



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

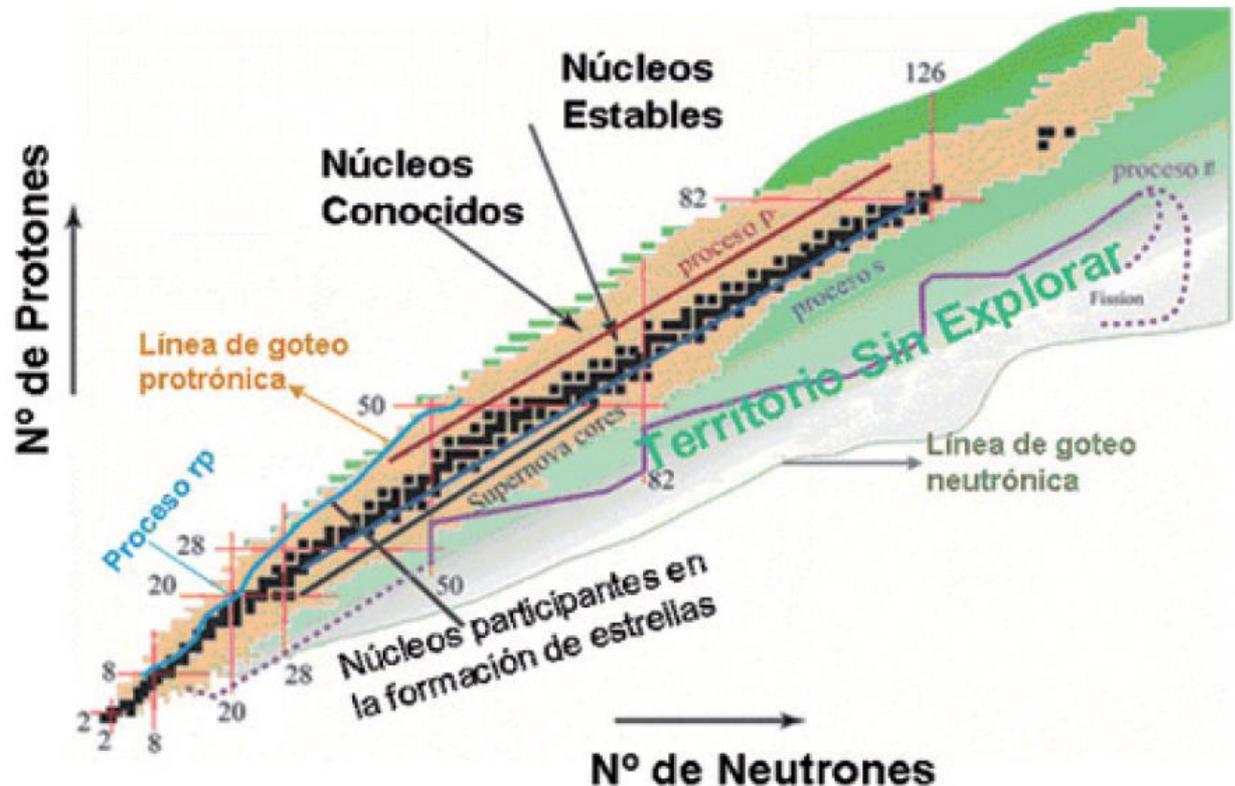
# ¿Cuáles son los límites de la estabilidad?

