



El Experimento ISOLDE del CERN :de la Fisica Nuclear a la Física Medica

María José G. Borge

Instituto Estructura de la Materia

CSIC, Madrid

17 de marzo 2023

mgb@cern.ch

Indice

- Inicios de la Física Nuclear
- Temas candentes de la Física Nuclear
- El experiment ISOLDE del CERN
- Su nueva instalación HIE-ISOLDE
- Aplicaciones en F. Medica

Descubrimiento de la radioactividad natural

Henry Becquerel

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

- Independiente del compuesto químico
- En ausencia de descargas

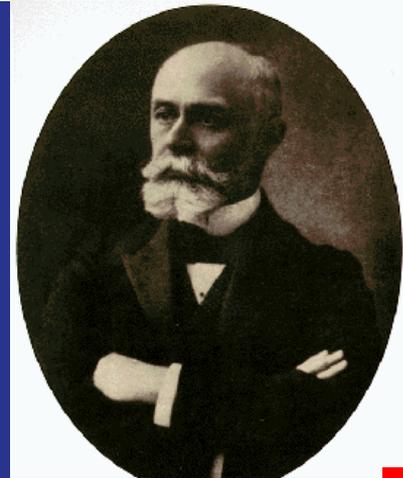
Mismas propiedades en **sales de torio**

➤ Hipótesis: Radiación propiedad atómica, **Radiactividad**

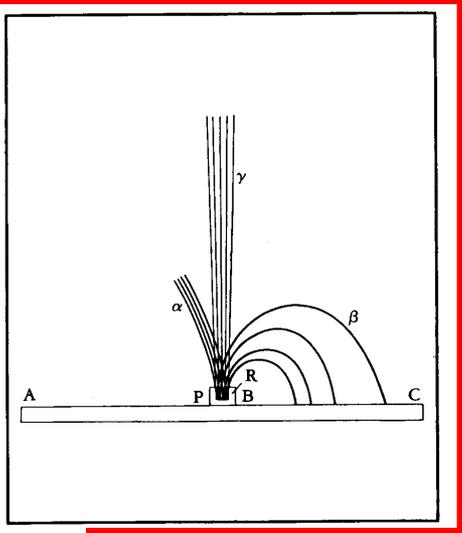
➤ En bismuto → **Polonio**.

➤ En Ba → **Radio**

➤ Uso del electrómetro de Curie para identificación química



Maria Sklodowska



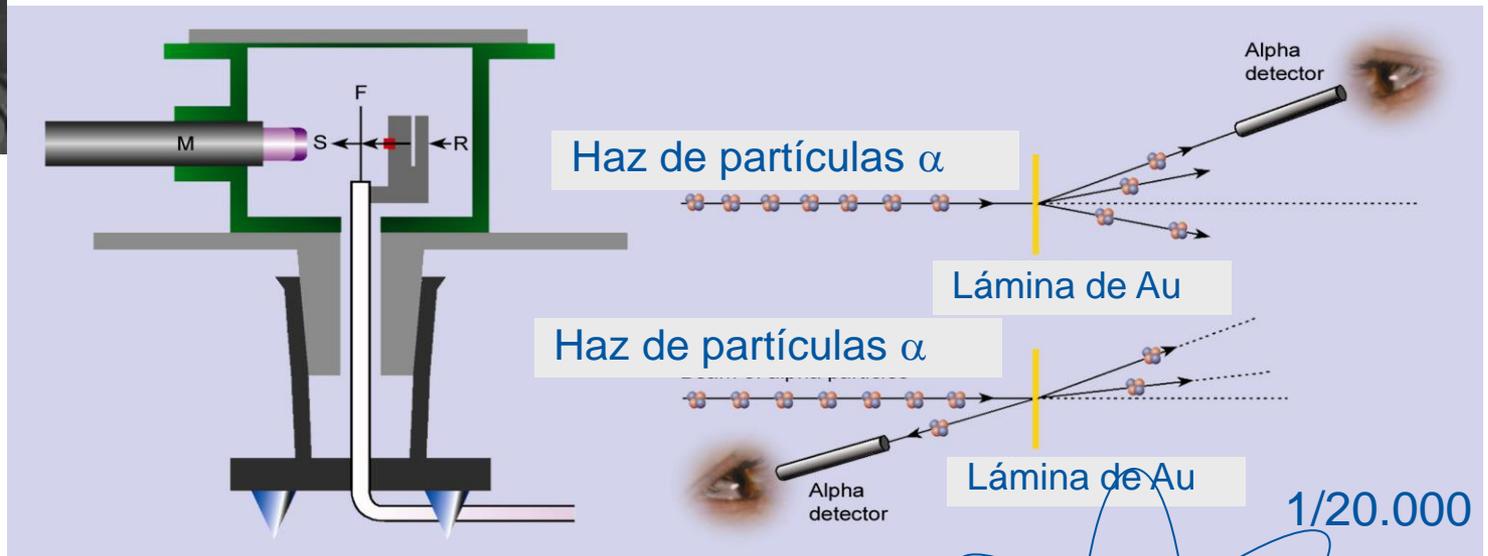
Pierre Curie

Módelos atómicos



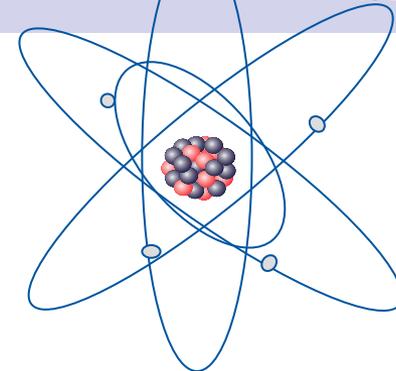
1907, Manchester (UK)

Estudió la dispersión de **partículas α** en láminas de Oro, mica,..



Geiger y Marsden observaron

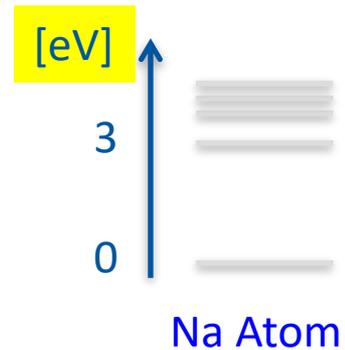
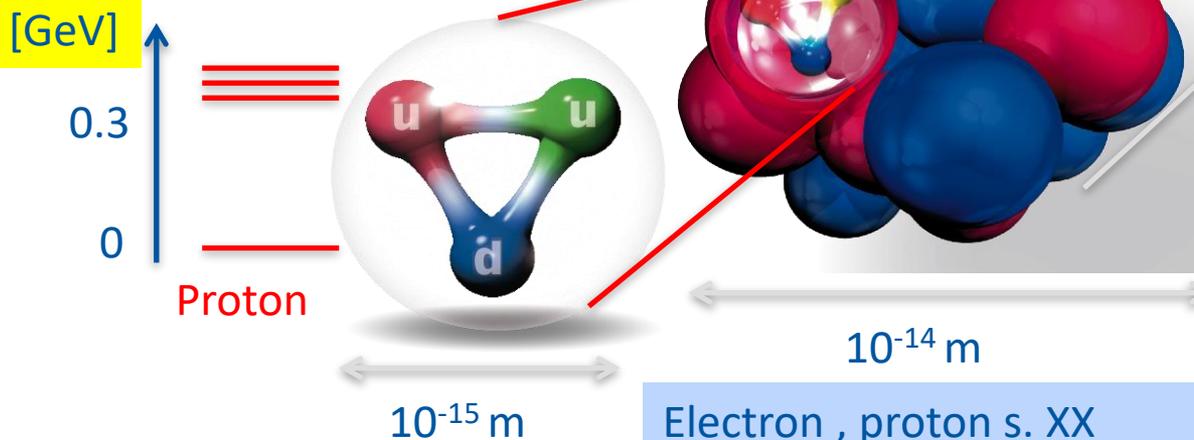
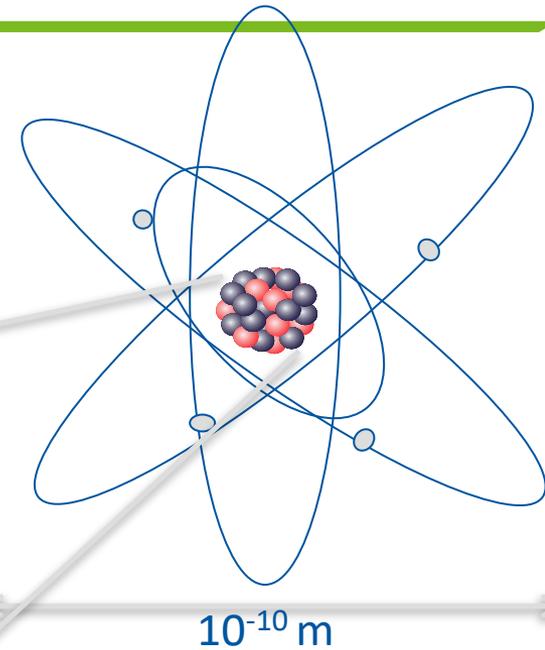
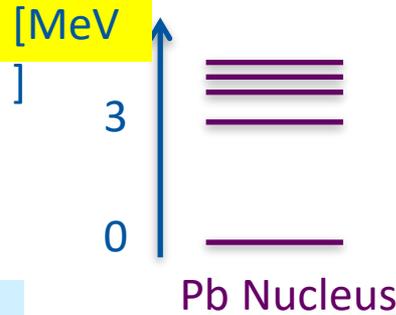
Retrodispersión, 1911



Estructura Subatómica

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!

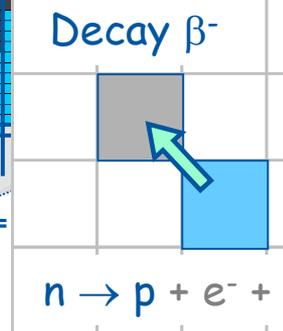
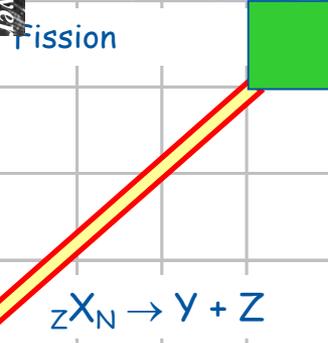
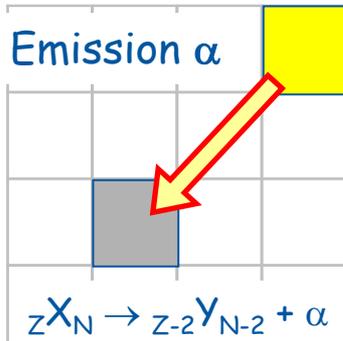
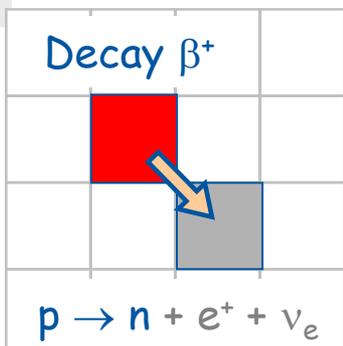
50/60's Acceleradores → El Zoo (100)Hadrónico
Hadrones combinaciones de 2-3 quarks

El Paisaje nuclear

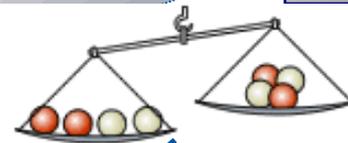


- - Stable Nuclei
- - β^+ / EC
- - β^-
- - α
- - Fission

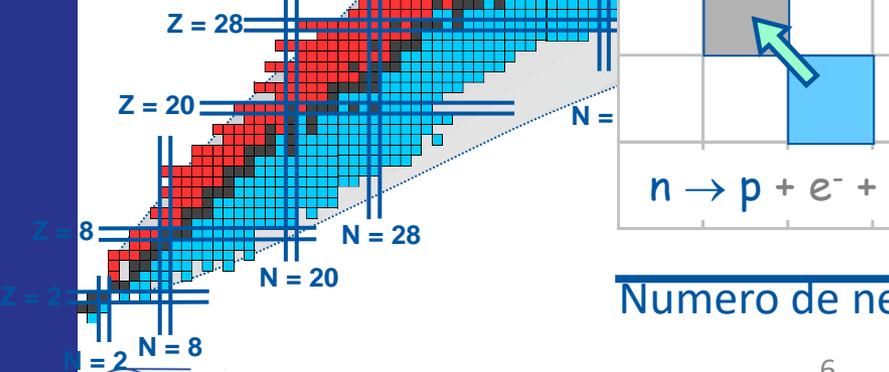
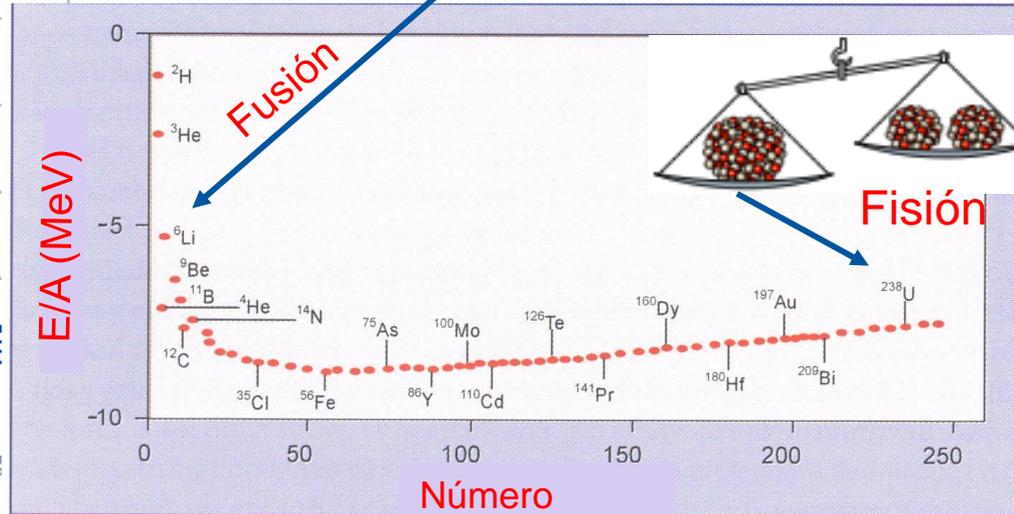
Numero de Protones, Z



Nucleos ligados



+ primordiales



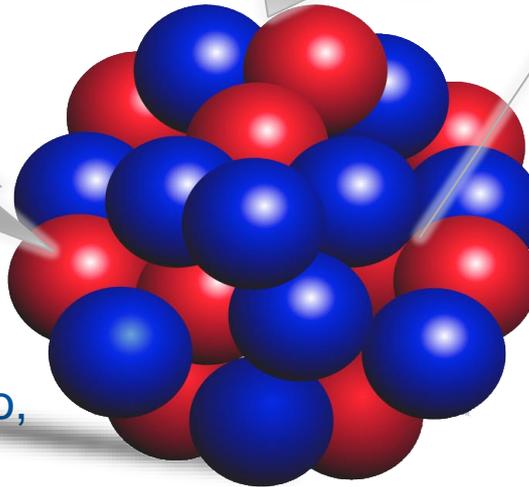
6 mg

Preguntas Fundamentales

¿Por qué aparecen regularidades en sistemas tan complejos?

