

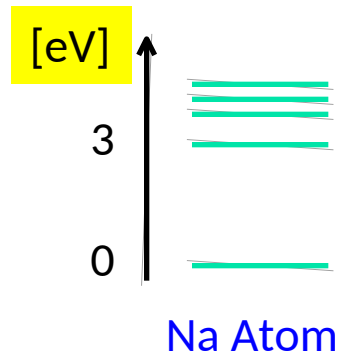
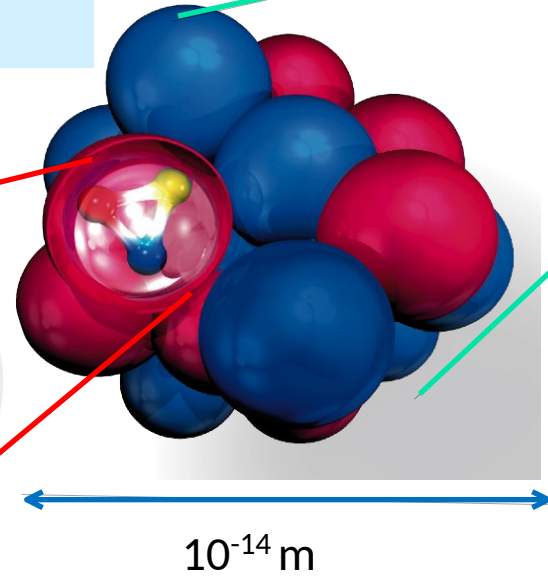
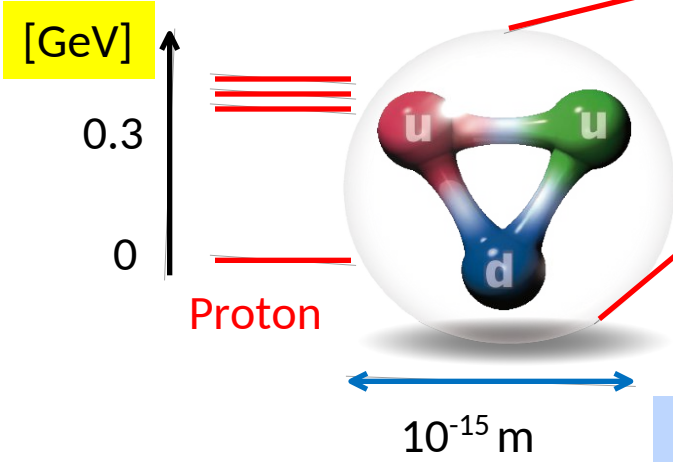
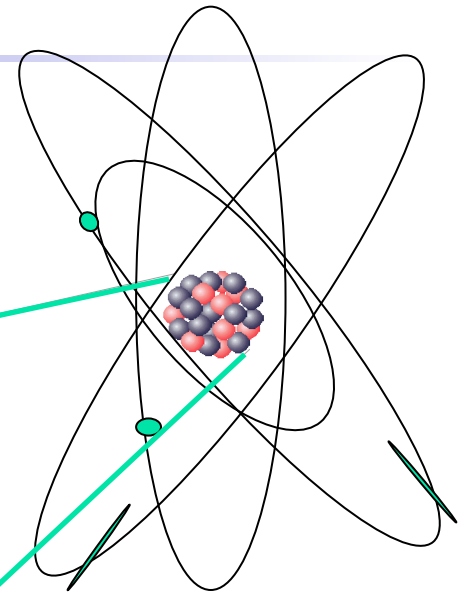
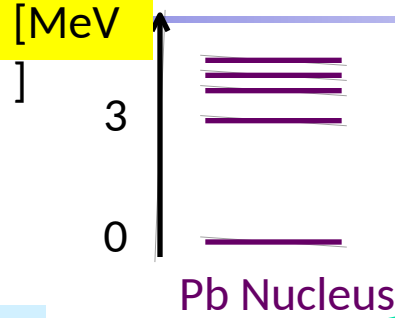
Física Nuclear (1): Estudio de Núcleos Exóticos

M^a José García Borge
Dpto de
Espectroscopía
5 de abril del 2022

Estructura Subatómica (> 99% de la materia)

Los núcleos: **protons** (red)
neutrons (blue), cada uno
formado de 3 quarks
unidos por gluones.

- 1 cm³ de hierro = 7.9 g
- 1cm³ de núcleos de hierro = 300 Toneladas!



Electron , proton s. XX
-1932 descubrimiento del neutron!

50/60's Acceleradores hadron zoo(100)
Hadrones combinaciones de 2-3 quarks



¿Qué mantiene unidos los protones y neutrones en el Núcleo?

➤ Fuerza Fuerte (“Fuerza nuclear”)

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

Int un nucleón con 10

Quarks, protones, neutrones...

• Fuerza Coulombiana (em)

Largo alcance

Mantiene el núcleo y electrones

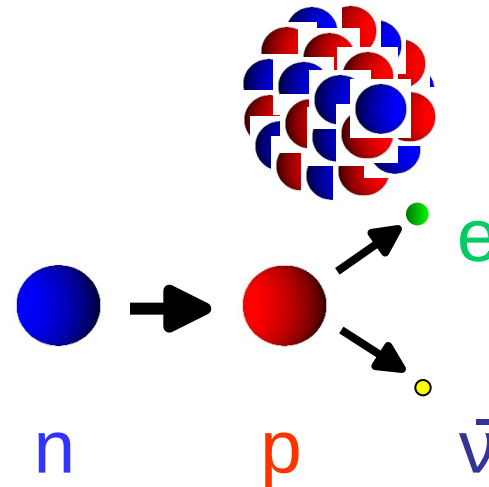
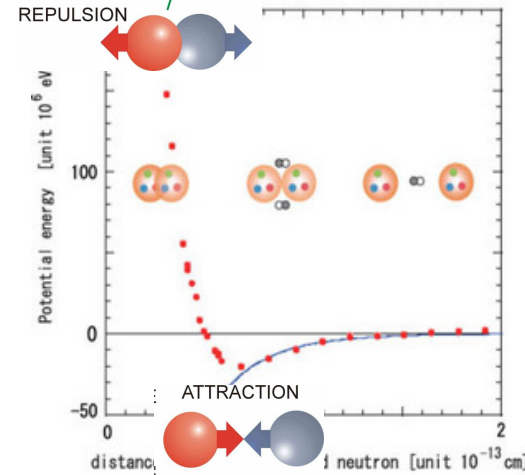
La sienten todas las partículas cargadas

• Fuerza Débil

Responsable de la inestabilidad de ciertos núcleos

• Fuerza Gravitatoria

Su masa



Intensidad

1

$< 10^{-2}$

$< 10^{-5}$

$< 10^{-38}$

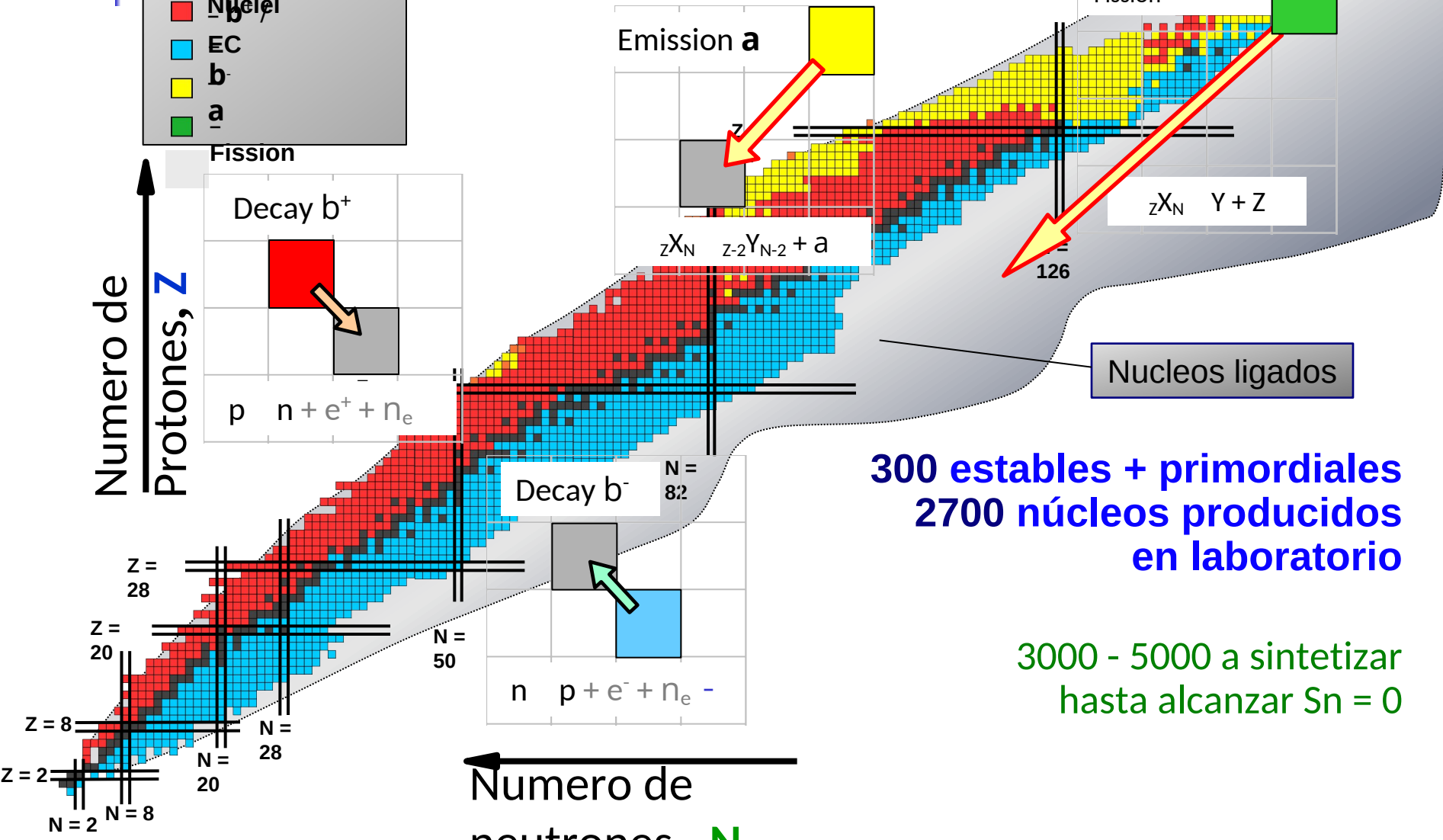
El Paisaje nuclear



- Stable Nuclei
 - EC
 - β^-
 - β^+
 - α

Numero de Protones, **Z**

Numero de neutrones, **N**



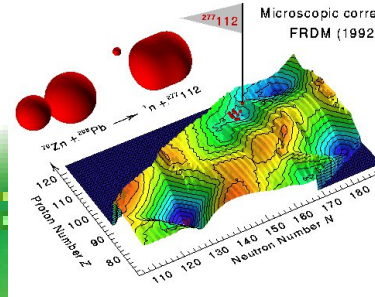
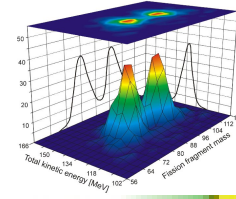
300 estables + primordiales
2700 núcleos producidos en laboratorio