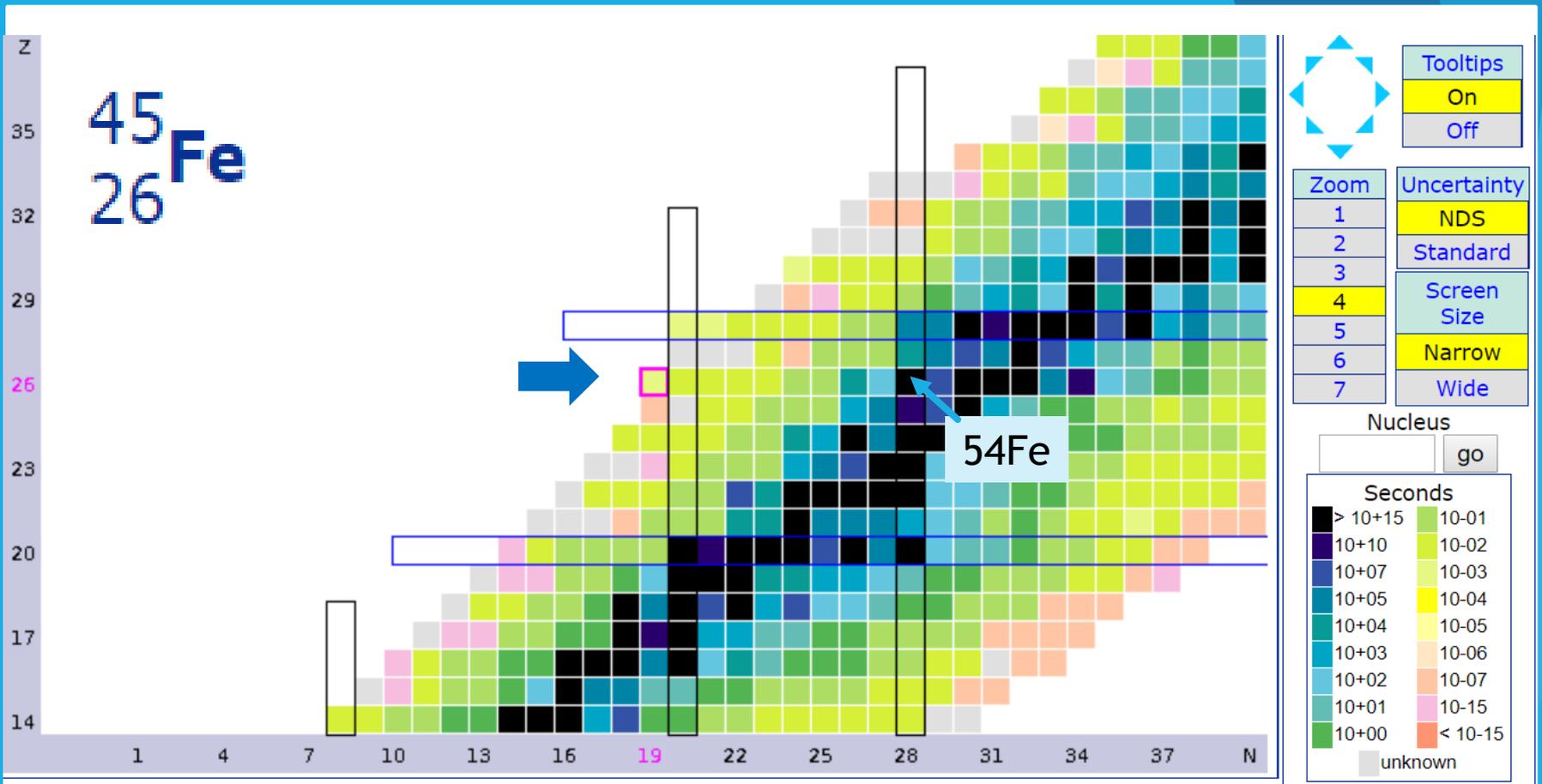
Protones y Neutrones **DRIP LINES** → “líneas de goteo”

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 $\pi$	$\Delta$ (MeV)	T <sub>1/2</sub>	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**  $\rightarrow S_p = 0$

