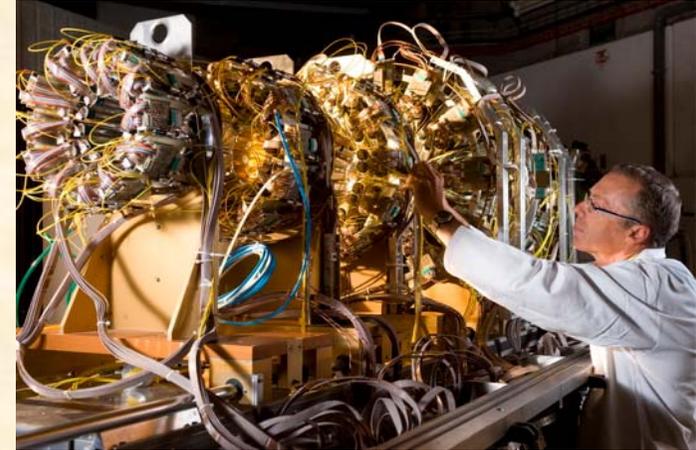
Sincrotrón (1940)



LHC: 27 km de circunferencia
1232 imanes superconductores.
Comenzó a operar en 2009

LHC: Temperatura de LHe ($\approx -270\text{ }^{\circ}\text{C}$)
Ha costado $\approx 2200\text{ M€}$ (JJOO)

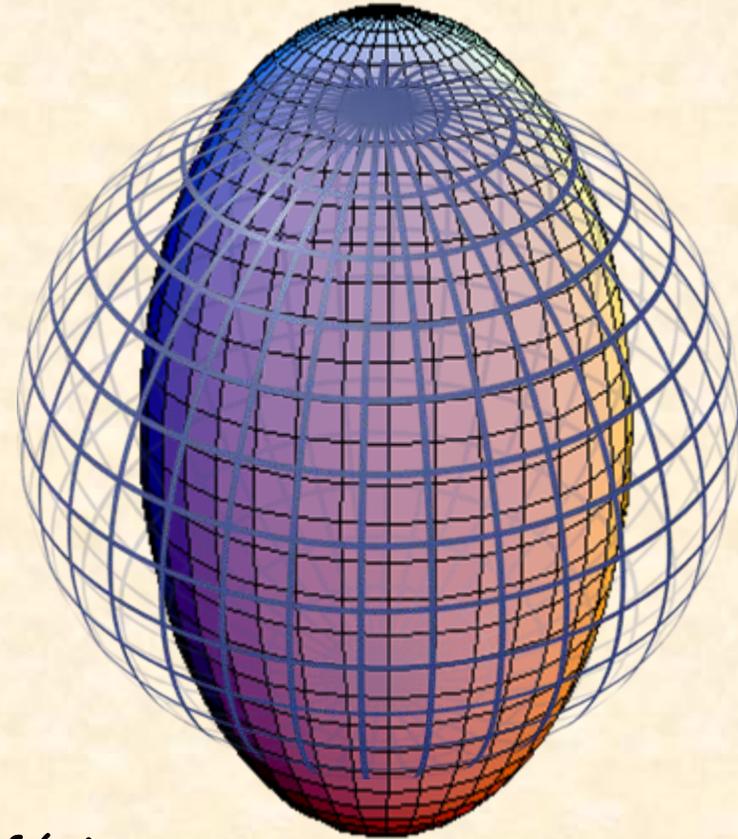
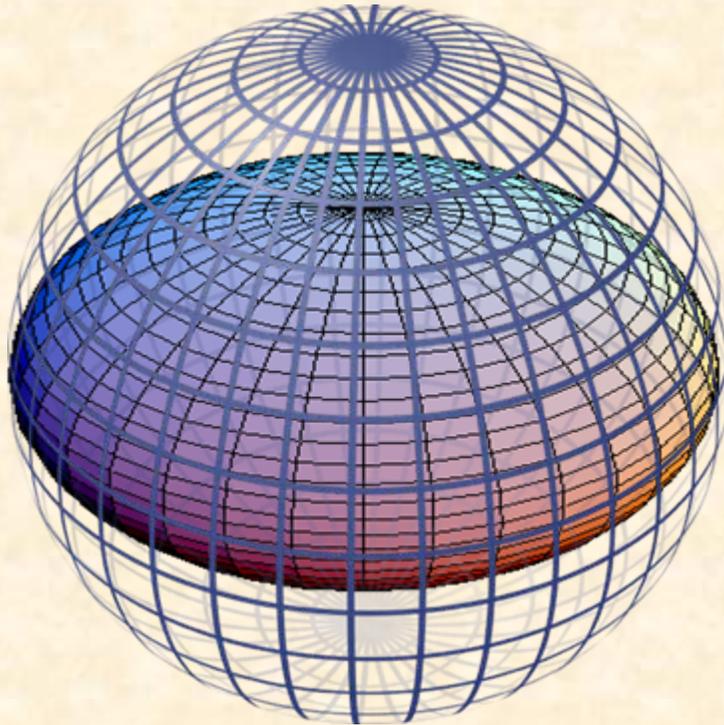




Lo que uno no se imagina de los
núcleos atómicos:

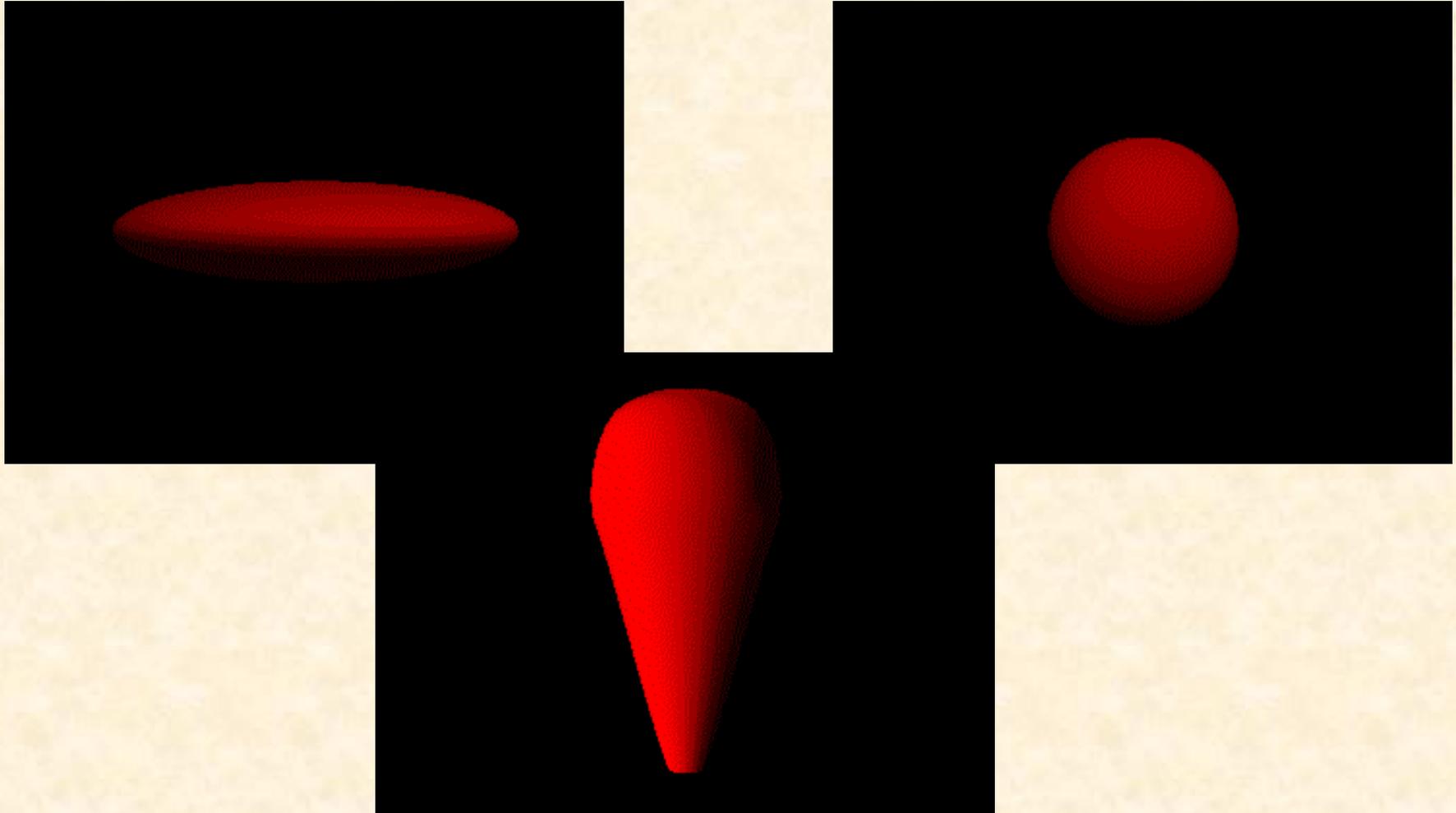
- Deformación Nuclear: Estados Vibracionales y Rotacionales
- Núcleos con Halo
- Resonancias Gigantes
- Radioactividades exóticas
- Elementos super-pesados
- (...)

- Los núcleos no son puntos sin estructura, tienen distintas formas:

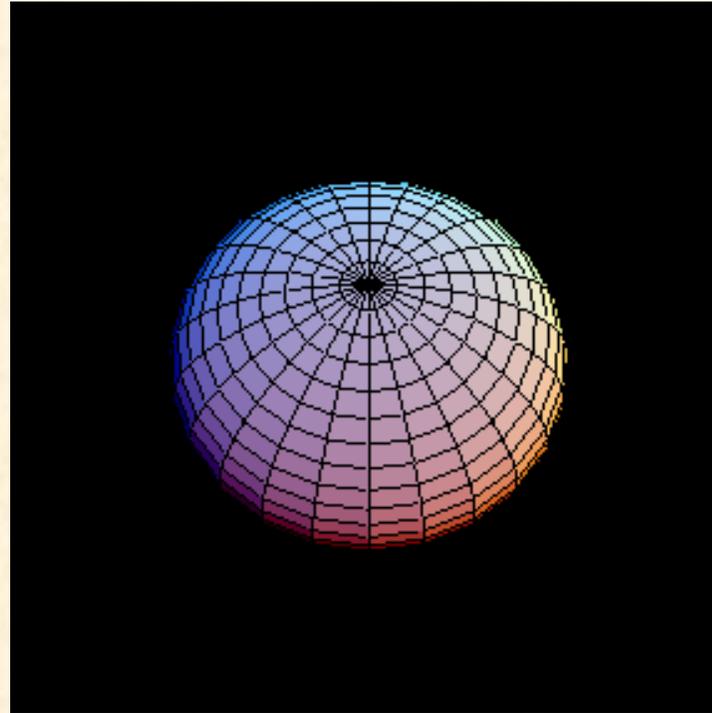
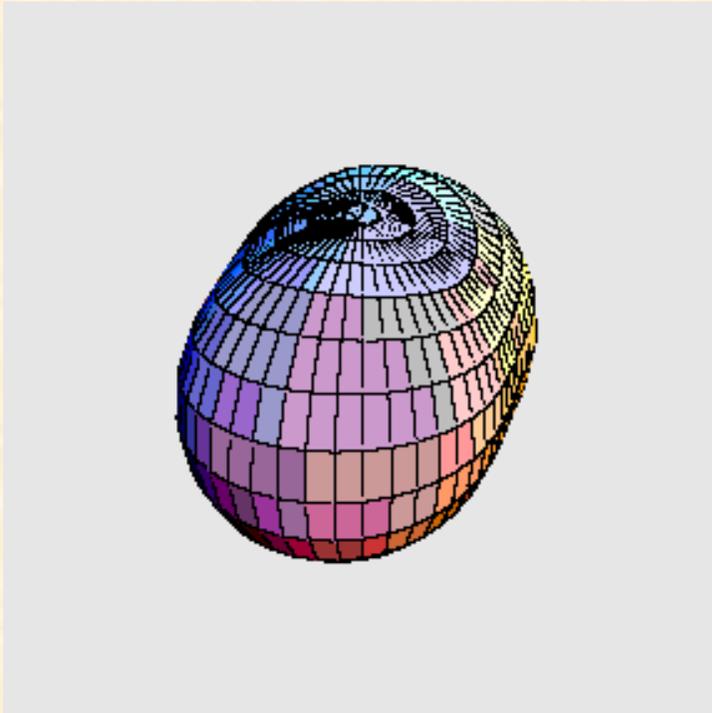


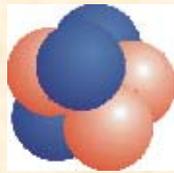
- Núcleo oblató
- Núcleos esféricos
- Núcleo prolato

- Además la forma del núcleo puede oscilar: vibraciones



- Y un núcleo deformado puede rotar:

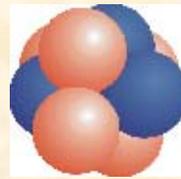




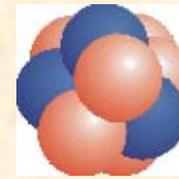
${}^6\text{Li}$



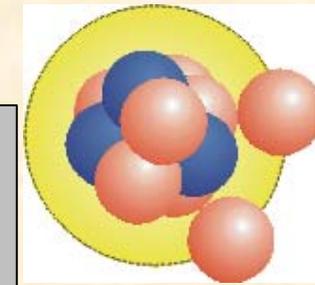
${}^7\text{Li}$



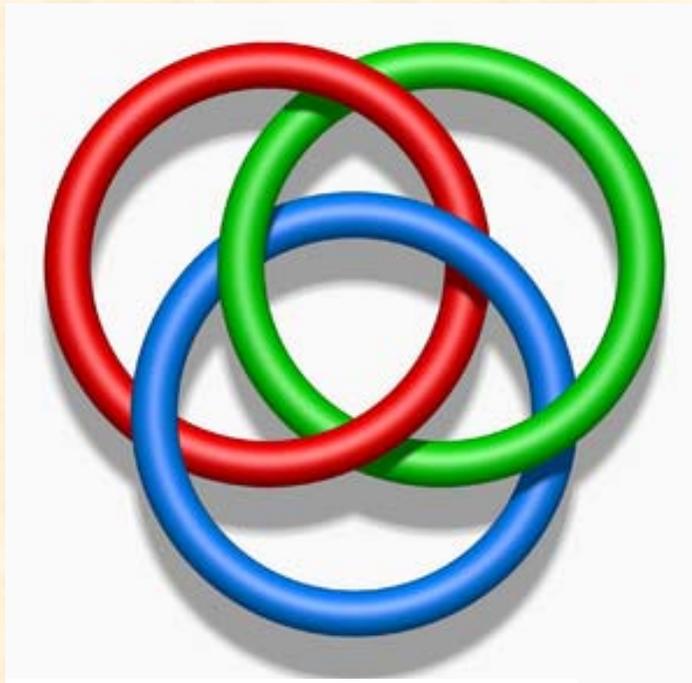
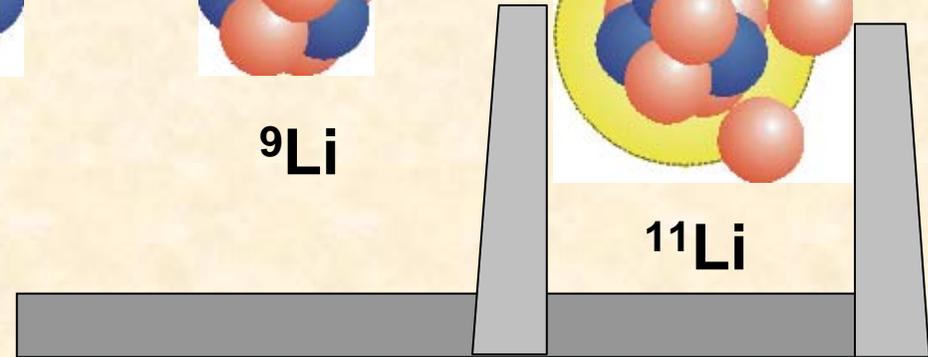
${}^8\text{Li}$