3000 - 5000 a sintetizar hasta alcanzar $S_n = 0$

La Física del núcleo: Magnífica Complejidad

Dinámica de Fisión

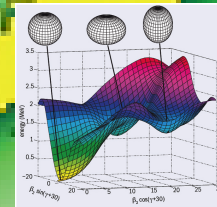
^{220}Ra



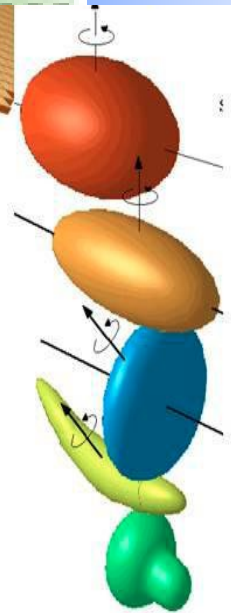
Modos exóticos de desintegración



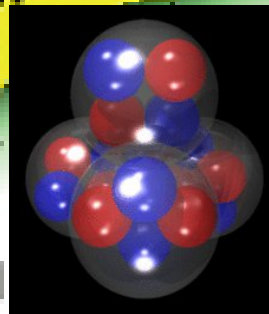
Coexistencia de formas



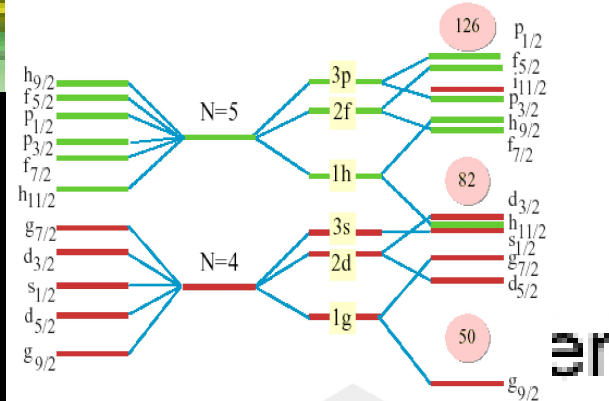
Superpesados



^4He



clusters



Nuevos N. Magicos

Formas exóticas

Halo de neutrones

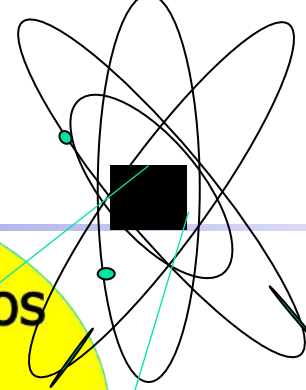




CSIC

I
E
M
...
CSIC
Grupo de Fisi
Nuclear
Experimental

Cuestiones Fundamentales en F. Nuclear?



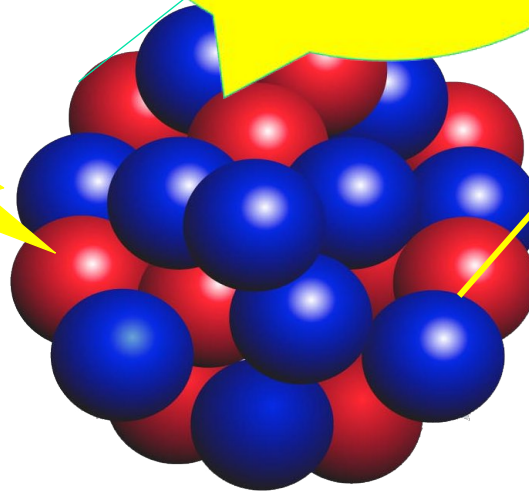
NUPECC
Long Range Plan 2017
Perspectives
in Nuclear Physics

2017

¿Cómo resulta la complejidad del núcleo a partir de sus constituyentes?

¿Cuáles son los límites de la estabilidad Nuclear?

¿Cómo y dónde en el universo se forman los elementos químicos?



Observables:

Prop del estado fundamental: masa, radio, momentos J , μ , Q
Tiempo de duracion y proceso de desintegración
Probabilidades de transicion

Modelos teóricos:

Modelo de capas (números mágicos)

Modelos de campo medio (deformación)

Calculos basados en primeros principios (ligeros)

El Modelo de capas y el carácter Universal de los números mágicos

Mayer & Jensen (1949)



- El núcleo exhibe estructura de capas
 - Capas cerradas= « números mágicos»
 - Nucleones de Valencia esenciales
 - El modelo de capas es la base para explicar la espectroscopia nuclear

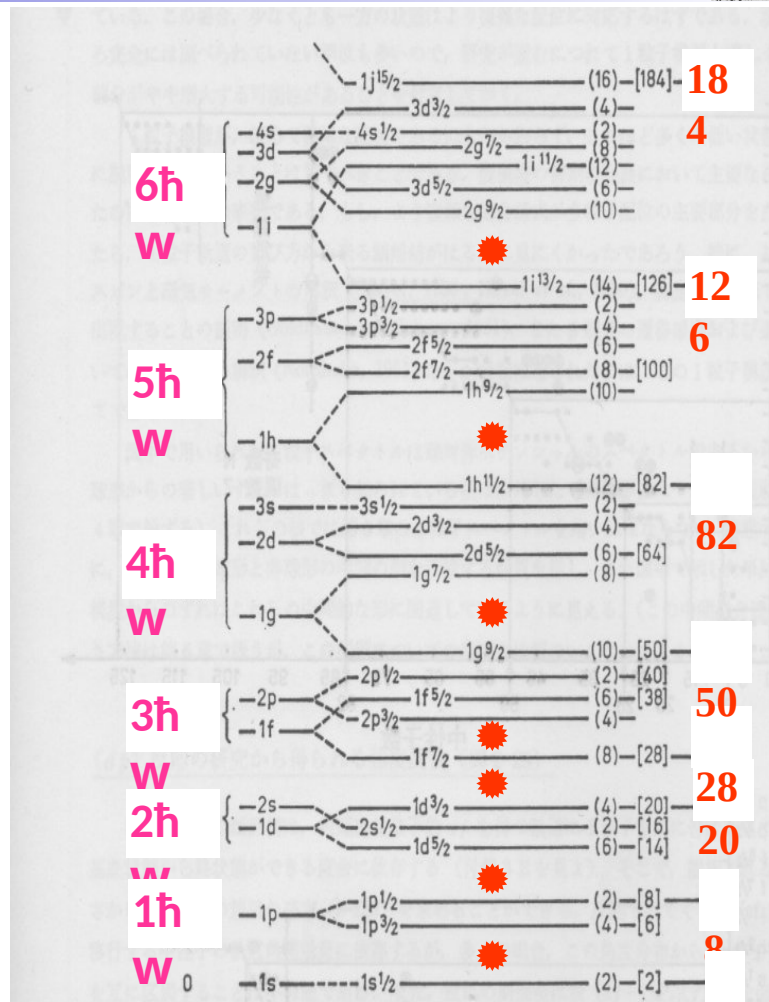
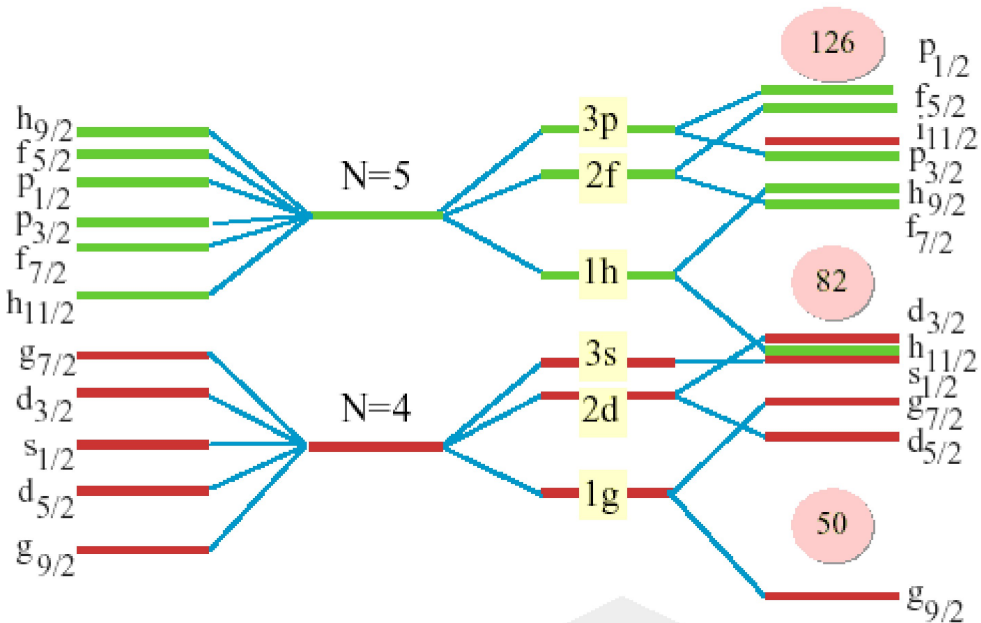


図2-23 1 粒子軌道の順序. 図は M. G. Mayer and J. H. D. Jensen, *Elementary Theory of Nuclear Shell Structure*, p. 58, Wiley, New York, 1955 からとった.

very diffuse surface
neutron drip line

harmonic oscillator

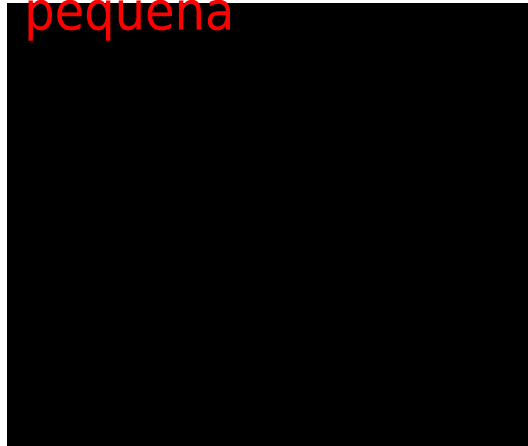
no spin orbit
exotic nuclei/
hypernuclei

around the valley of
β-stability

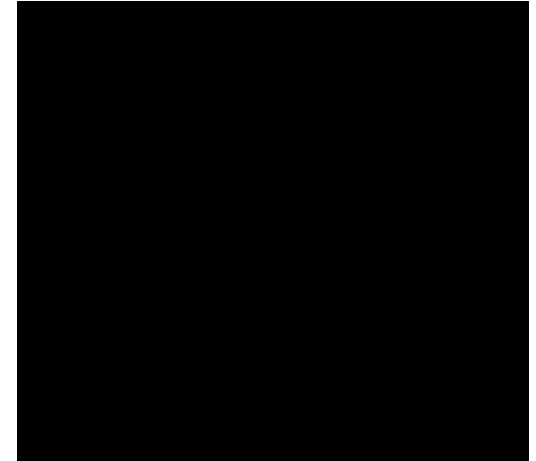
Densidad Nuclear & Asimetria Proton-Neutron



