



REVIEWS OF MODERN PHYSICS, VOLUME 84, APRIL–JUNE 2012

Radioactive decays at limits of nuclear stability

M. Pfützner* and M. Karny

Faculty of Physics, University of Warsaw, Hoża 69, PL-00-681 Warszawa, Poland

L. V. Grigorenko

Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, Joint Institute for Nuclear Research, RU-141980, Dubna, Russia

K. Riisager

Department of Physics and Astronomy, Aarhus University, DK-8000 Aarhus C, Denmark

(published 30 April 2012)

TWO PROTON RADIOACTIVITY

► Lic. Verónica Tessaro

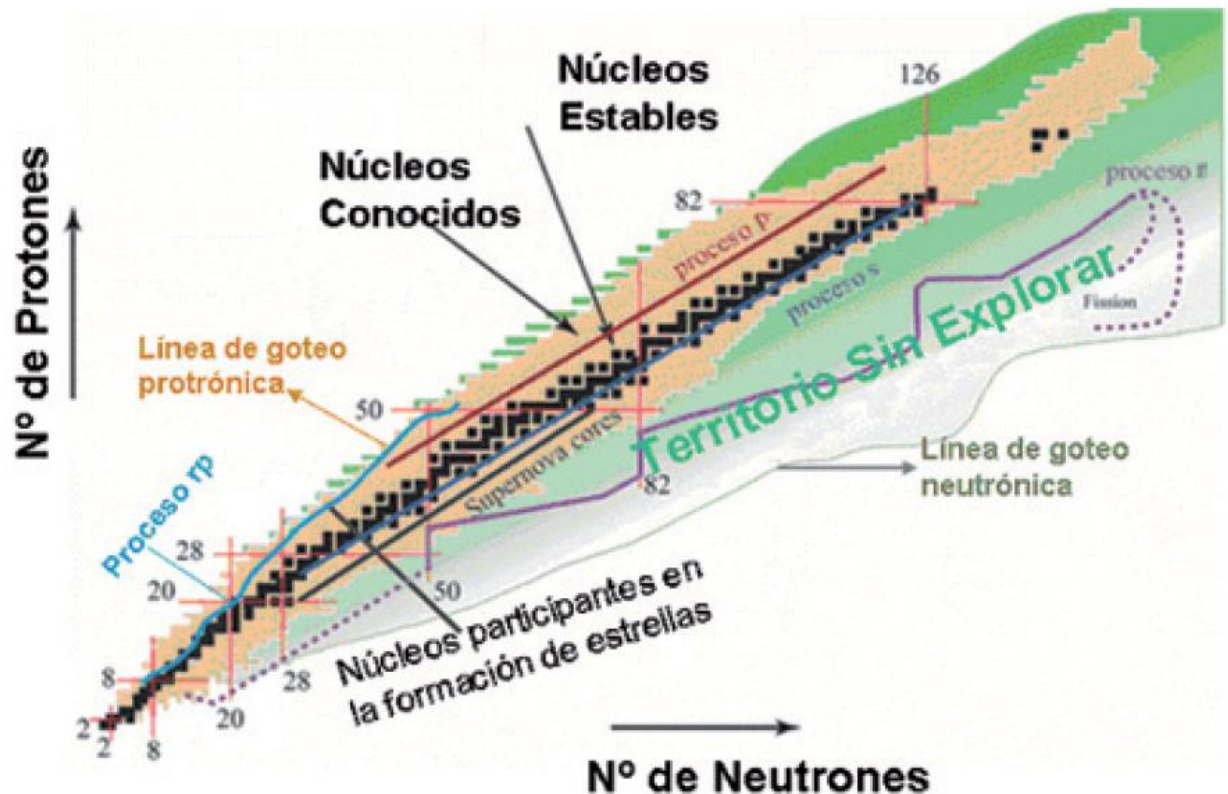
¿Cuáles son los límites de la estabilidad?

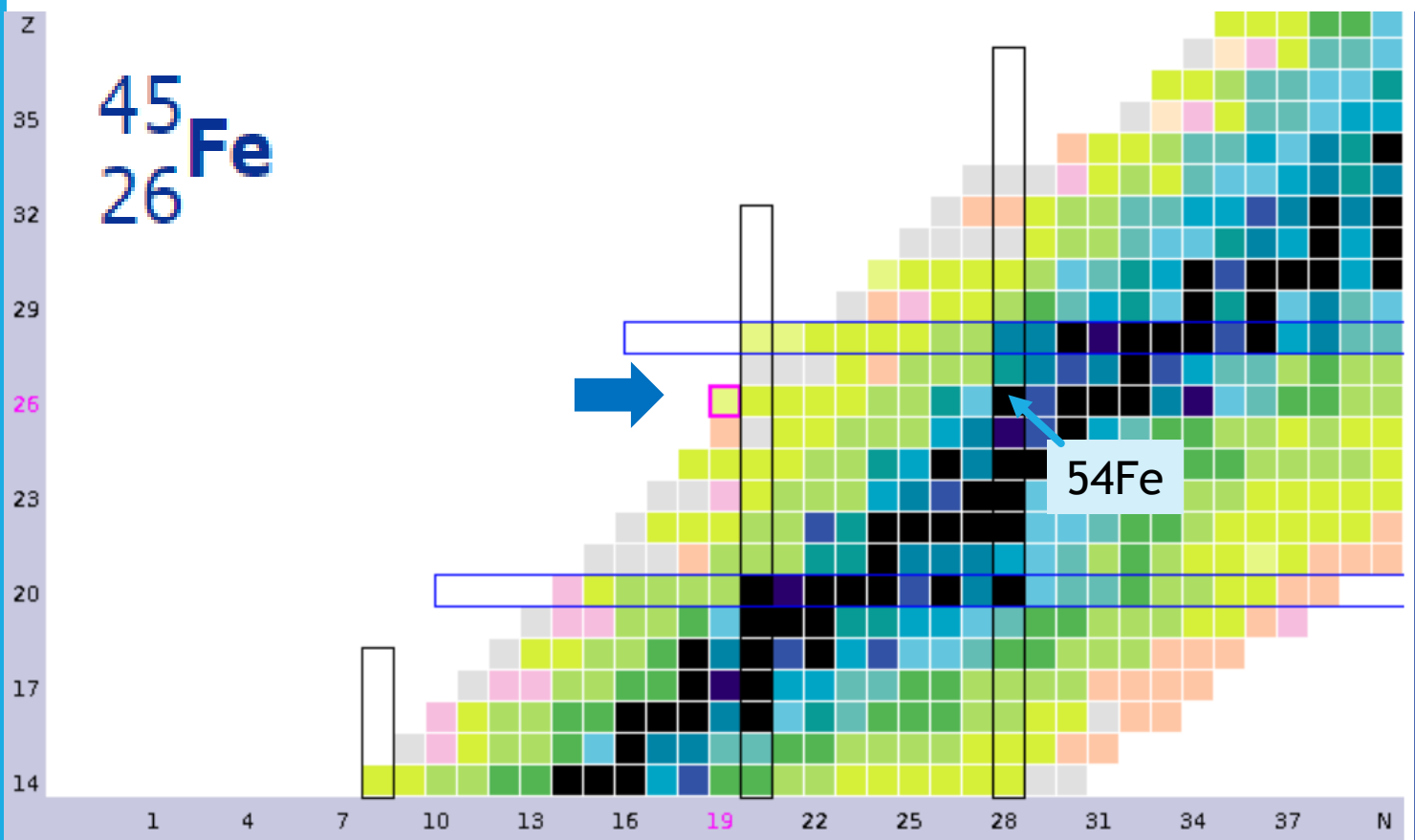
Protones y Neutrones **DRIP LINES** → “líneas de goteo”