${}^9\text{Li}$

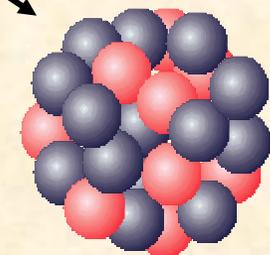
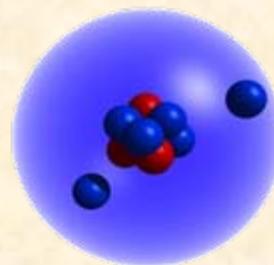


${}^{11}\text{Li}$



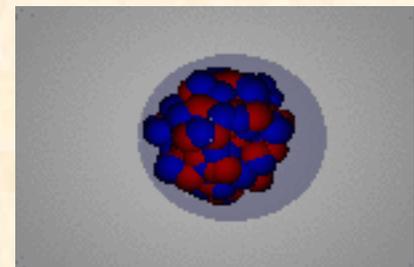
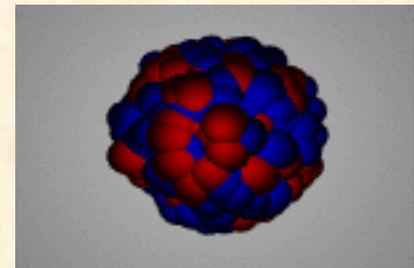
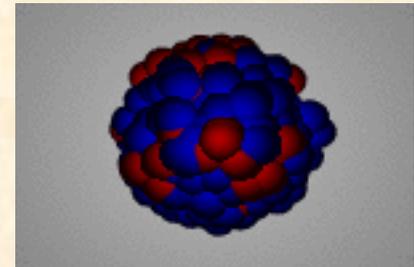
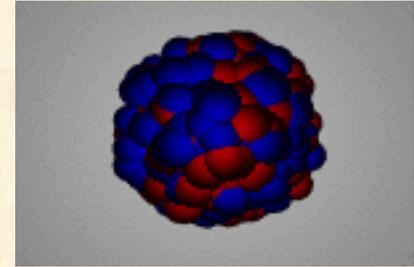
Sistema Borromeo

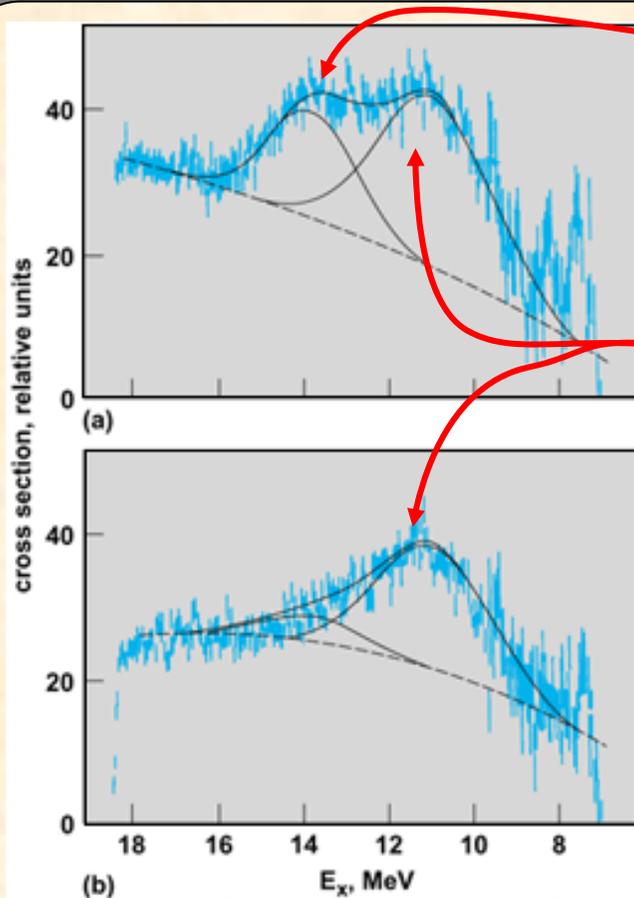
- Efecto observado en reacciones
 - Energía de enlace mínima
- Radios cuadráticos medios
Equivalentes: ${}^{11}\text{Li}$ y ${}^{48}\text{Ca}$



Estados muy colectivos en los que protones y neutrones oscilan en fase o en oposición de fase

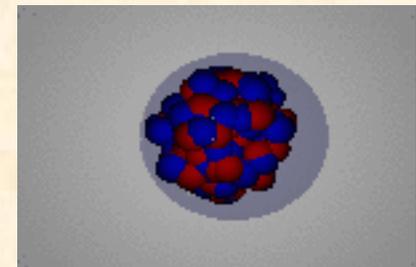
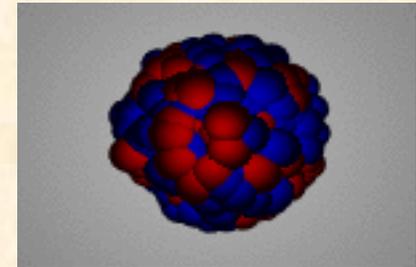
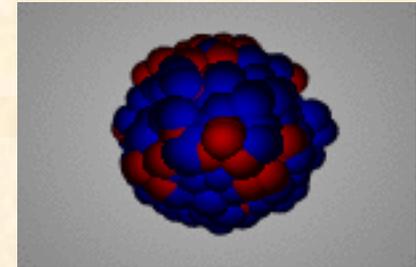
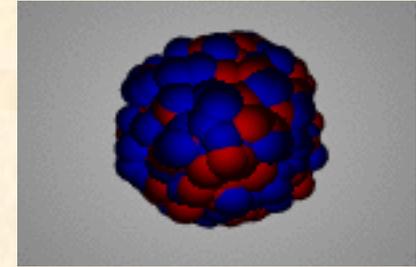
Responden a excitaciones causadas por diversas reacciones nucleares de distinto tipo



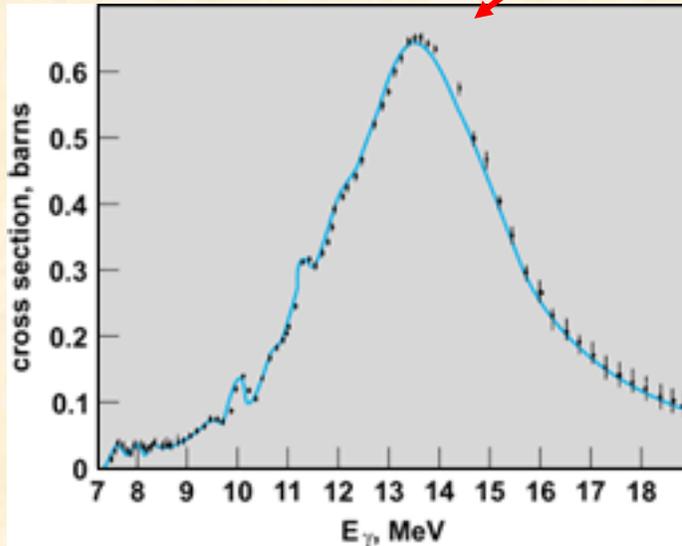


Giant Monopole Resonance

Giant Quadrupole Resonance

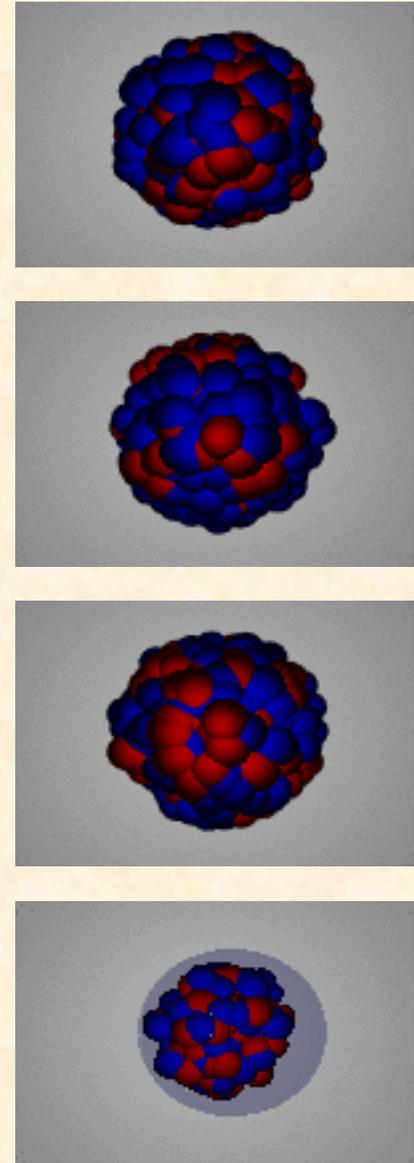


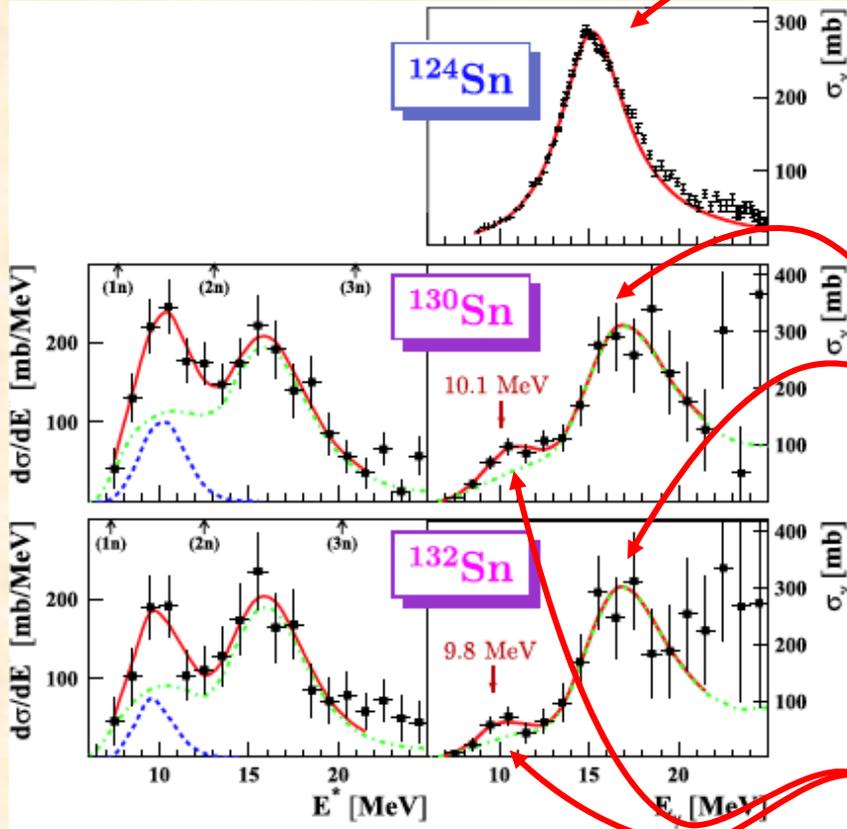
Dispersión de partículas α
(120 MeV) contra blanco de
 ^{208}Pb a dos ángulos distintos



Giant Dipole Resonance

Disociación coulombiana sobre ^{197}Au

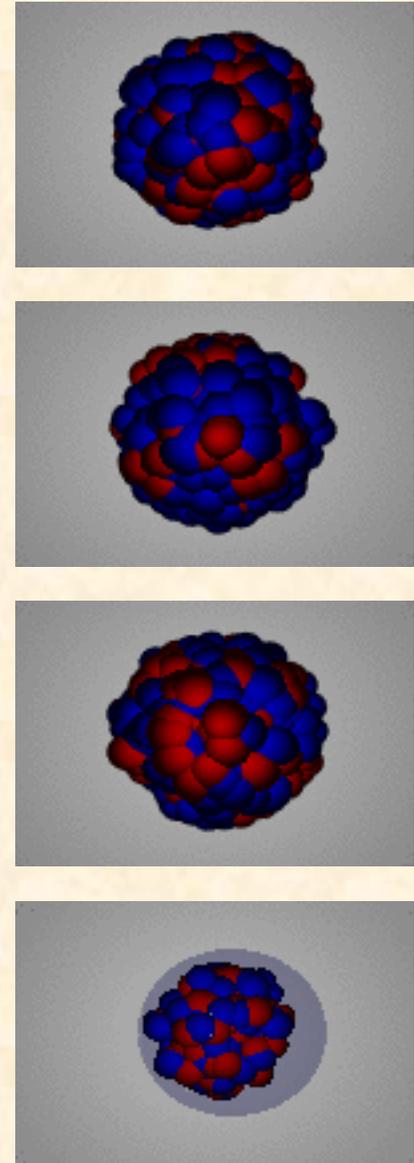




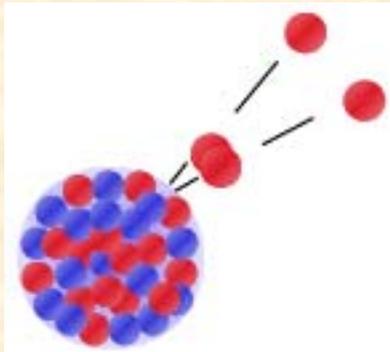
Giant Dipole Resonance

Pigmy Dipole Resonance

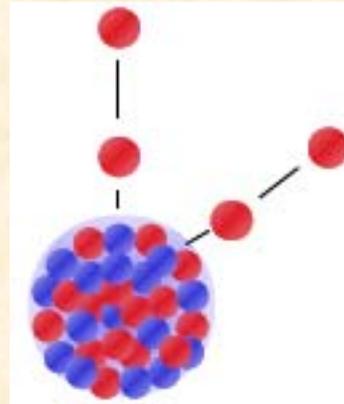
Disociación coulombiana sobre ^{124}Sn , ^{130}Sn y ^{132}Sn



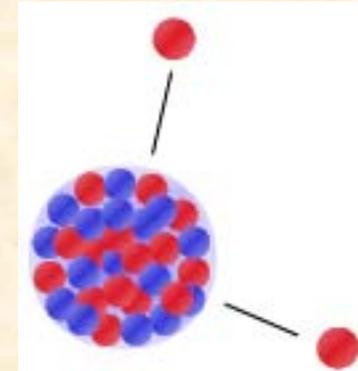
- Emisión de dos protones: tres posibles escenarios