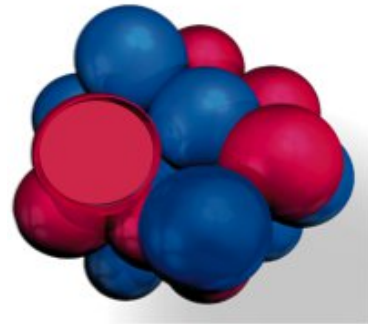
1-2n con energía de enlace muy pequeña



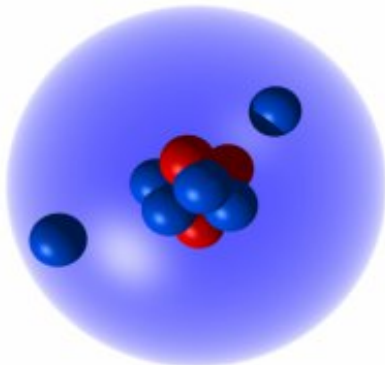
Gran exceso de neutrones



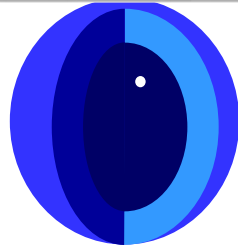
Estable



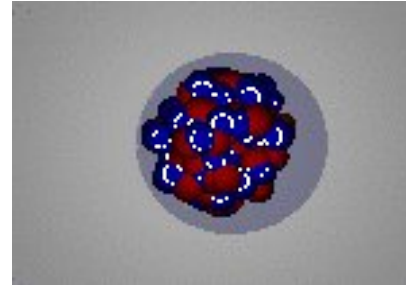
Halos



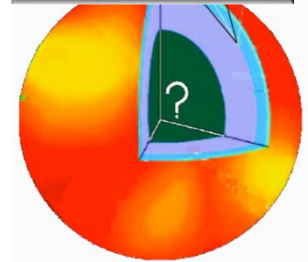
Piel de Neutrones



Resonancia Pigmea



Estrella de Neutrones



EOS

¿ Cómo sean formado los elementos mas pesados

- Protones & Neutrones producidos 10^{-6} s - 1s despues del Big Bang (hace 13.7×10^9 años)
- H, D, He, Li, Be, B formados 3 - 20 min despues del Big Bang
- Los núcleos mas pesados se forman a lo largo de la vida de la estrella

rp-, p-process:

- masses, Q_b at & beyond the proton drip-line
- (p,g), (g,p) rates

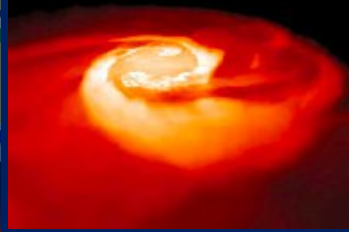


s-Process

Avanza en núcleos estable por captura neutrónica

Tin 50

neutron star merger

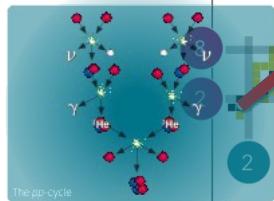


proceso-r:

- masas, vidas-medias
- b-n
- (g,n), (n,g) rates
- Estructura de capas

"Rapid process" via unstable neutron-rich nuclei

Neutron dripline (edge of nuclear stability)

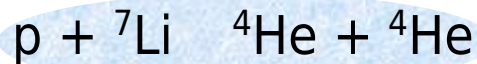


Datos precisos de Física Nuclear en combinación con observaciones y modelizaciones astronomicas permiten **fijar los escenarios astrofísicos**

Aceleradores de Partículas: los microscopios de la F.N



1932 Primera Reacción con protones:

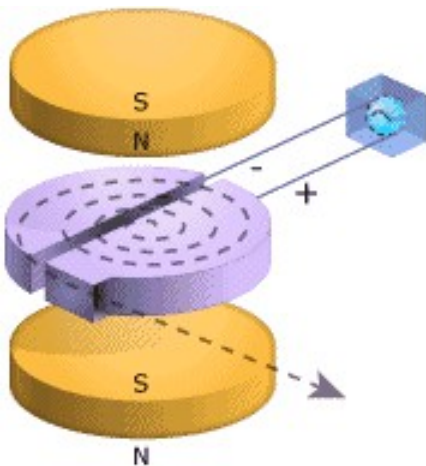


Li



Cockcroft & Walton (PN 1951)

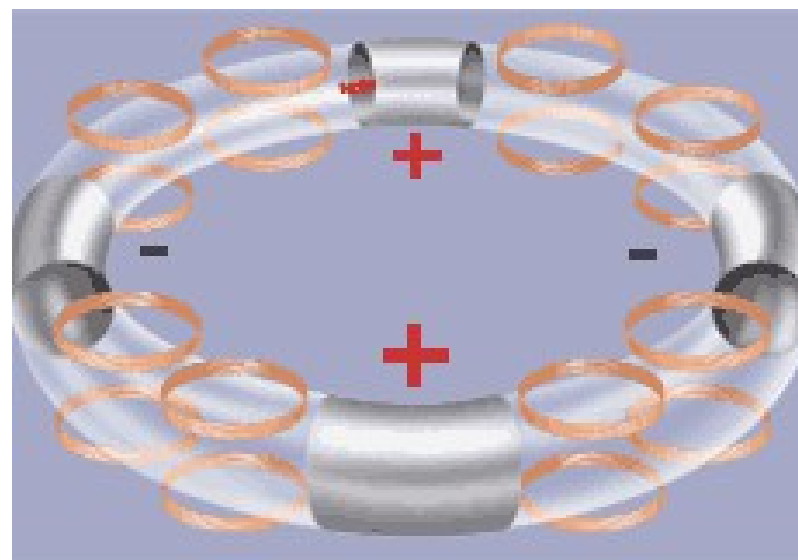
Construyeron (1930) el primer acelerador para explorar el núcleo



Ciclotrón



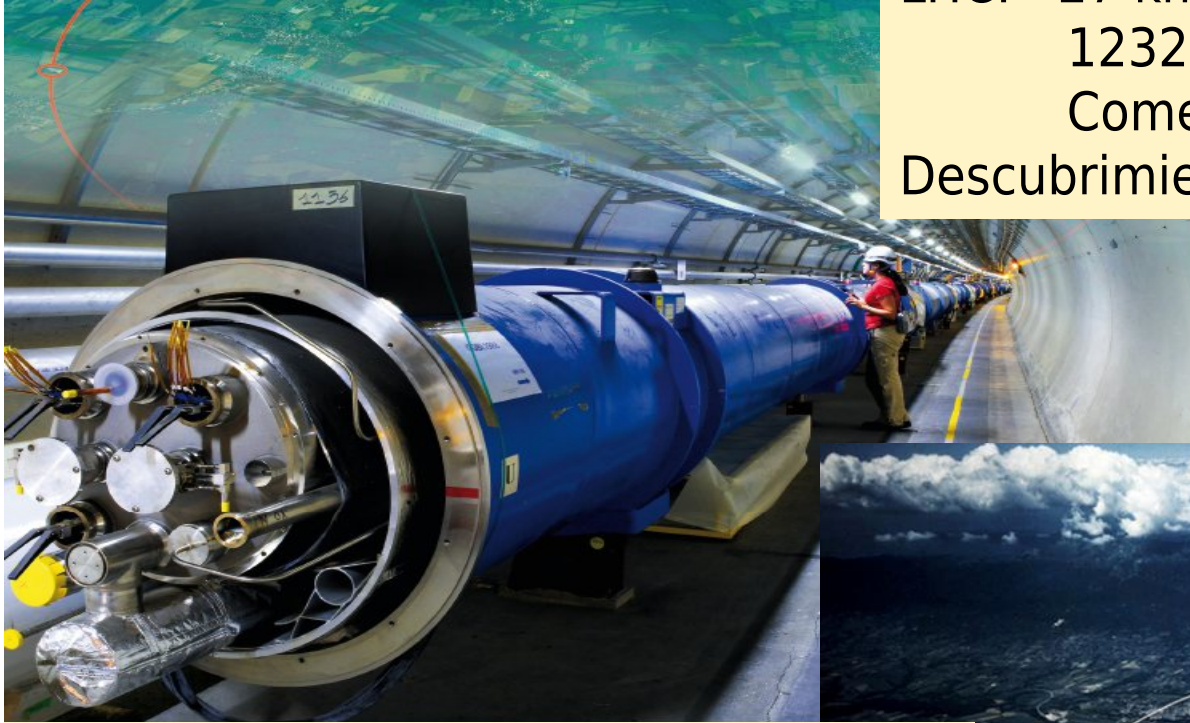
Lawrence (PN 1939)
propuso el ciclotrón



Sincrotrón (1940)

Aceleradores de Partículas: los microscopios de la F.N.

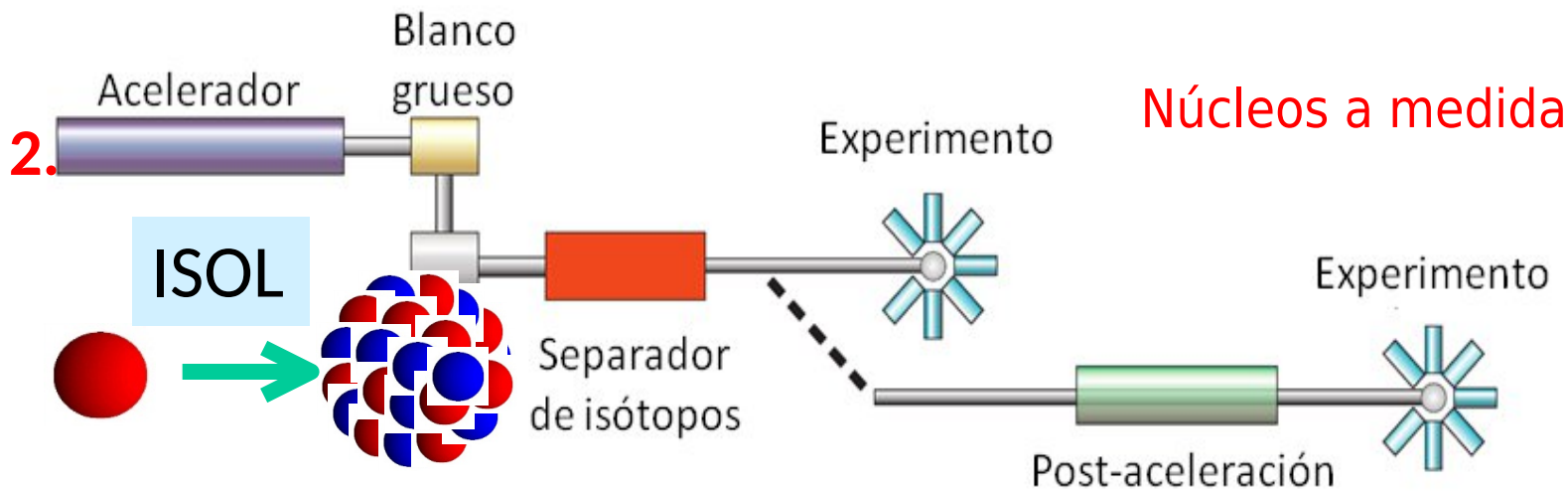
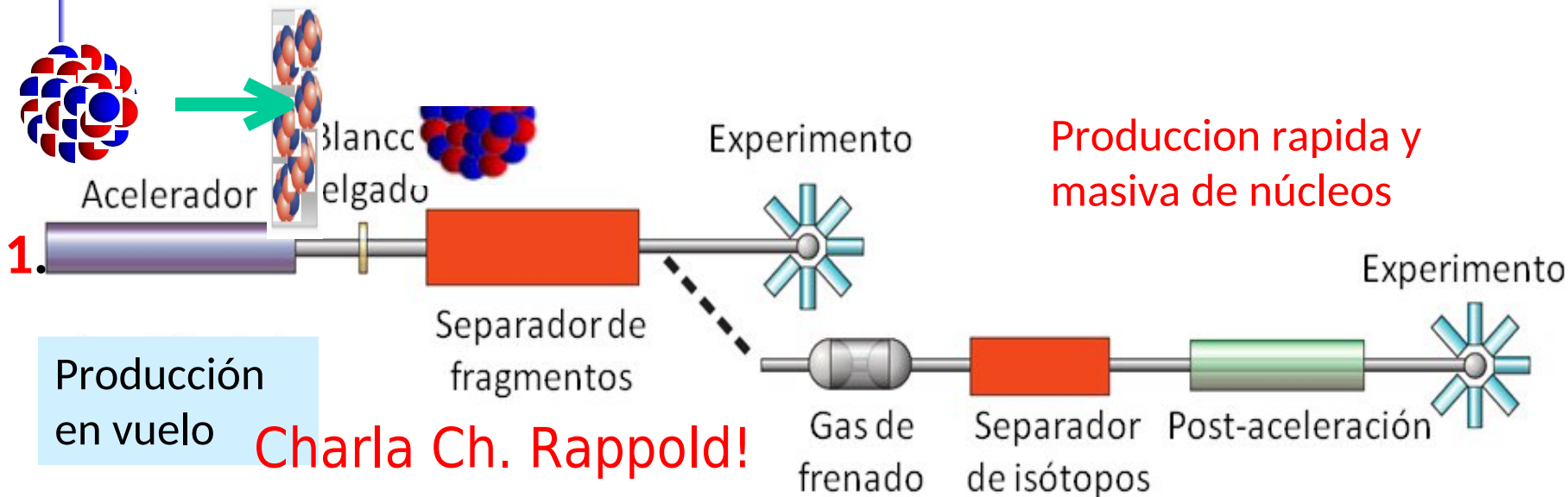
LHC: 27 km de circunferencia
1232 imanes superconductores.
Comenzó a operar en 2009
Descubrimiento del Higgs 2012