Procesos de radioactividad de protones → indica que se ha cruzado la línea goteo protónica



Núcleos exóticos:
son altamente inestables y se encuentran muy lejos del valle de la estabilidad





Tooltips
 On
 Off

Zoom
 1
 2
 3
 4
 5
 6
 7

Uncertainty
 NDS
 Standard

Screen Size
 Narrow
 Wide

Nucleus
 go

Seconds
 > 10+15
 10+10
 10+07
 10+05
 10+04
 10+03
 10+02
 10+01
 10+00
 10-01
 10-02
 10-03
 10-04
 10-05
 10-06
 10-07
 10-15
 < 10-15
 unknown

Ground and isomeric state information for $^{45}_{26}\text{Fe}$

E(level) (MeV)	J π	Δ (MeV)	T _{1/2}	Decay Modes
0.0	(3/2+)	13.7620	2.45 ms 23	2p : 70.00 % ε : 30.00 % εp : 19.00 % ε2p : 7.80 % ε3p : 3.30 %



NNDc ENSDF NSR
Nuclear Wallet Cards

ENERGÍA DE SEPARACIÓN

$$S_p(N, Z) = B(N, Z) - B(N, Z - 1)$$

$$S_{2p}(N, Z) = B(N, Z) - B(N, Z - 2)$$

$S_p(N, Z) > 0 \rightarrow$ entrego energía

$S_p(N, Z) < 0 \rightarrow$ se libera energía



Energía de ligadura del núcleo con Z es menor que con Z-1 o Z-2

$$B(N, Z) < B(N, Z - 1) !!!$$

DRIP LINE $\rightarrow S_p = 0$

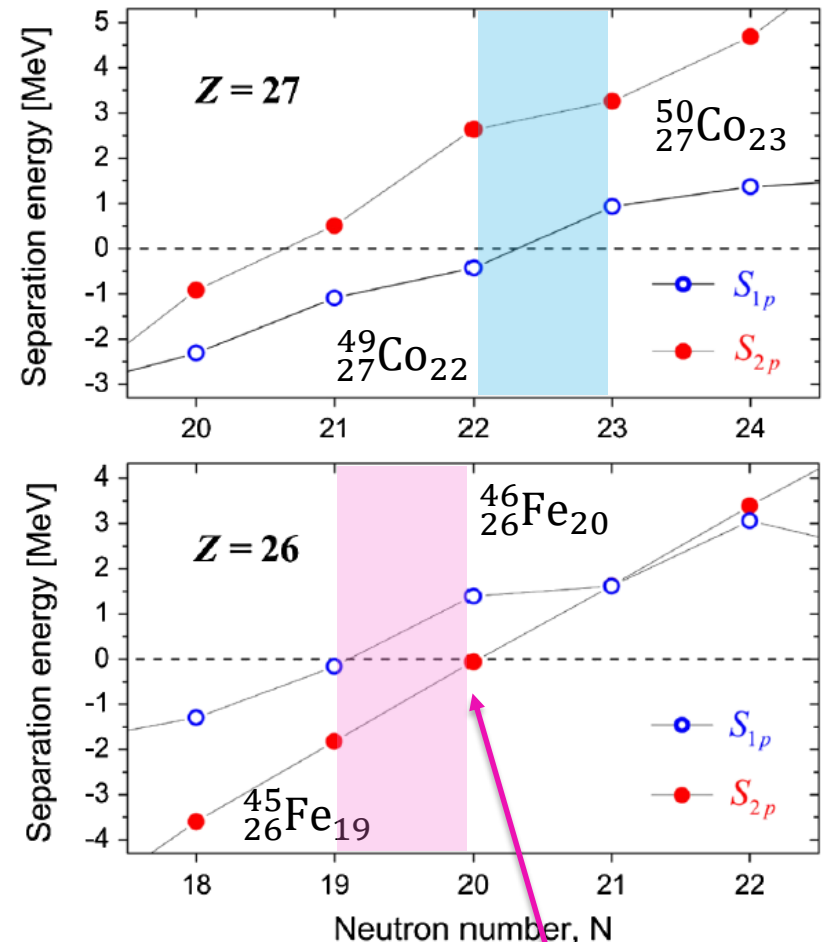


FIG. 3 (color online). The proton- and two-proton separation energies of iron and cobalt isotopes as predicted by the FRDM mass model (Möller, Nix, and Kratz, 1997).

$$S_{2p} < S_p$$

Q value → no conservación de la energía en reposo



A y Z se conservan pero la masa en reposo NO $\rightarrow Q = [(m_a + m_x) - (m_b + m_Y)]c^2$

Siendo $m_i = m(Z, N)$ y $m_f = m(Z - 1, N) + m_p$

$$S_p(Z, N) = [m(Z - 1, N) + m_p] - m(Z, N)$$



$$S_p(Z, N) = -Q_p$$

La determinación exacta de Q_p permite la determinación de la masa del emisor y la comprobación de los modelos de masa nuclear mas allá de la línea de goteo!!

Radioactividad protónica es una herramienta muy útil para estudiar la estructura nuclear mas allá de la estabilidad

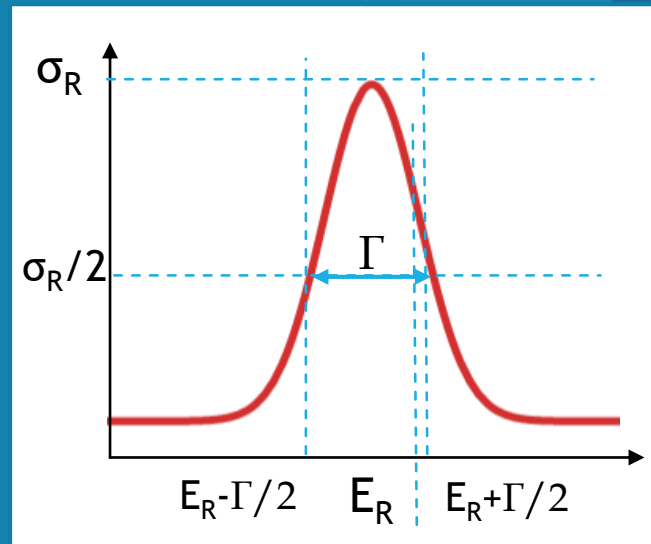
Necesariamente para que un núcleo decaiga necesitamos que:
 $S_p < 0$ o $Q_p > 0$