Emisión de un diprotón (${}^2\text{He}$) y posterior ruptura de este en 2p



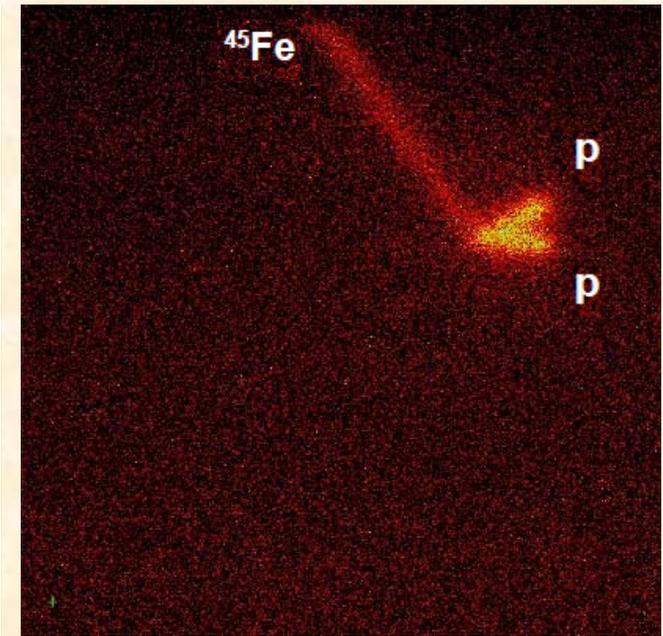
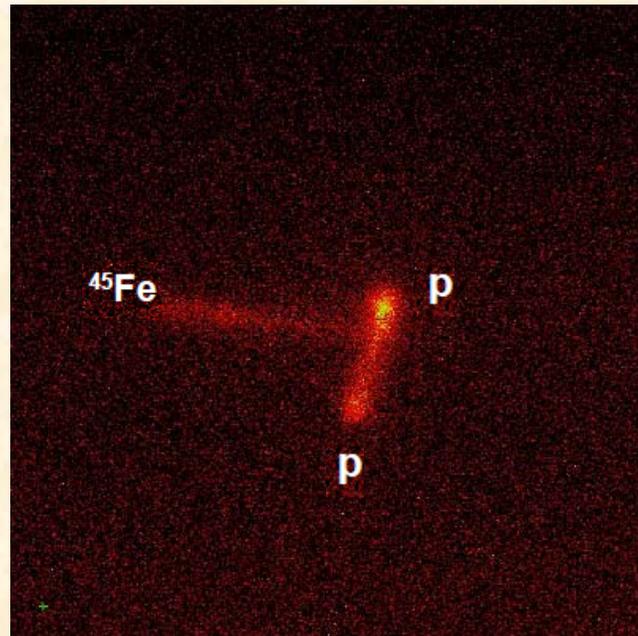
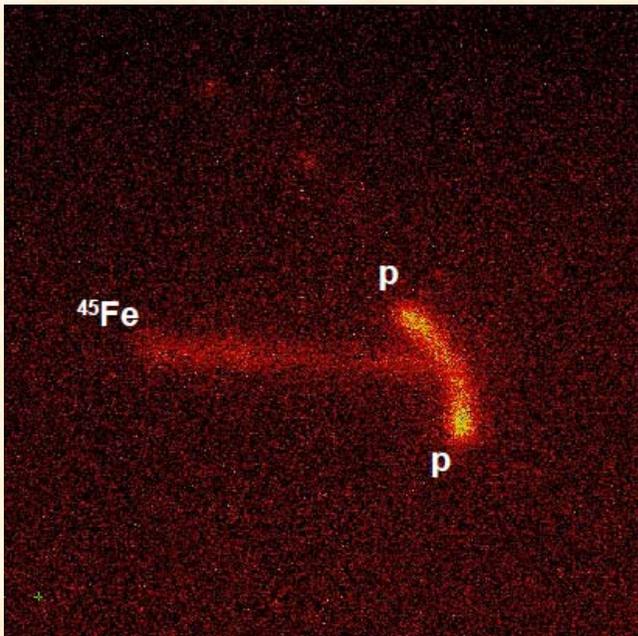
Ruptura espontánea a 3 cuerpos



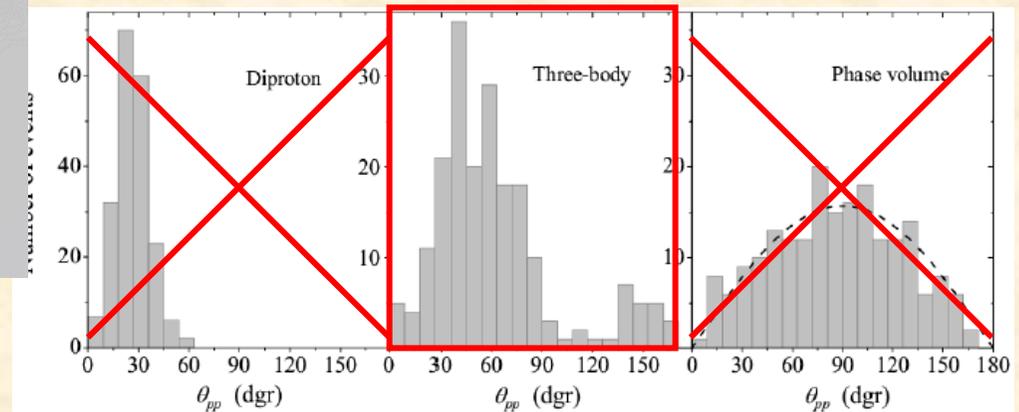
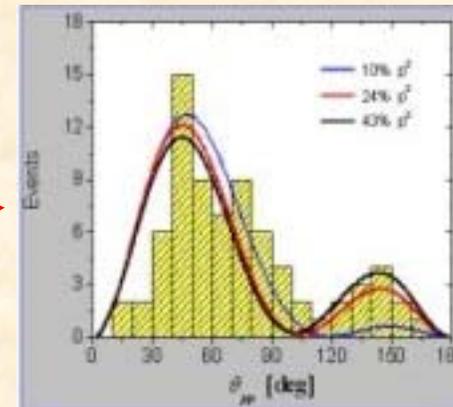
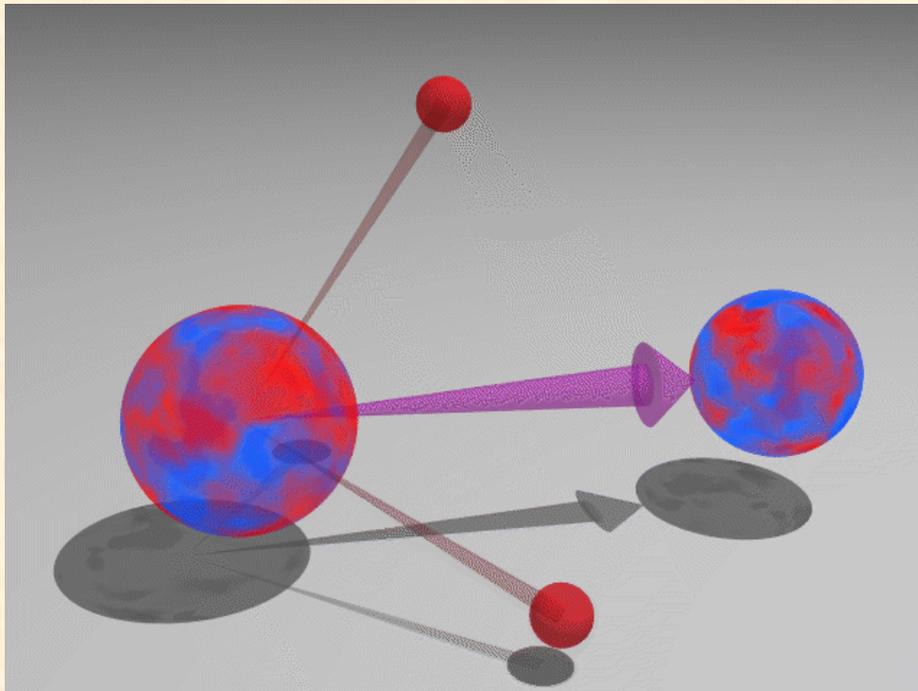
Emisión secuencial de 2 protones descorrelacionados

- Es necesaria una medida muy precisa del ángulo entre los protones y de su evolución temporal

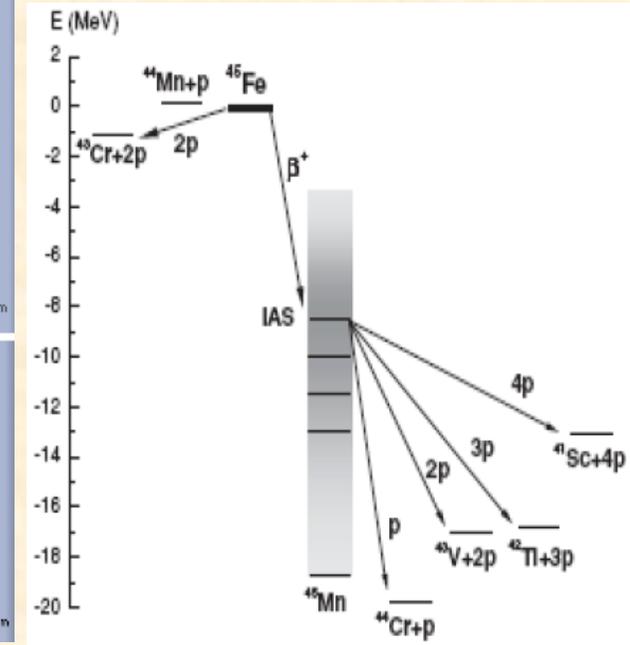
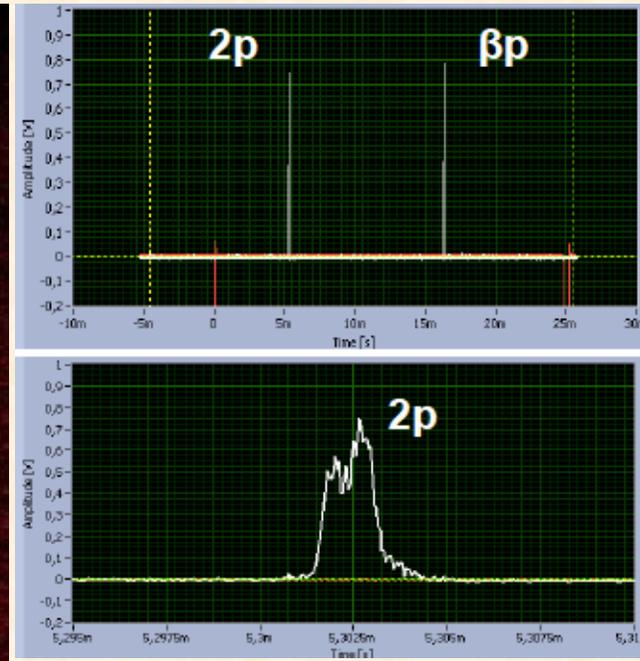
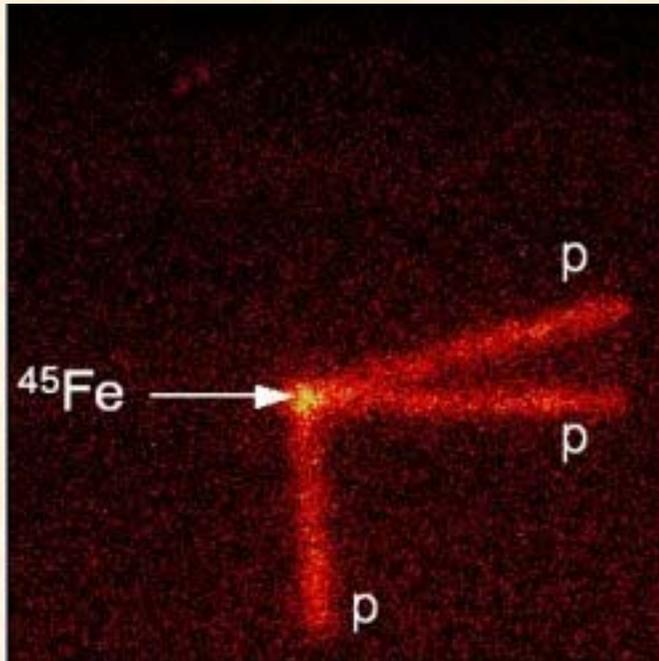
- Emisión de dos protones
- Radioactividad 2p en ^{45}Fe . Se ha medido en MSU (EE.UU.)



- Emisión de dos protones
- Radioactividad 2p en ^{45}Fe . Se ha medido en MSU (EE.UU.)



- Primera observación de una emisión de β -3p



¿Cuál es el final de la tabla Periódica?

- información única sobre la interacción Nuclear.
- Las teorías predicen una isla de estabilidad alrededor de $Z=120$

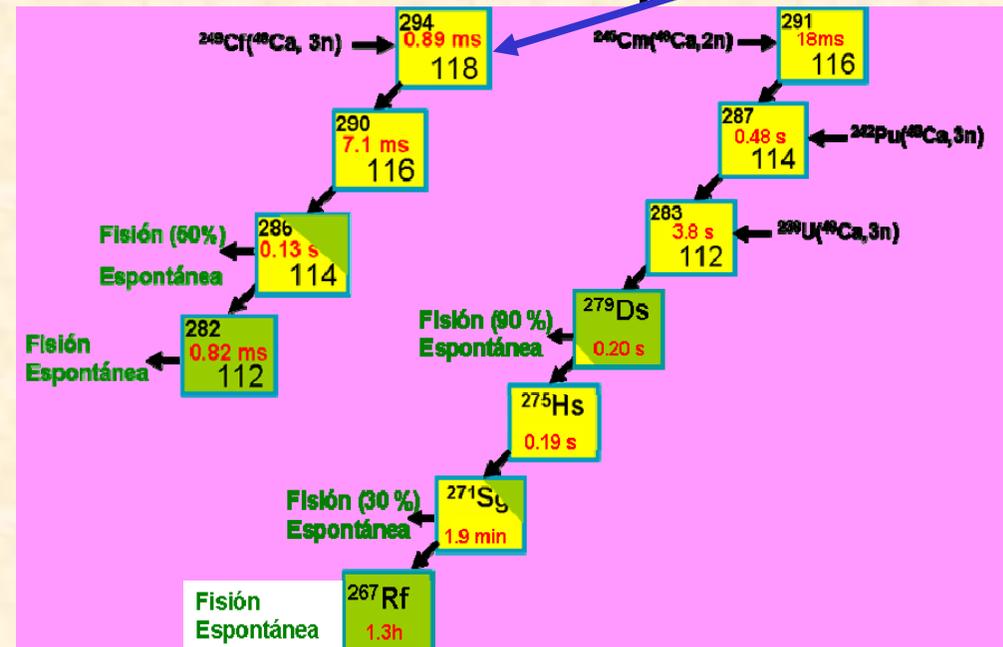
Fusión fría con haces y blancos estables.