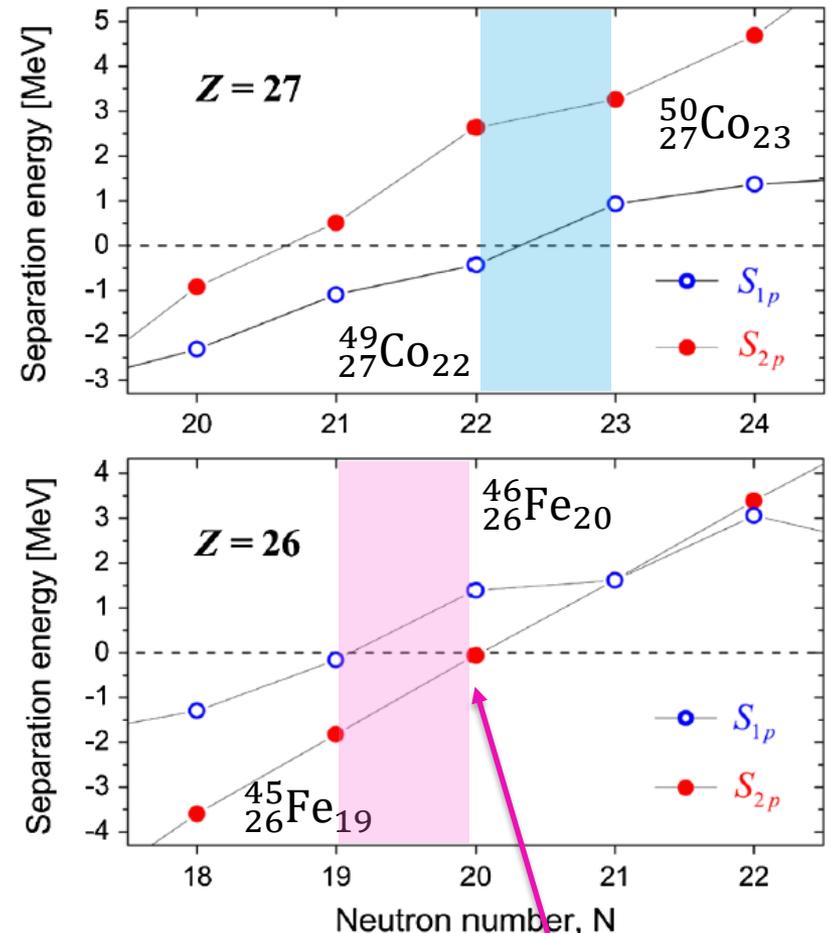


FIG. 3 (color online). The proton- and two-proton separation energies of iron and cobalt isotopes as predicted by the FRDM mass model (Möller, Nix, and Kratz, 1997).

$$S_{2p} < S_p$$

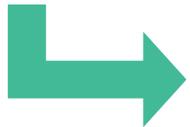
# Q value → no conservación de la energía en reposo



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

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

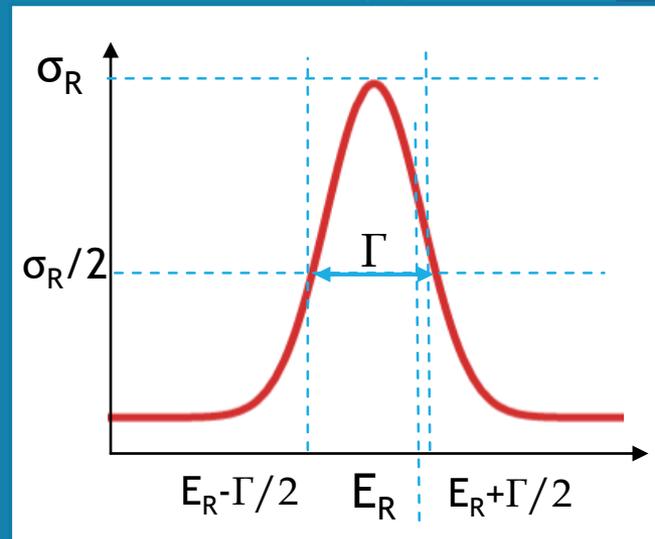
Necesariamente para que un núcleo decaiga necesitamos que:  
 $S_p < 0$  o  $Q_p > 0$