RESONANCIA



ESTADO CUASISTACIONARIO

Sistemas con “tiempo de vida finito” y “tiempo de retardo” grande



De la relación entre

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar$$

$$\tau = \hbar / \Gamma$$

$$\Delta E = \Gamma$$

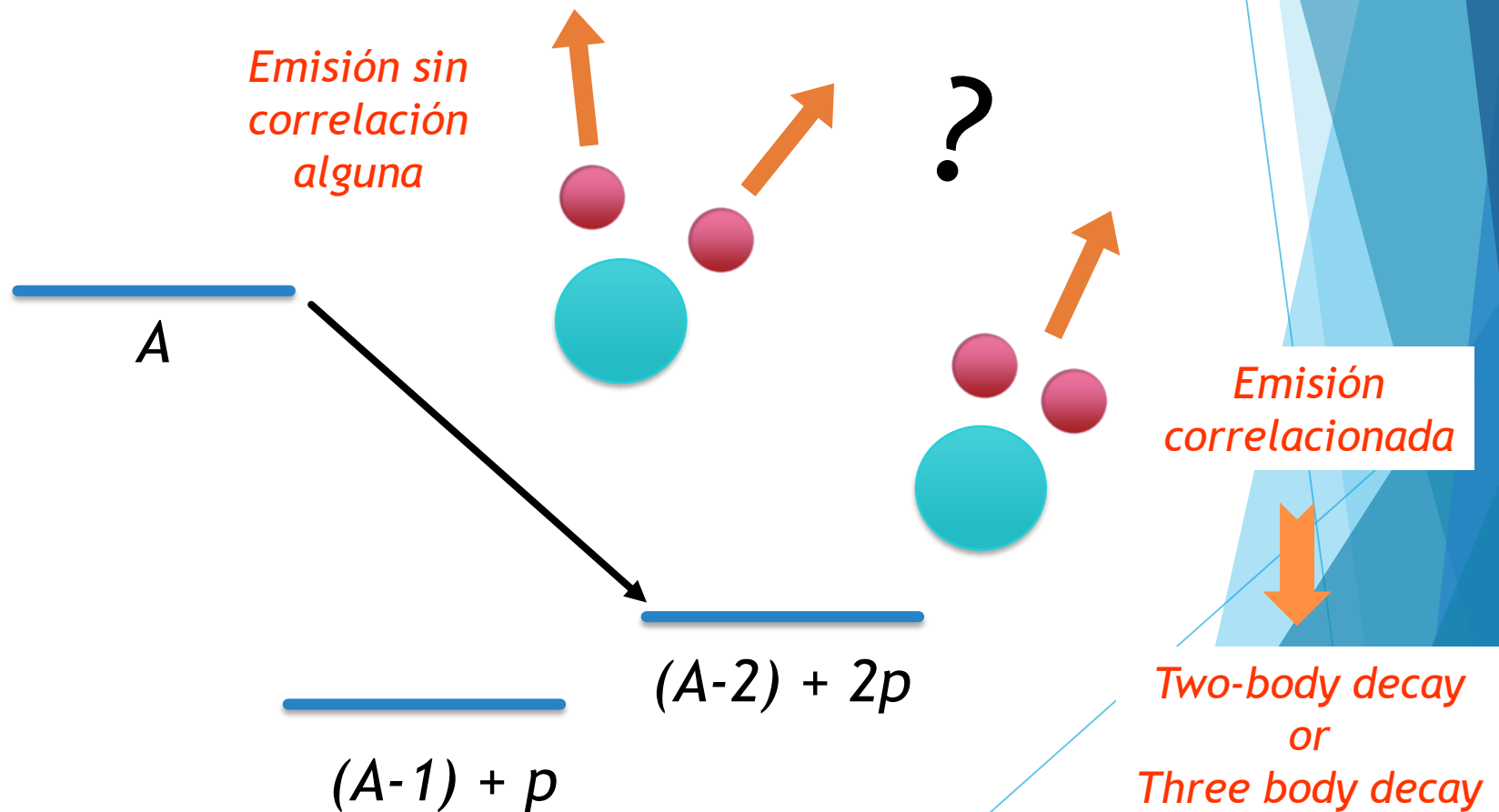
“incerteza de la E_R ”

$$\Gamma = \frac{\hbar \ln 2}{T_{1/2}}$$

“determinan experimentalmente”

TWO-PROTON RADIOACTIVITY

Las **correlaciones en energía y momento** entre los protones suscitó interés desde su postulación ya que permitía conocer la interacción nucleón-nucleón dentro del núcleo

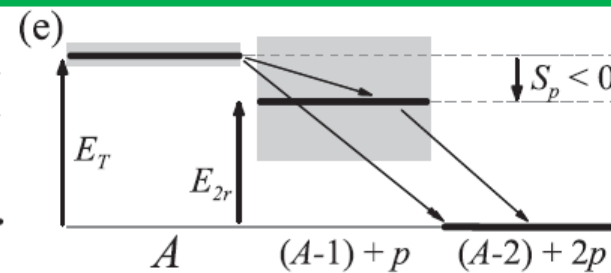
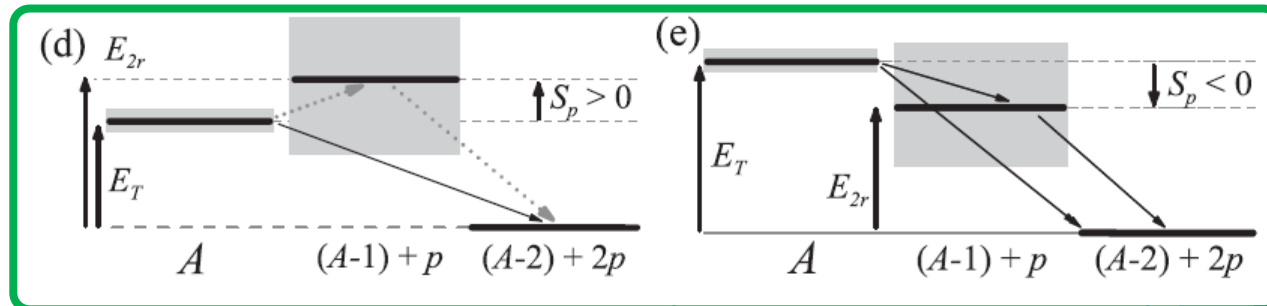
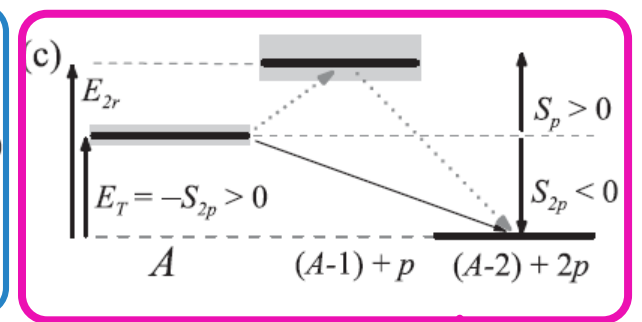
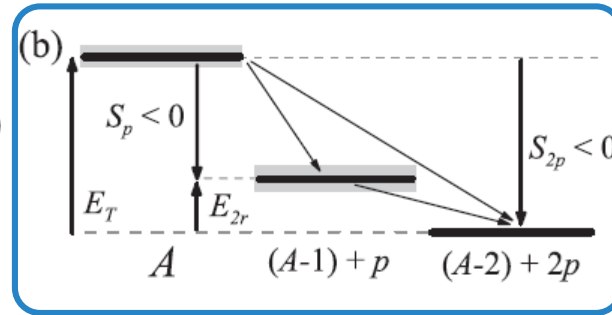
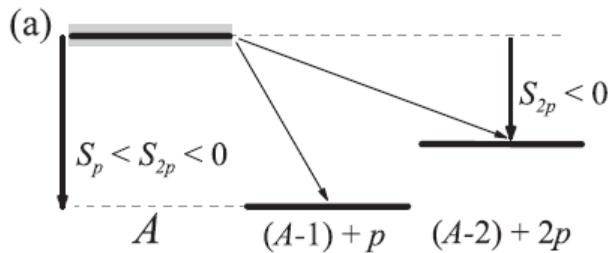