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

Fusión con haces estables Y blancos radiactivos

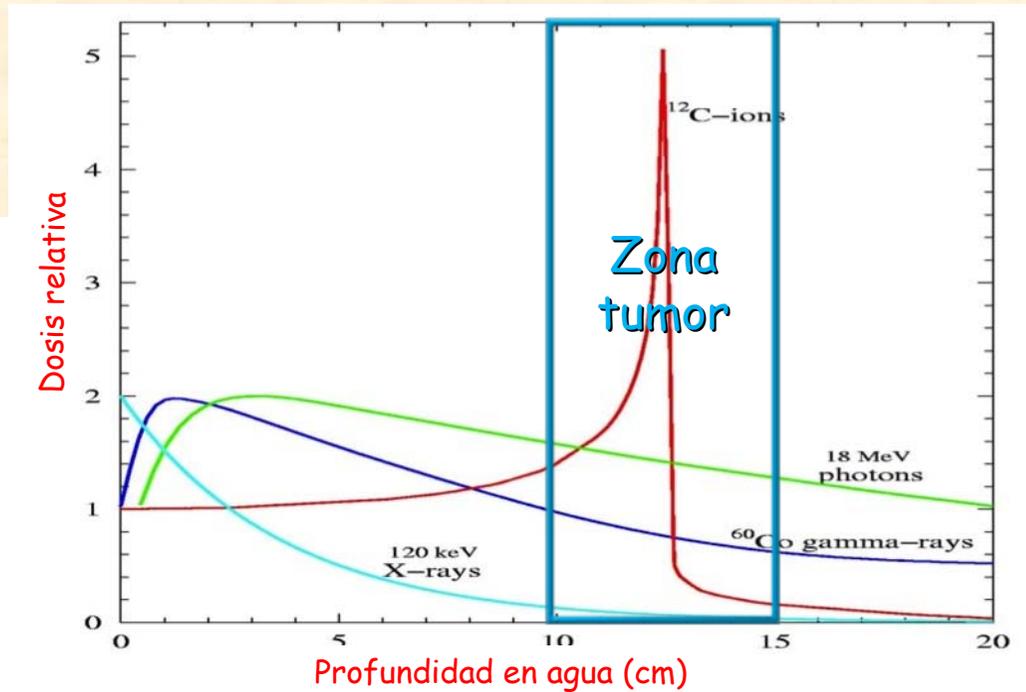
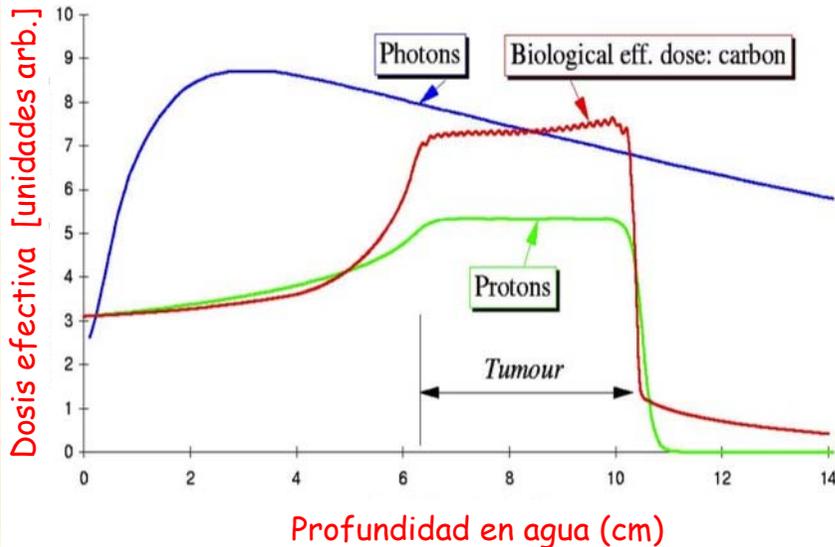
- En Dubna (Rusia) se han sintetizado $Z=113 - 116$ y 118 ($A=294$).
114: Flevorium 116: Livermorium

Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	H																	He
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	La*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	Ac**	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo	



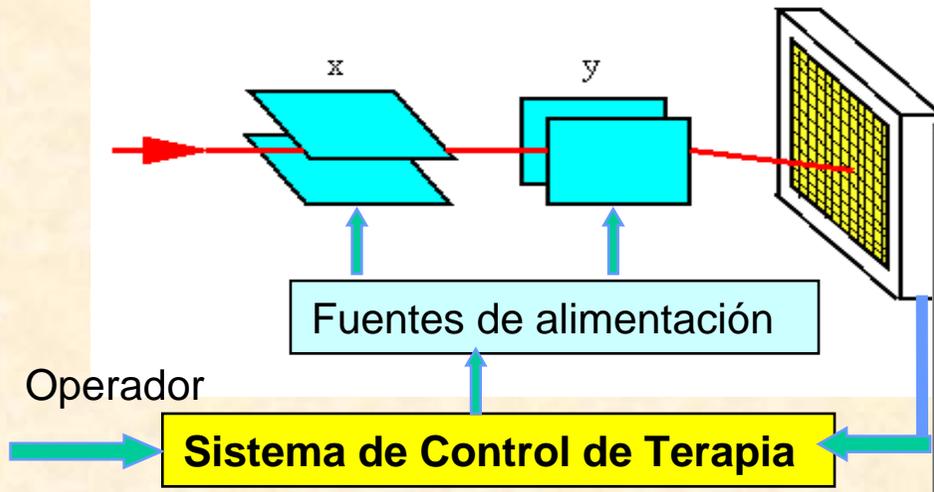
50 pacientes tratados anualmente desde dic. 1997

Propiedades clínicas importantes de los iones pesados

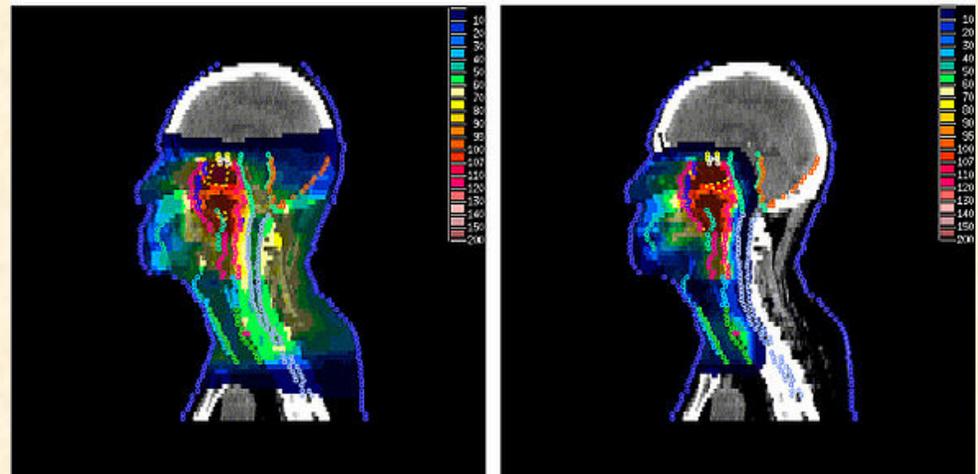
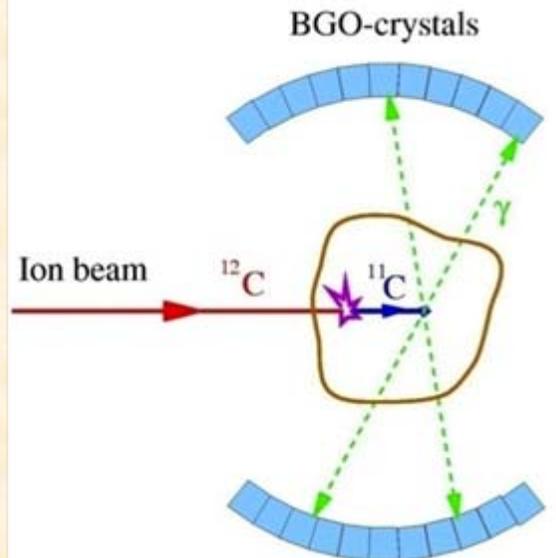
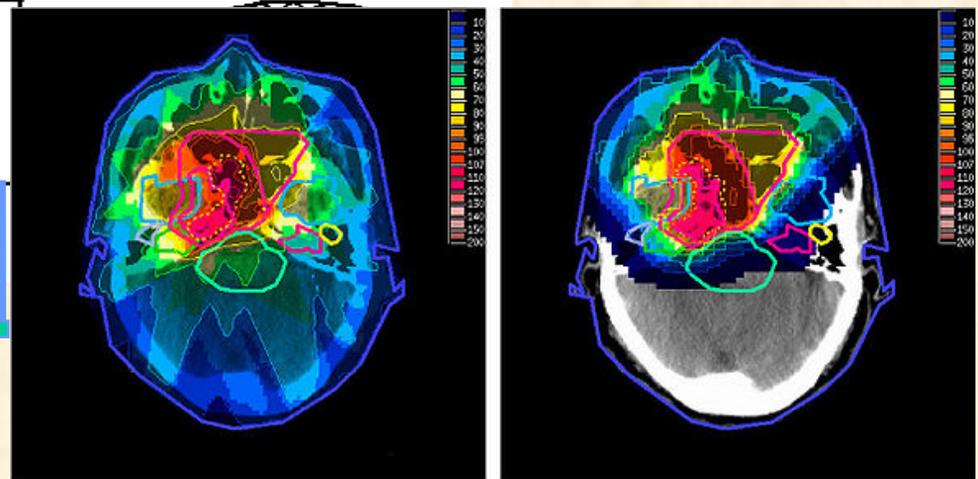


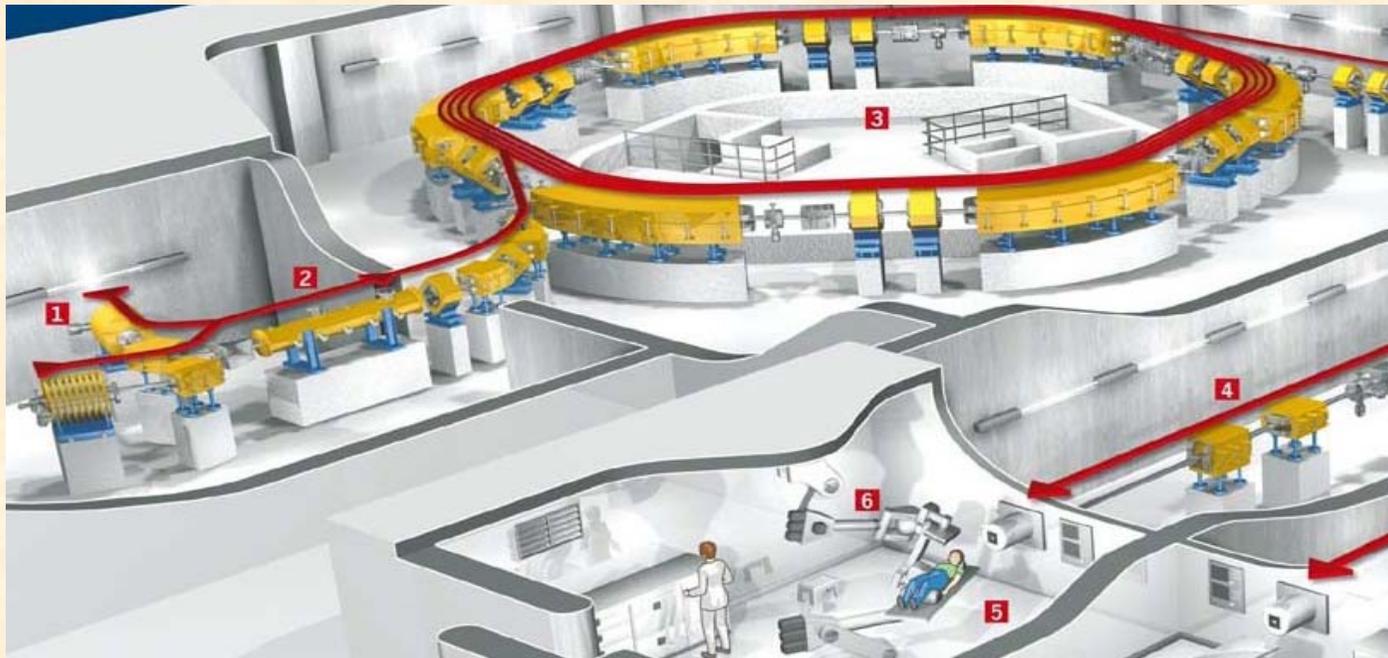
Mejora en la eficiencia biológica

Imanes de barrido rápido



Tumor

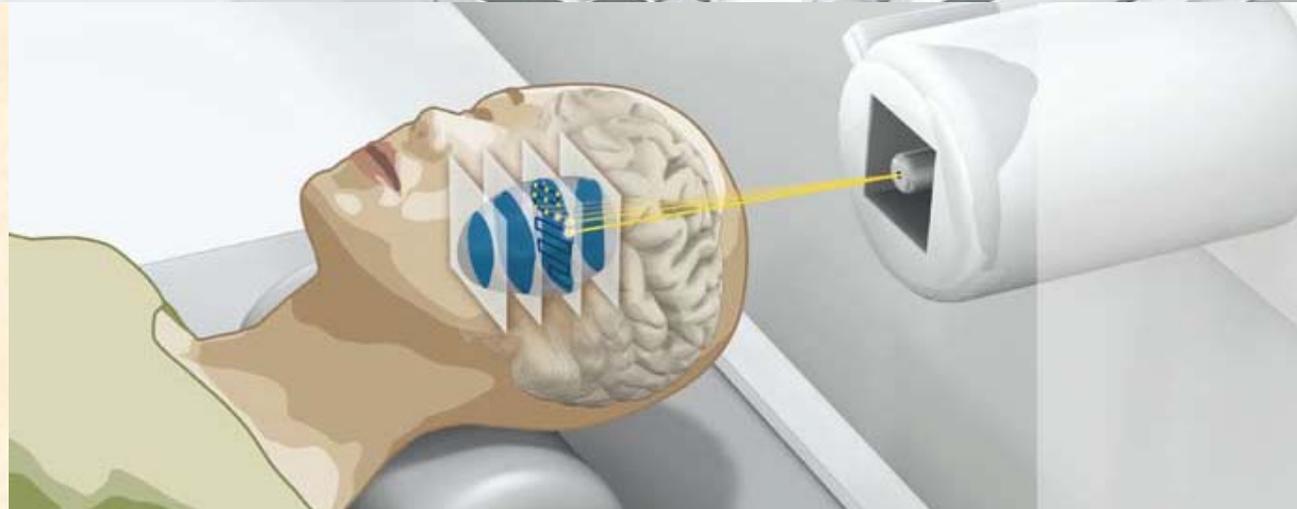




Este centro, realizará terapia con protones e iones pesados.

Tiene permiso para tratar pacientes desde 2 Nov 2009
Esperado: 1300 p/y

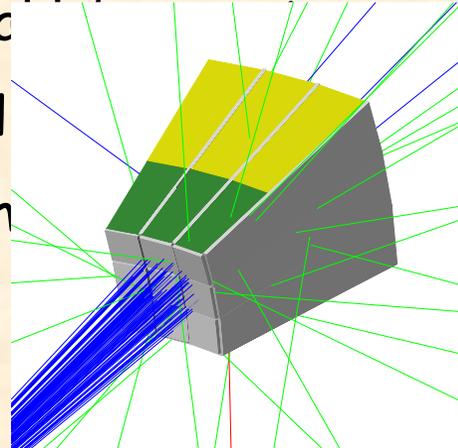
Tratará tumores de difícil acceso hasta 30cm.