¿Cómo se forma un núcleo a partir de sus contituyentes?

¿Cómo explicar las propiedades colectivas a partir del comportamiento individual?



Observables:

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

Modelos teóricos:

Modelo de capas (números mágicos)

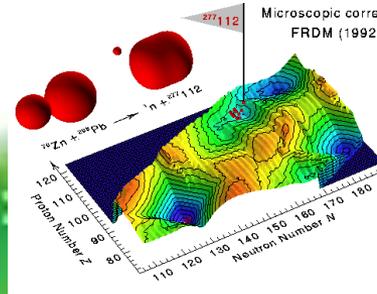
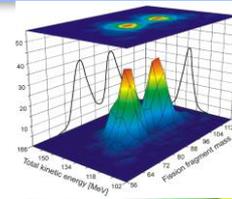
Modelos de campo medio (deformación)

Calculos basados en primeros principios (ligeros)

Temas Candentes en Física Nuclear

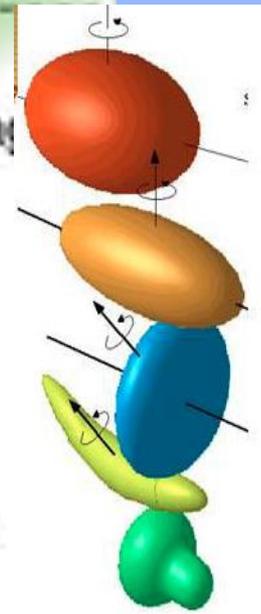
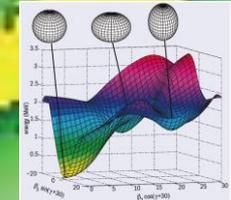
La Física del núcleo Magnífica Complejidad

Dinamica de Fisión



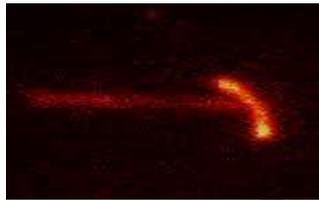
Superpesados

Coexistencia de formas

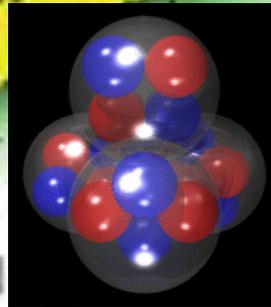


Formas exóticas

Modos exóticos de desintegración

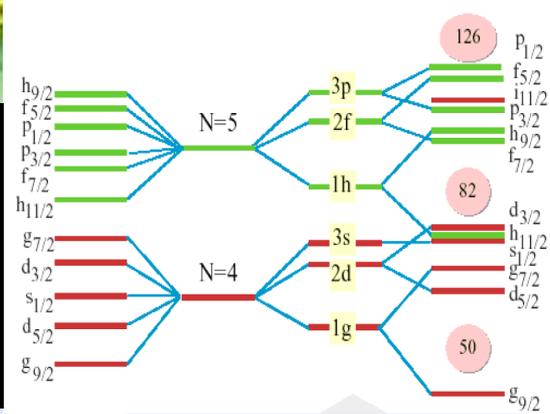
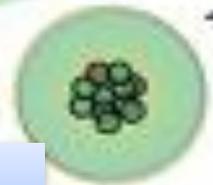


4He



clusters

Halo de neutrones



Nuevos N. Magicos

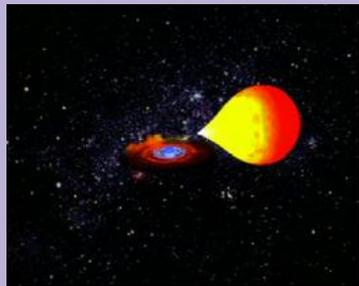
Genesis de los elementos

- Los protones y los neutrones se formaron 10^{-6} s – 1s después de Big Bang (hace 13.7×10^9 años)
- H, D, He, Li, Be, B se formaron 3 - 20 min después del Big Bang
- Núcleos más pesados se forman a lo largo de la vida de las estrellas

Proceso p y rp:

- masas hasta el límite de la estabilidad
- (p, γ) , (γ, p) secciones eficaces

↑ Proton number, Z



Unificación de
estrellas de
neutrones



Proceso-r:

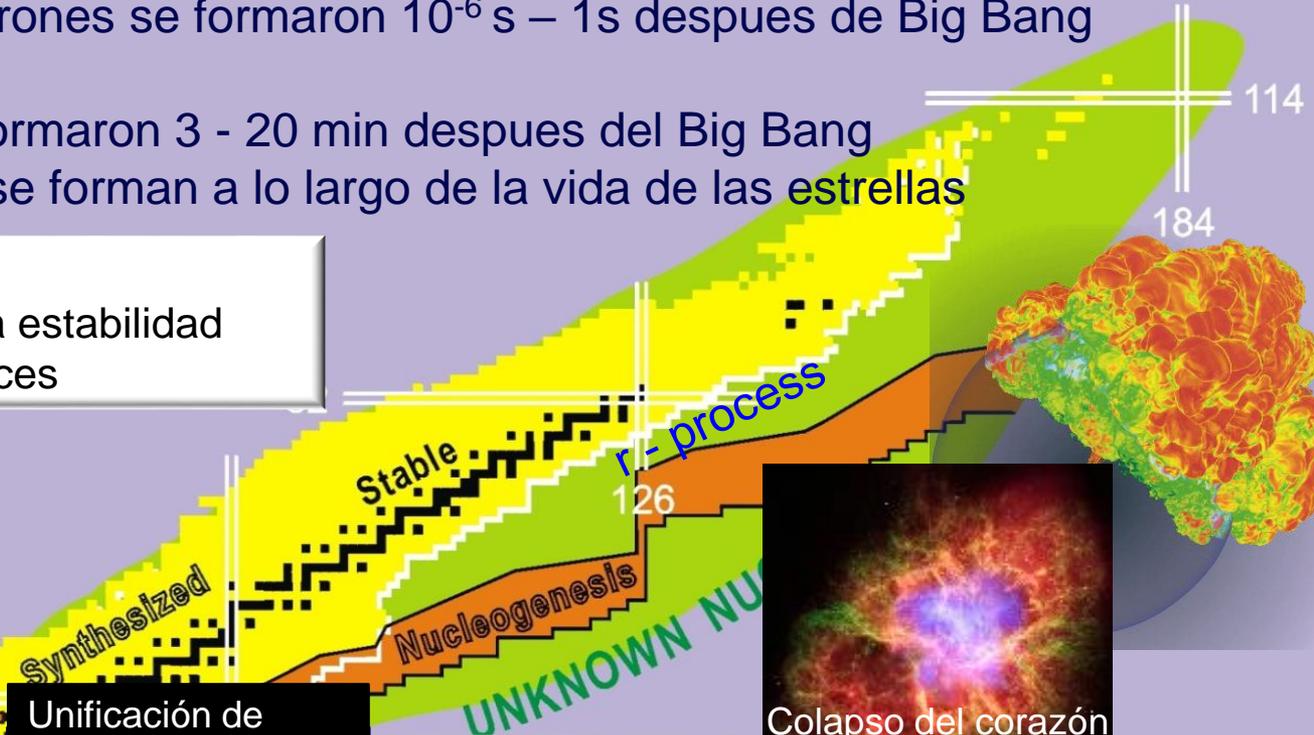
- masas, vidas medias
- β^-
- (γ, n) , (n, γ) secciones eficaces
- estructura de capas

Colapso del corazón
de la supernova



→ La combinación de datos nucleares precisos con modelos astronómicos realistas permite limitar los escenarios astrofísicos de formación de elementos.

2 8 — Neutron number, N



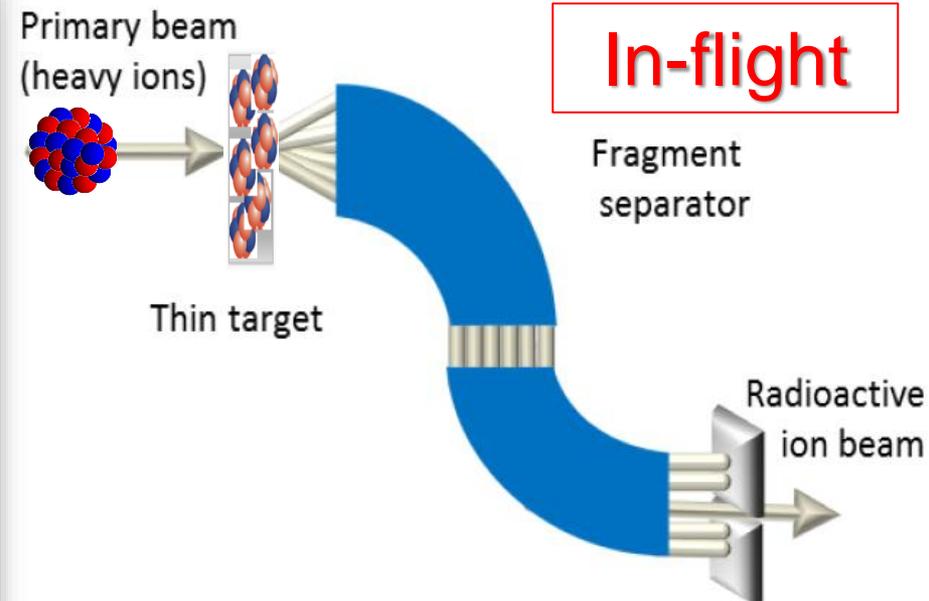
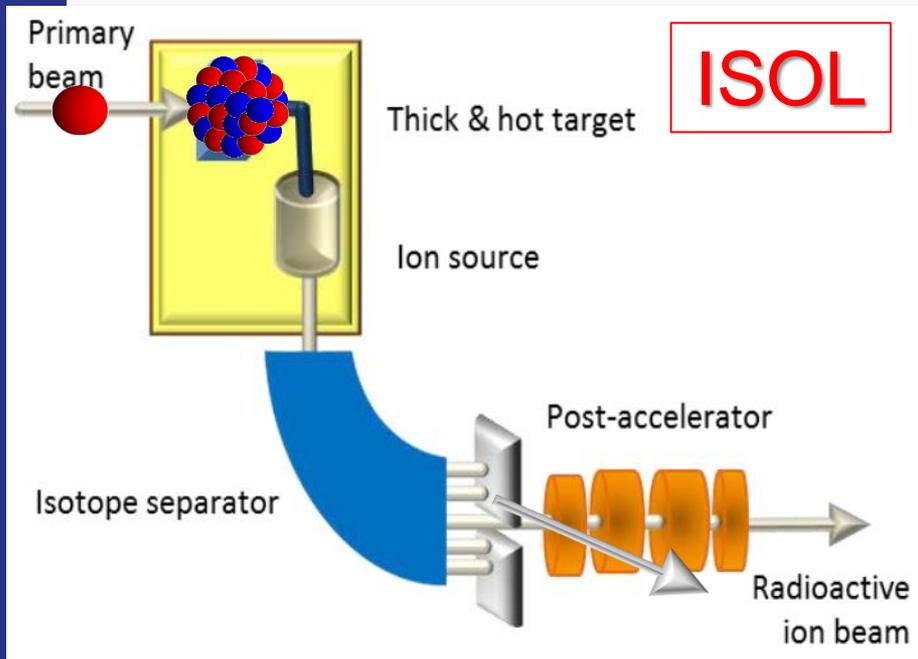
Producción de Isótopos Artificiales

Separador de Isotopos en Línea (ISOL):

✓ bajas energías, gran calidad del haz y alta pureza

Método de producción en vuelo:

✓ Alta energía, proceso muy rápido, (μs)



Producción de núcleos a medida

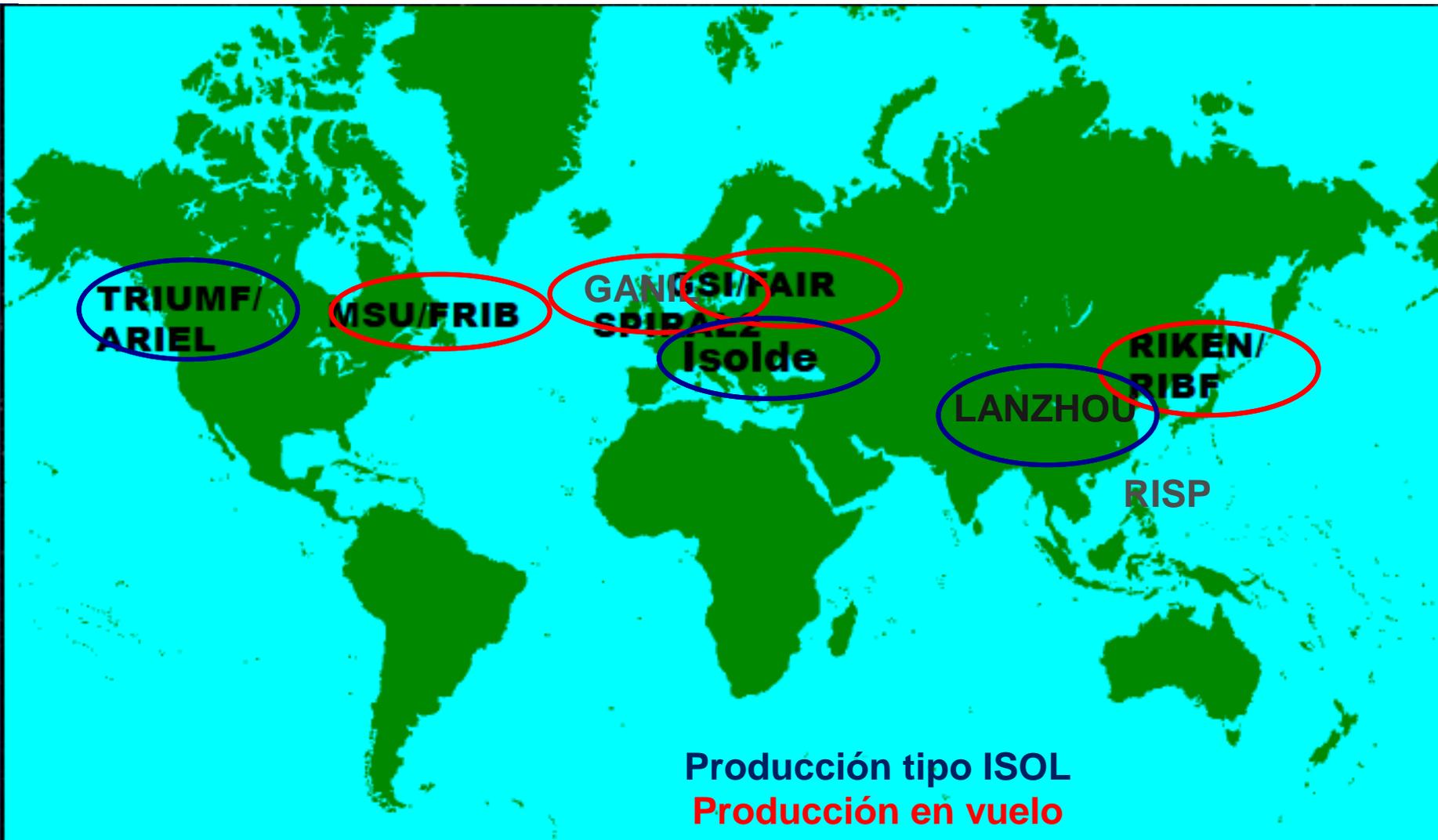
Tiempo de extracción: ms – s

Permite explorar núcleos en el rango del micro-segundo.