Paper: TWO-PROTON RADIOACTIVITY

E_T : energía del sistema relativa al umbral de tres cuerpos

E_{2r} : menor energía del sistema de 2-cuerpos relativa a este umbral

Secuencial decay



$^{45}\text{Fe}_{19}$

^6Be , ^{45}Fe , ^{19}Mg

Democratic decay

True 2p decay
(true three body decay)

TABLE VI. Ground-state $2p$ emitters investigated experimentally. The indicated half-life corresponds to the partial value for the $2p$ decay.

N_Z	E (keV)	Γ or $T_{1/2}$	Reference
${}^6\text{Be}$	1371(5)	92(6) keV	Whaling (1966)
${}^{12}\text{O}$	1820(120)	400(250) ^a keV	RESONANCE PHENOMENA
	1790(40)	580(200) ^a keV	
	1800(400)	600(500) ^a keV	
${}^{16}\text{Ne}$	1350(80)	200(100) ^a keV	Woodward, Tribble, and Tanner (1983)
	1400(20)	110(40) ^a keV	
${}^{19}\text{Mg}$	1350(80)	<200 keV	Mukha <i>et al.</i> (2008b)
	750(50)	4.0(15) ps	Mukha <i>et al.</i> (2007)
${}^{45}\text{Fe}$	1100(100)	4.0 ^{+3.3} _{-1.8} ms	RADIACTIVE DECAY
	1140(50)	8.5 ^{+6.4} _{-3.2} ms	
	1154(16)	2.8 ^{+1.0} _{-0.7} ms	
${}^{48}\text{Ni}$	1350(20)	3.7 ^{+0.4} _{-0.4} ms	Dossat <i>et al.</i> (2005)
		8.4 ^{+12.8} _{-7.0} ms ^b	
${}^{54}\text{Zn}$	1480(20)	3.0 ^{+2.2} _{-1.2} ms	Pomorski <i>et al.</i> (2011b)
		3.7 ^{+2.2} _{-1.0} ms	

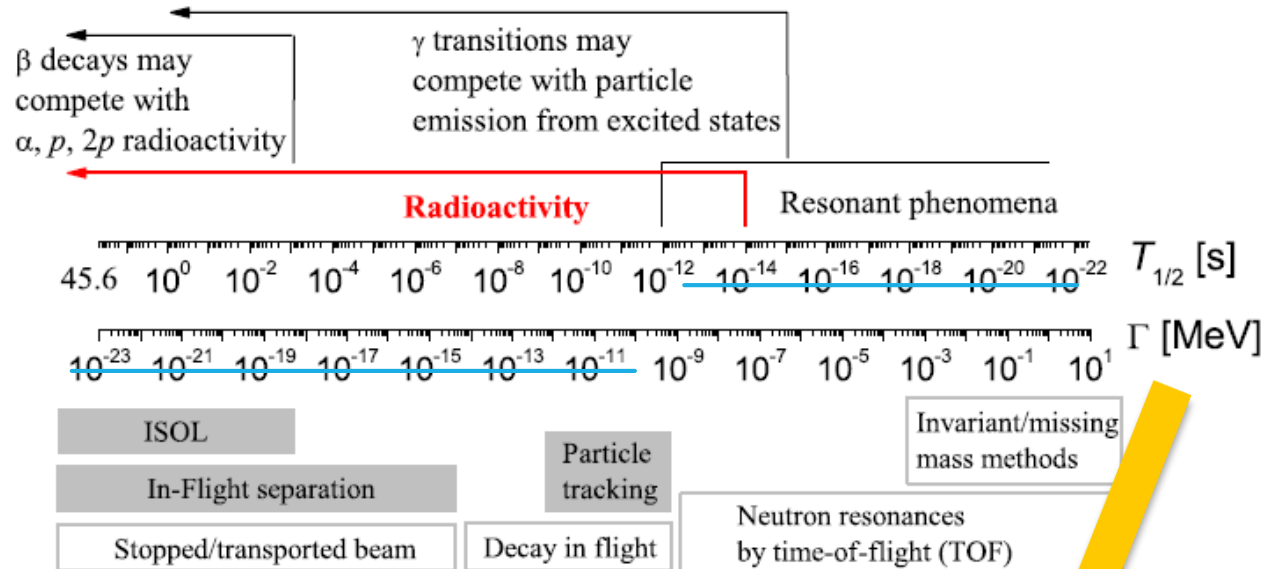
^aAccording to theoretical calculations, much smaller widths are expected (Barker, 1999; Barker, 2001; Grigorenko *et al.*, 2002).

^bOnly one decay event observed.

EXPERIMENTAL two-proton emitters ground state

$$\Gamma = \frac{\hbar \ln 2}{T_{1/2}}$$

RESONANCIA VS RADIOACTIVIDAD



N_Z	E (keV)	Γ or $T_{1/2}$
${}^6\text{Be}$	1371(5)	92(6) keV
${}^{12}\text{O}$	1820(120)	400(250) ^a keV
	1790(40)	580(200) ^a keV
${}^{16}\text{Ne}$	1800(400)	600(500) ^a keV
	1350(80)	200(100) ^a keV
	1400(20)	110(40) ^a keV
	1350(80)	<200 keV
${}^{19}\text{Mg}$	750(50)	4.0(15) ps
${}^{45}\text{Fe}$	1100(100)	4.0 ^{+3.3} _{-1.8} ms
	1140(50)	8.5 ^{+6.4} _{-3.2} ms
	1154(16)	2.8 ^{+1.0} _{-0.7} ms
${}^{48}\text{Ni}$		3.7 ^{+0.4} _{-0.4} ms
	1350(20)	8.4 ^{+12.8} _{-7.0} ms ^b
${}^{54}\text{Zn}$		3.0 ^{+2.2} _{-1.2} ms
	1480(20)	3.7 ^{+2.2} _{-1.0} ms

$$T_{1/2} \sim 10^{-21} \text{ s} \rightarrow \Gamma = 1 \text{ MeV}$$

$$\Gamma = \frac{\hbar \ln 2}{T_{1/2}}$$

TWO-PROTON CORRELATION

Three body decay

3 partículas en el estado final \rightarrow 9 GL

Dos sistemas de Jacobi irreducibles
(protones indistinguibles)