1. Fuente de Iones de CO_2 , libera C_2 ionizado.
2. Acelerador lineal a 10 % de la velocidad de la luz c
3. Síncrotrón acelera iones de C_2 hasta 73 % de c



2) Realización del experimento



1) Propuesta y Preparación del experimento 'en casa'

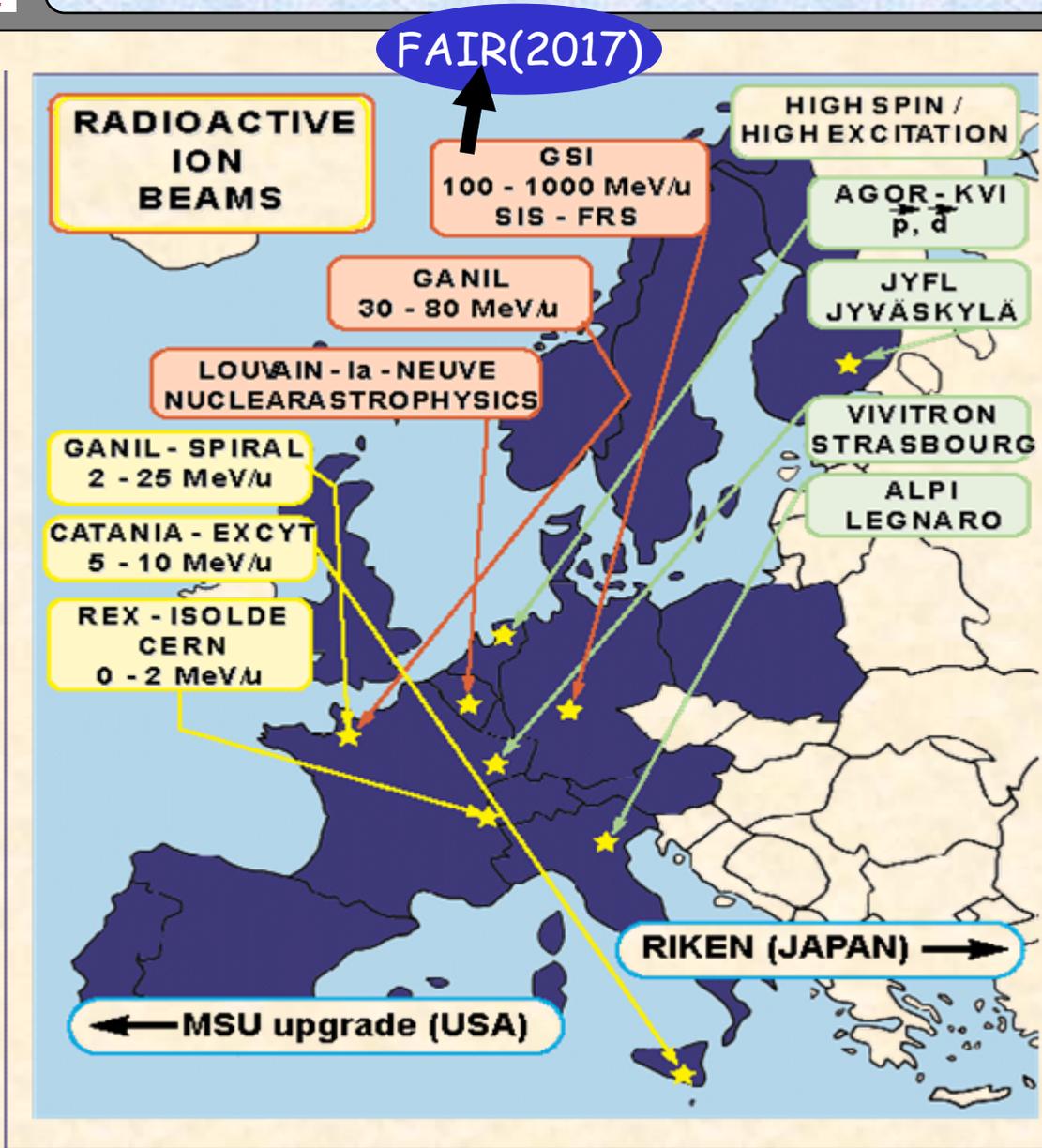
- Interés físico y viabilidad → Defensa ante un comité científico.
- Simulaciones Monte Carlo del experimento, detectores ...
- Preparación de detectores, electrónica, sistemas de adquisición ...

2) Realización del experimento

- Traslado de material al laboratorio correspondiente
- Montaje experimental (1 semana... 4 meses... años...)
- Medida con haz (1 semana)

3) Análisis de datos y divulgación de los resultados

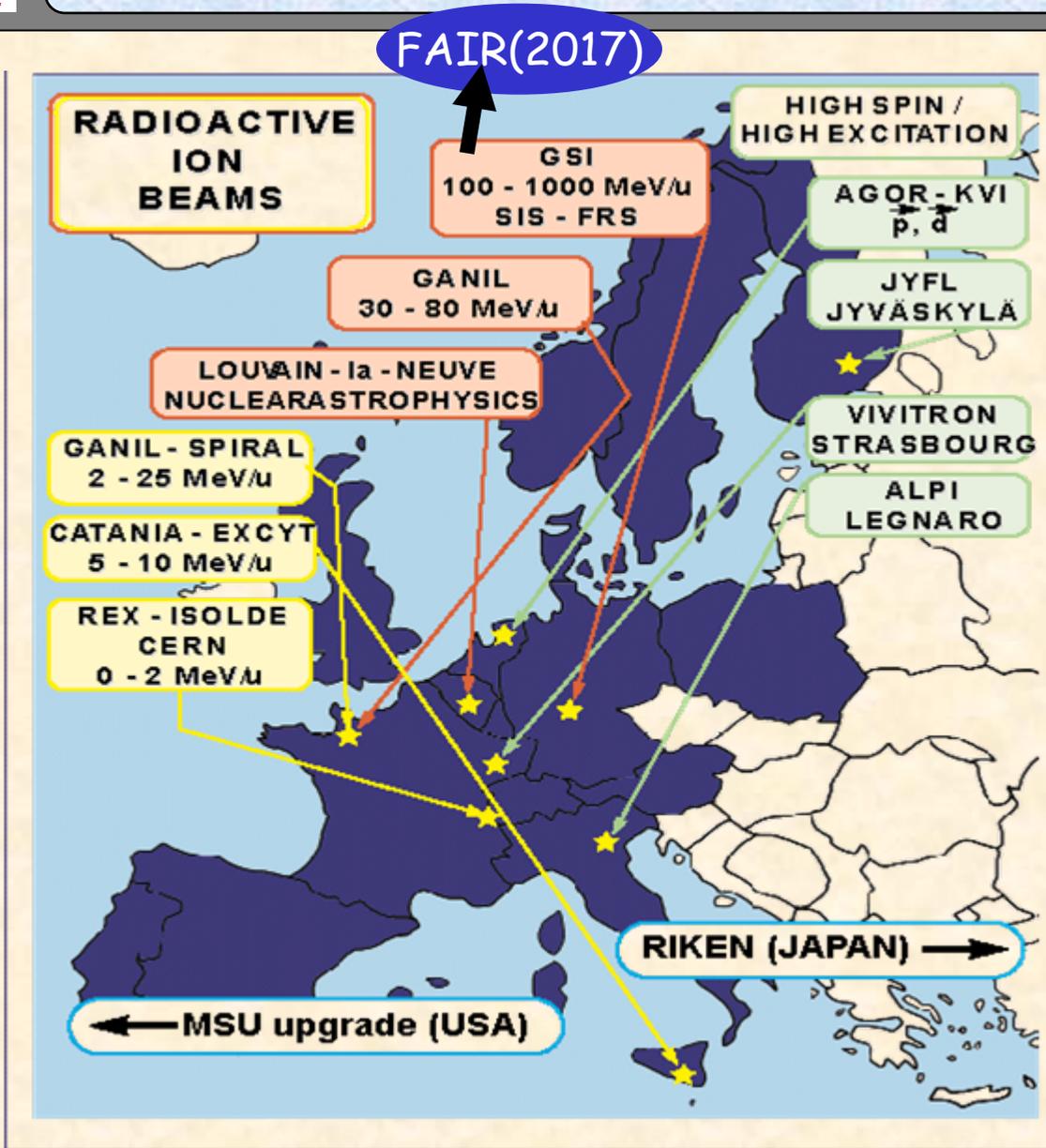
- Preparación de software y análisis (meses...)
- Publicación de artículos y presentación en conferencias



- En España: ALBA, CMAM y CNA (no aceleran haces radioactivos)

- Instalaciones de haces radioactivos en Europa: CERN, GSI, GANIL...

- En otros continentes: TRIUMF, MSU, RIKEN...

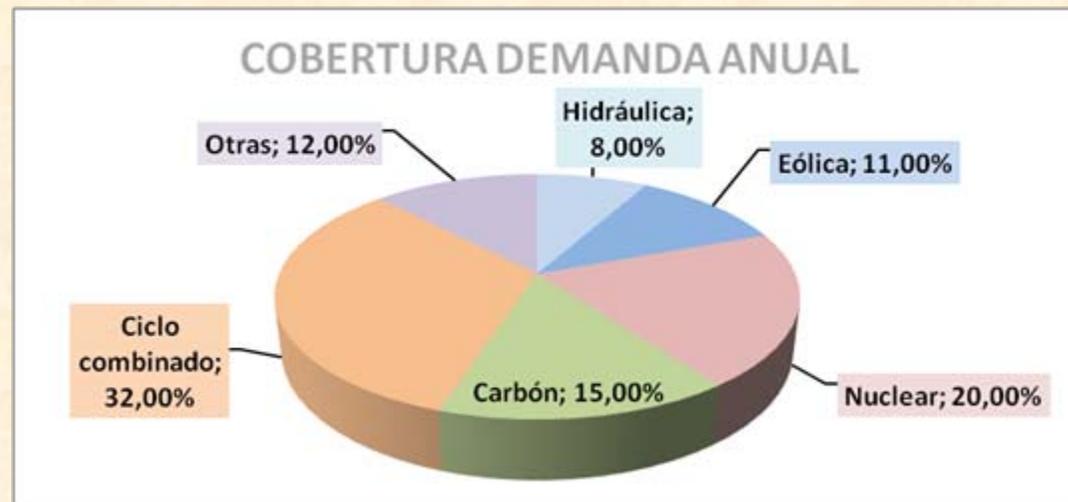
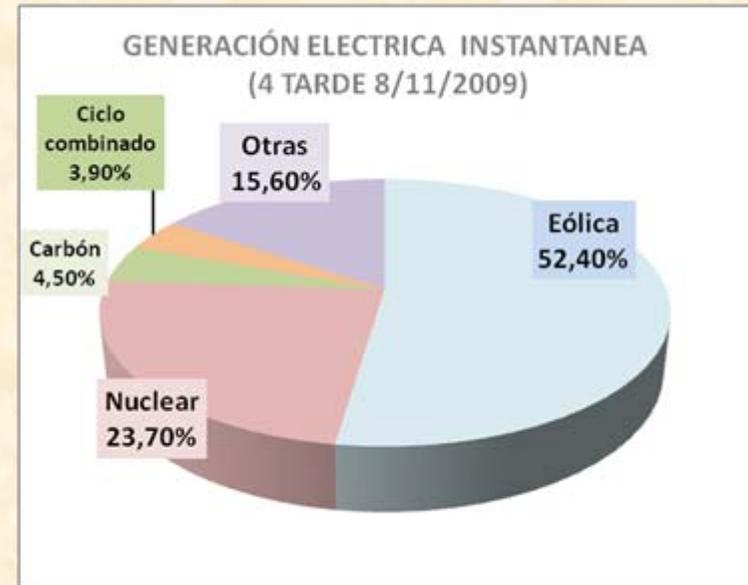


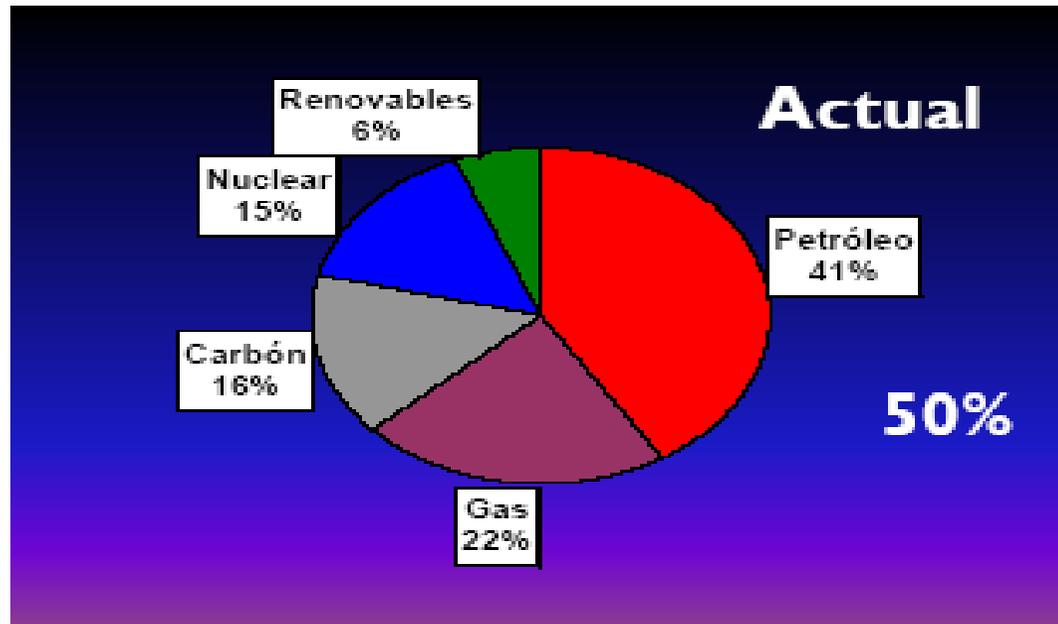
Sin grandes inversiones en desarrollo y mejora de aceleradores y detectores

⇒ El avance será muy difícil

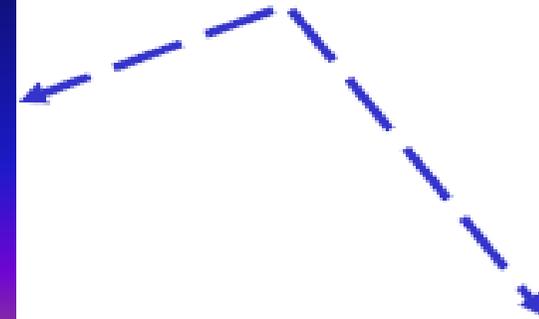
¡Gracias por vuestra atención!