# RESONANCIA



## ESTADO CUASISTACIONARIO

Sistemas con "tiempo de vida finito" y "tiempo de retardo" grande



De la relación entre

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

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

$$\Delta E = \Gamma$$

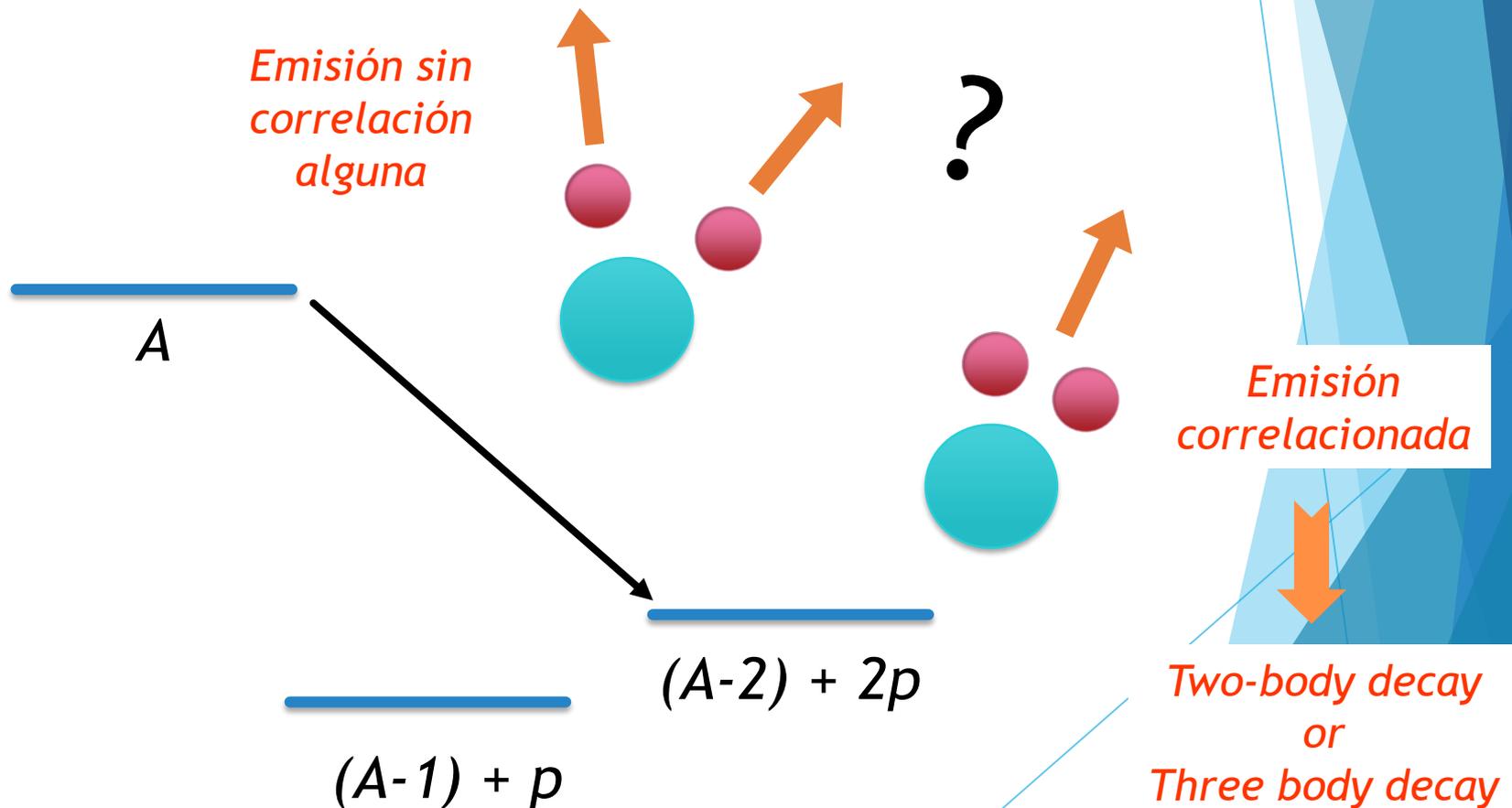
"incerteza de la  $E_R$ "