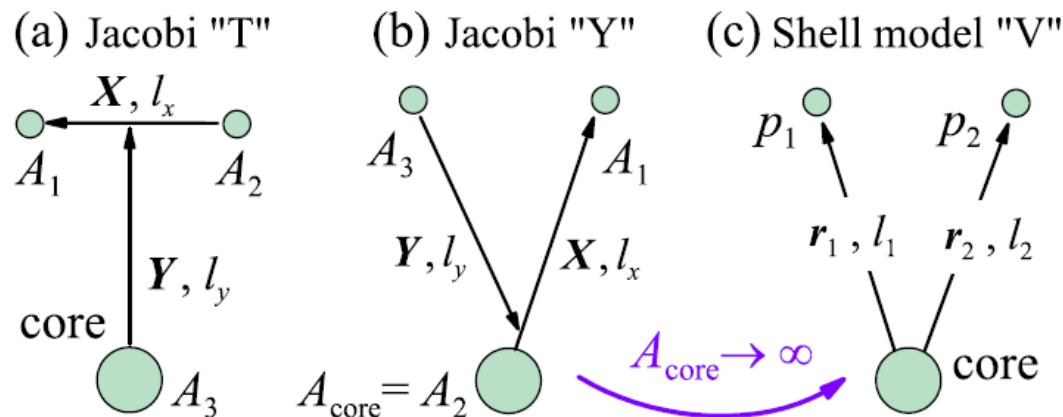
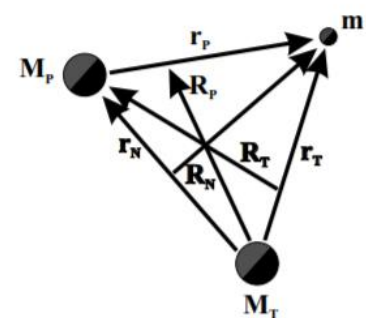
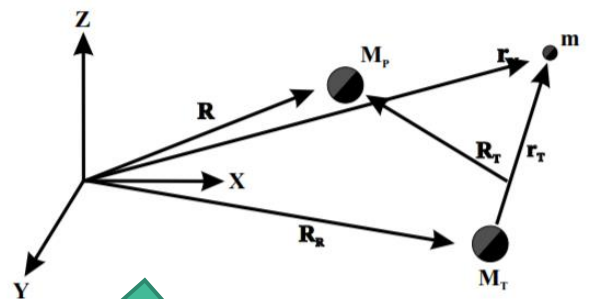


FIG. 26 (color online). Coordinate systems for two-nucleon plus core problem. In (a) the Jacobi T system, the “two-proton subsystem,” and the core are explicitly in configurations with definite angular momenta l_x and l_y . For a heavy core (b) the Jacobi Y system is close to (c) the single-particle V system used typically in many-body approaches.



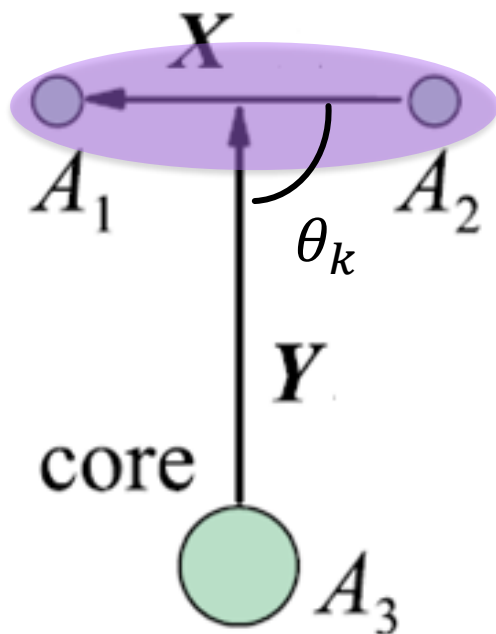
E_T fija \rightarrow quedan 2 parámetros que representan la correlación completa

$$\varepsilon = E_x / E_T,$$

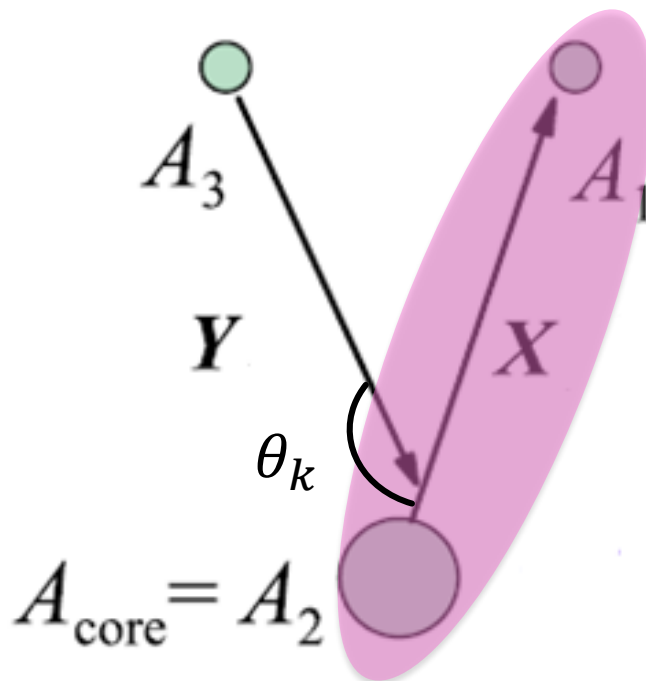
$$\cos(\theta_k) = (\mathbf{k}_x \cdot \mathbf{k}_y) / (k_x k_y),$$

TWO-PROTON CORRELATION

(a) Jacobi "T"



(b) Jacobi "Y"



$$\varepsilon = E_x/E_T,$$

$$\cos(\theta_k) = (\mathbf{k}_x \cdot \mathbf{k}_y)/(k_x k_y),$$

RESULTADOS EN ${}^6\text{Be}$

Three body decay

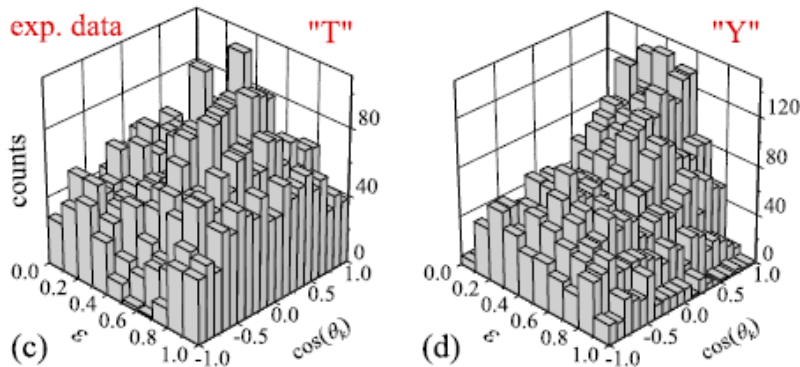
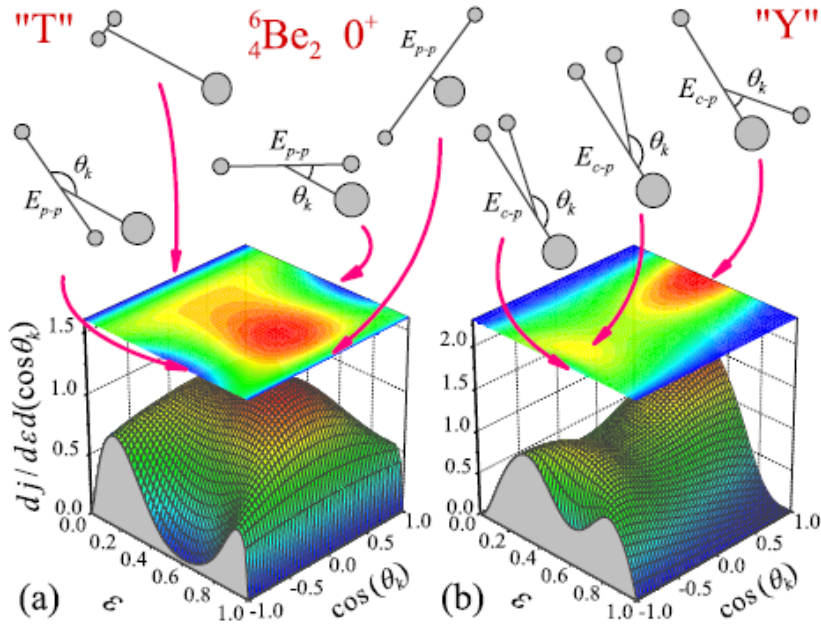