3w.nobel.se/physics/laureates/
3w.nobel.se/physics/educational/index.html

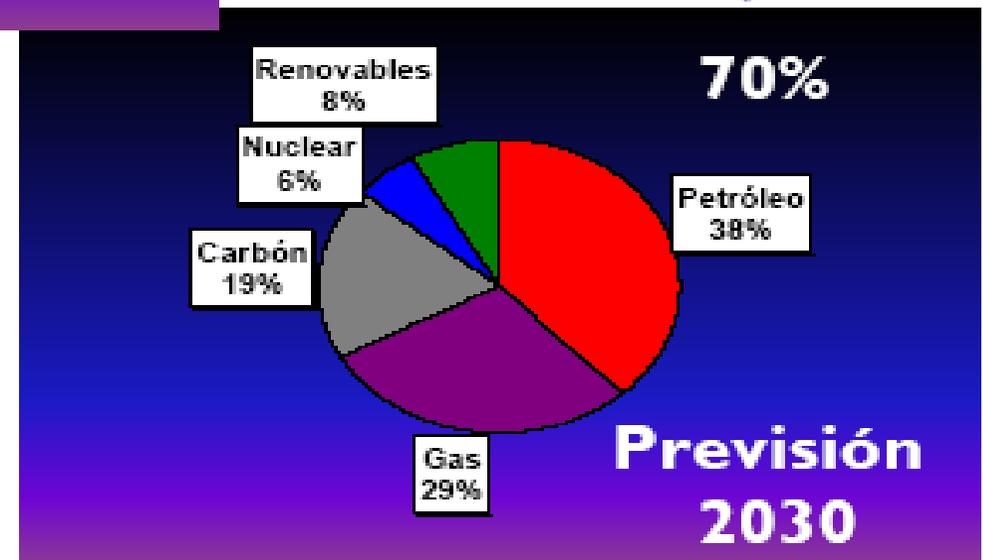




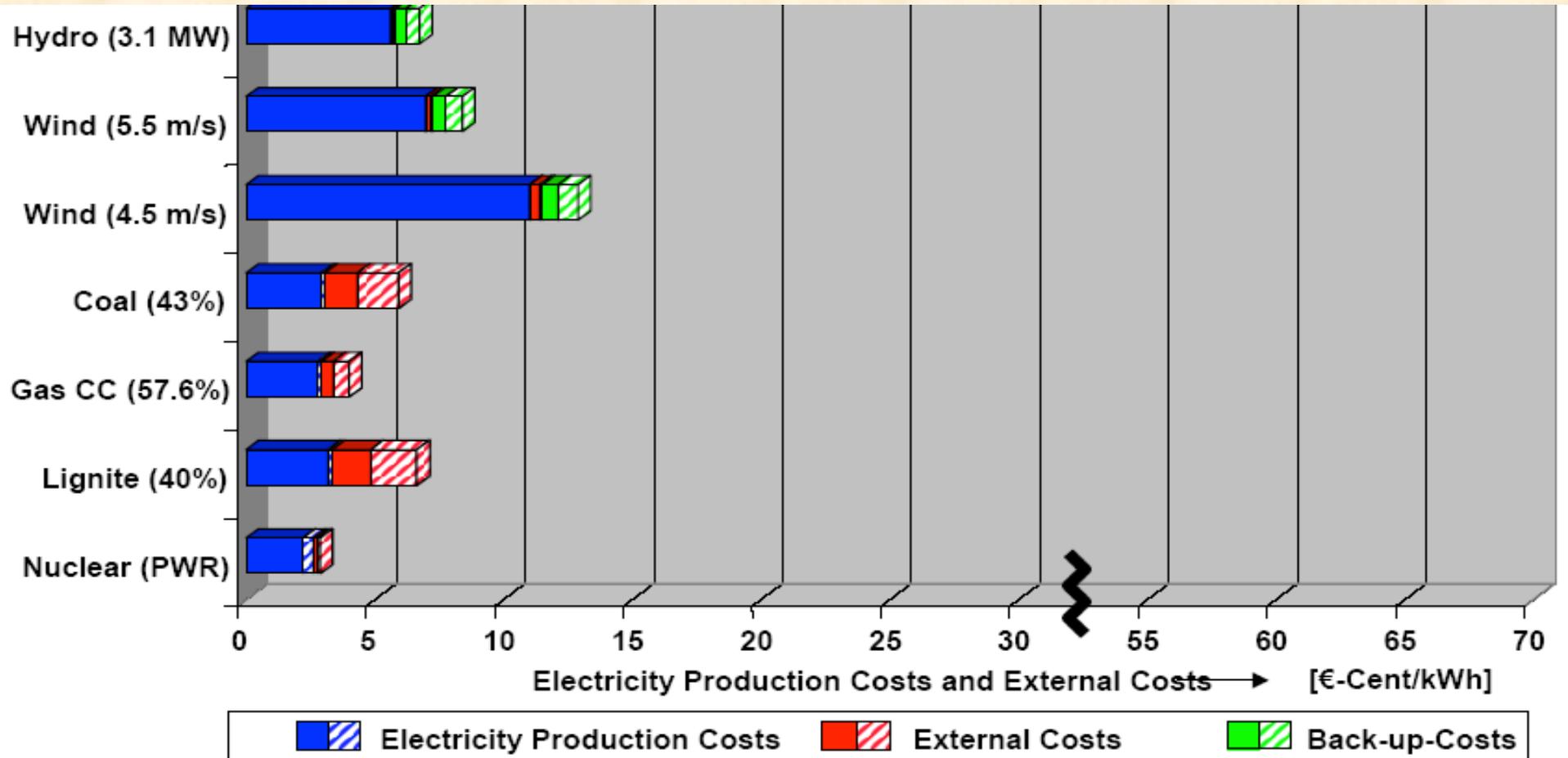
IMPORTACIONES
ENERGÉTICAS
EN LA U. E.



↓
Nuclear
Petróleo
Renovables
↑
Carbón
Gas

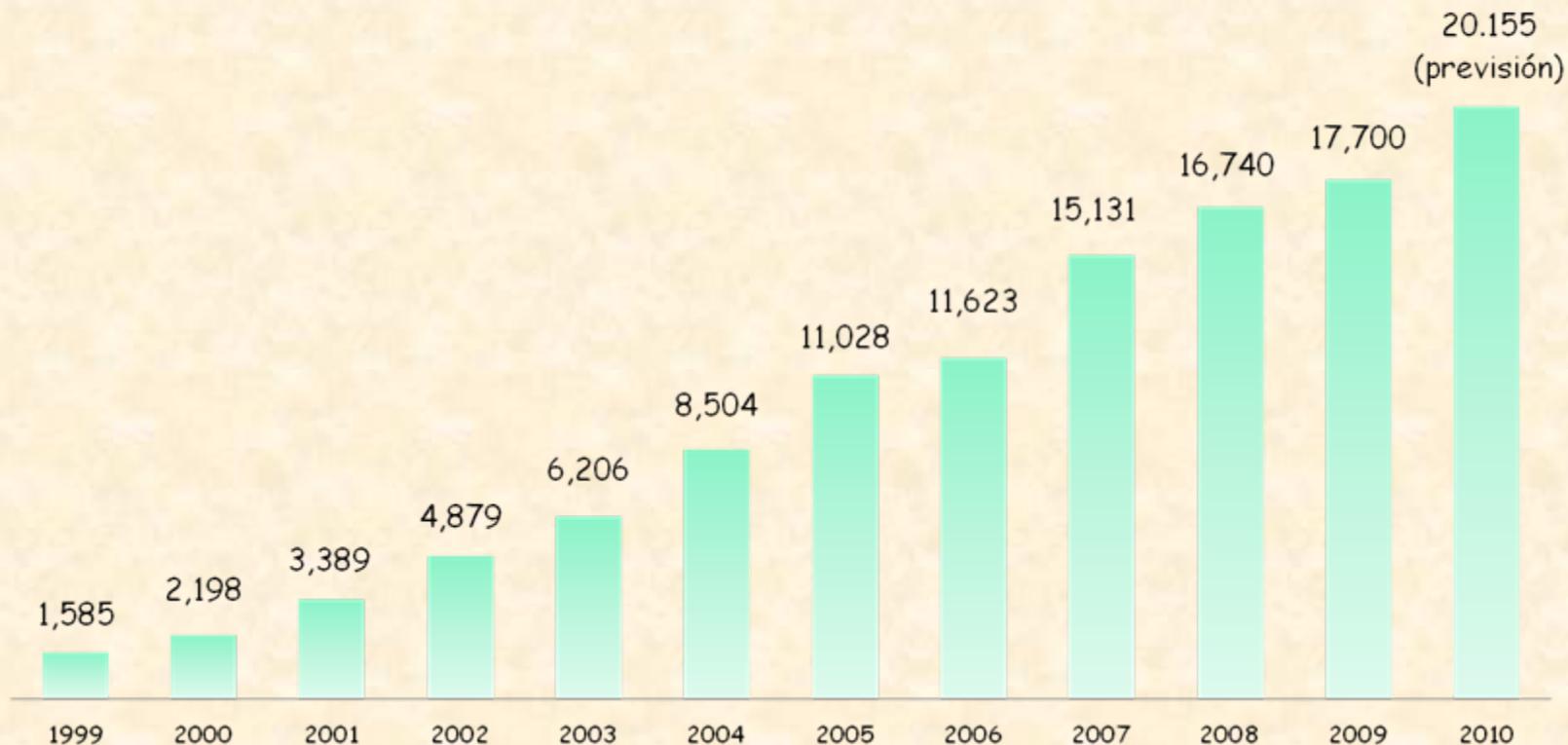


Coste de producción de luz en euros por kWh

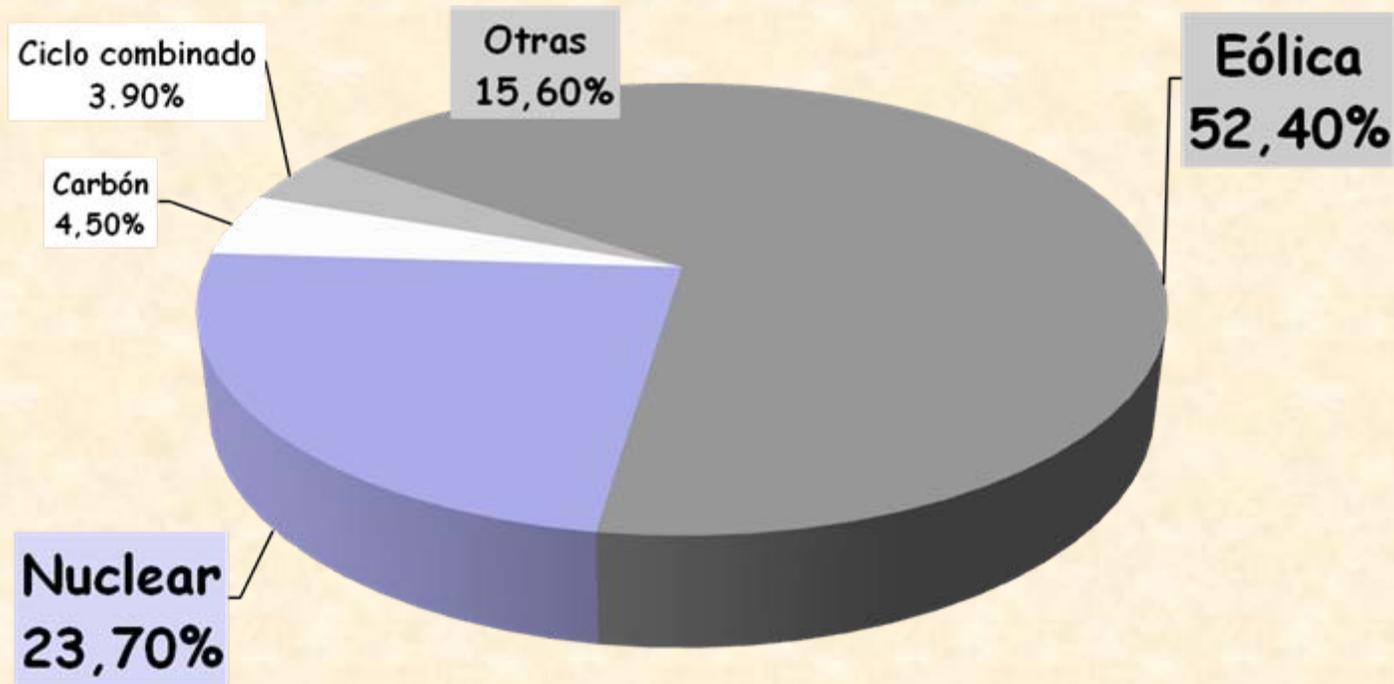


Fuente: El País
9/11/2009

EVOLUCIÓN DE LA POTENCIA EÓLICA INSTALADA (MW)



ESTRUCTURA DE GENERACIÓN ELECTRICA (4 TARDE)



Fuente: El País
9/11/2009

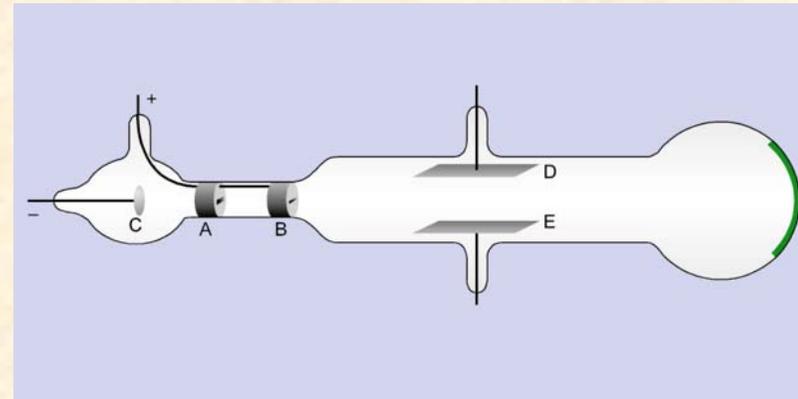
➤ Perrin había demostrado que los rayos catódicos (ondas) iban acompañados de carga (partículas)



J.J. Thomson

P. Nobel 1906

1895



✓ Poniendo unas rendijas descubrió que sólo **se recogía carga** si el haz pasaba por las rendijas

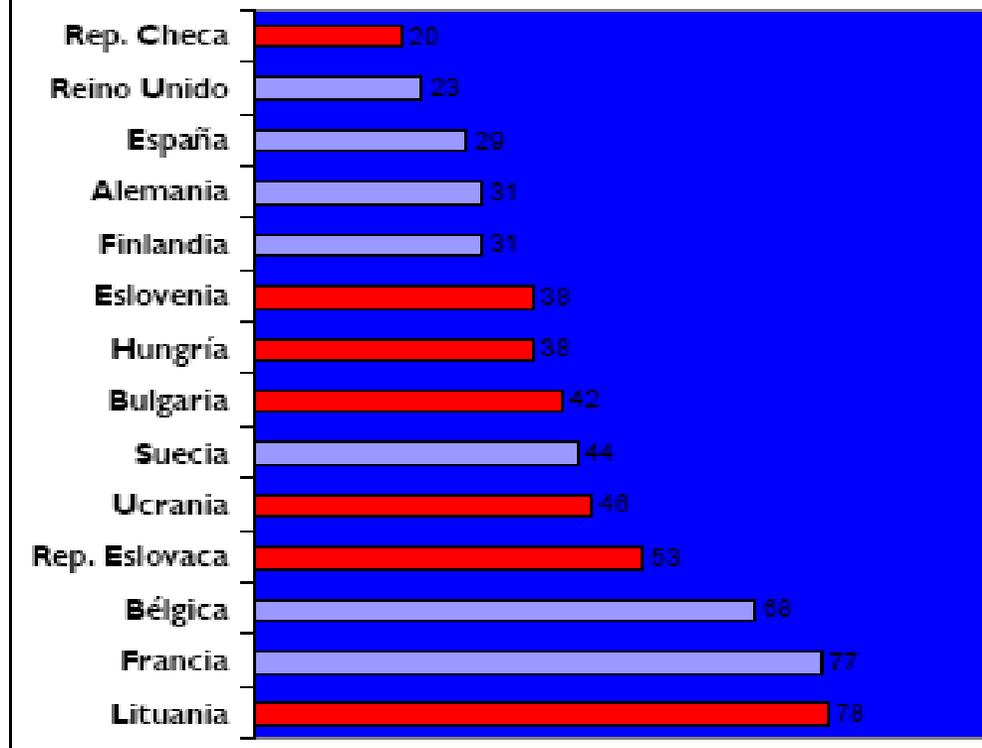
✓ Al hacer vacío encontró que **se curvaban** en presencia de campo eléctrico

✓ Midió cómo **se desviaban** en campo magnético

$$m_e \text{ aprox } 1/1000 m_H$$

➤ Los rayos catódicos ↔ materia en un nuevo estado

% de energía nuclear sobre Producción Total



Fuente: Agencia Internacional Energía Atómica

Miembros de la U.E.

	Reactores
Países Bajos	1
Finlandia	4
Bélgica	7
España	9
Suecia	11
Alemania	19
Reino Unido	33
Francia	59
TOTAL	143

Países candidatos U.E.

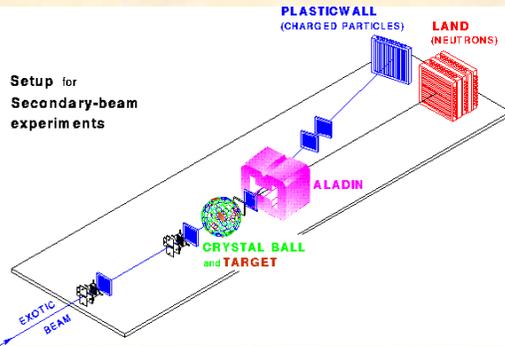
	Reactores
Rumania	1
Eslovenia	1
Lituania	2
Hungría	4
Rep. Checa	5
Bulgaria	6
Rep. Eslovaca	6
TOTAL	25

Otros países europeos

	Reactores
Suiza	5
Ucrania	13
Rusia	30
TOTAL	48

¿Cómo obtener la información completa ?