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

"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

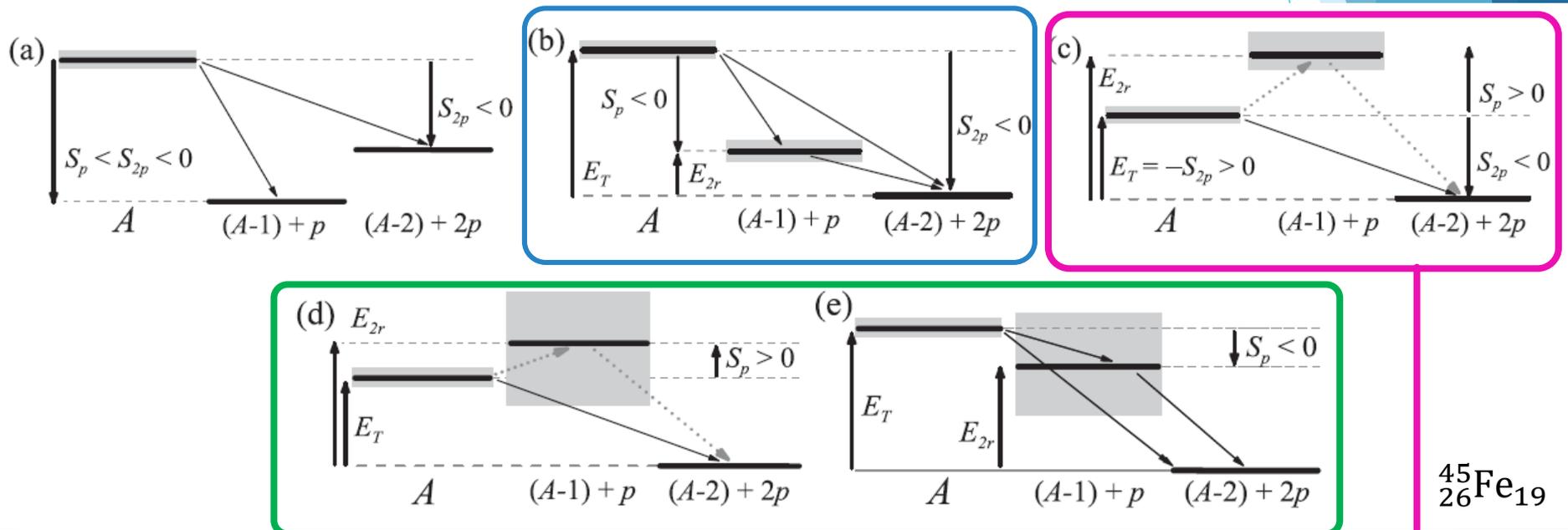


# Paper: TWO-PROTON RADIOACTIVITY

$E_T$  : energía del sistema relativa al umbral de tres cuerpos

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

## Secuencial decay



${}^{45}_{26}\text{Fe}_{19}$

True 2p decay  
(true three body decay)