Muchos núcleos simultáneamente

Permite explorar el límite de una región

Instalaciones de haces radioactivos

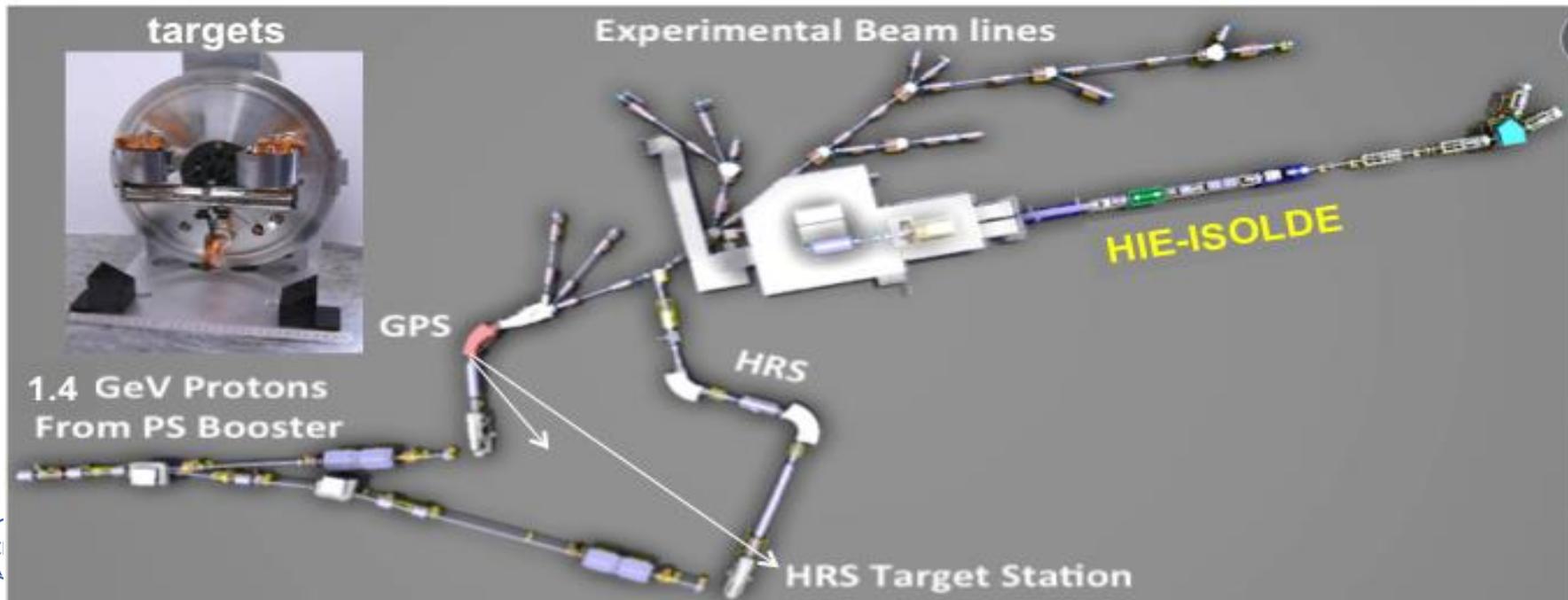


La Instalación ISOLDE en cifras

- ISOLDE experimento del CERN desde 1967
- Produce la mayor selección de isótopos (>1300) del Mundo.
- Suministra haces de baja energía y los acelera para estudios de reacciones.
- Siendo responsable una colaboración internacional de **18 países**



- **> 500 Usuarios de 100 Instituciones, 50 experimentos/ año**



CERN

European Organization for Nuclear Research = European Laboratory for Particle Physics



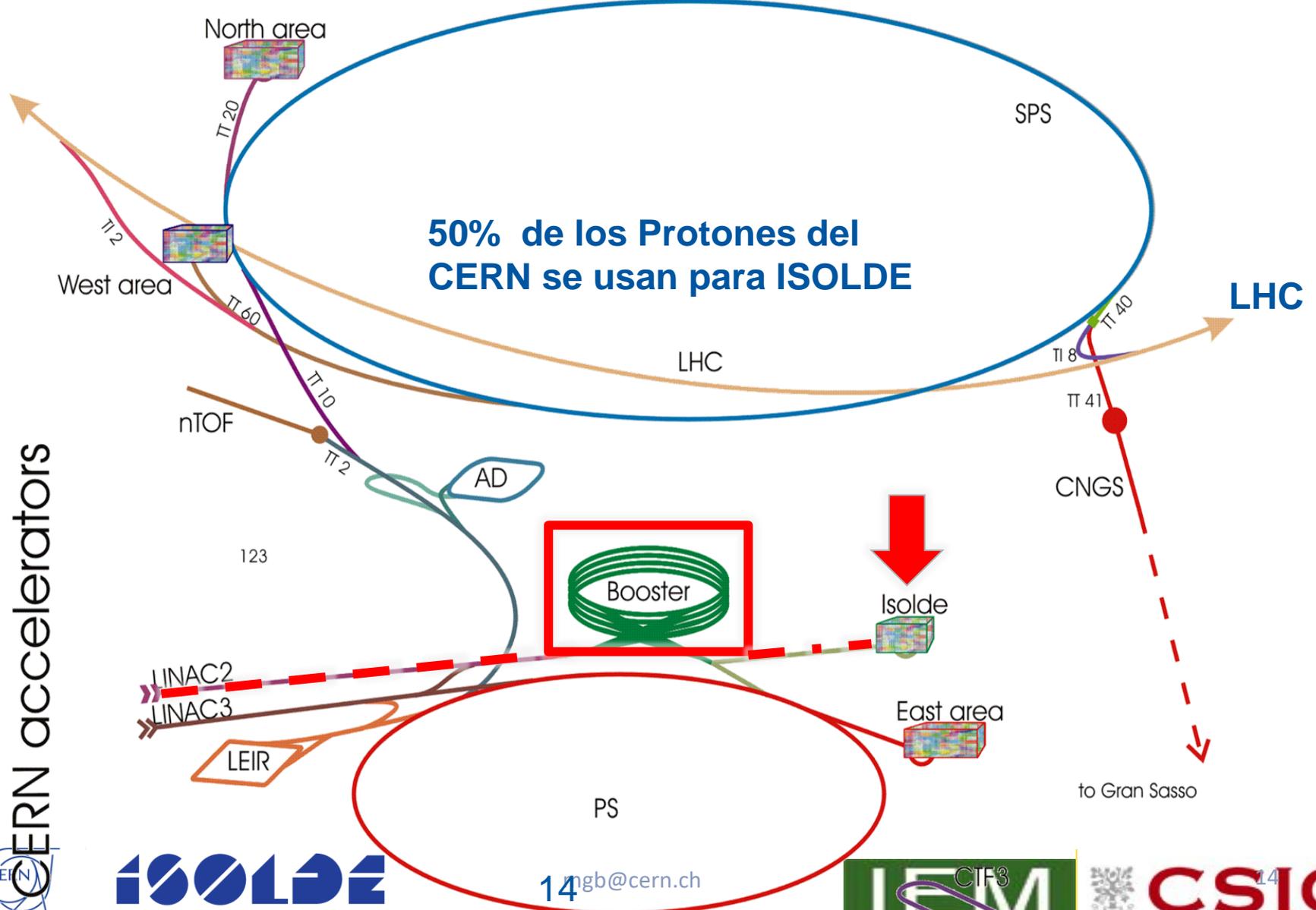
- Fundado en 1954 por 12 países
- Hoy: 21 estados miembros
- Más de 10500 usuarios de todo el mundo
- Presupuesto (2014): 800 MEuros

LHC

SPS

ISOLDE =

Separador de Isótopos en Línea



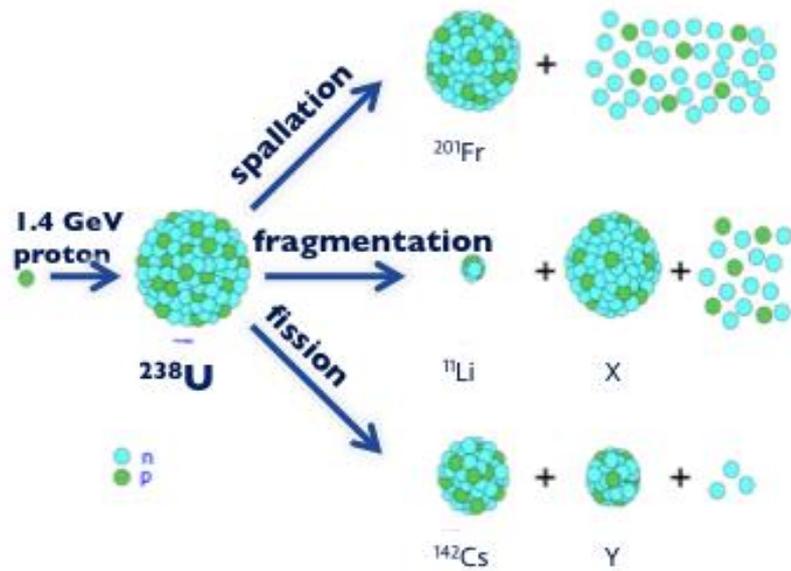
CERN accelerators



14 ngb@cern.ch

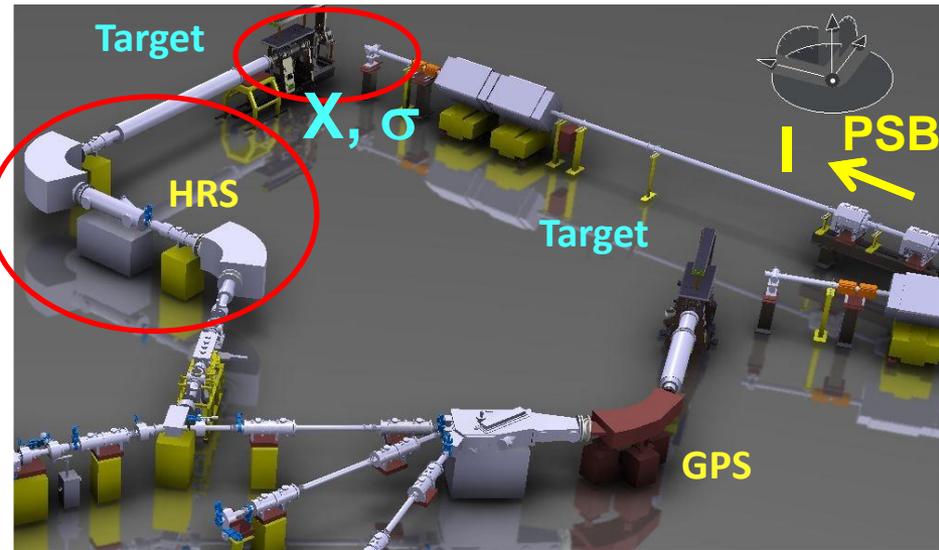


Mecanismo de Producción, Ionización y Selección



$$Y = I X \sigma \epsilon_{rel} \epsilon_{ion} \epsilon_{sep} \epsilon_{transp}$$

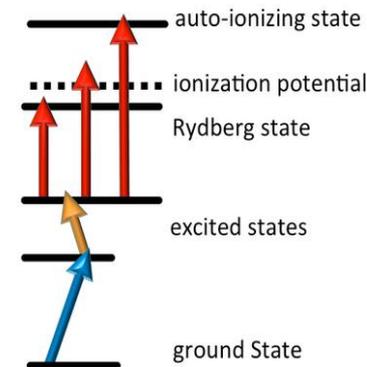
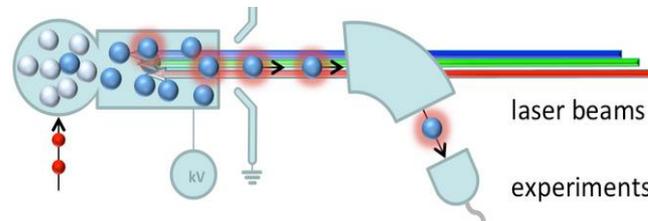
$10^{-3} - 10^{-8}$ $5 - 90 \%$



10 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
	b-n	b-	b-	n	b-n	
	Be12 23.6 ms 0+	Be13 0.9 MeV (1/2,5/2)+	Be14 4.35 ms 0+			
	b-	n	b-n, b-2n, ...			
MeV	Li11 8.5 ms 3/2-	Li12				
	b-n, b-2n, ...					
MeV	He10 0.3 MeV 0+					
	n					

Ionización con Laser

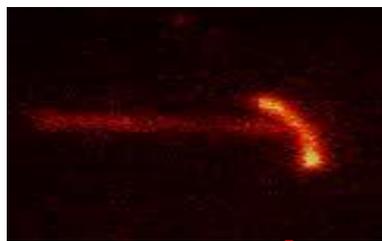
Target Fuente Iones Extractor Separador de masas