LHC: Temperatura de LHe (≈ -270 °C)
Ha costado ≈ 2200 M€ (JJOO)

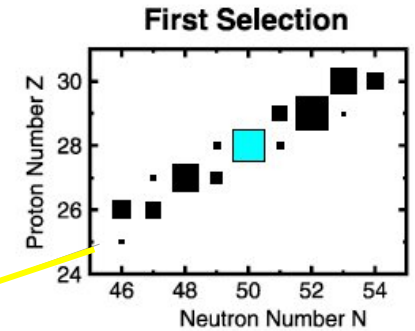
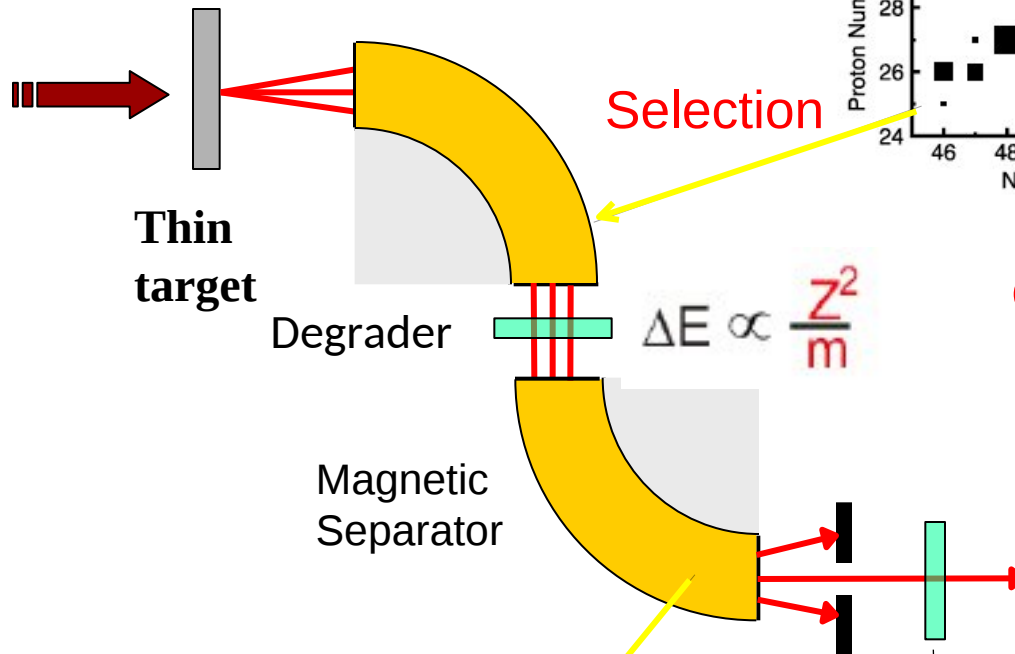


Producción de isótopos artificiales

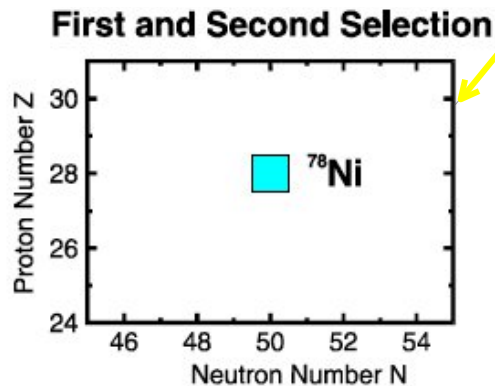
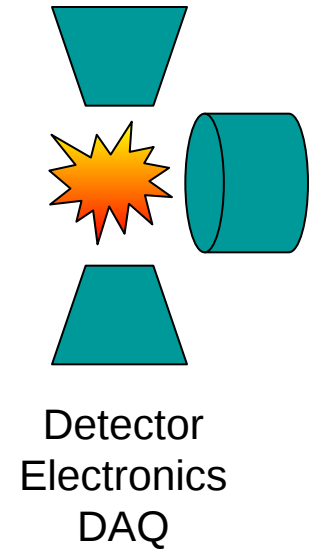


In-Flight Method (charla de Christophe Rappold)

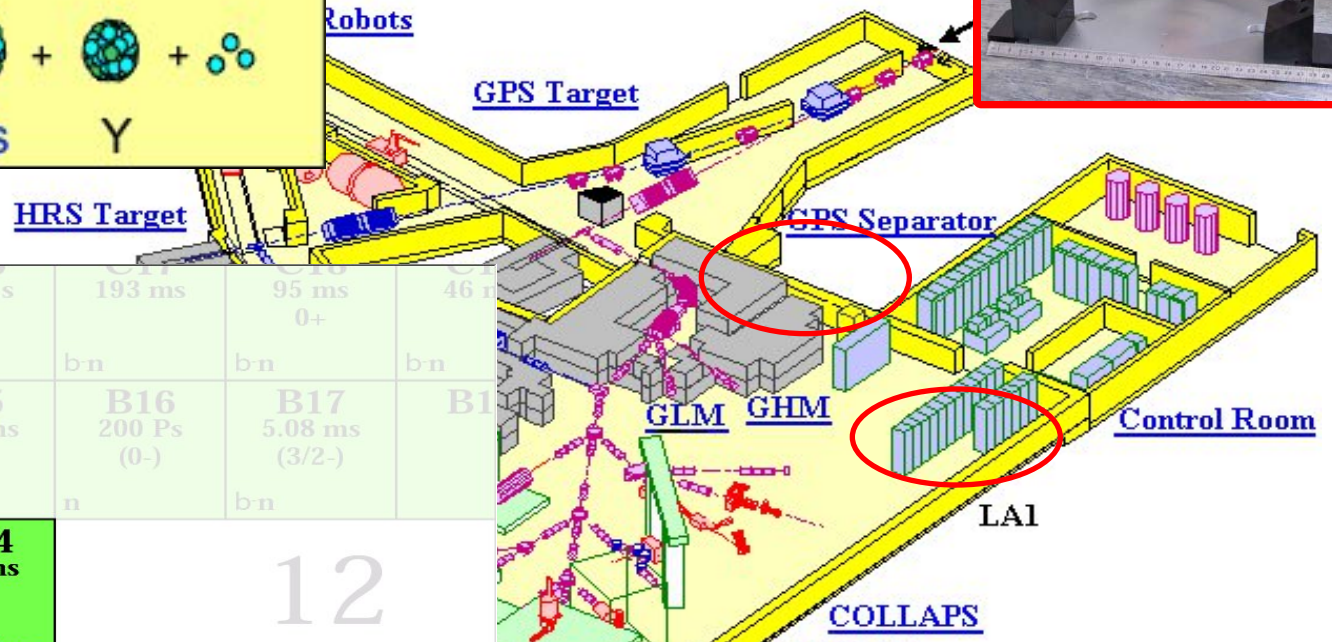
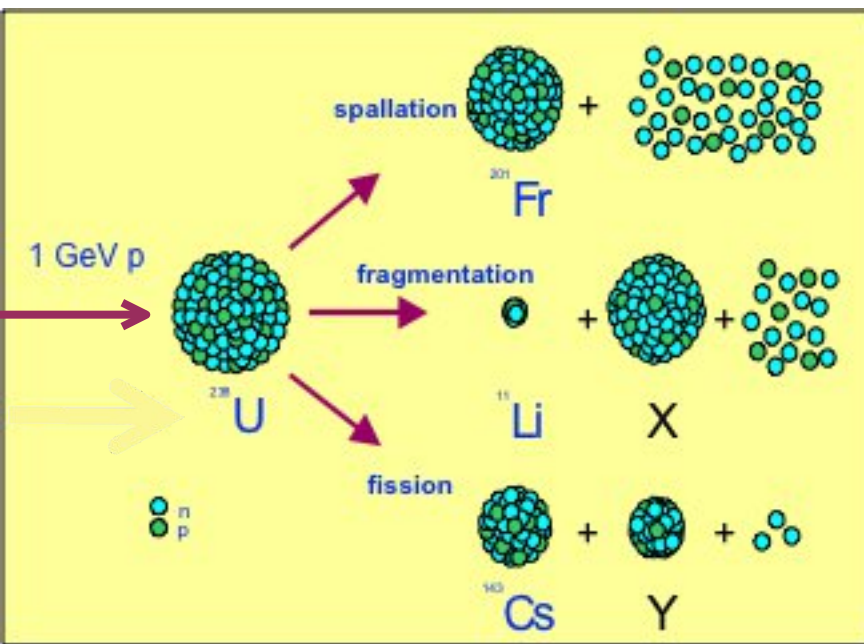
Production



Observation



Selection @ ISOLDE



	5730 y 0+	2.449 s 1/2+	0.747 s 0+	193 ms	95 ms 0+	46 ms
0 ms	B13 17.36 ms 3/2-	B14 13.8 ms 2-	B15 10.5 ms	B16 200 Ps (0-)	B17 5.08 ms (3/2-)	B18
MeV	Be12 23.6 ms 0+	Be13 0.9 MeV (1/2,5/2)+	Be14 4.35 ms 0+			
	Li11 8.5 ms 3/2-	Li12				
MeV	He10 0.3 MeV 0+					

12

10

Very Efficient separation and production of the Nucleus of interest



CSIC

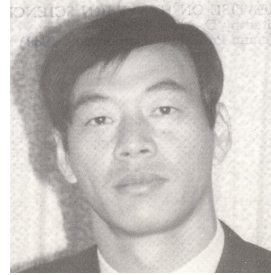
I
E
M
...
CSIC
Grupo de Física
Nuclear
Experimental

Instalaciones de haces radiactivos

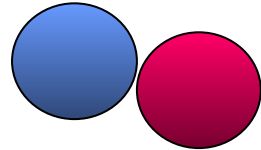


¿Qué ocurre en el límite de estabilidad neutrónica?