${}^6\text{Be}$ ,  ${}^{45}\text{Fe}$ ,  ${}^{19}\text{Mg}$

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

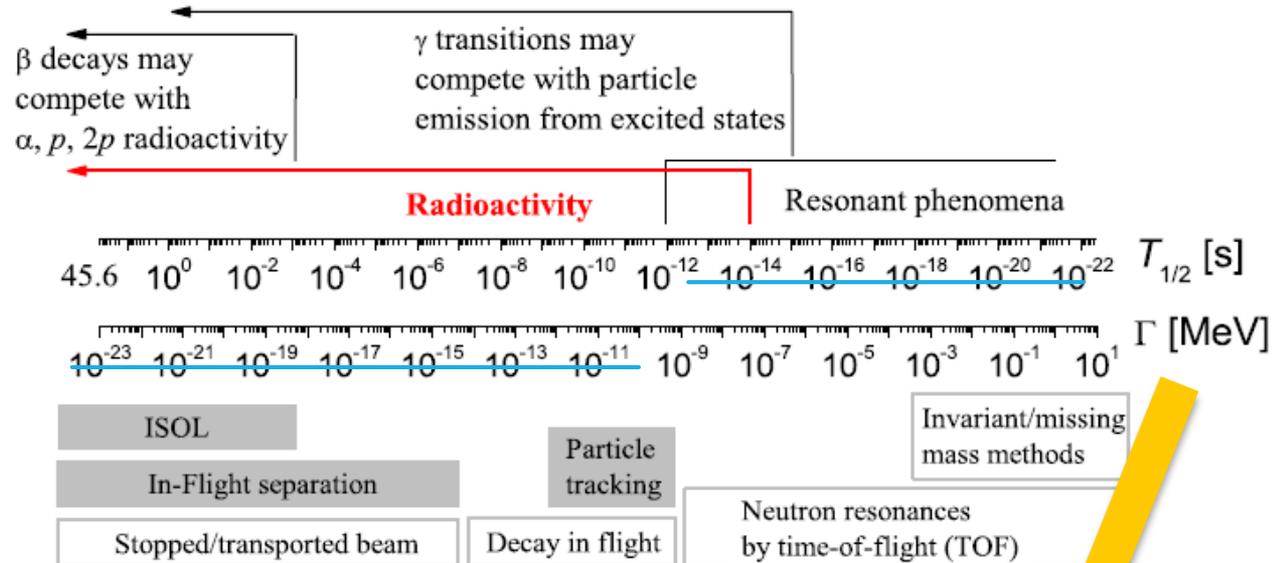
<sup>a</sup>According to theoretical calculations, much smaller widths are expected (Barker, 1999; Barker, 2001; Grigorenko *et al.*, 2002).

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

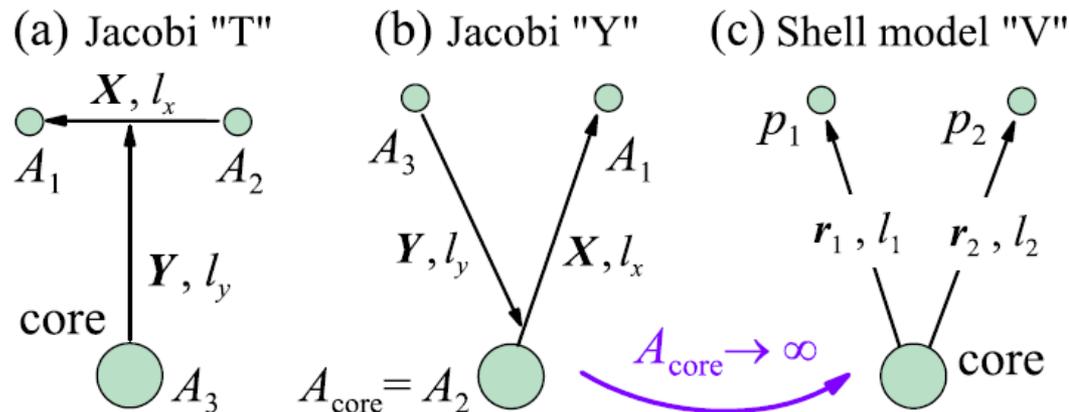
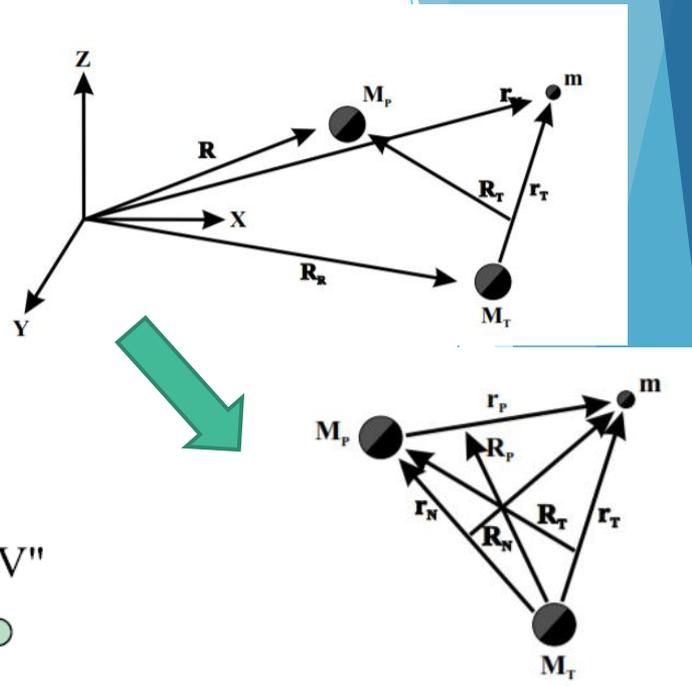