Secciones Eficaces

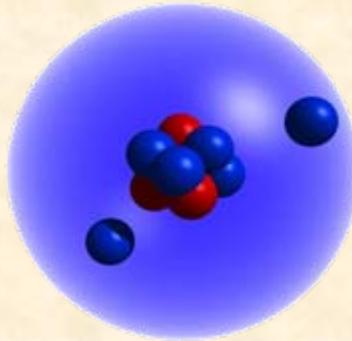


Distribuciones de Momento



FRS, GSI, Alemania

Dispersion Elástica



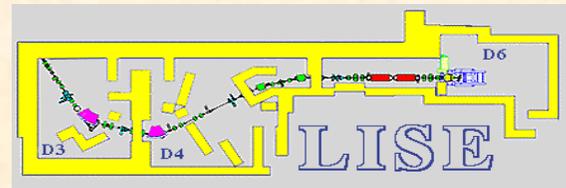
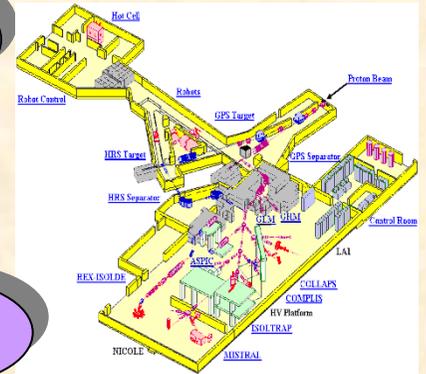
Spin Momentos μ, Q

Masas

Desintegración Beta

Nucleos Resonances

ISOLDE (CERN)



GANIL, Francia

Explorando los límites: límite protónico

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

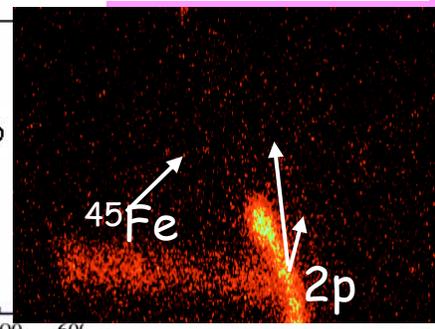
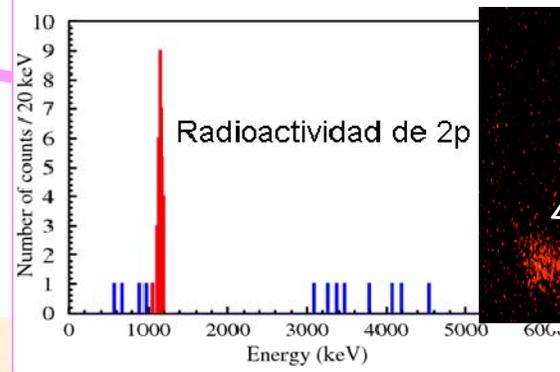
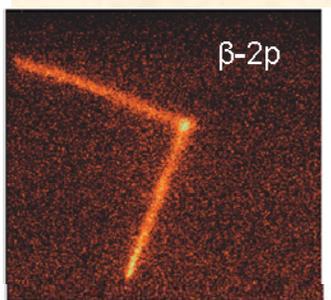
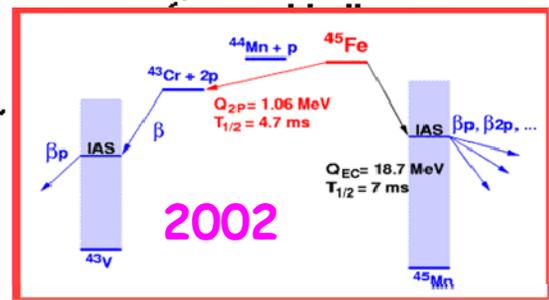
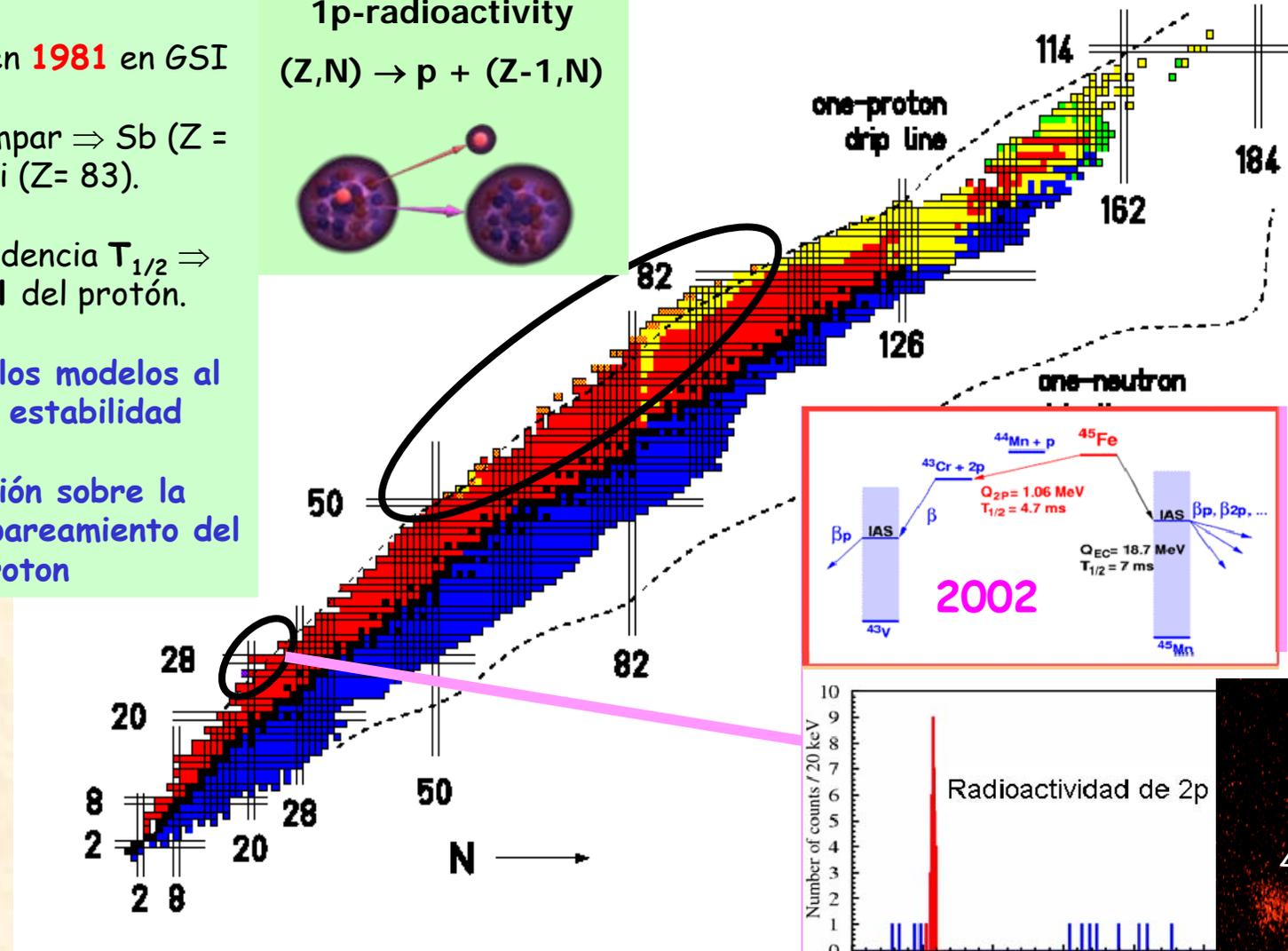
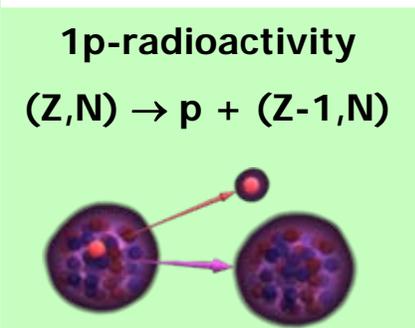
Observado en 1981 en GSI

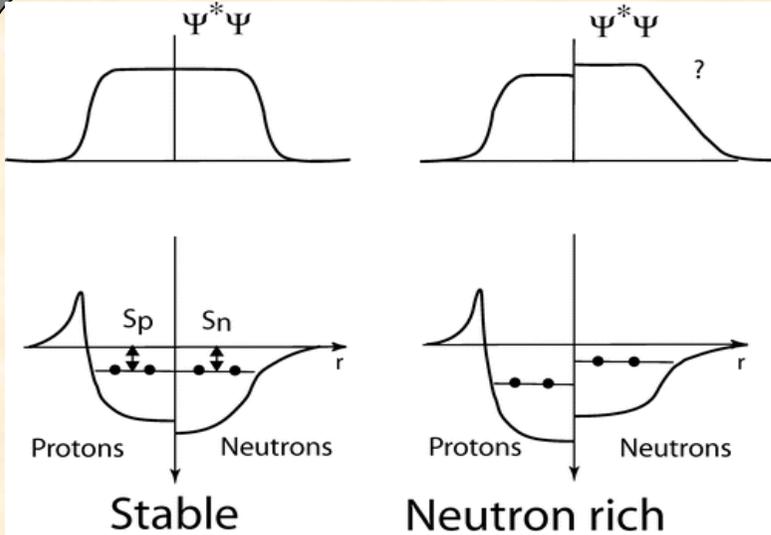
Núcleos Z-impar \Rightarrow Sb (Z = 51) - Bi (Z= 83).

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





M. Goepfert-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: ${}^4\text{He}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{40}\text{Ca}$, ${}^{208}\text{Pb}$

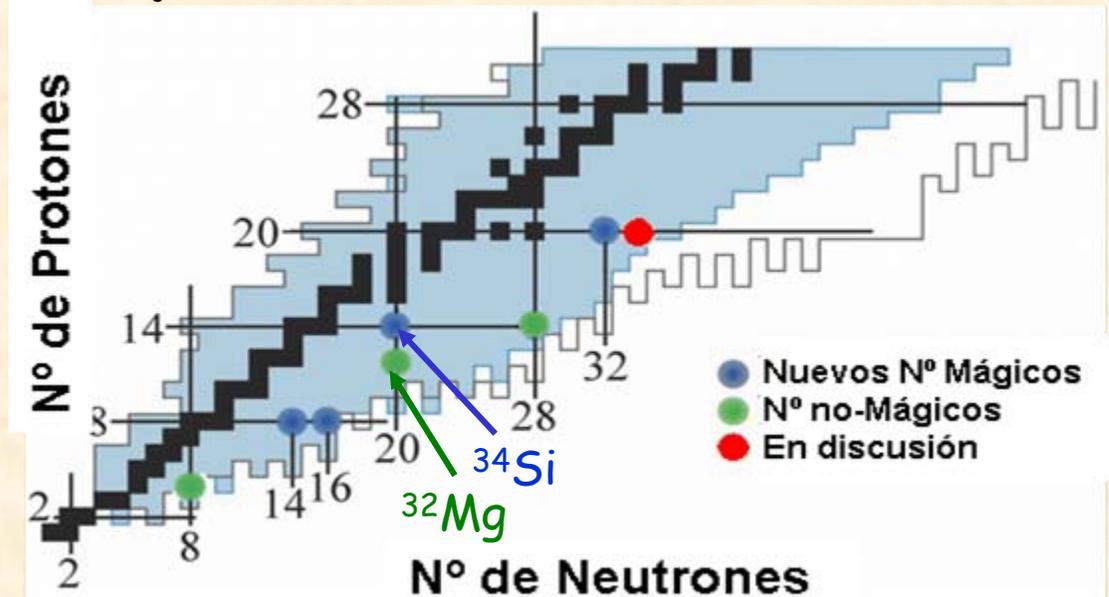
⇒ Lejos de la estabilidad la situación cambia.

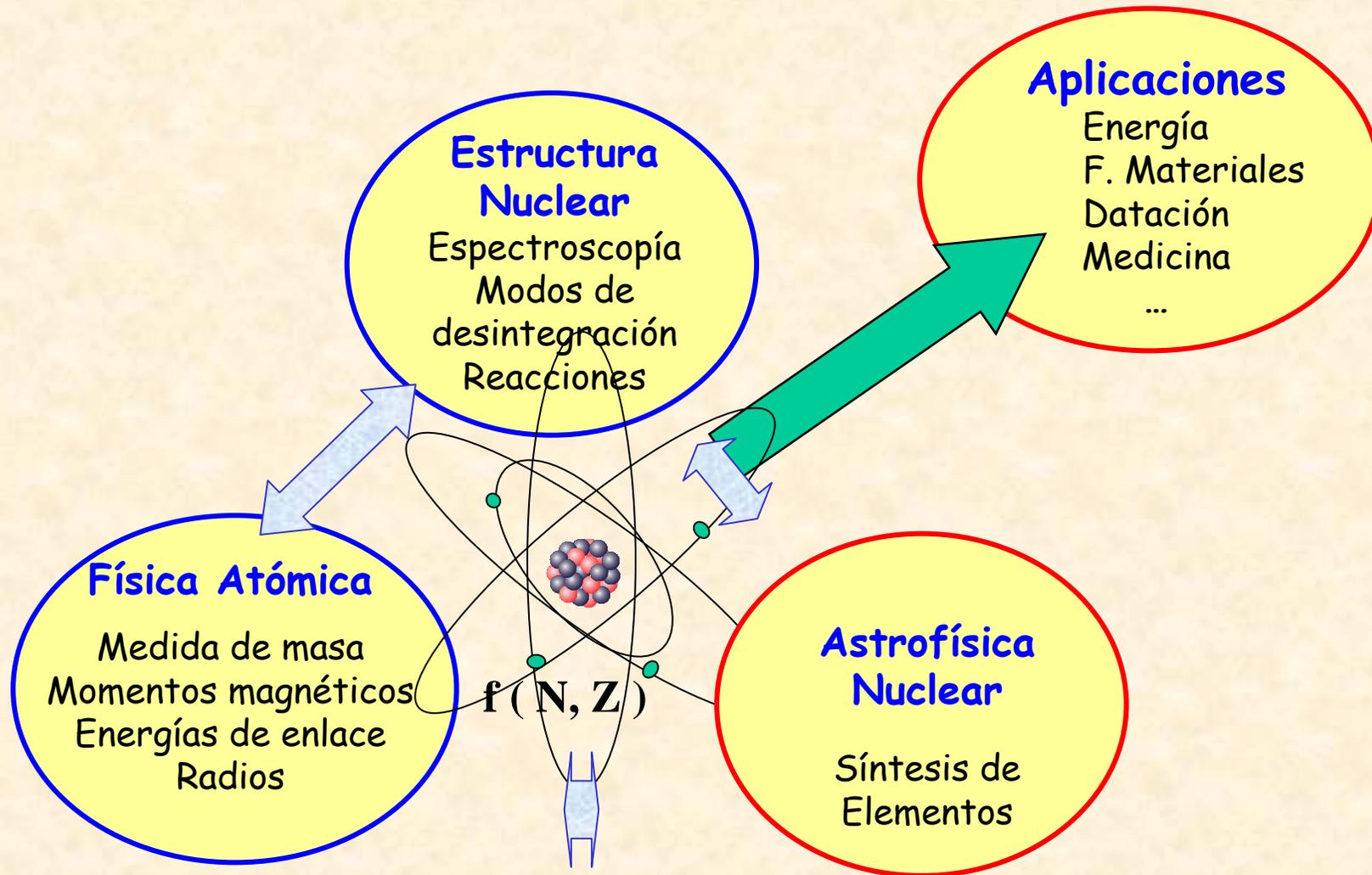
R Geesaman DF, et al. 2006.
Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 56:53–92