1985, Primeros Experimentos con haces radioactivos, Berkeley (USA)

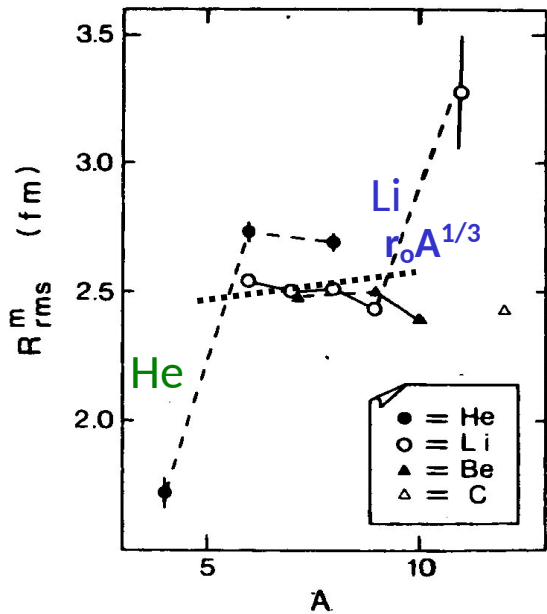


Tanihata



Deuterio

¿Por qué su radio de masa es tan grande?

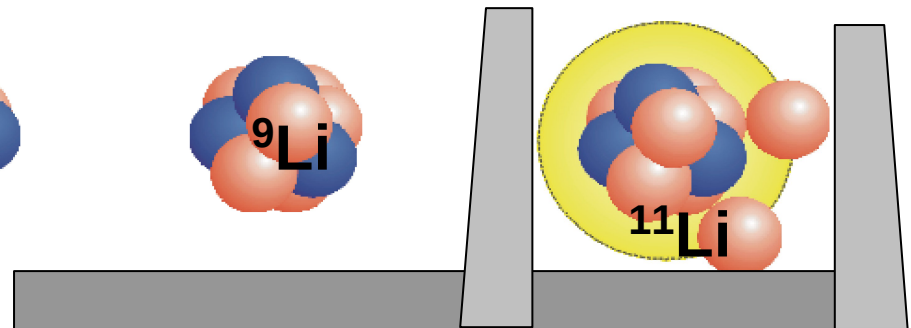
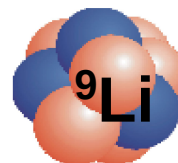
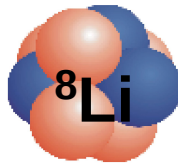
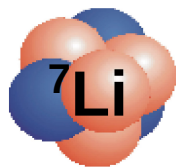
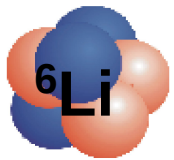


Be, C and Al



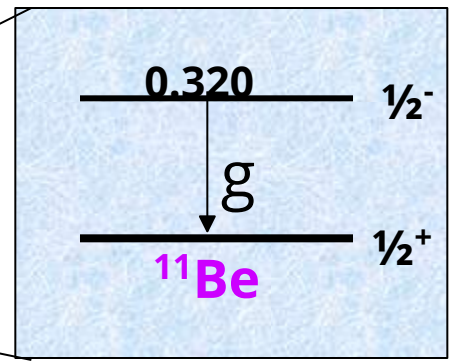
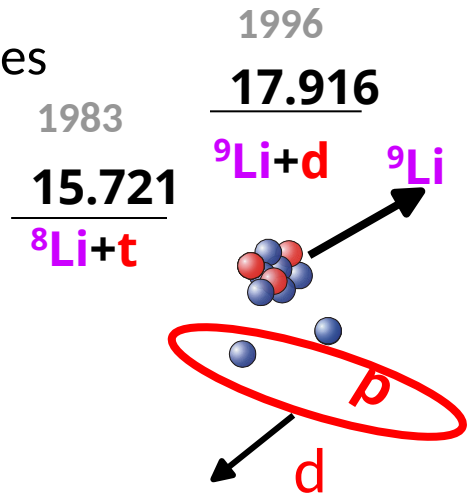
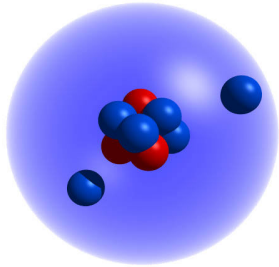
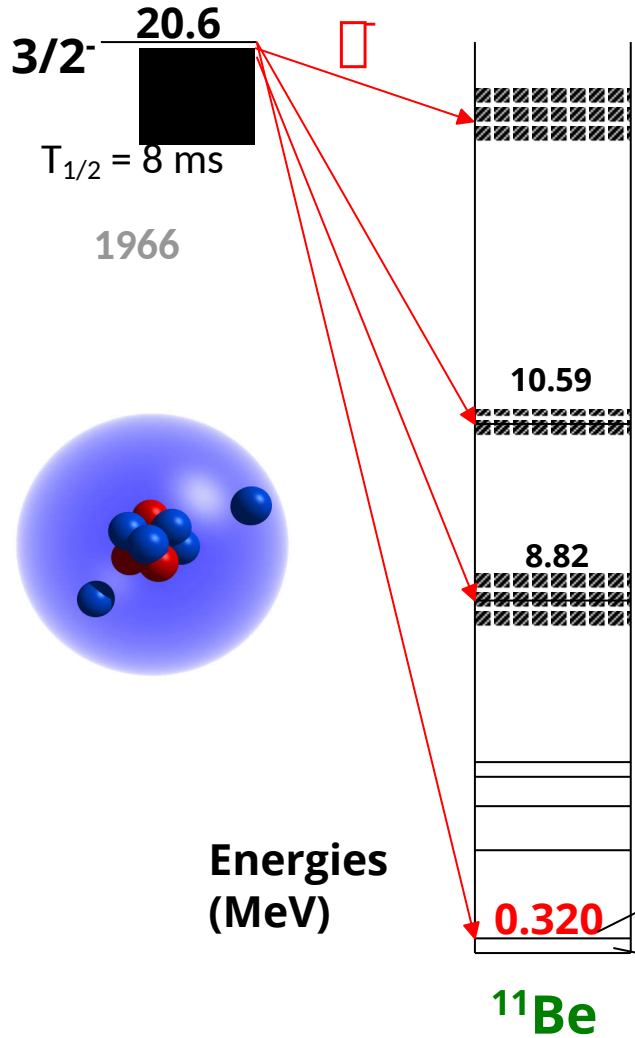
$$S_I(p, b) = \rho [R_I(p) + R_I(b)]^2$$

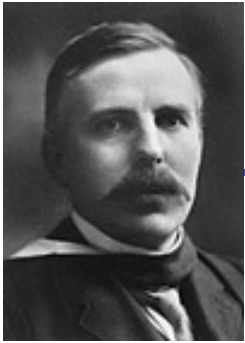
$$R(^{11}\text{Li}) = 3.30(24) \text{ fm}$$



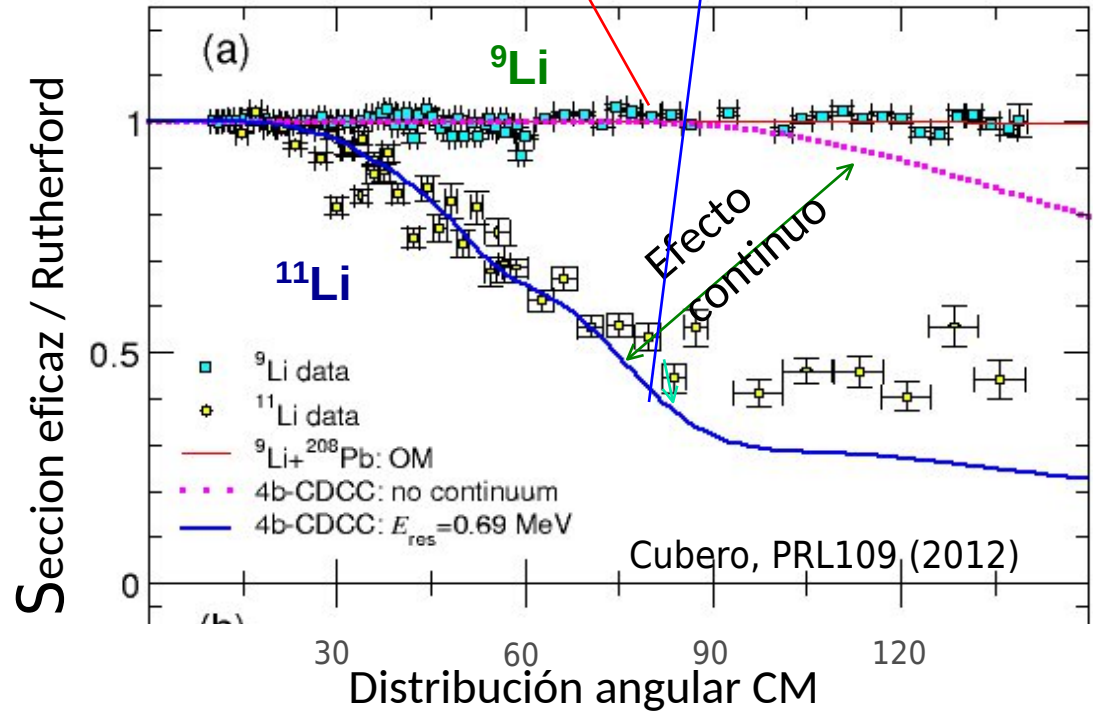
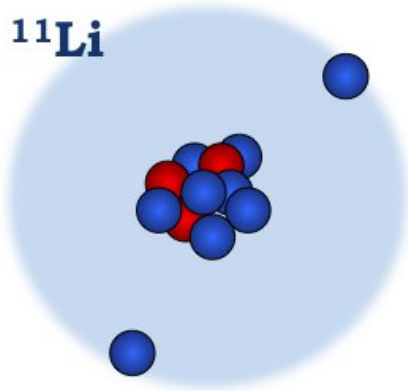
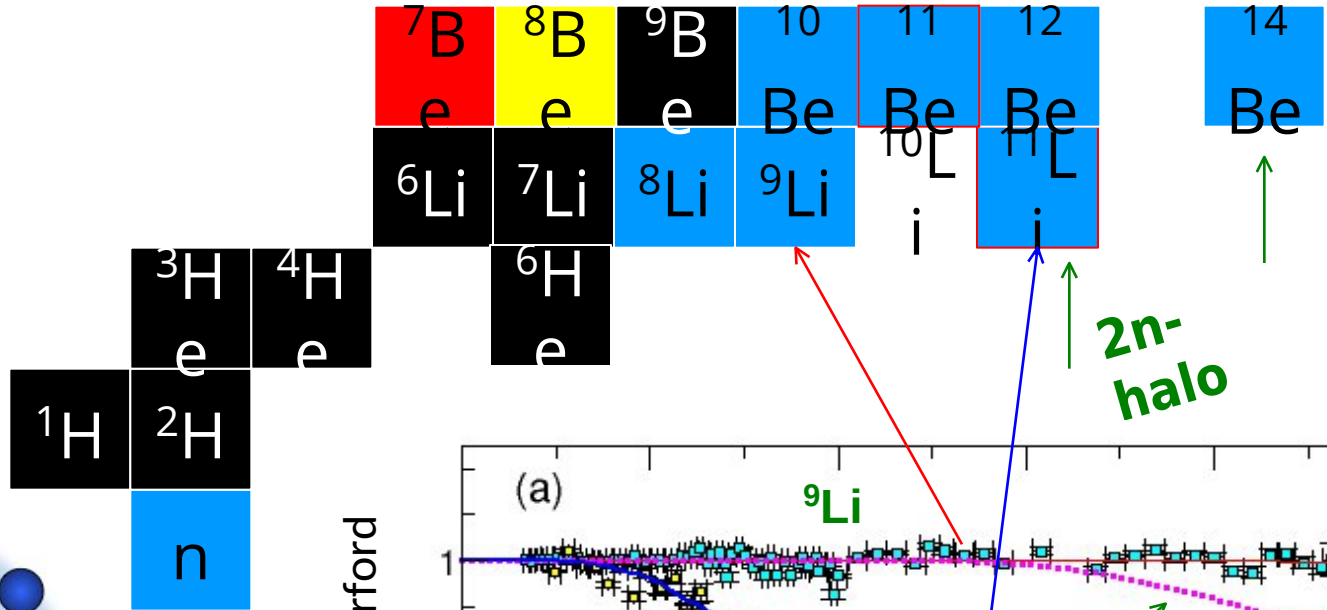
Desintegración beta de un núcleo exótico

- Muchos modos de desintegración
- Emisión de part. Cargadas en núcleos ricos en neutrones





¿Núcleos Halo y Reacciones ?