FIG. 26 (color online). Coordinate systems for two-nucleon plus core problem. In (a) the Jacobi T system, the “two-proton subsystem,” and the core are explicitly in configurations with definite angular momenta  $l_x$  and  $l_y$ . For a heavy core (b) the Jacobi Y system is close to (c) the single-particle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



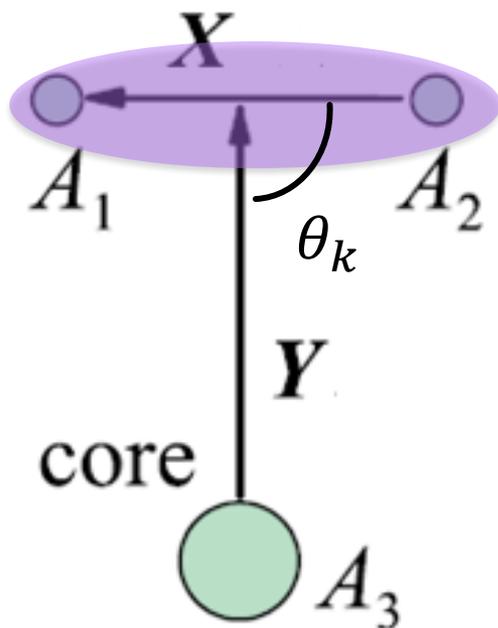
$E_T$  fija  $\rightarrow$  quedan 2  
parámetros que  
representan la  
correlación completa

$$\varepsilon = E_x / E_T,$$

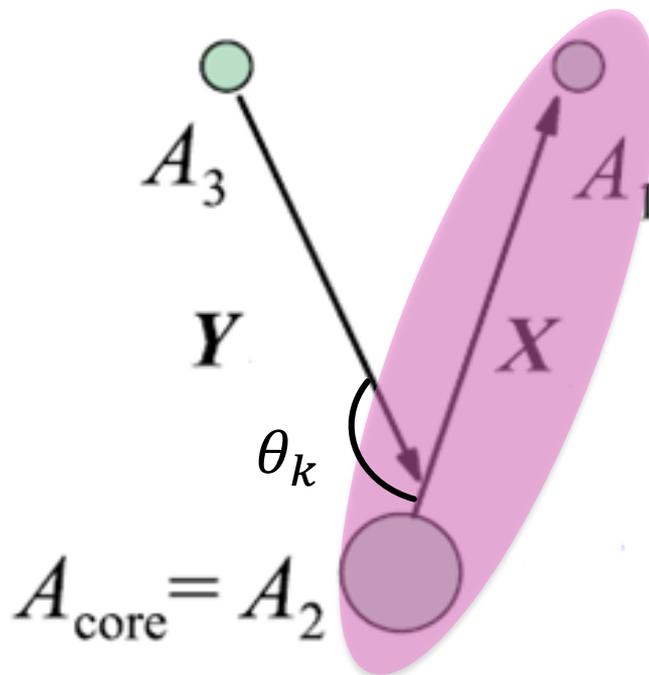
$$\cos(\theta_k) = (\mathbf{k}_x \cdot \mathbf{k}_y) / (k_x k_y),$$