● projectiles ● target material ● neutrals ● ions

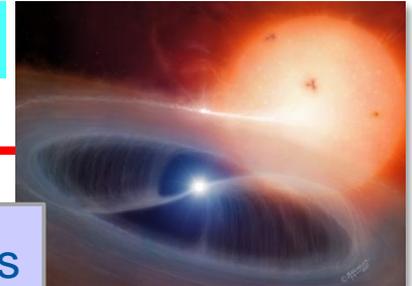


Uso de Núcleos Radioactivos @ ISOLDE



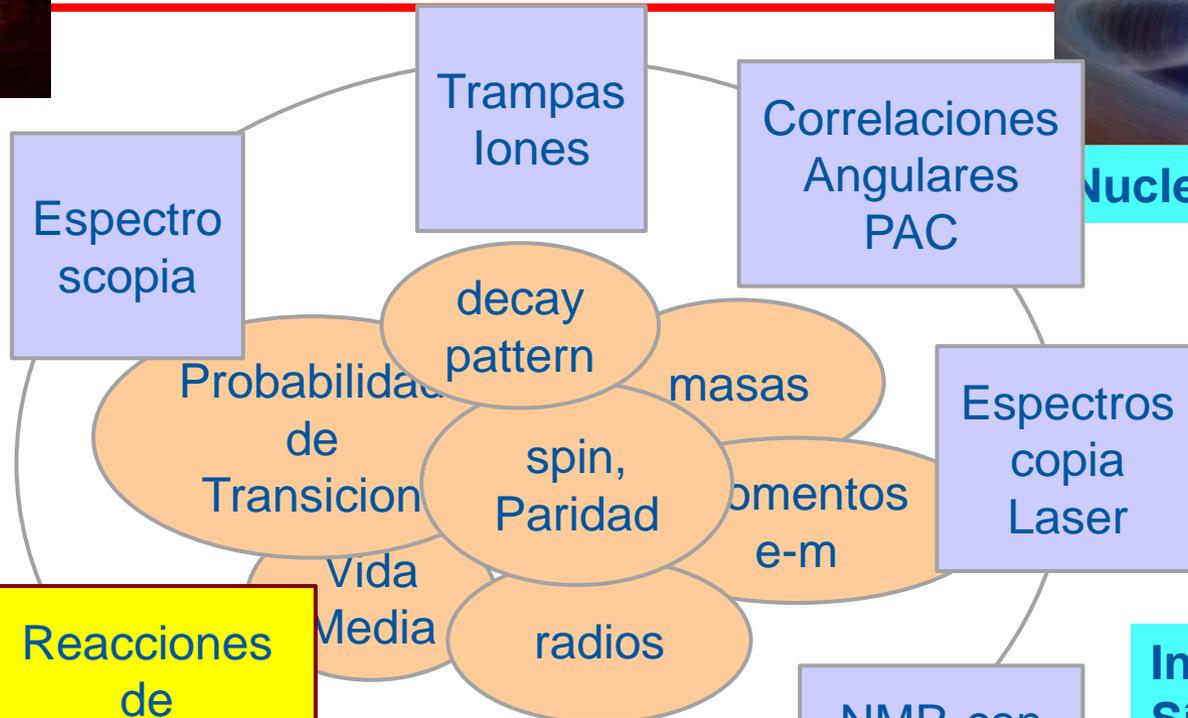
F. Nuclear

Astrofísica



F. Atómica

Nucleo-síntesis

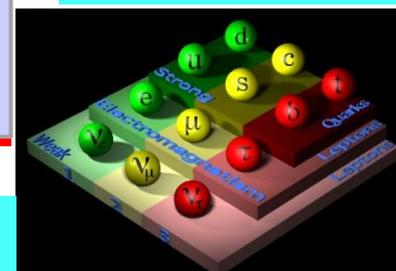


Ciencia de M

Interacciones Símetrías



Ciencias de la vida



Test del SM

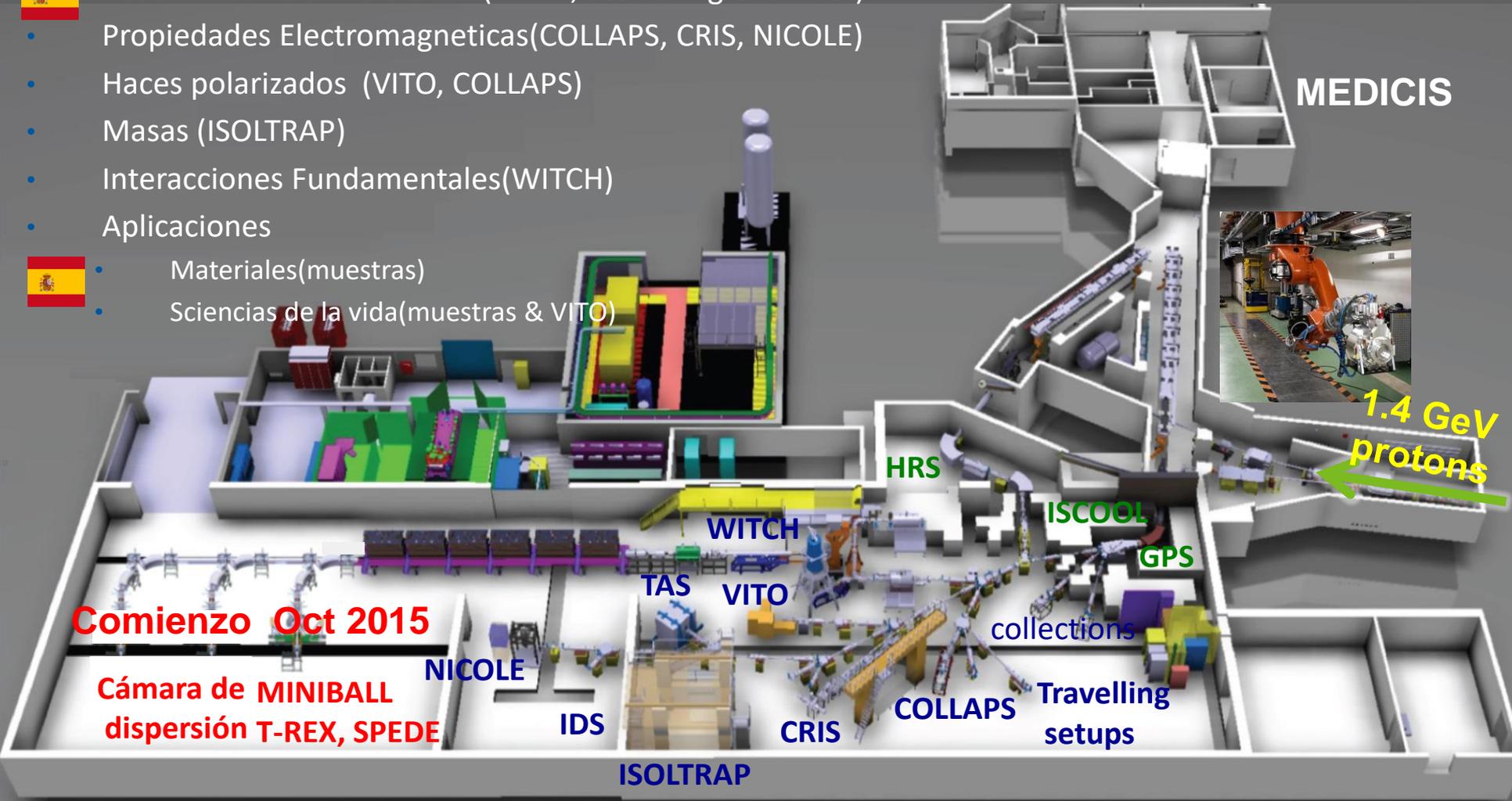


Desintegración beta (IDS, TAS,..)

Excitación Coulombiana(MINIBALL+ CD + SPEDE)

Reacciones de transferencia(T-REX, Scattering Chamber)

- Propiedades Electromagneticas(COLLAPS, CRIS, NICOLE)
- Haces polarizados (VITO, COLLAPS)
- Masas (ISOLTRAP)
- Interacciones Fundamentales(WITCH)
- Aplicaciones
 - Materiales(muestras)
 - Ciencias de la vida(muestras & VITO)



Comienzo Oct 2015

Cámara de MINIBALL dispersión T-REX, SPEDE

NICOLE

IDS

ISOLTRAP

CRIS

WITCH

TAS

VITO

HRS

ISCOOL

GPS

collections

Travelling setups

MEDICIS



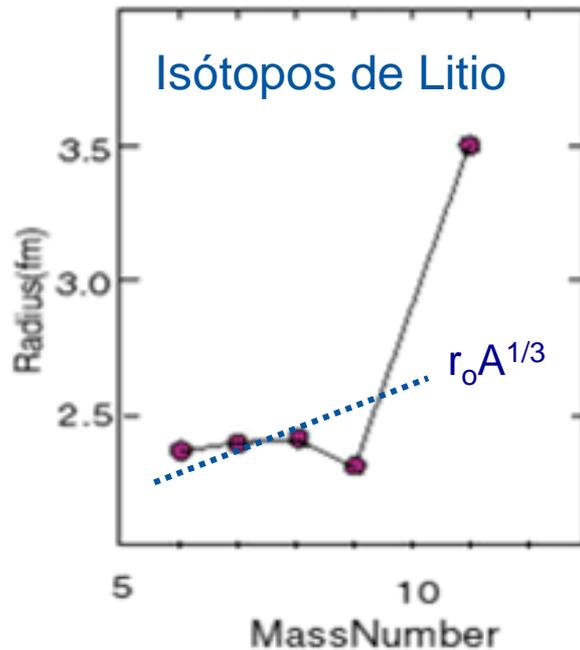
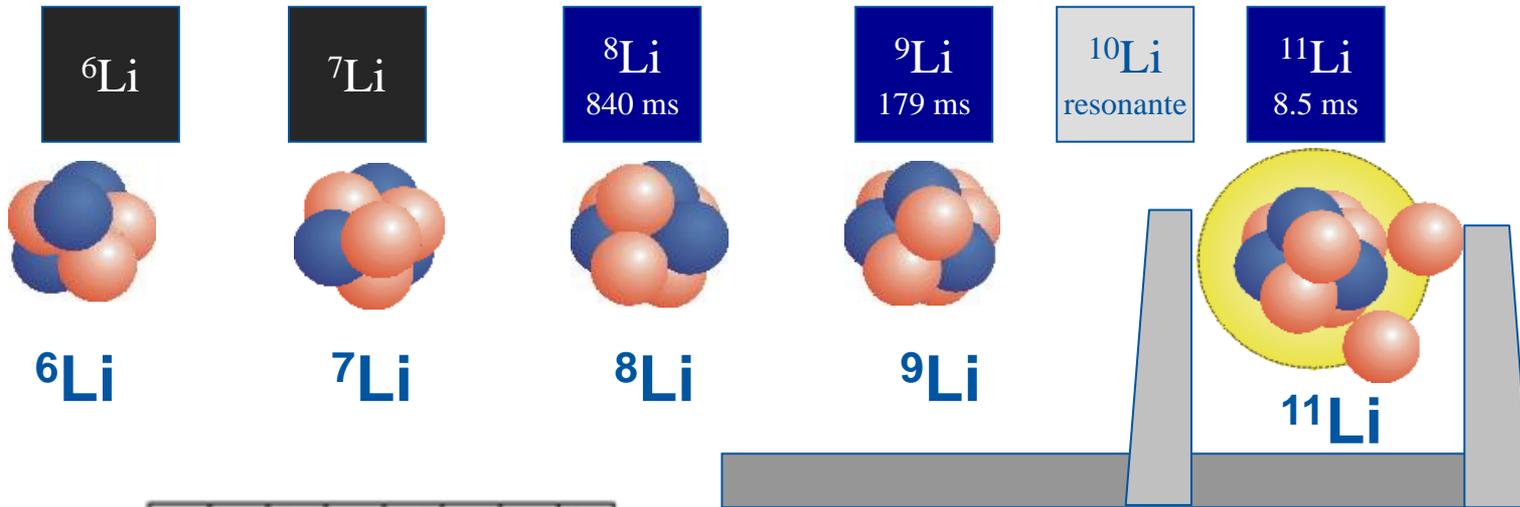
1.4 GeV protons

— Post-accelerated Exps (5.5 MeV/u), — Low Energy (30-60kV) Exps, — Machine elements



Algunos Ejemplos

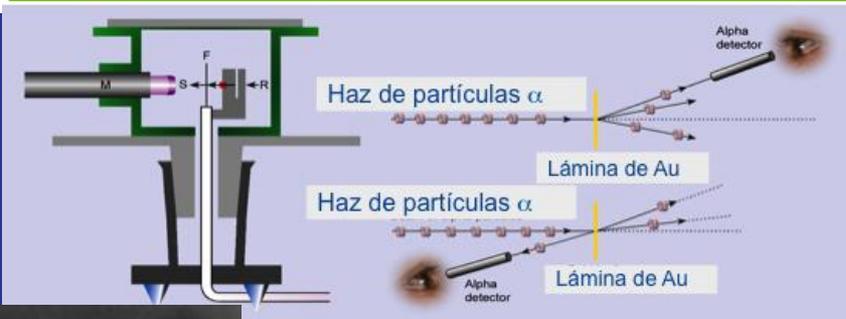
¿Qué ocurre en el límite de estabilidad neutrónica?



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



¿Núcleos Halo y Reacciones ?

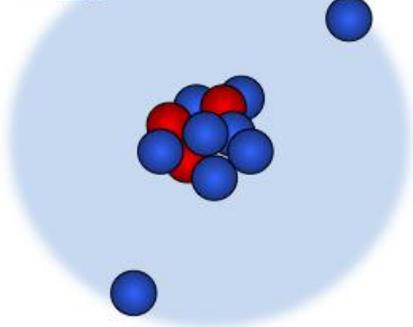


	${}^3\text{He}$	${}^4\text{He}$
${}^1\text{H}$	${}^2\text{H}$	
	n	

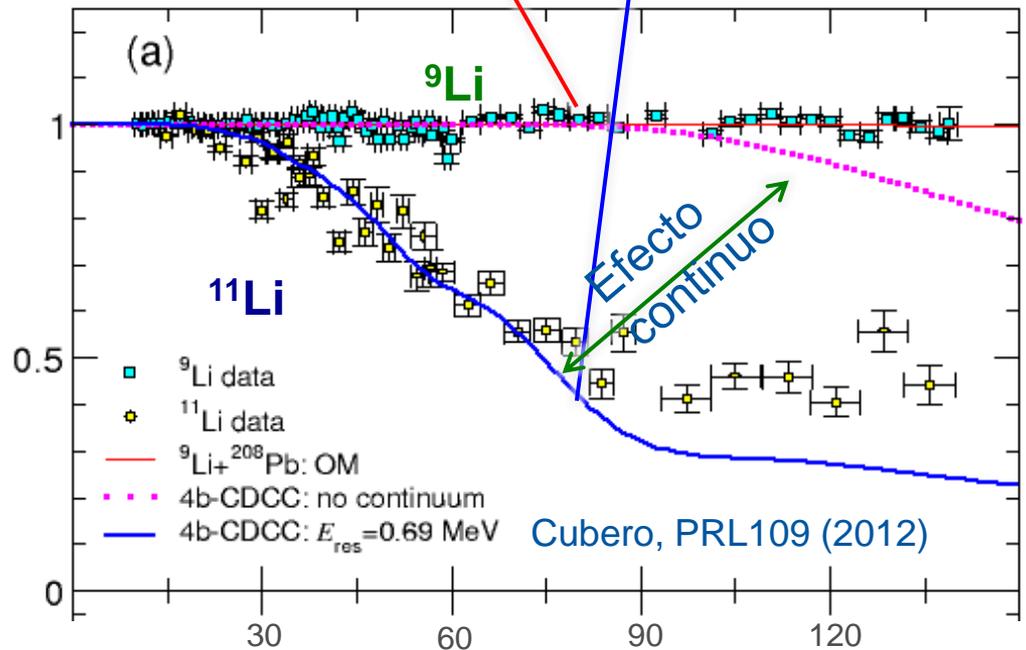
${}^7\text{Be}$	${}^8\text{Be}$	${}^9\text{Be}$	${}^{10}\text{Be}$	${}^{11}\text{Be}$	${}^{12}\text{Be}$	${}^{14}\text{Be}$
${}^6\text{Li}$	${}^7\text{Li}$	${}^8\text{Li}$	${}^9\text{Li}$	${}^{10}\text{Li}$	${}^{11}\text{Li}$	
	${}^6\text{He}$					