FIG. 27 (color online). Complete correlation picture for ${}^6\text{Be}$ g.s. decay, presented in (a), (c) T and (b), (d) Y Jacobi systems. (a), (b) is theory, and (c), (d) is experimental data. Qualitative illustration of the meaning of different kinematical regions is provided above the panels. Data and calculations are from Grigorenko *et al.*, 2009b.

(2009)
Estudios recientes experimentales dieron una imagen completa de la correlación. Tiene un buen acuerdo con el modelo de 3 cuerpos

$$\varepsilon = E_x/E_T,$$

$$\cos(\theta_k) = (\mathbf{k}_x \cdot \mathbf{k}_y)/(k_x k_y),$$

RESULTADOS EXPERIMENTALES

^{45}Fe → 2002 medido en GSI (Alemania) y GANIL (Francia)

^{54}Zn → GANIL

^{48}Ni → (1 solo decaimiento)

Se producen por reacciones de fragmentación y se separan usando in-flight techniques.

Estos iones son implantados en detectores de silicona y las variables que se pueden medir es la *energía* y el *tiempo de decaimiento*

J. Giovinazzo et al./Nuclear Physics A722 (2003) 434c–438c

437c

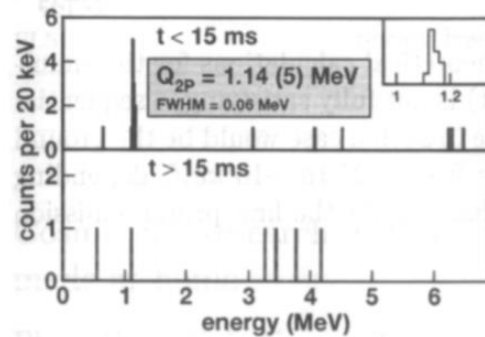


Figure 2. Energy distribution of decay events correlated to a ^{45}Fe implantation. A peak clearly appears for short times after implantation (upper part). This peak is identified as the two-proton decay from the ground state. Longer time events (lower part) are compatible with a subsequent decay of ^{43}Cr , the daughter of ^{45}Fe after two-proton emission.

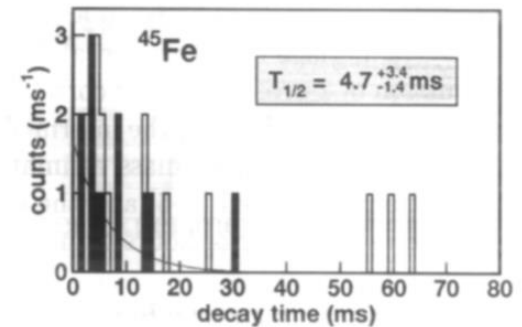
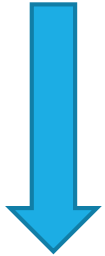


Figure 3. Time distribution of decay events after a ^{45}Fe implantation. The dark spectrum corresponds to the time distribution of the events in the 1.14 MeV two-proton peak, for which a half-life of $4.7^{+3.4}_{-1.4}$ ms is estimated. If all events are taken into account, this distribution is consistent with the decay of the daughter nucleus ^{43}Cr with an estimated half-life of (16.7 ± 7.0) ms.

Detectores de silicona

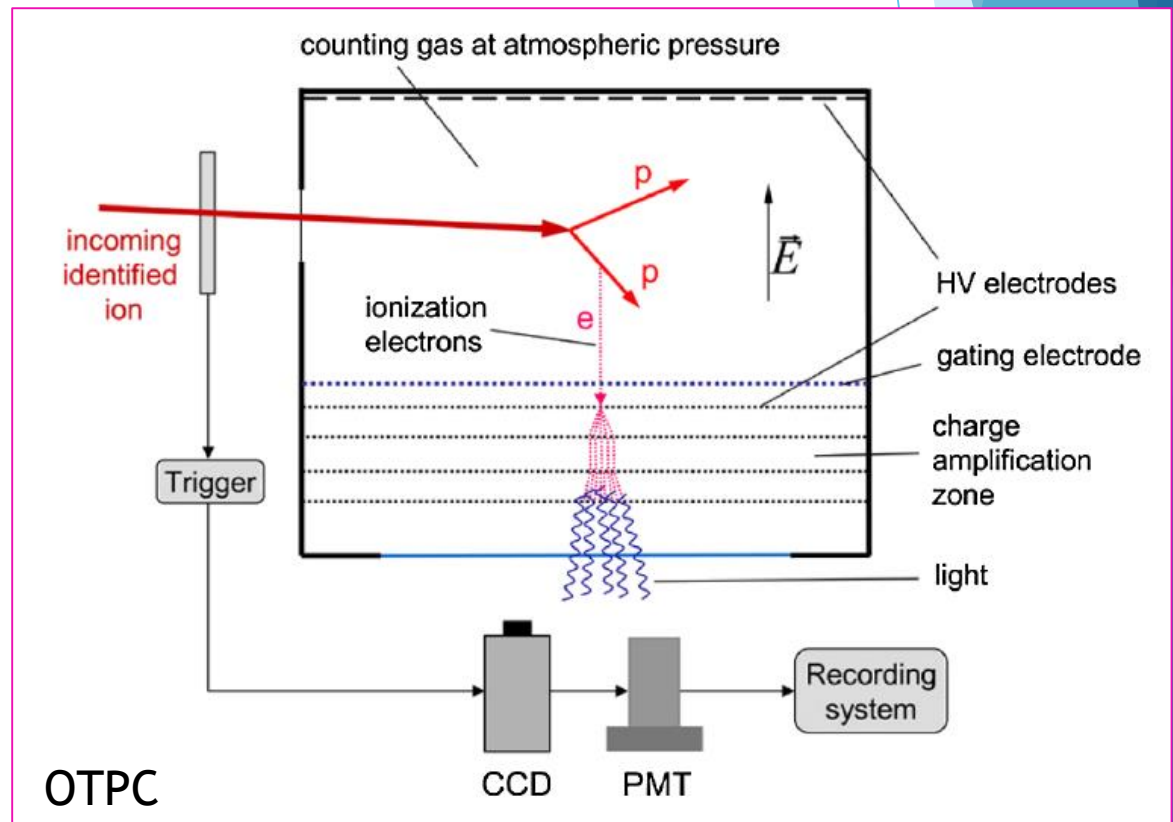
Solo pueden medir la energía depositada en el medio
No se puede obtener en detalle las energía de los productos o las correlaciones de los momentos