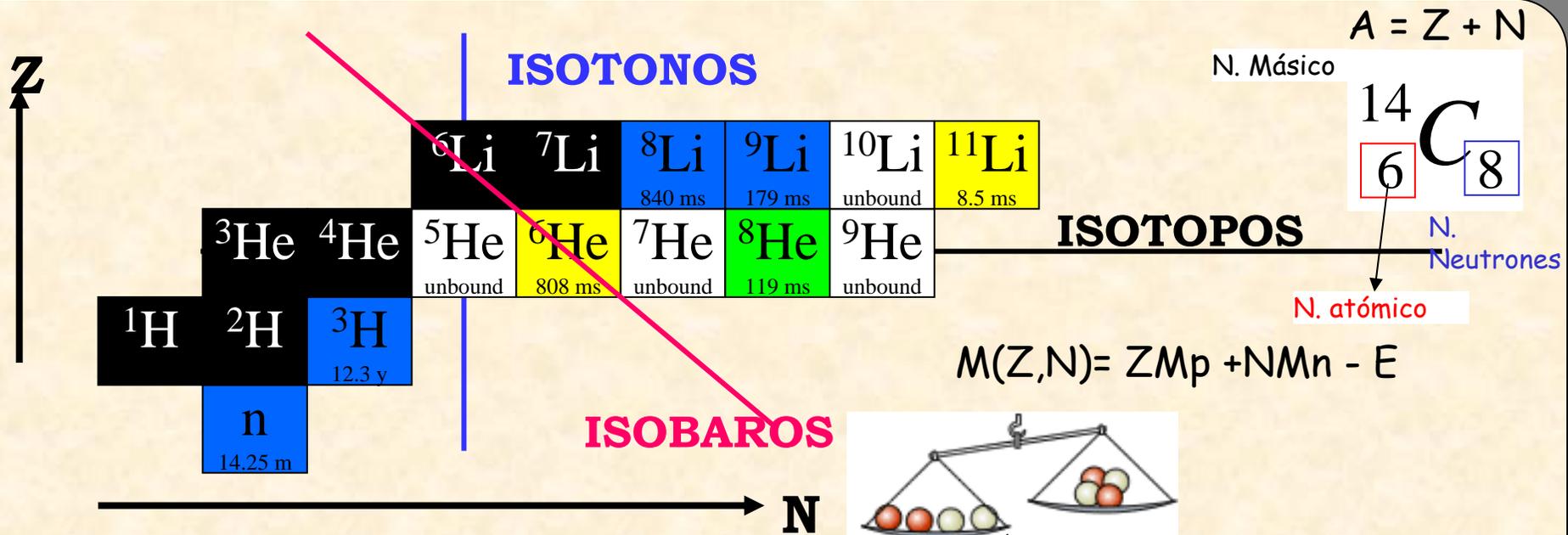
Experimentalmente:

Medida de $B(E2)$

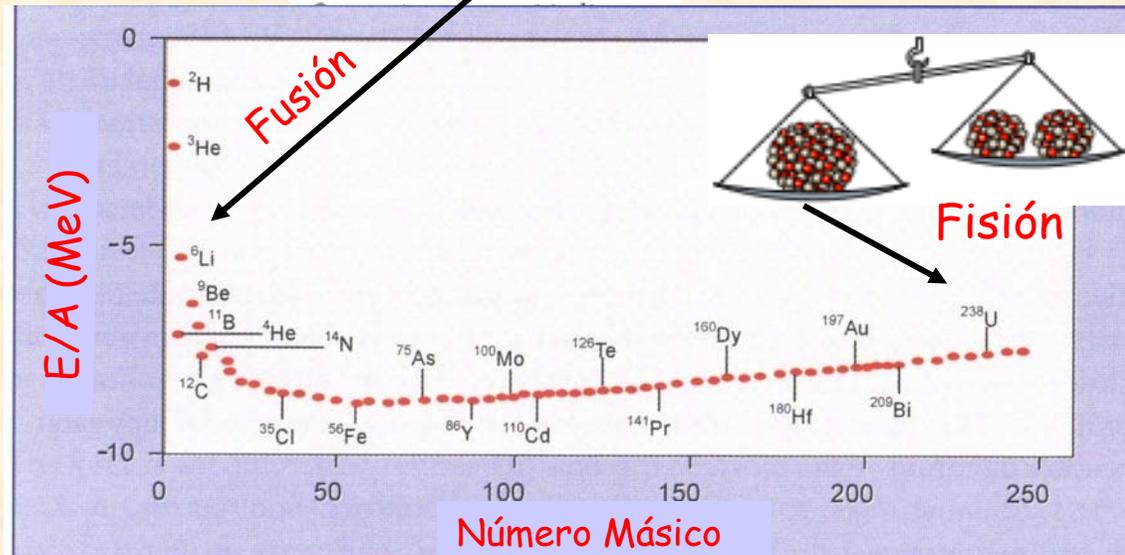
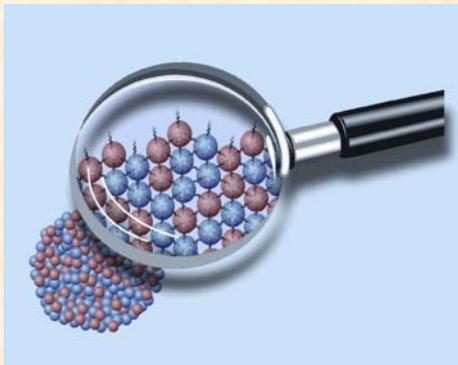
Energía del primer estado excitado



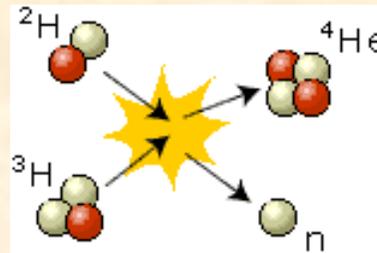




Igual densidad (= M/V)
 $r = r_0 A^{1/3}$, $r_0 \approx 1.2$ fm



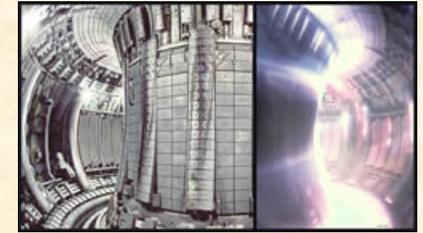
Reacciones de fusión



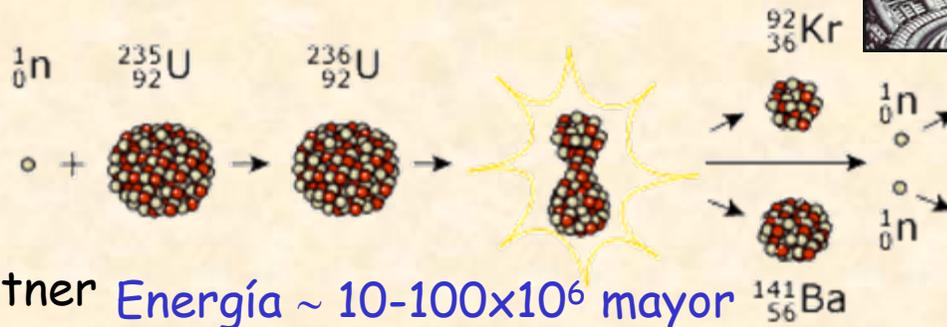
17.6 MeV \Rightarrow Energía del Futuro

JET, UK

ITER, Fr

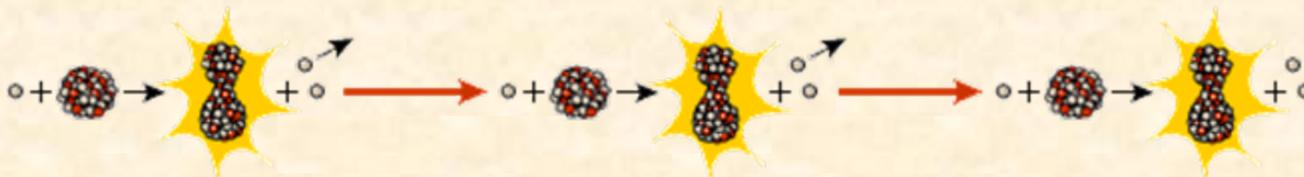


Reacciones de fisión

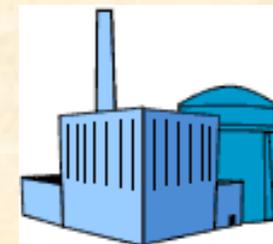


1938 , Otto Hahn & Lise Meitner **Energía ~ 10-100x10⁶ mayor que en reacciones químicas**

Reacciones en cadena / primer reactor E. Fermi 1942



No controlada, 1945



Central Nuclear , 1954 en Obninsk, Rusia

➤ Física de Superficies

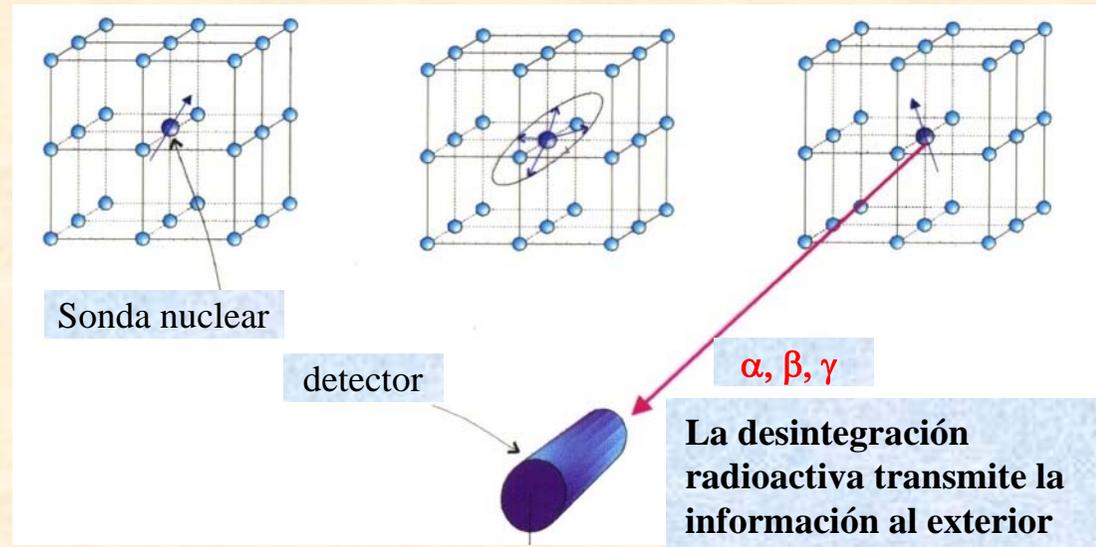
Los núcleos radioactivos se usan como "espías" (PAC) ⇒
 -semiconductores de alta tec.
 -como dopantes.

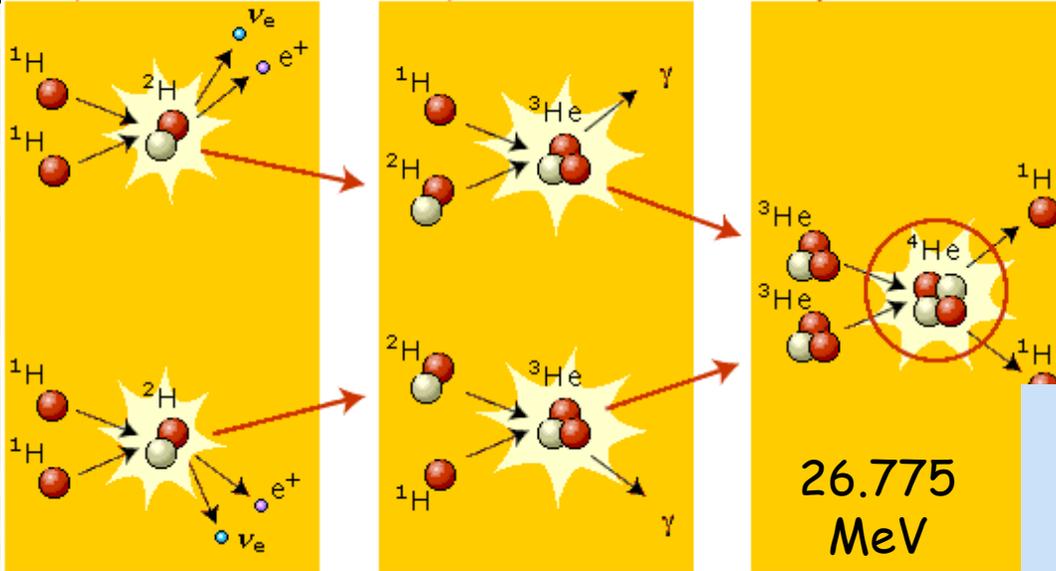
➤ Datación

- Obras de arte
- Arqueología..

➤ Ciencias de la Vida

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



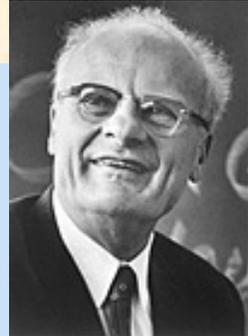
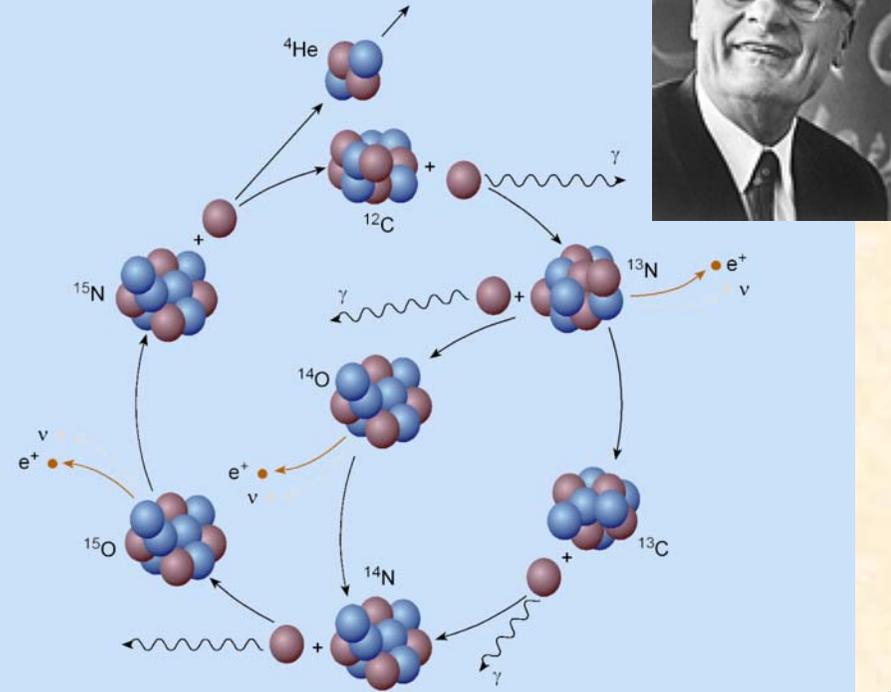


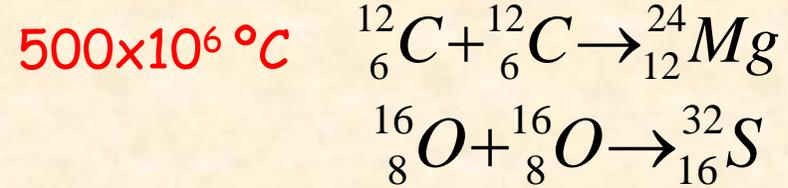
Temperatura en el Sol $15 \times 10^6 \text{ C}$

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

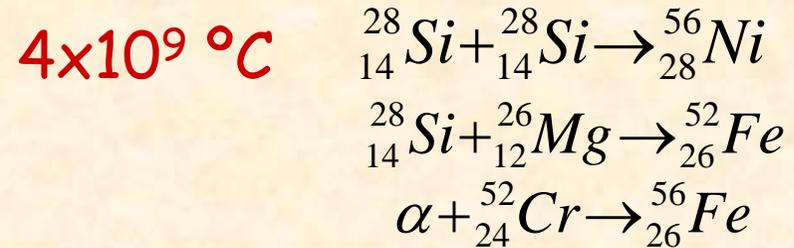
Estrellas más masivas \Rightarrow alternativa a la cadena-pp: **El ciclo de CNO** (Bethe final 30's, PN 1967).

➤ Presencia trazas C: ${}^{12}\text{C}(p,\gamma){}^{13}\text{N}...$
¿Cómo se producen los elementos más pesados que existen en la naturaleza?





Hay tal flujo de fotones y γ 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.