Tesis 2012

Tesis 2015

Tesis 2021



Astrophysics

- Part of the stellar hydrogen-burning chain
- Source of high-energy solar neutrinos above 2 MeV



Main contributor to what was known as the “solar neutrino problem”

Nuclear Structure

- Through the β^+ decay of ${}^8\text{B}$ we study the **structure of ${}^8\text{Be}$**



The 16.6 and 16.9 MeV levels of ${}^8\text{Be}$ **are assumed to form a fully mixed 2^+ isospin doublet**
(Only known case of Nuclear Chart)



β^+ decay of ${}^8\text{B}$ allows to experimentally check this assumption!

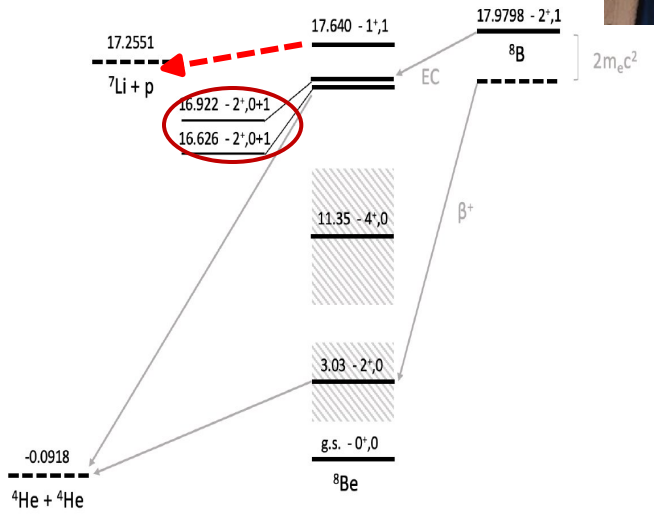
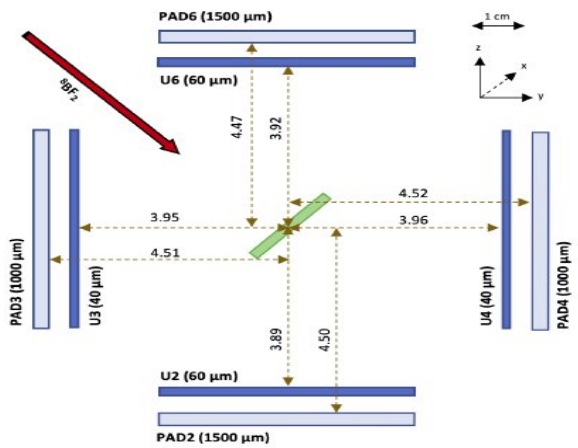
Our objective is to determine the mixture coefficients of the 2^+ isospin doublet



Experiment IS633 was conducted at CERN-ISOLDE in 2017 to study the structure of ^8Be



Tesis 2020



α - α coincidence spectrum + coincidence response matrix + fitting

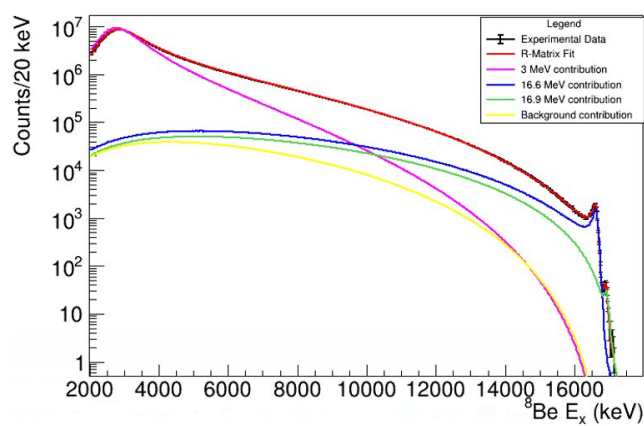
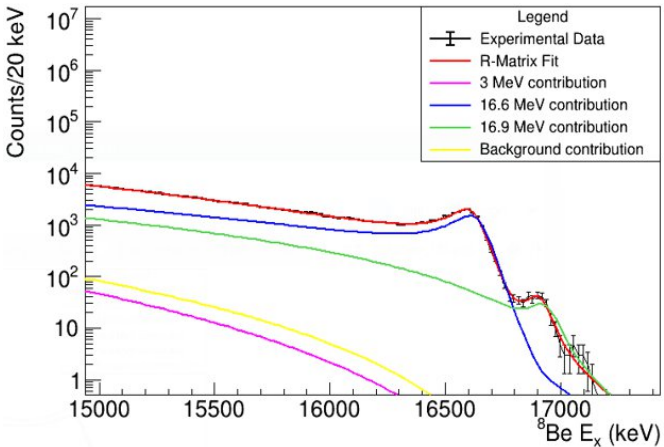
R-Matrix formalism Nuclear resonances in reaction studies

A. M. Lane et al., *Rev. Mod. Phys.* 30(2):257-353, 1958

β -decay of broad resonances

F.C. Barker, *Aus. Journ. Phys.* 22(3):293-316, 1969

✓ Good fit to the experimental data



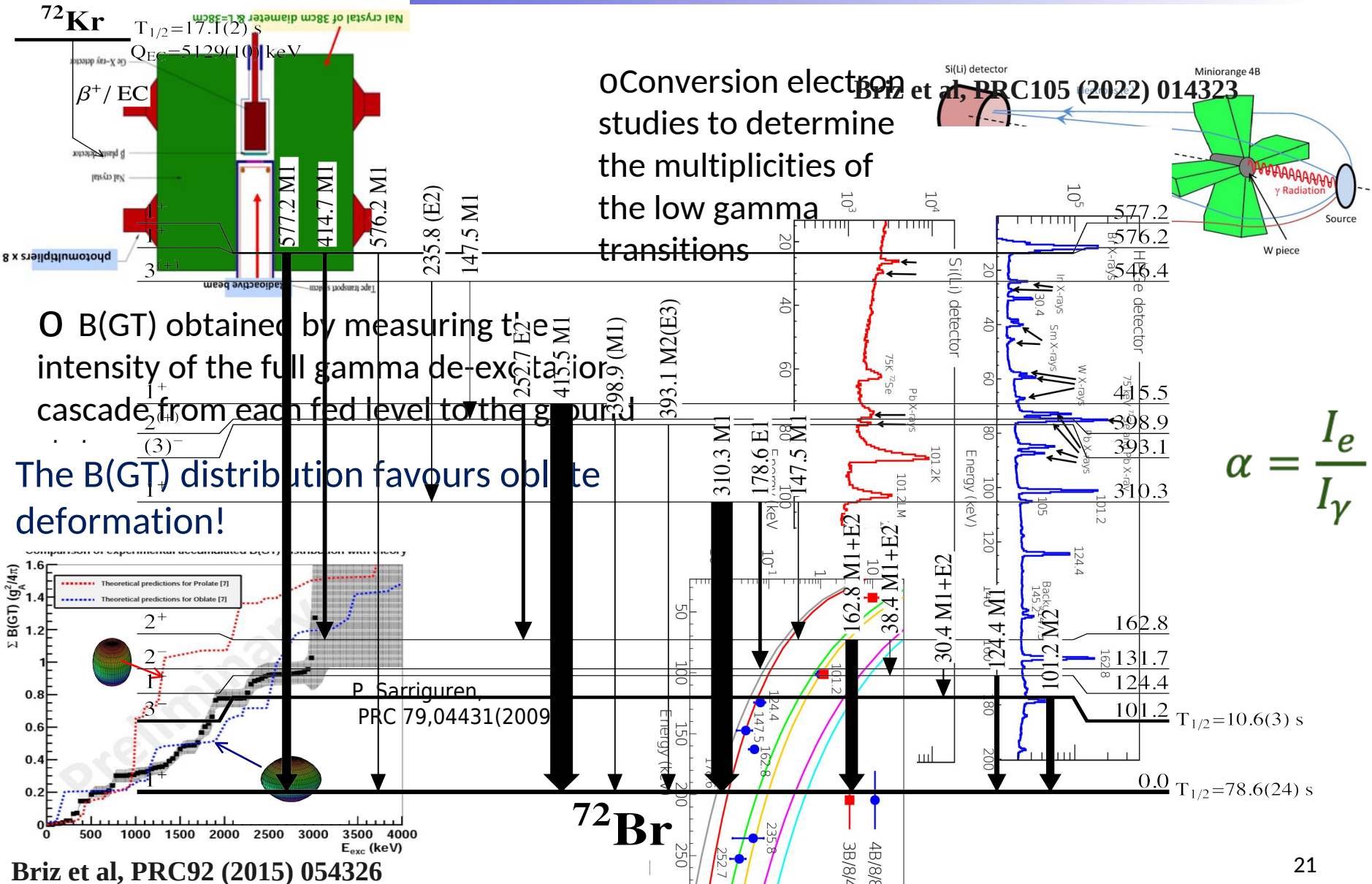
M.J.G. Borge

• La alimentación beta al doblete se ha resuelto por primera vez

• Se confirma que el doblete tiene una mezcla total de isopin.

• Limite a la emisión beta-p

Estudio del nucleo N=Z ^{72}Kr



Estudio de reacciones de interés astrofísico: $^{19}\text{F}(p,\alpha)^{16}\text{O}$

Carbon and Oxygen:

- Se produce en el proceso de quemado de He en estrellas rojas gigantes.
- Su abundancia está determinada. Their relative abundances are determined por la **competición** entre la destrucción de ^{12}C por 3α y la reacción $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$

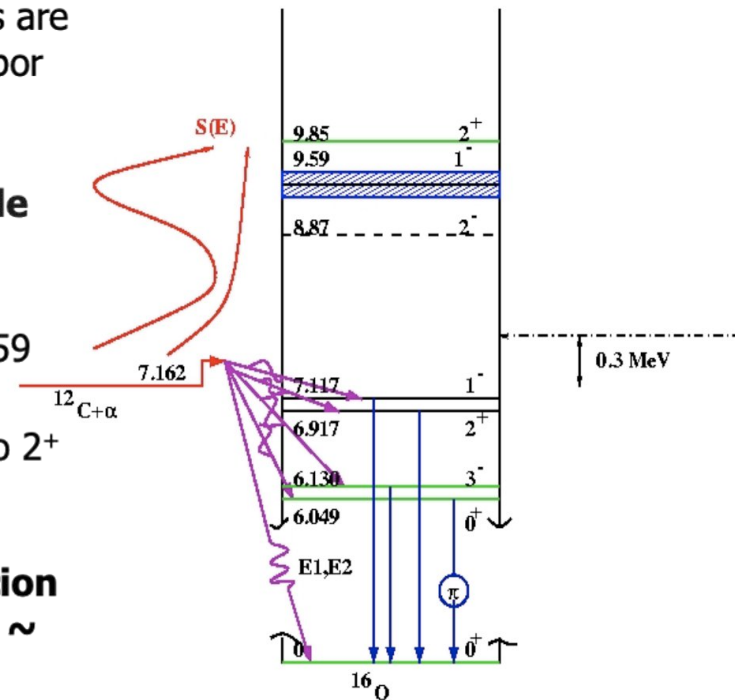
La reacción $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ ocurre fundamentalmente a través de captura radiativa a dos estados de ^{16}O muy próximos al umbral $^{12}\text{C} + \alpha$

- La captura E1 capture con tribucion de los estados 1^- at 9.59 and **sub-threshold 7.117 MeV** ($S_\alpha = 7162$ keV).
- La captura E2 dominada por por captura directa y al estado 2^+ a **6.917 MeV**.