Nuevas tecnologías basadas en
TPC=time projection chamber

Detectores Gaseosos

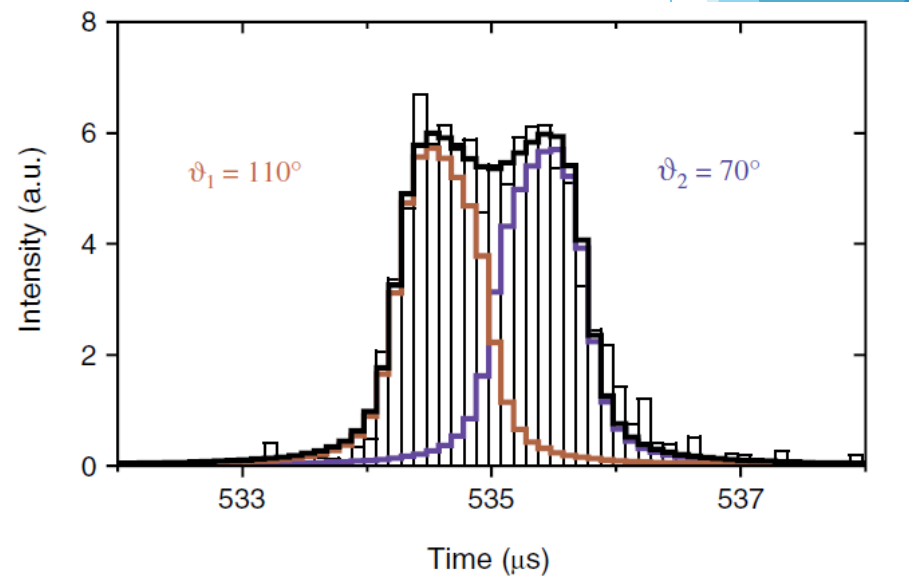
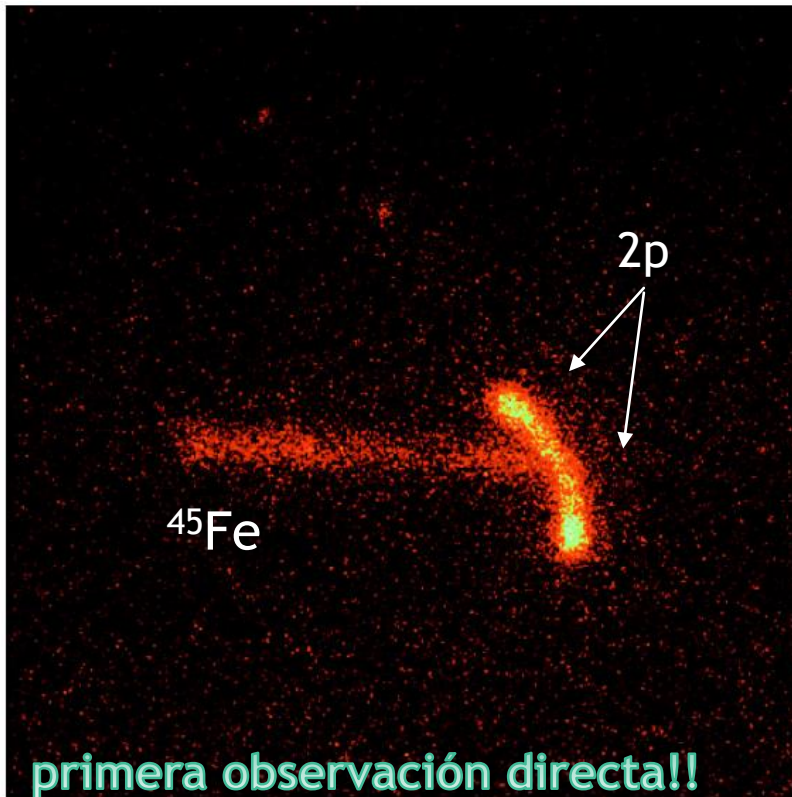
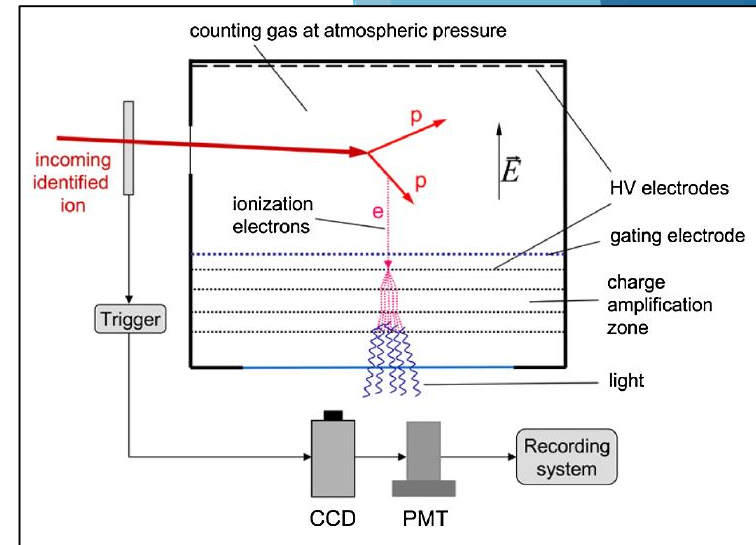
➤ A través de la ionización en el gas de la cámara se puede obtener la **traza de las partículas cargadas**