↑ 2n-halo

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



Seccion eficaz / Rutherford



mgb@cern.ch

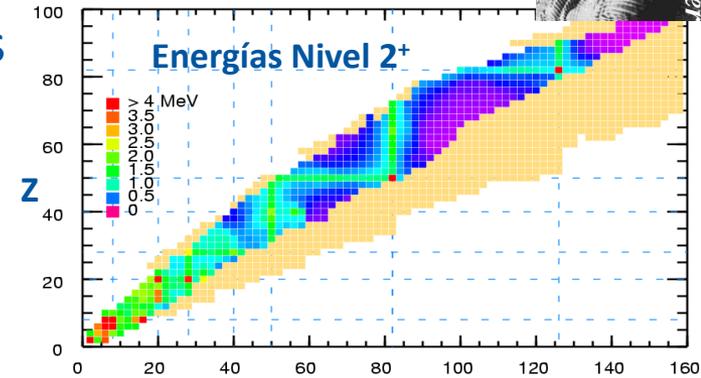
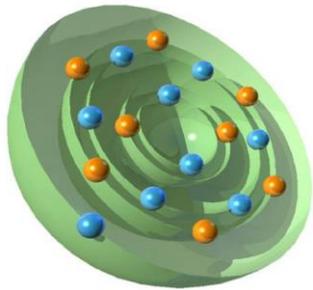
Distribución angular CM



Nuevos Números Mágicos

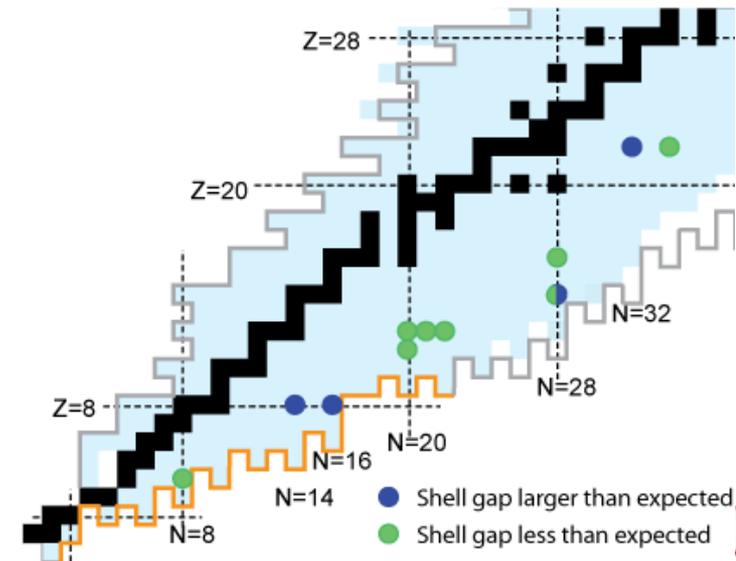
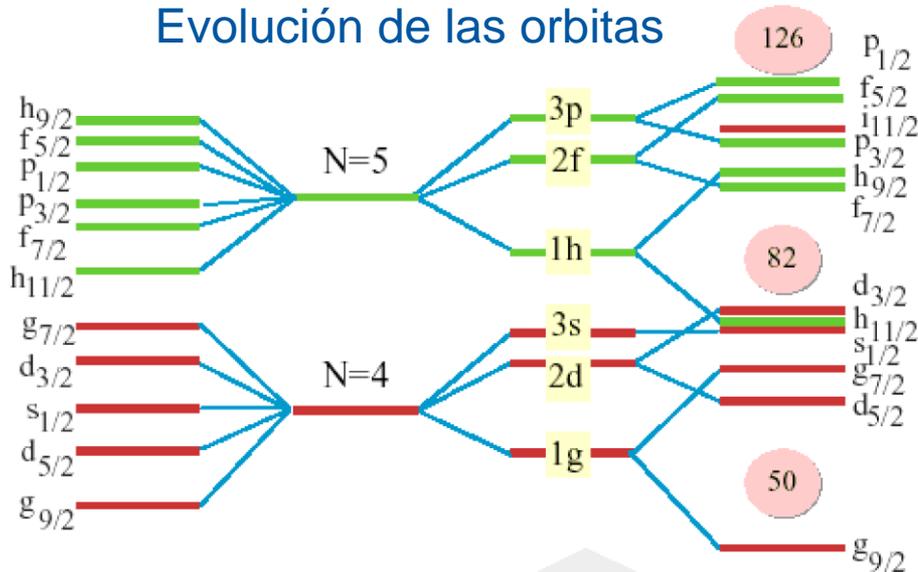


- Núcleos presentan una estructura de capas
 - Órbitas llenas= « núcleos mágicos »
 - $Z, N = 2, 8, 20, 28, 50, 82; N = 126$



- En « núcleos exóticos » (N/Z extremo)
 - La estructura de capas evoluciona
 - Nuevos números mágicos

Evolución de las orbitas



n.ch

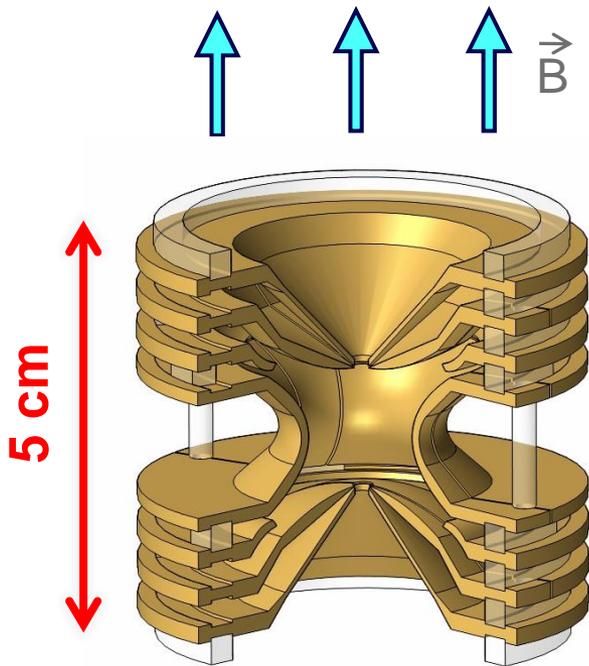


Masas & Números mágicos

$$M_{\text{Atom}} = N \cdot m_{\text{neutron}} + Z \cdot m_{\text{proton}} + Z \cdot m_{\text{electron}} - (B_{\text{atom}} + B_{\text{nucleus}})/c^2$$

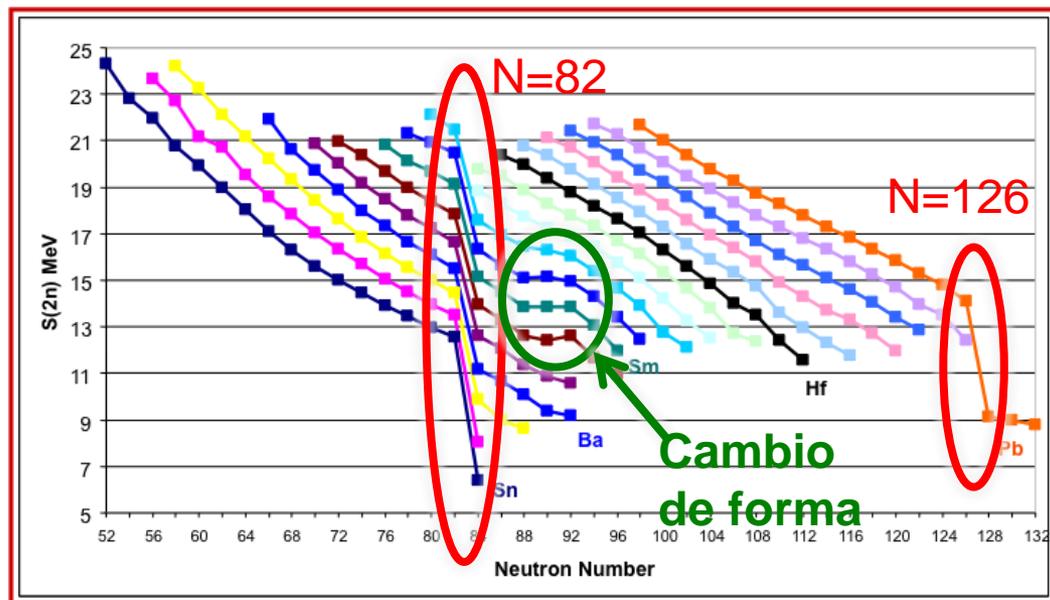
$$\delta m/m < 10^{-10}$$

$$\delta m/m = 10^{-6} - 10^{-8}$$



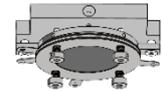
$$\omega_c = qB / m$$

$$S_{2n}(N, Z) = ME(N-2, Z) - ME(N, Z) + 2 \cdot ME(n)$$

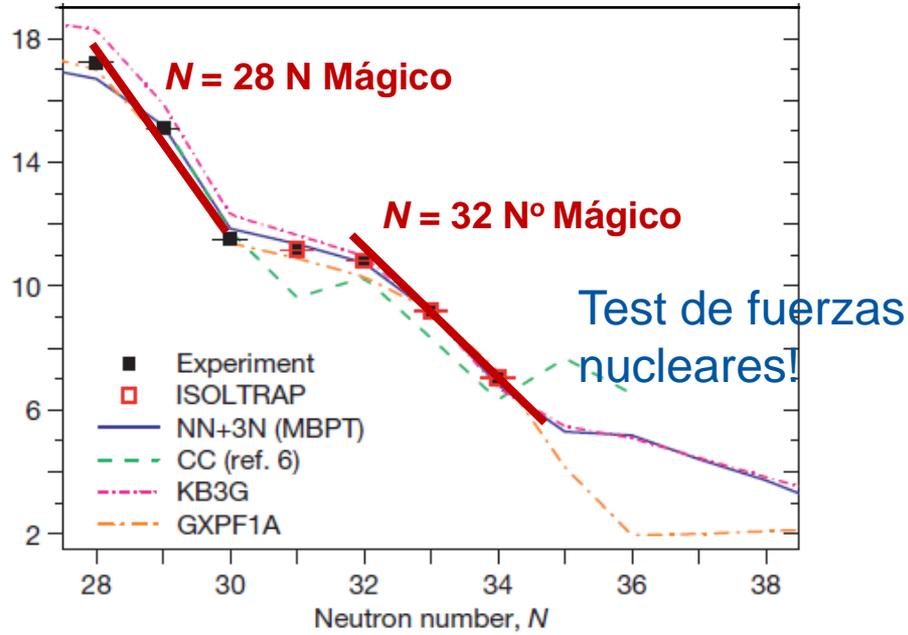


Masas & Nuevos Números Mágicos

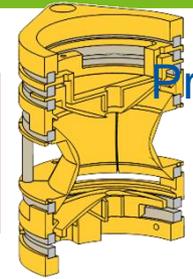
MCP



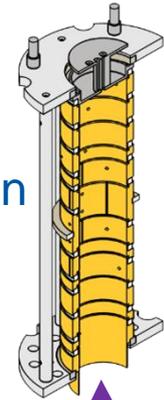
$$S_{2n} = B_{\text{nucl}}(Z, N) - B_{\text{nucl}}(Z, N-2)$$



$$\omega_c = qB / m$$



Precision trap
1987



Preparation trap

1994

Nature. 498 (2013)346

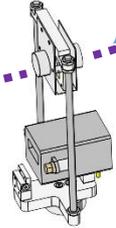


2010

1999
RFQ cooler and buncher



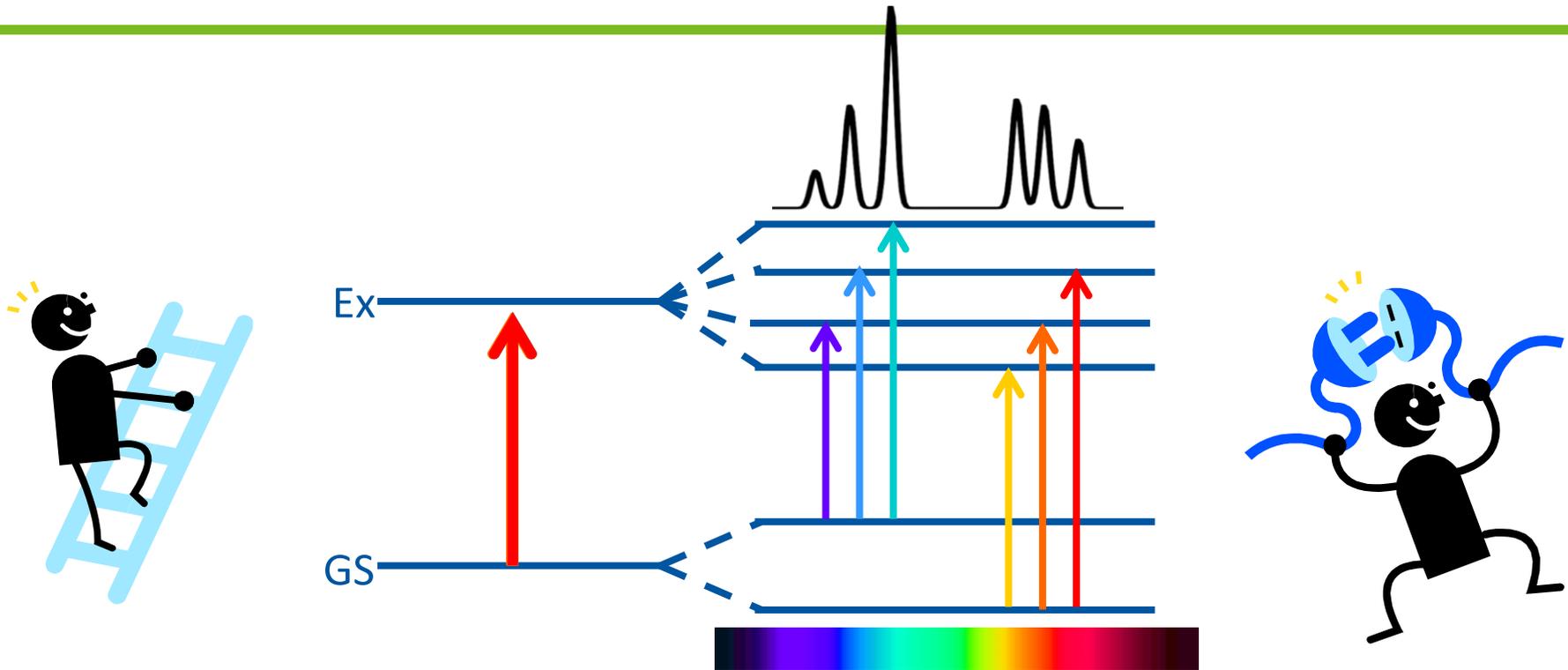
Bradbury-Nielsen beam gate



F. Herfurth *et al.*, NIM A **469**, 254 (2001).
 R. N. Wolf *et al.*, Int. J. Mass Spectrom **313**, 8 (2012).
 G. Savard *et al.*, Phys. Lett. A **158**, 247 (1991).
 M. König *et al.*, Int. J. Mass Spectrom. **142**, 95 (1995).