A pesar de la importancia de la reacción $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$, su sección eficaz en las condiciones típicas de quemado de helio [$E_{\text{cm}} \sim 300$ keV] es muy limitado por varias razones

- Su infima sección eficaz, del orden de 10^{-17}b .
- Desconocimiento del papel que juegan los estados sub-umbrales a 7.117 y 6.917 MeV ^{16}O .

$^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$



Objetivo: medir las anchura-a de estos estados de una manera indirecta usando la reacción $^{19}\text{F}(p,\alpha)^{16}\text{O}$ en el CMAM (UAM)

Experimentos en el CMAM : Estudio de la Reaccion $^{19}\text{F}(p,\alpha)^{16}\text{O}$

- Haz de protones producido por el Tandem de 5MV
- Hay una línea experimental dedicada a F. nuclear

CEPA4

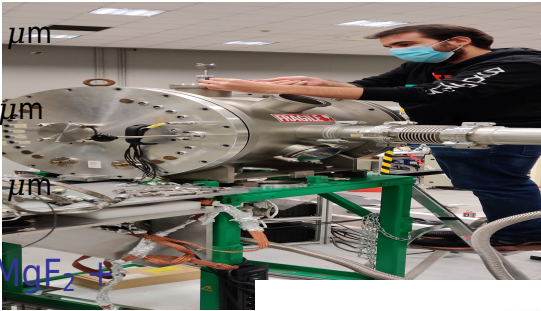
LaBr₃ LaCl₃

4 cm 6 cm

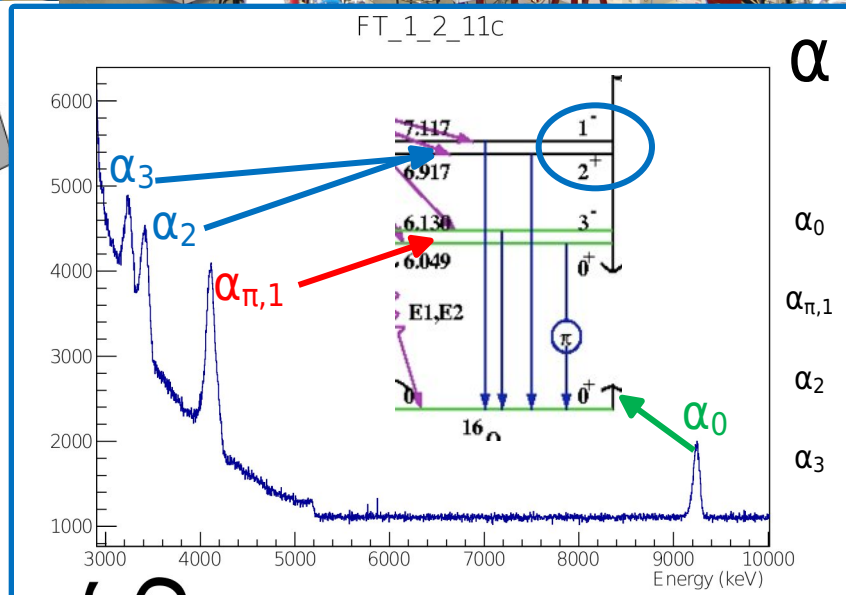
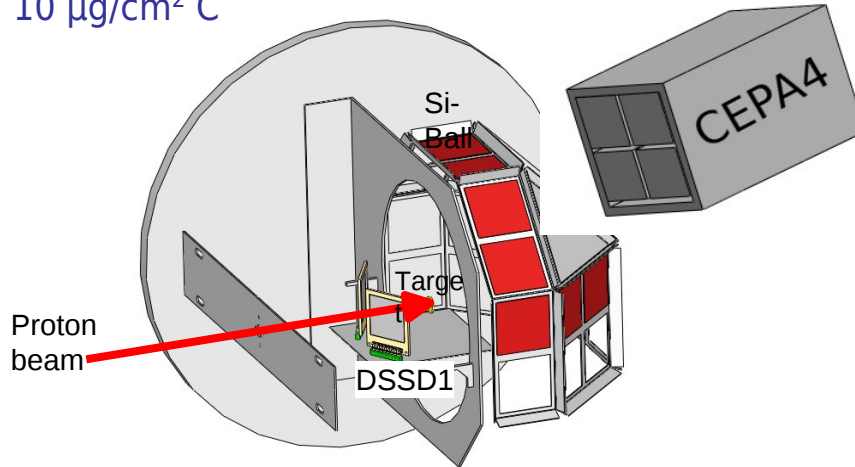
DSSD_1 300 μm

DSSD_2 60 μm

DSSD_3 300 μm

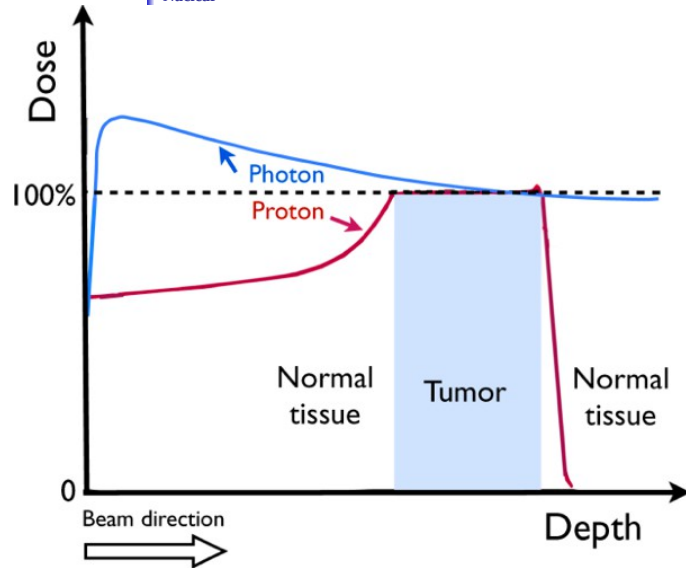


Target: 120 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ MgF₂ +
 10 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ C

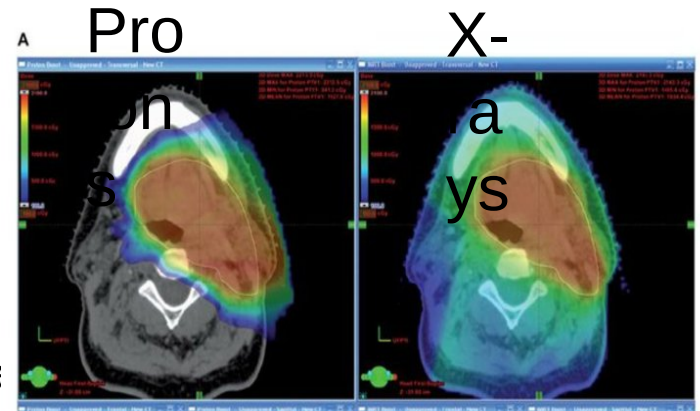


Rati
 100
 236
 145
 173

Aplicaciones en medicina: pCT



La proton terapia tiene la ventaja sobre la terapia convencional con radiación gamma que el daño de los órganos próximos se puede minimizar.



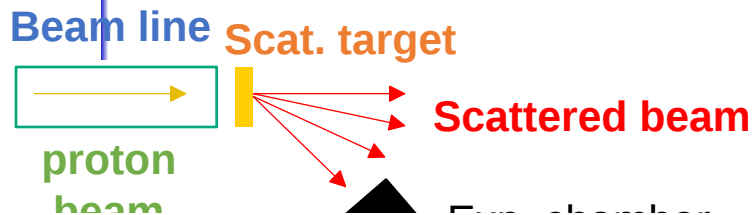
Actualmente el control de dosis en tratamientos de proton terapia se usan XCT. En el procedimiento, coef de atenuación + Stopping powers (poder de frenado) de los distintos tejidos hay una incertidumbre de 3%

ii Dosis absorbida para
 -radiografía: 0.01 mGy
 -X-ray CT: 30-50 mGy
 -proton CT: ~1.3-1.4 mGy

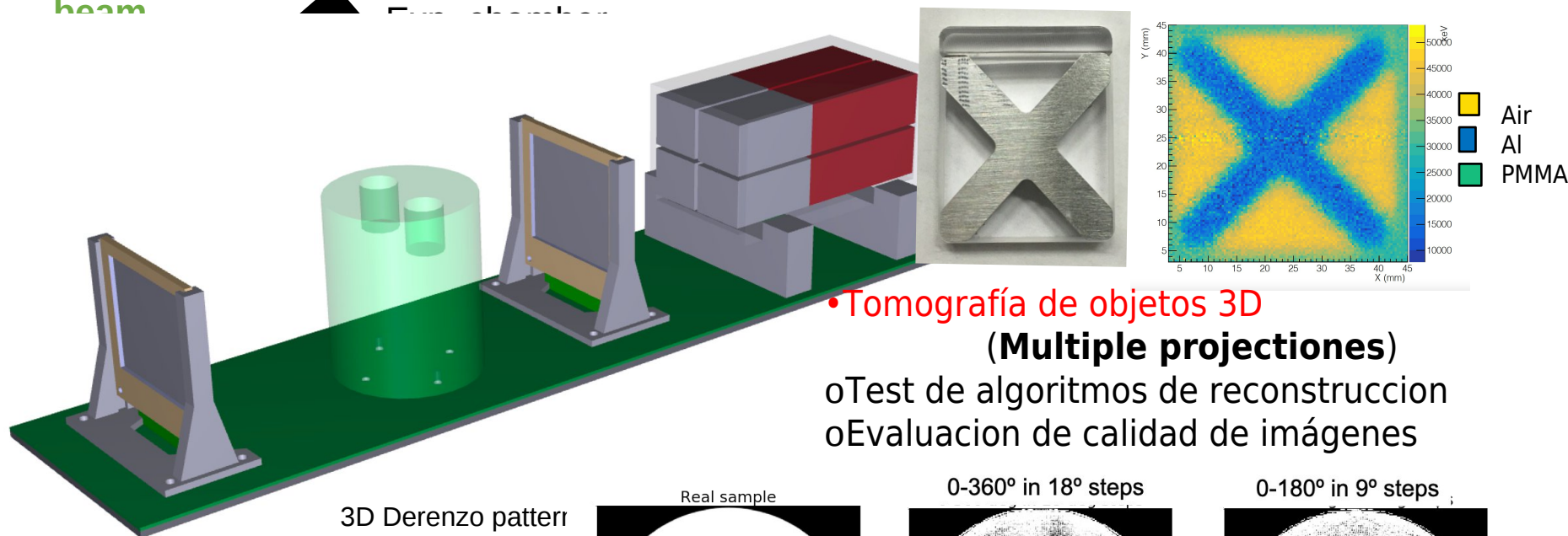
Robert P. Johnson et al.
 Rep. Prog. Phys. 81 (2018) 016701