OPTICAL TIME PROJECTION CHAMBER

- permite medir la correlación entre protones

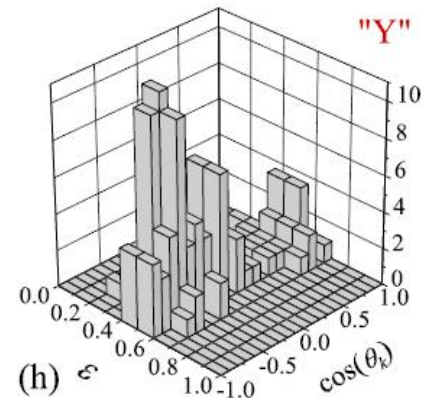
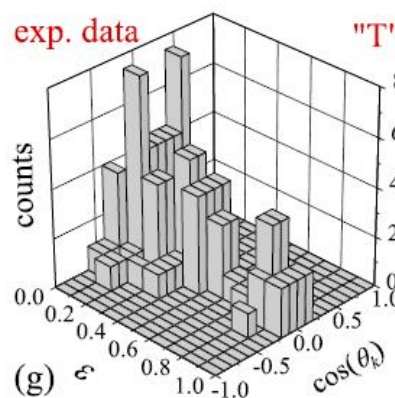
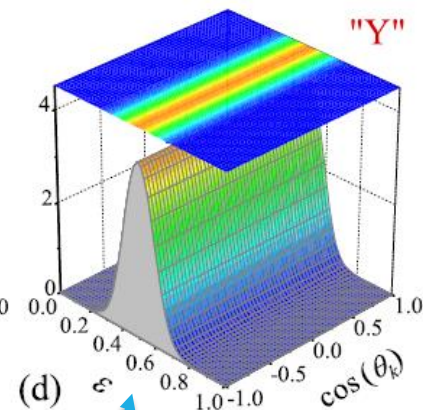
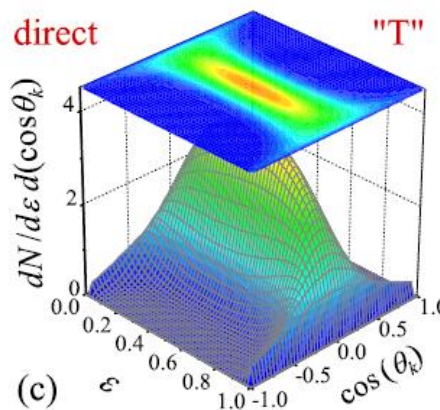
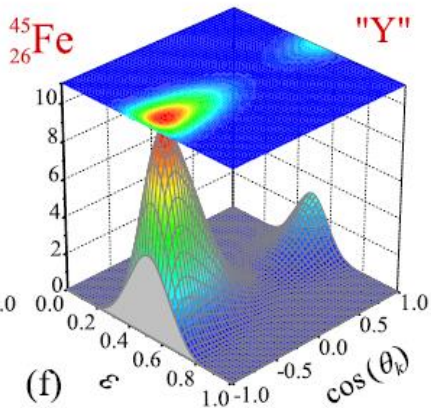
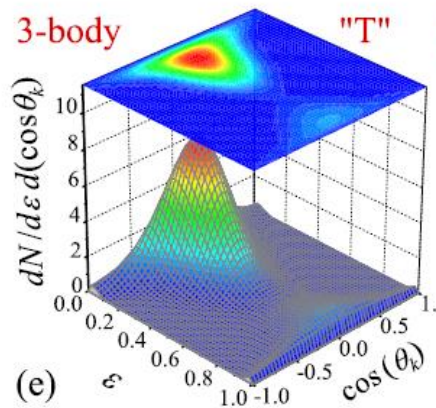
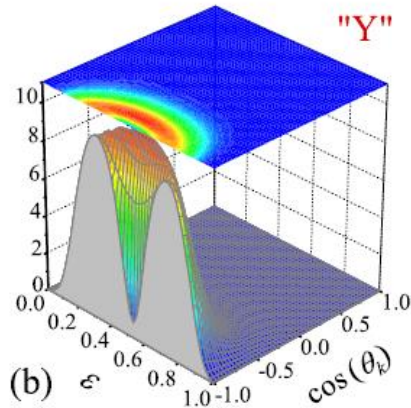
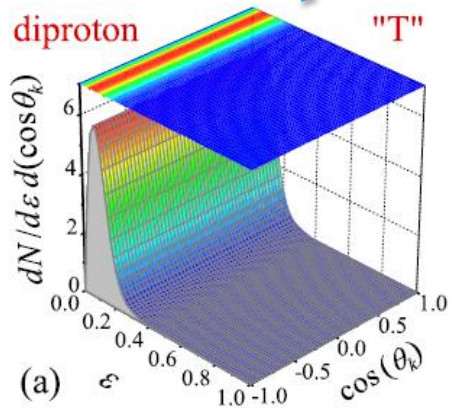
Imagen 2D de CCD en un tiempo de exposición de 25ms. Los brazos son protones de 0.6MeV emitidos a 535 μ s luego de la implantación



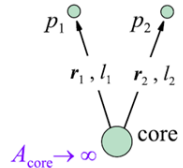
Intensidad total medida por PMT

RESULTADOS EN ^{45}Fe

-un solo pico angosto de energía
-distribución angular isotrópica



(c) Shell model "V"



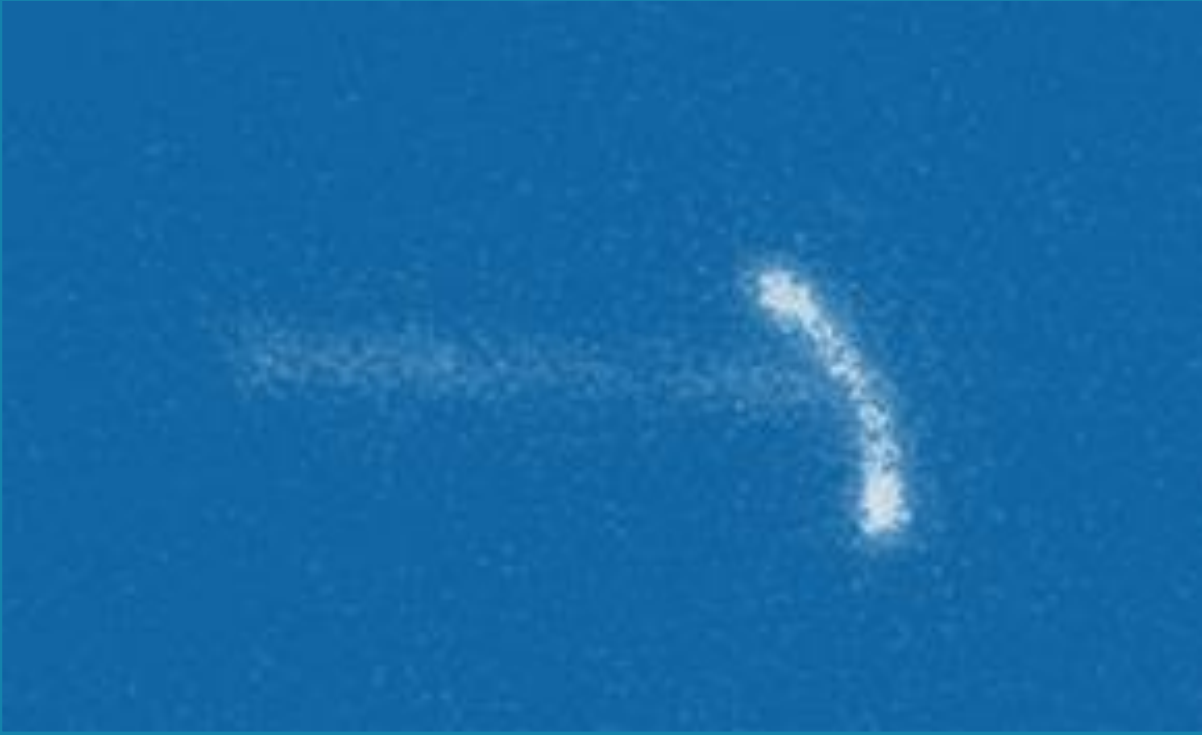
-pico bien definido en $\epsilon=0,5$
refleja la simetría entre los 2p

CONCLUSIÓN

La exploración de las líneas de goteo en la carta de nucleidos ha hecho un gran progreso en las últimas décadas.

La radioactividad de 2 protones es el descubrimiento mas reciente en los modos de decaimiento. Este fenómenos junto al decaimiento de un protón, dados en la cercanía de la línea de goteo, permiten verificar la validez de los modelos teóricos mas allá de las líneas de estabilidad.

Los cálculos realizados en el modelo de tres cuerpos demuestran que la correlación p-p es muy sensible a la estructura nuclear tomada en los modelos teóricos. Estas correlaciones se manifiestan en las variables ε y $\cos\theta$ de los sistemas usados T y Y.



*Gracias por su
atención!*