Espectroscopía Laser



- Los niveles atomicos se desdoblan debido al spin de los nucleos
Al escanear la luz laser obtenemos el desdoblamiento de los niveles
- Se obtienes observables nucleares independientes:

$$d\langle r^2 \rangle^{A,A'}$$

Cambio del radio
cuadratico de carga

$$m_I$$

Momento Dipolar
Magnetico

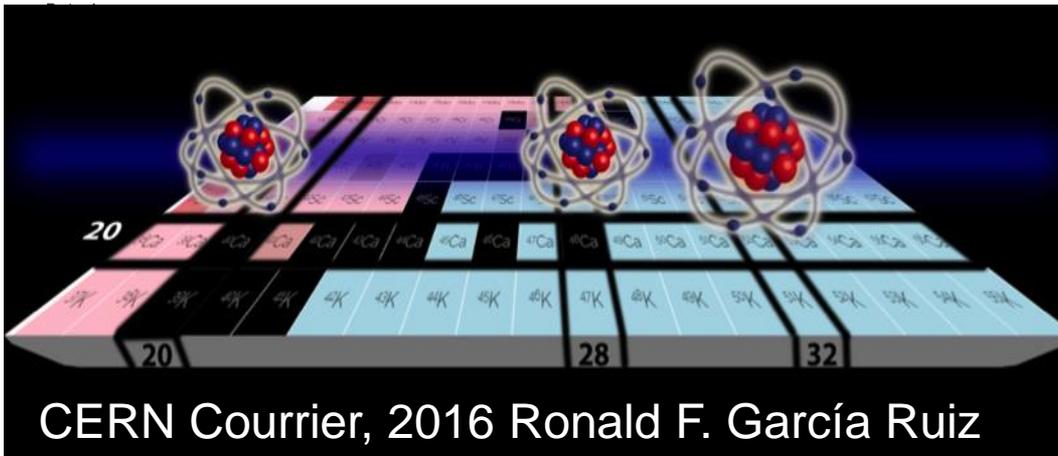
$$Q_S$$

Momento
cuadрупolar electrico

$$I$$

Explorando el nuevo numero mágico a N=32

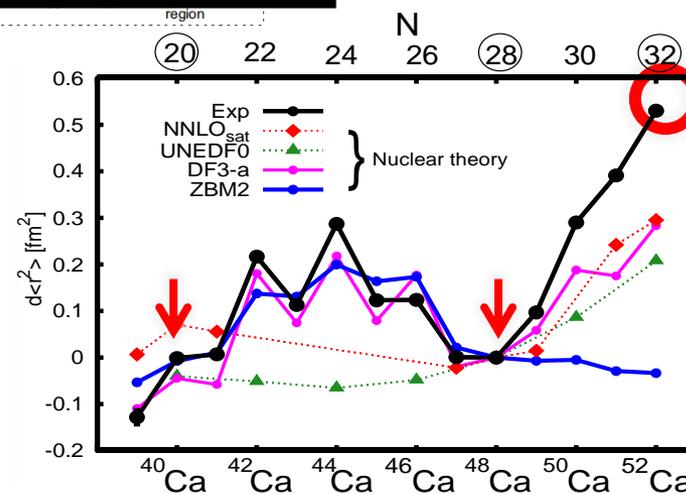
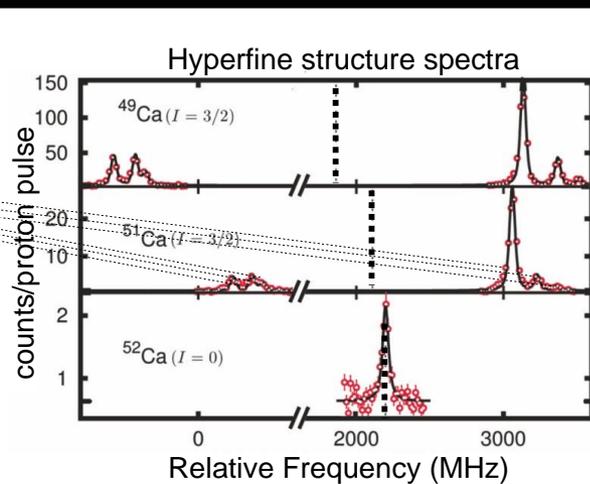
COLinear LAser Spectroscopy @ ISOLDE



El centroide de la distribución nos da la variación del radio cuadrático medio.

Objetivo: determinar el radio de los los isotopos de calcio lejos de la estabilidad en particular N=32.

Por qué: Carácter doblemente mágico: 2^+ y masas



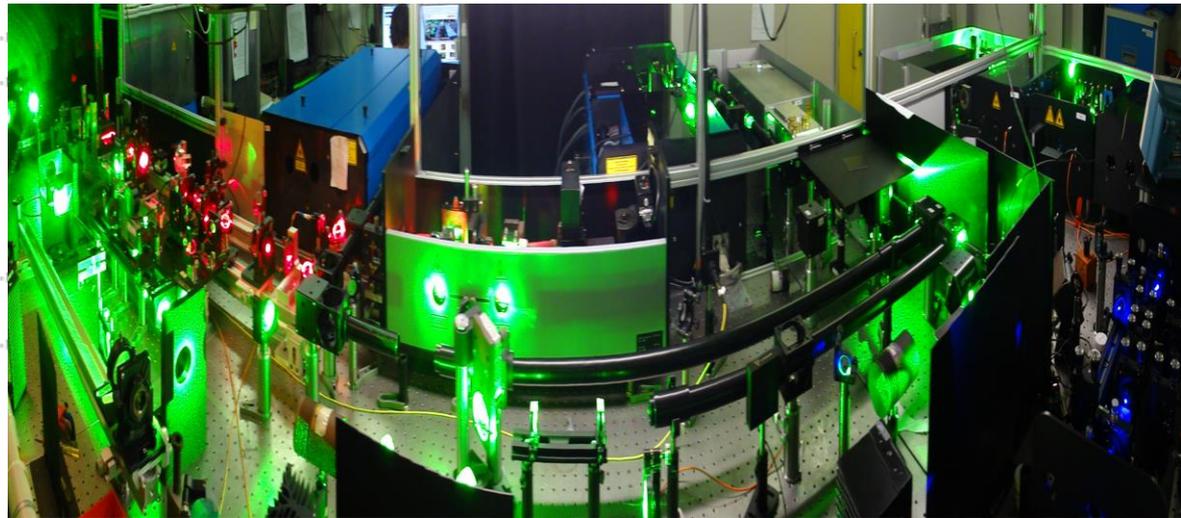
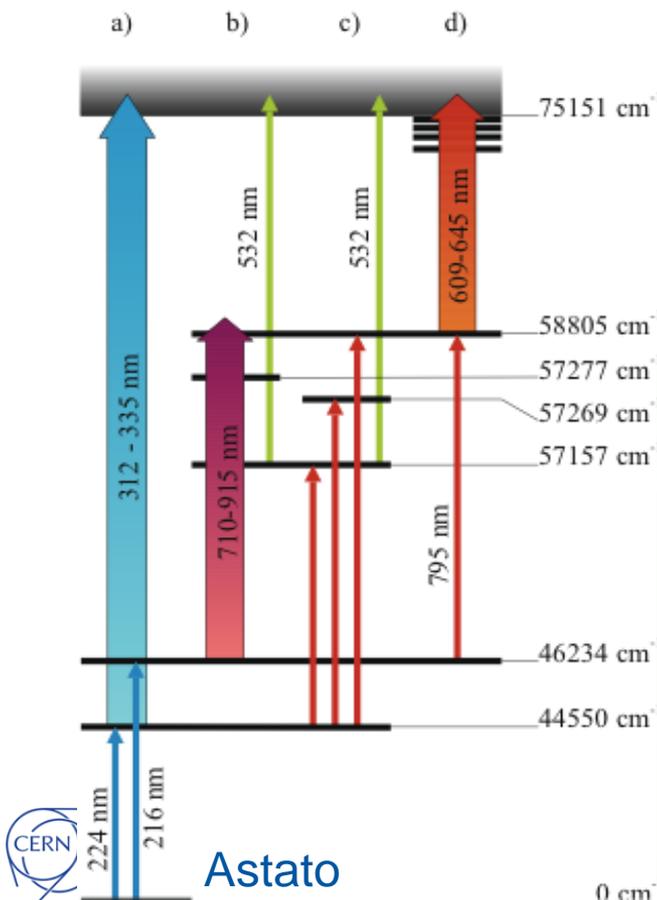
El continuo aumento del radio incluyendo ^{52}Ca pone en duda su carácter doblemente mágico y cuestiona la evolución del tamaño del núcleo lejos de la estabilidad. **Nature Physics 12 (2016) 594.**

Propiedades Atómicas del Astatato

IP(At) = 9.31751(8) eV

Rothe et al., Nature
Communication 4 (2013) 1835

- Determinación Potencial de Ionización (IP) mediante excitación de estados resonantes
- Test de los efectos relativistas de modelos Atómicos.
- Implicaciones en homólogo $Z = 117$
- Producción de ^{211}At de interés en F. Médica



El proyecto HIE-ISOLDE : I , E



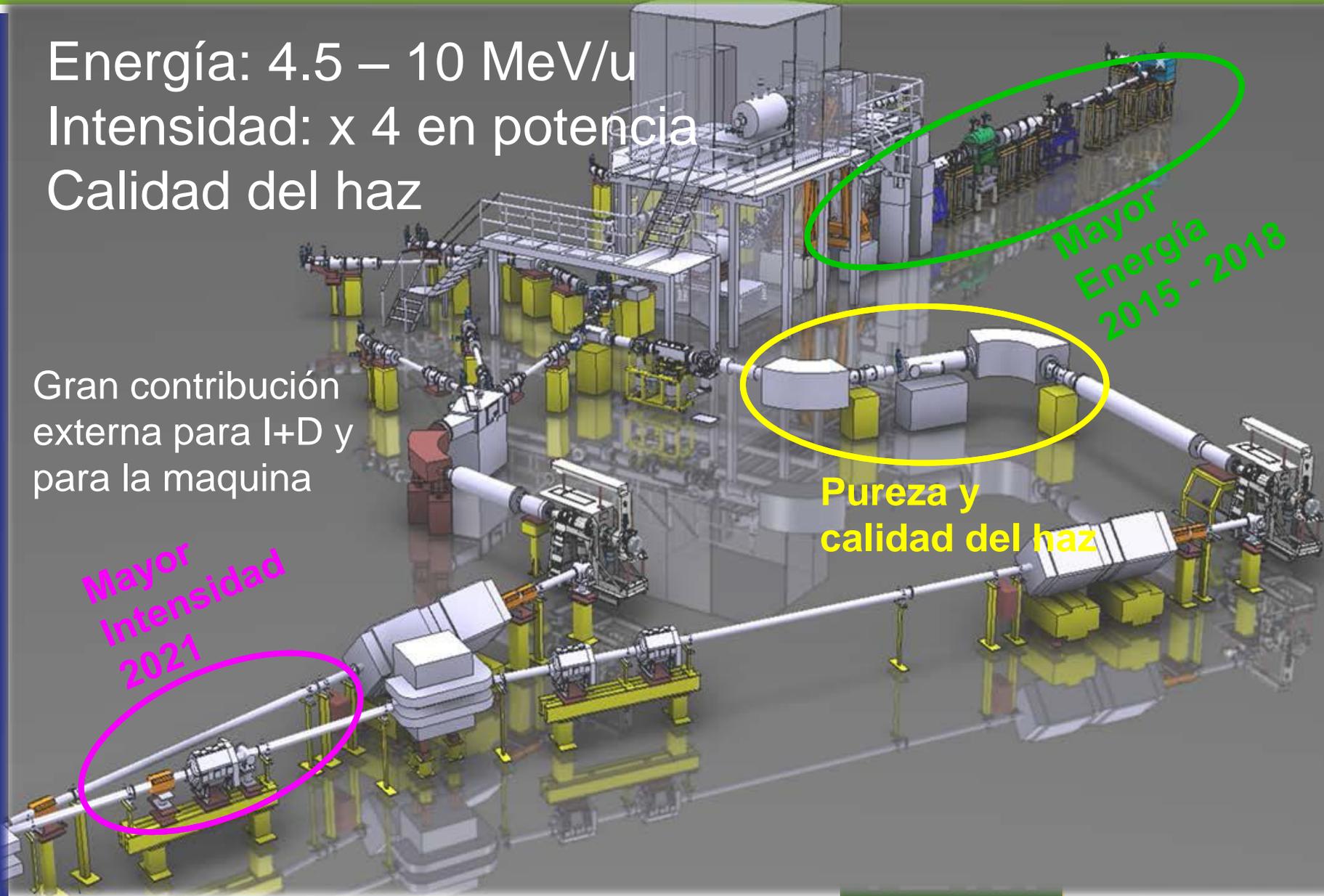
Energía: 4.5 – 10 MeV/u
Intensidad: x 4 en potencia
Calidad del haz