Además en España ya existen 2 instalaciones de terapia de protones: Quirón y Cl. U. de Navarra Y se planifican otras 12 mas (Fundación Amancio Ortega)

Experimento en Instalación Protonterapia CCb en Cracovia



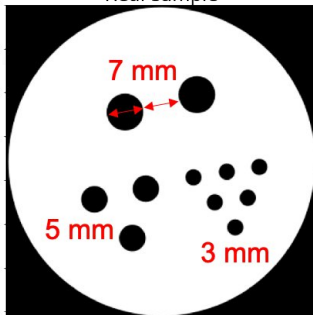
• Propiedades de imágenes directas (radiografías) (**proyecciones**)



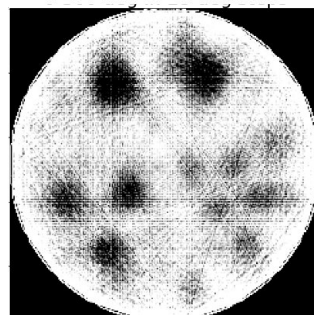
3D Derenzo pattern



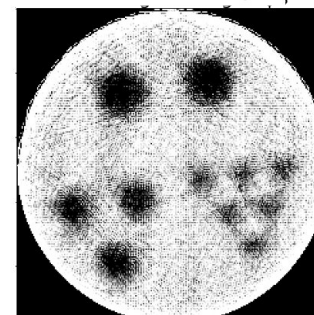
Real sample



0-360° in 18° steps



0-180° in 9° steps





Etapas en la investigación en F. N. Experimental

1) Antes del Experimento

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

2) Durante el Experimento

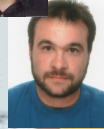
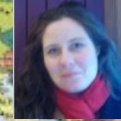
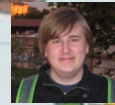
- Traslado de material al laboratorio correspondiente
- Montaje experimental (1 semana... 4 meses... años...)
- Medida con haz (1 semana)

3) Después del Experimento

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



DOCTORES 2010 - 2021



Gracias por vuestra atención

Grupo Senior:

Maria Jose G^a Borge

Andrea Jungelaus

Ch. Rappold (Prox

Charla)

Olof Tengblad

Angel Perea

Estudiantes:

Jaime Acosta

Samuel Escrig

Daniel Fernandez

Carlos Ferrera

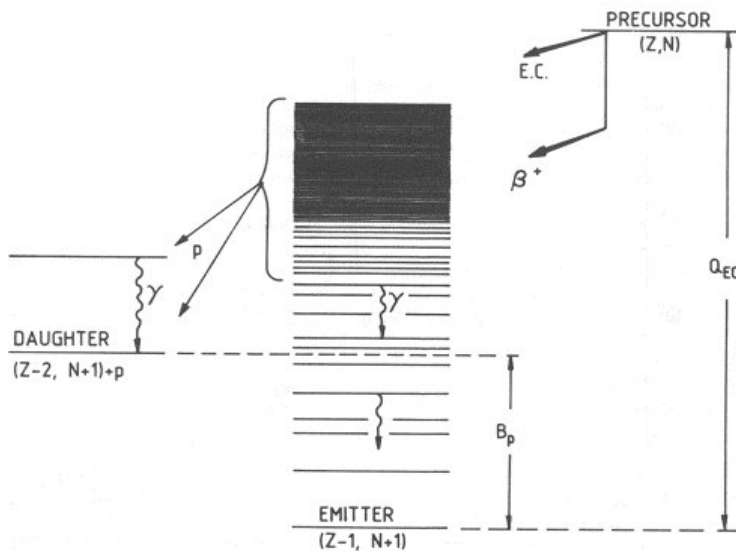
Vicente G^a Tavora

Amanda Nerio

Emisión retardada de partículas

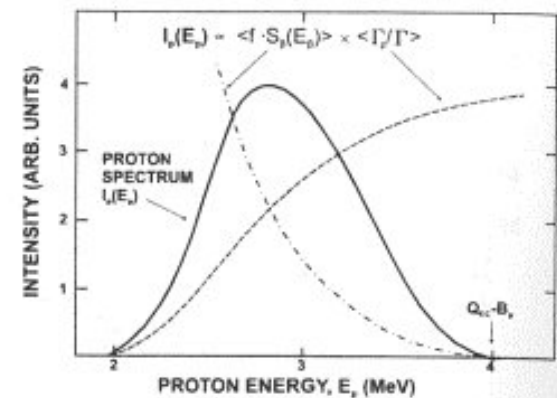
- **1963** **Barton & Bell** en McGill (Canada) identificaron ^{25}Si como el primer precursor de emisión de protones.

- La energía de la partícula depende de:
 - 1-Intensidad beta del precursor
 - 2-probabilidad de emisión de part. Frente a gammas.



$$I_p^{if} = I_\beta^i \frac{\Gamma_p^{if}}{\Gamma^{if}}$$

- Para precursores más pesados, I_p^{if} se promedia sobre el rango de energía con forma de campana.



31Ar, al borde de la estabilidad: 18p + 13n



Tesis
2018

$$E_{IAS} = 12322(2)(50) \text{ keV}$$

$$Q_{EC} = E_{IAS} + \epsilon_{EC} - \epsilon_{np}$$

$$\epsilon_{EC} = 7045 \text{ keV}$$

$$Q_{EC} = 18,49(11) \text{ MeV}$$

$$f(E_{IAS})t_{IAS} = 6145(4) \text{ s} / [B(F) + B(GT)]$$

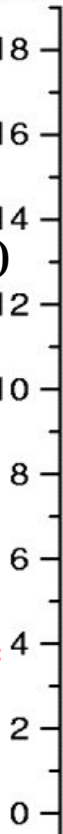
$$\text{b.r.}(IAS) = T_{1/2} / t_{IAS}$$

$$B(F) = [T(T+1) - T_{zi}T_{zf}] / I_f = 5$$

$$\text{Expected b.r. (IAS)} = 4.35(31)\%$$

$$\text{Experimentally: b.r. (IAS)} = 4.25(30)\%$$

1eV



$2p/1p$ (IAS) ≈ 9

18.46
31Ar
14.1(7) ms

$Q = 18.5 \text{ MeV}$

$I_{\beta}(\%)$

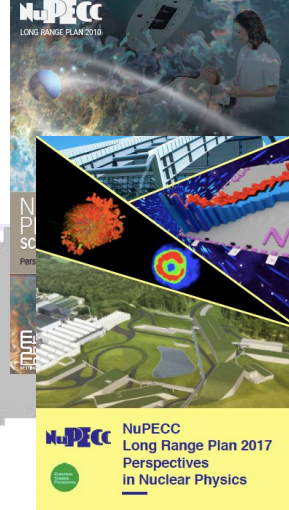
IAS

Tesis 2015



Cuestiones Fundamentales en F. Nuclear?

- ¿Cómo se forma un núcleo a partir de sus contituyentes?
 - La interacción fuerte en el medio nuclear
- ¿Cómo explicar las propiedades colectivas a partir del comportamiento individual?
 - Prop. colectivas versus individuales
- ¿Por qué aparecen regularidades en sistemas tan complejos?
 - Identificación de simetrías



LRP 2010

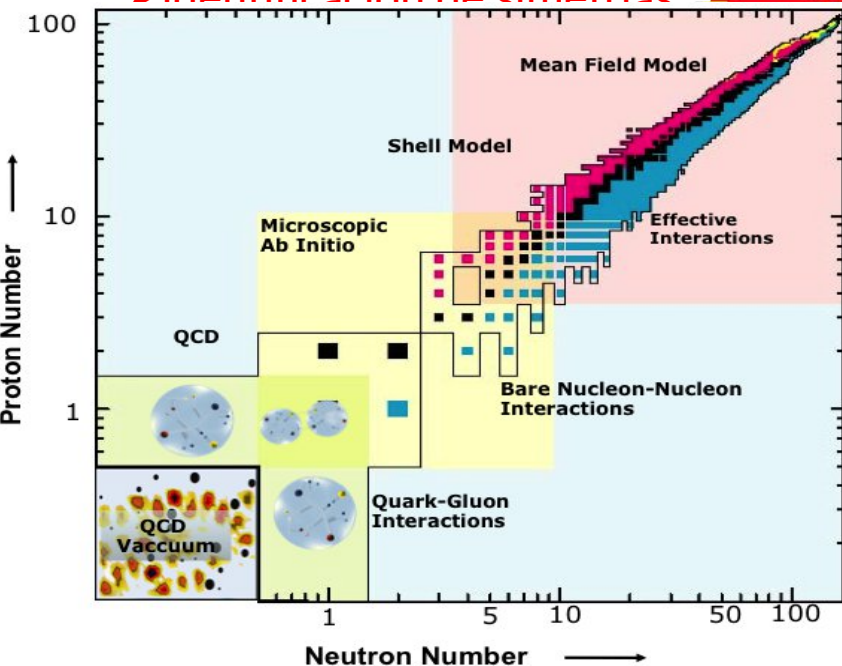
Observables: LRP 2017
 Prop del estado fundamental: masa, radii
 momentos J, μ, Q
 Tiempo de duracion y proceso de desintegración
 Probabilidades de transicion

Modelos teóricos:

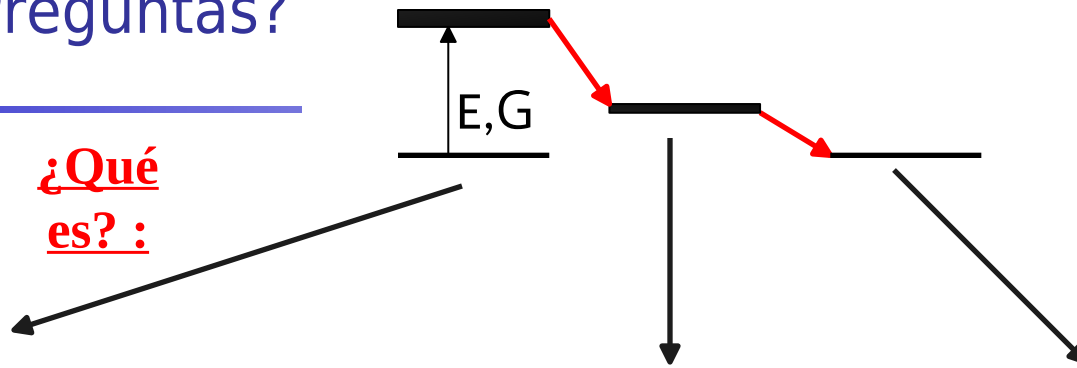
Modelo de capas (números mágicos)

Modelos de campo medio (deformación)

Calculos basados en primeros principios (ligeros)



¿Preguntas?



¿Qué es? :

•E,G ?

-**Difícil de medir**

•Spin-parity?

- **Reglas de selección**

•¿Estructura del estado?

-**Cluster states**
 -**Many-body states**

•Mecanismo de ruptura?

-**¿Secuencial or directo?**
 -**Importancia de los distintos canales**

•Relación con estructura del estado

•Espectro

•Asimptótico

-**Observables**

-**Energías**
Correlaciones angulares