Gran contribución
externa para I+D y
para la maquina

Mayor
Intensidad
2021

Mayor
Energía
2015 - 2018

Pureza y
calidad del haz





Conectores electricos

Adjuste 



Vasija de vacío

Tapas 



Recipiente de helio

Pantalla térmica  recubrimiento de Ni



Fuelles

Estructura Mécnica 



Solenoides

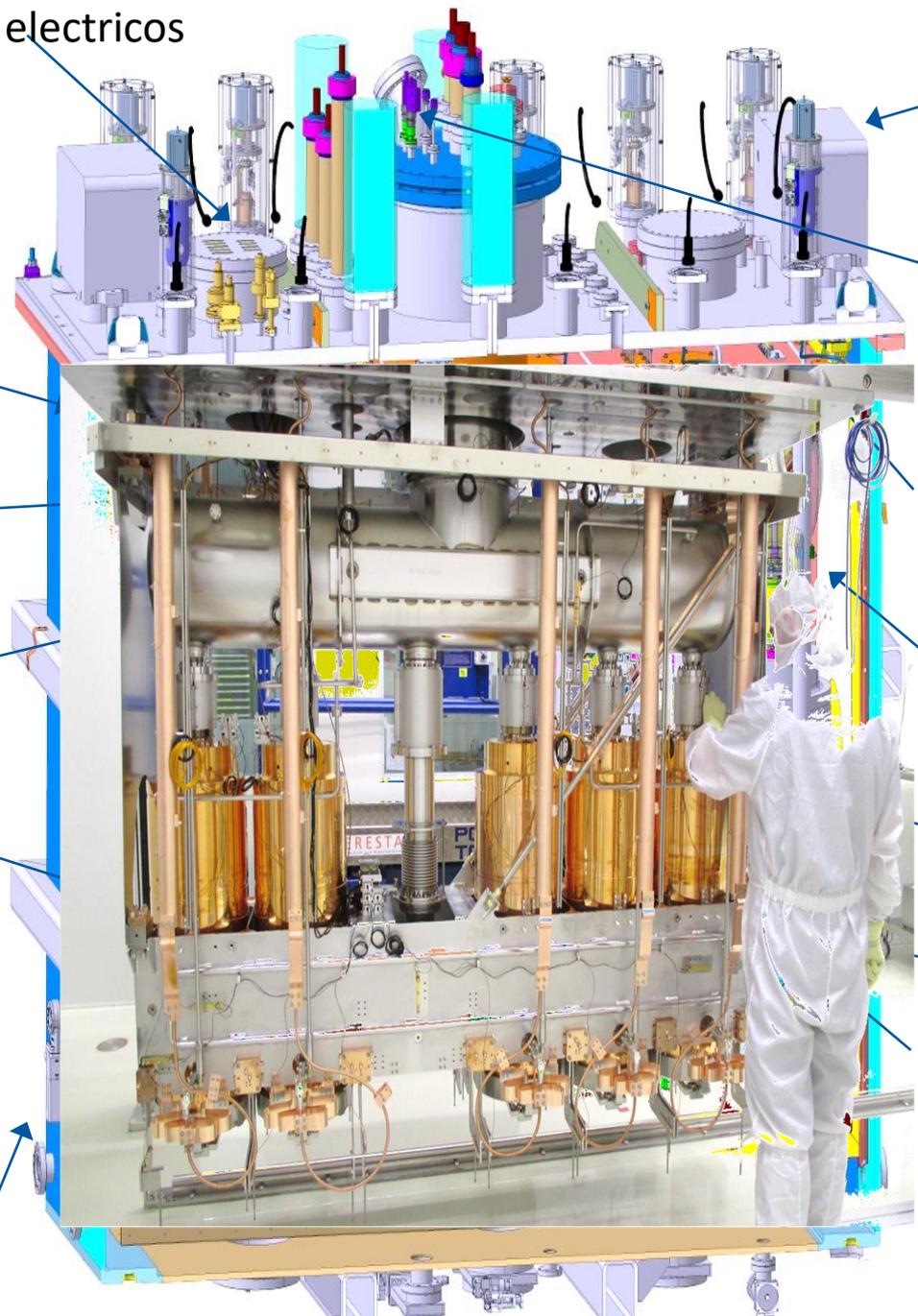
Cavidades   

Instrumentación



Puntos de observación

Suporte 



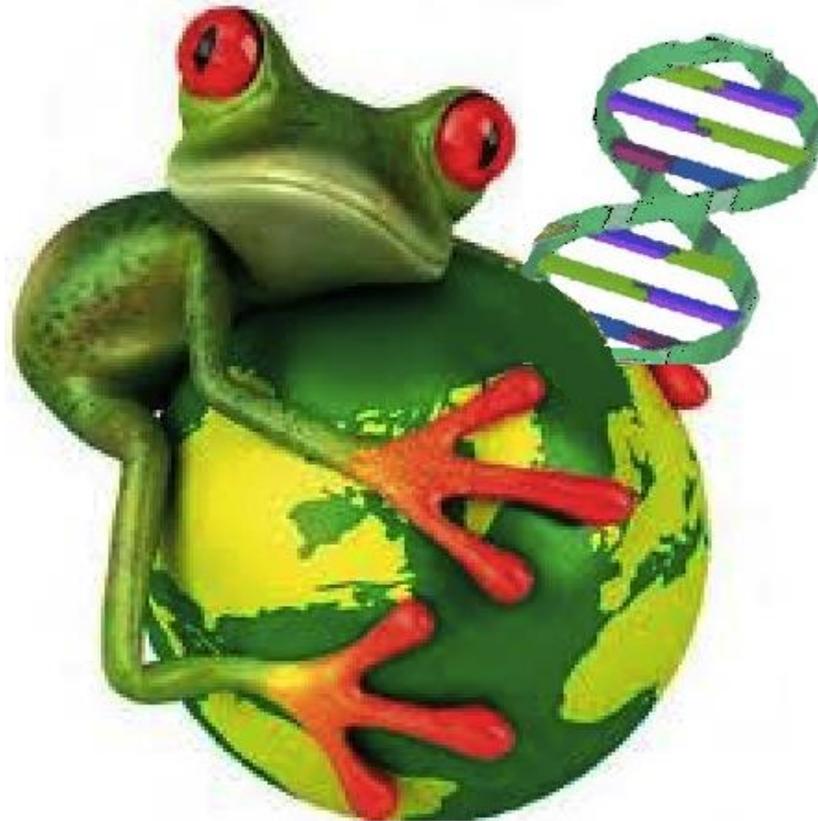
Haces Radioactivos @ 5.5 MeV/u (2016)

- Simetría de isospin
- Reacciones de interes astrofísico
- Caracter colectivo frente individual
- Núcleos Magicos lejos de la estabilidad

Celebración el 28 de Septiembre de 2016



Aplicaciones a las ciencias de la salud



Física Nuclear y Medicina

- La transferencia de Conocimiento mas rápida de la historia !

- **Diagnóstico :**

- Núcleos como trazadores
- La dinámica de un proceso metabólico.

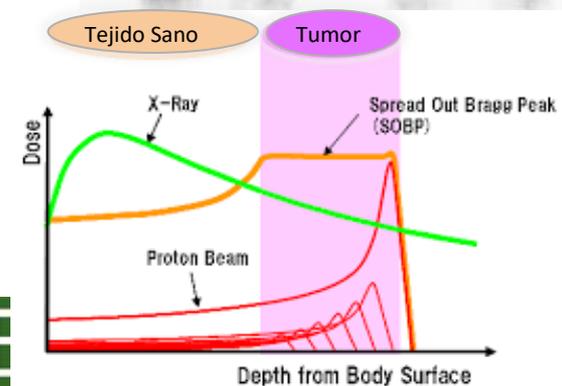
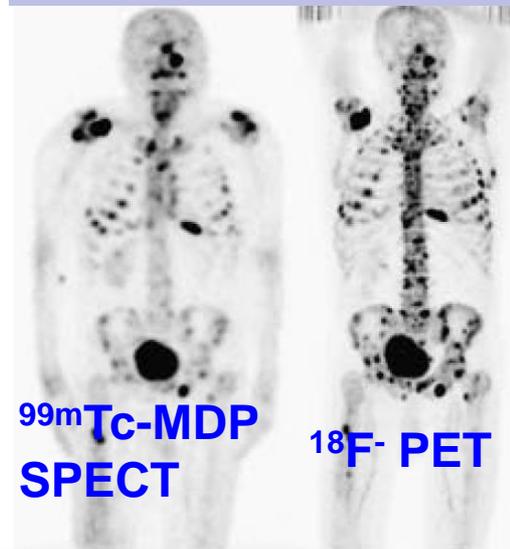
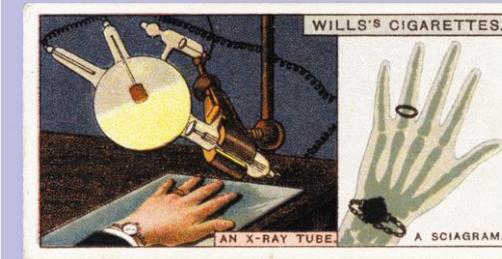
Imagen Médica

- ✓ Tomografía computarizada 1 fotón, SPECT
- ✓ Tomografía de emisión de positrones, PET

- **Tratamiento/Terapia:**

Uso de Radioisótopos

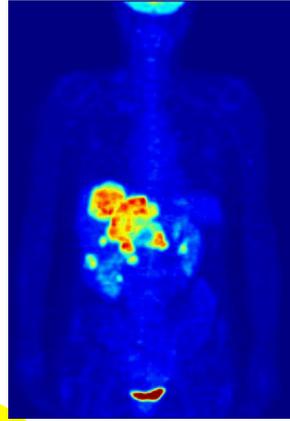
Aceleradores de protones, o iones de carbono



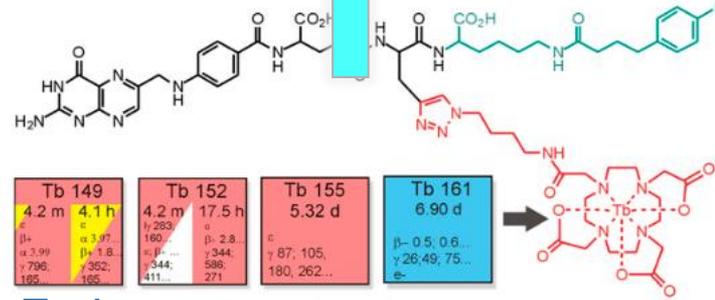
Esfuerzo multidisciplinar contra el Cáncer

Tratamiento Personalizado ↔ Distinta respuesta a los fármacos

Mismo elemento químico para diagnosis y terapia: Teranostics



Bombesin un ligando usado con éxito con ^{155}Tb (5 d) y ^{125}I (59 d) en cánceres de prostata, mama y estómago

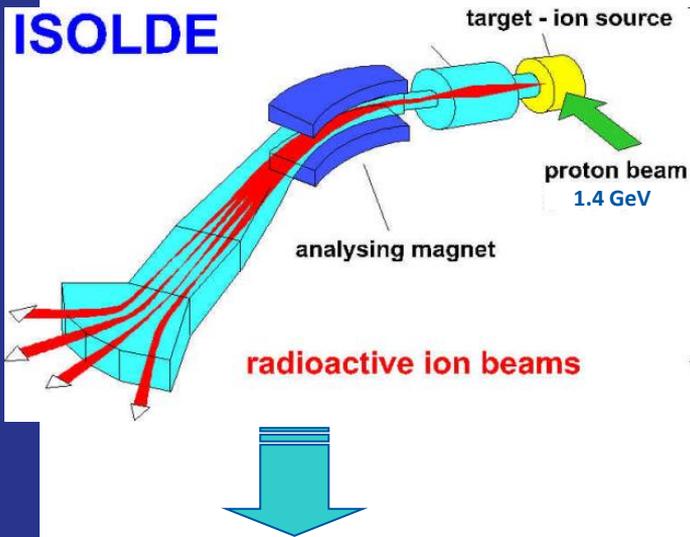


Emisores: α , β^+ , β^-

¿Cómo se ha producido?

Producción en ISOLDE

ISOLDE

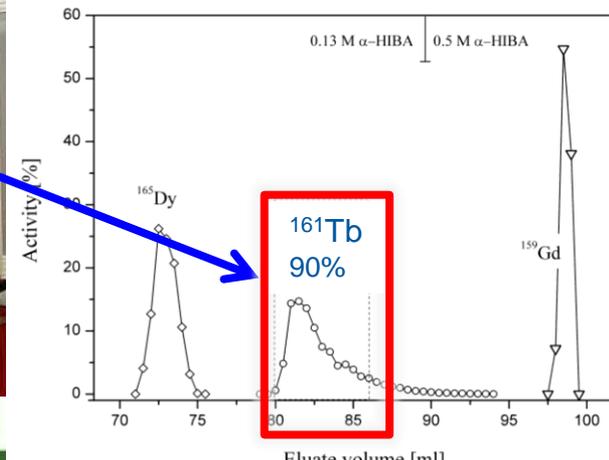
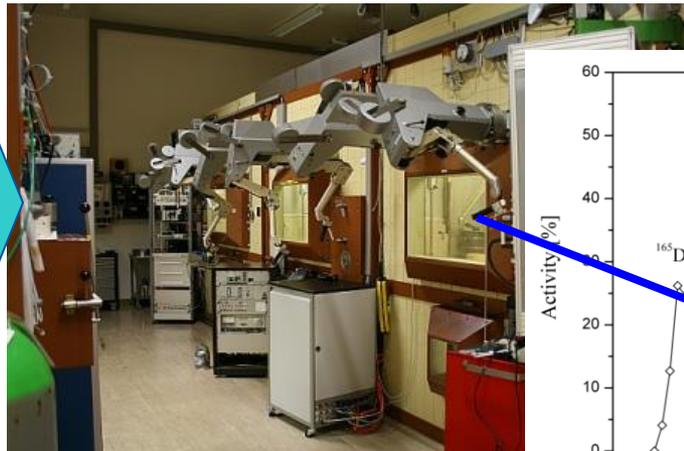


Envío a PSI, Zurich

PSI



iii. Purificación e inserción en portador



iv. Inyección en el raton



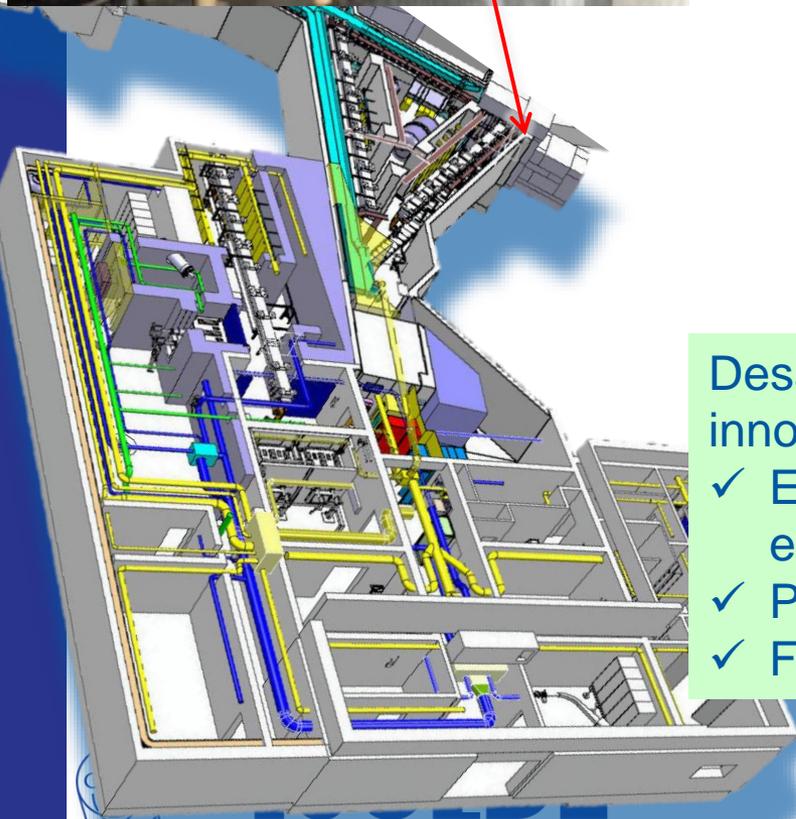
v. Imagen PET/SPECT tratamiento tumor



ISOLDE

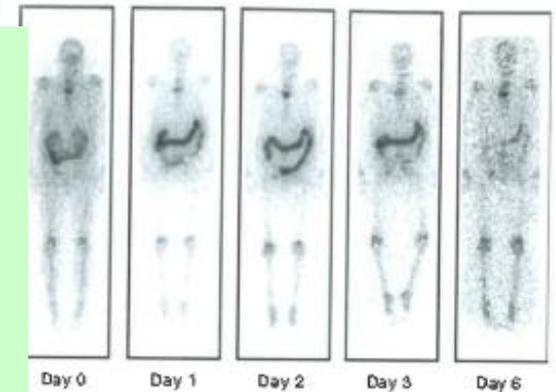
ingb@cern.ch

Nueva Instalación: CERN-MEDICIS



Desarrollo de isotopos innovadores.

- ✓ Extensión de ISOLDE en la zona de blancos
- ✓ Primeros test 2017
- ✓ Funcionamiento 2018



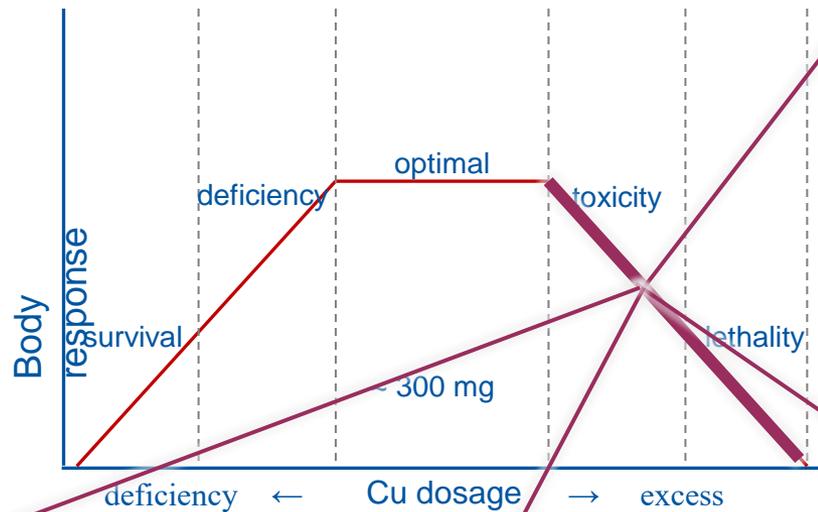
1st approval of $^{223}\text{RaCl}_2$ Xofigo drug to treat cancer with bone metastasis in 2013

Biofísica: Iones metálicos en el cuerpo: Mg, Cu, Zn

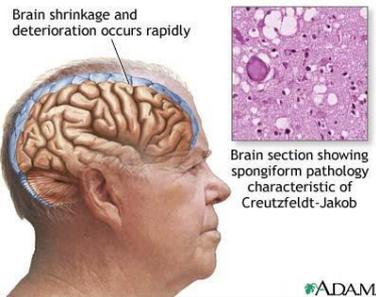


Estos metales son prácticamente invisibles para los estudios químicos

El caso del Cu: 300 mg
Funcion: Transporta oxígeno,



Alzheimer
1 / 85



de Prion
1/1.000.000

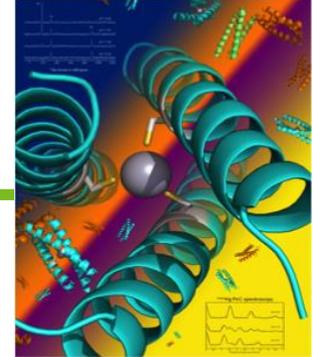


Parkinson
3 / 1000



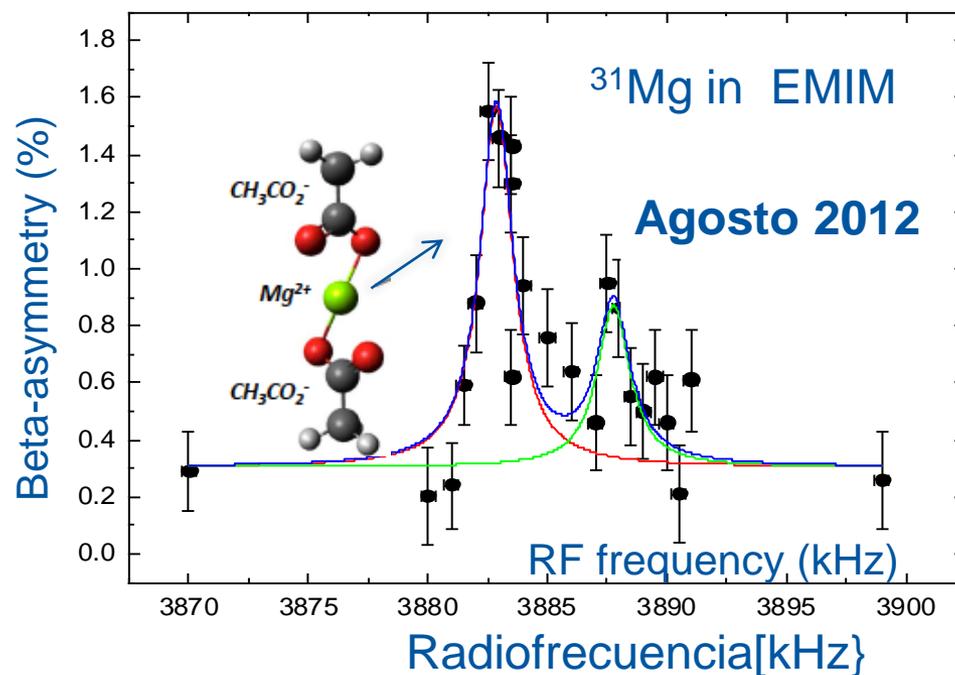
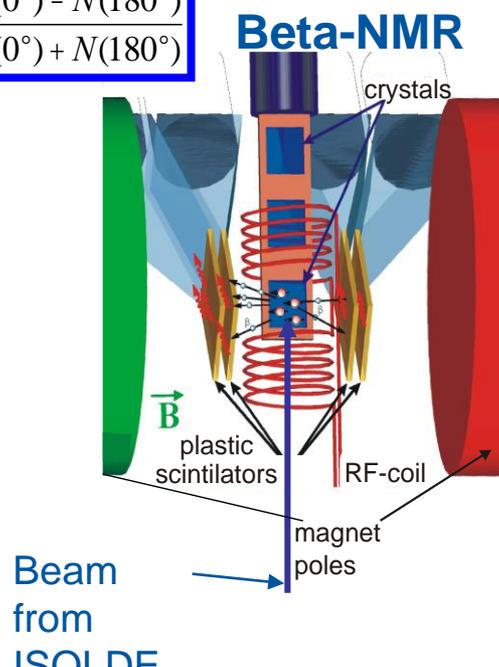
De wilson
1/300.000

Primer estudio de β -NMR en líquidos



- Estudio de la interacción ion-metal en biomoléculas
- Haz polarizado en líquido

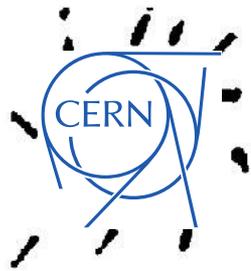
$$A = \frac{N(0^\circ) - N(180^\circ)}{N(0^\circ) + N(180^\circ)}$$



La espectroscopía con β -NMR es un billion de veces mas sensible que la realizada con NMR convencional

Conclusiones:

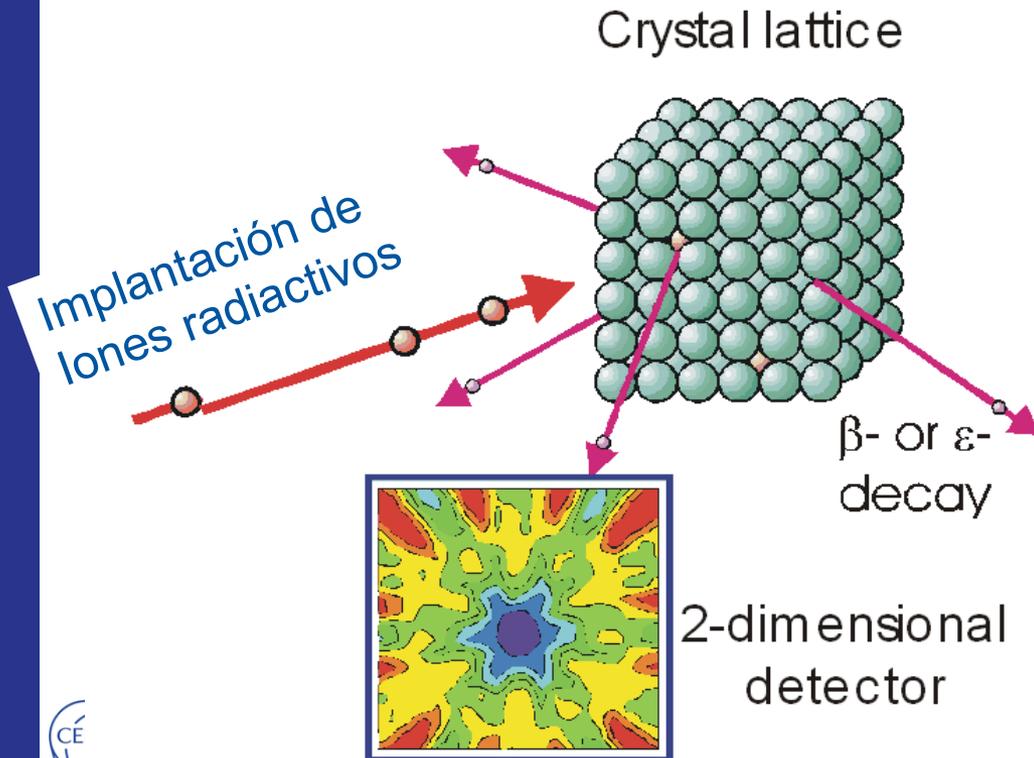
- El futuro de la física nuclear es brillante y en expansión. Con varias instalaciones en construcción y operativas en este decenio.
- Su investigación es fundamental para responder a cuestiones del comportamiento de la materia nuclear en condiciones extremas, la formación de los elementos, la vida y la muerte de las estrellas.
- Es la ciencia cuyas aplicaciones a la sociedad son más directas y van de la mano de la investigación fundamental.



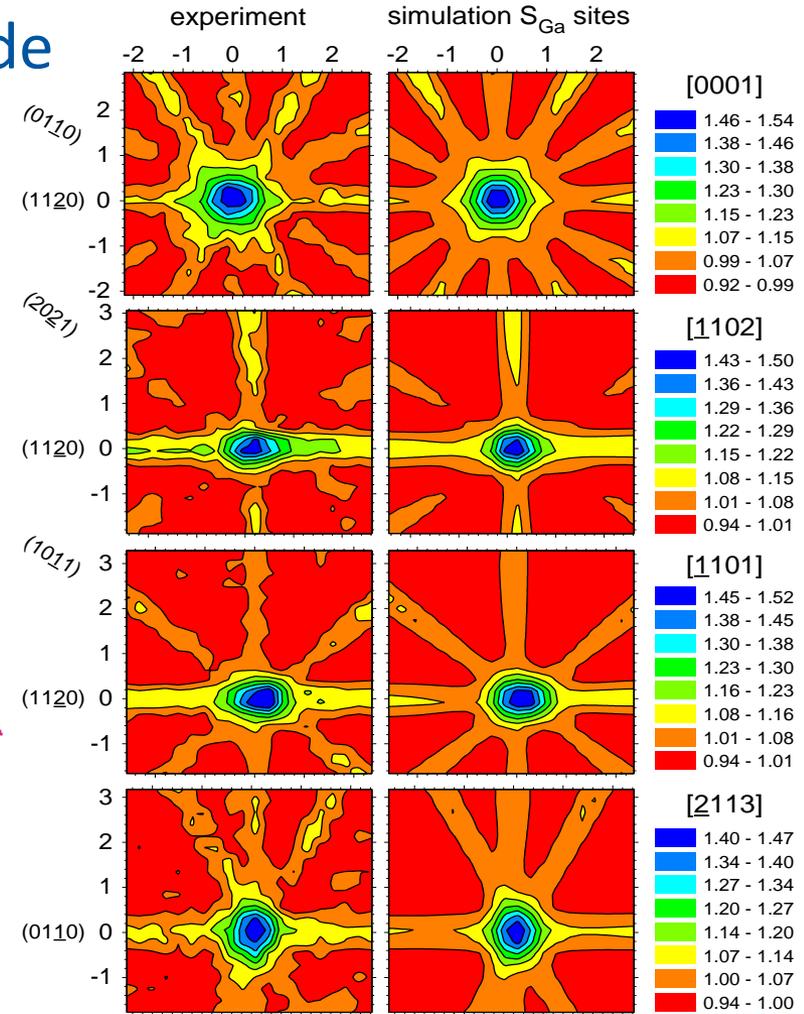
¡Gracias por su atención !

Física de Materiales: Núcleo sonda

- Posición de iones implantados
- Importante en caracterización de dopado de semiconductores



Emission Channeling

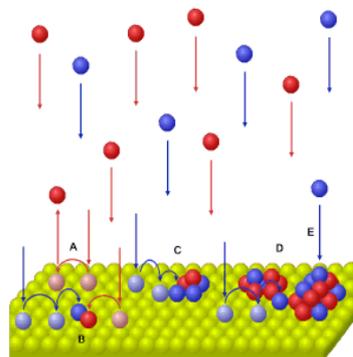


Un modo único de testear grafeno usando ASPIC

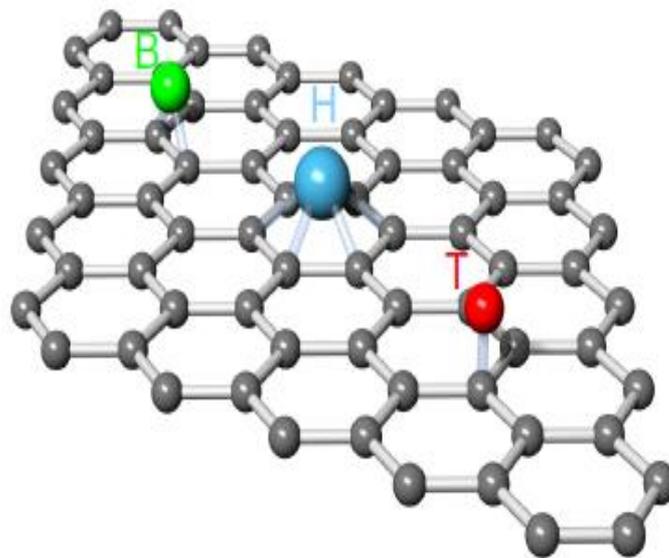
“Deposito controlado”



ASPIC: Camara de vacío para el estudio de superficies

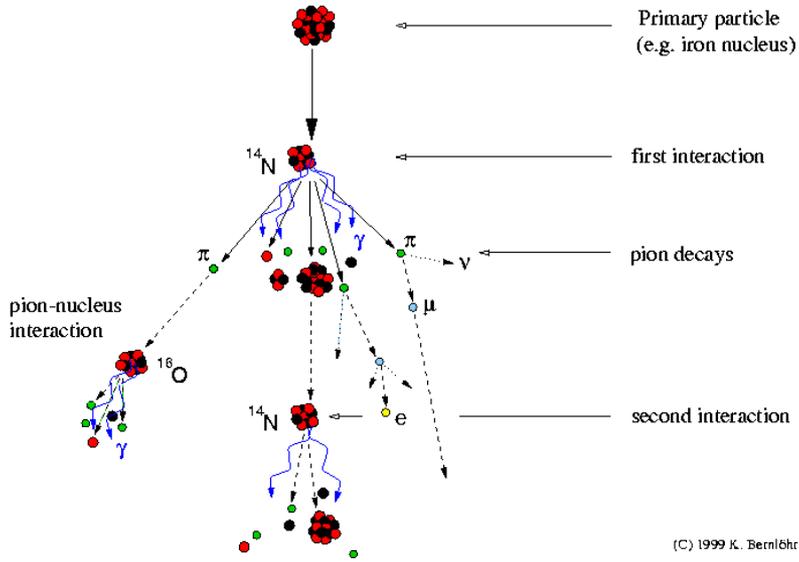


Objetivo: estudio del cambio de propiedades en el grafeno en contacto con dopantes o impurezas



Fuentes Naturales de Radiación

Development of cosmic-ray air showers



Radiación de origen terrestre: U, Th, Ra, Rn

Radiación presente en el cuerpo , sobre todo 40K.



Radionúcleos: 14C, 7Be, 3H

Radiación de origen cósmico

Altitud