# 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

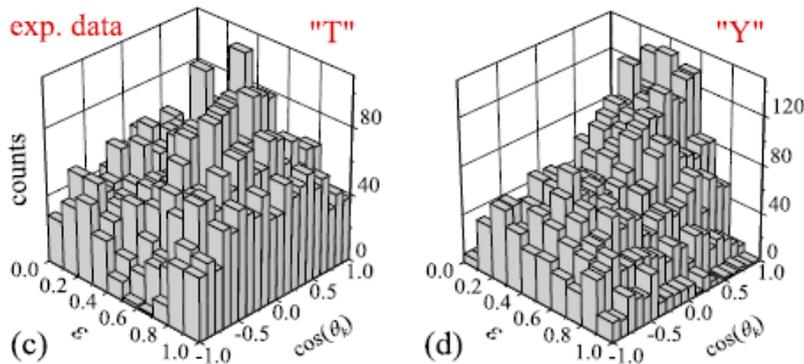
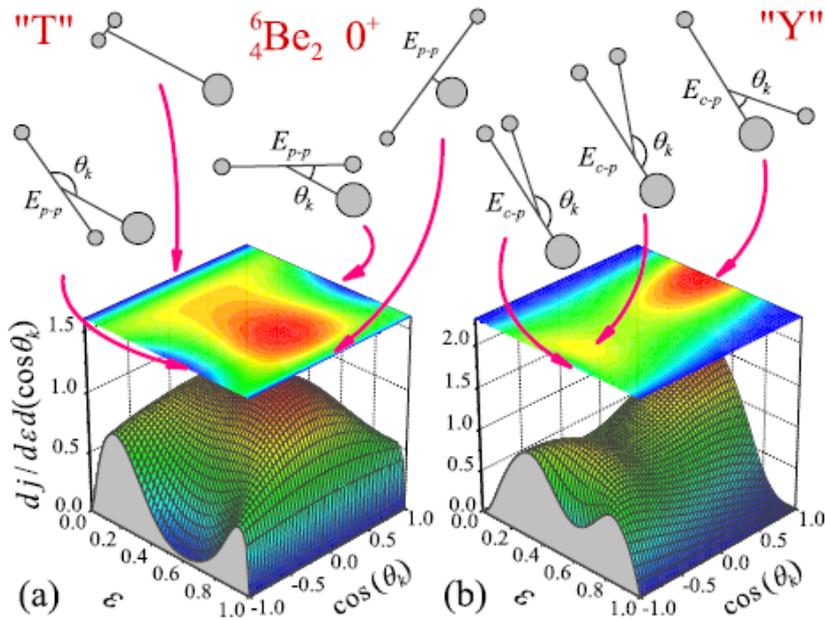


FIG. 27 (color online). Complete correlation picture for  ${}^6\text{Be}$  g.s. decay, presented in (a), (c) T and (b), (d) Y Jacobi systems. (a), (b) is theory, and (c), (d) is experimental data. Qualitative illustration of the meaning of different kinematical regions is provided above the panels. Data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

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

$^{54}\text{Zn}$  → GANIL

$^{48}\text{Ni}$  → (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

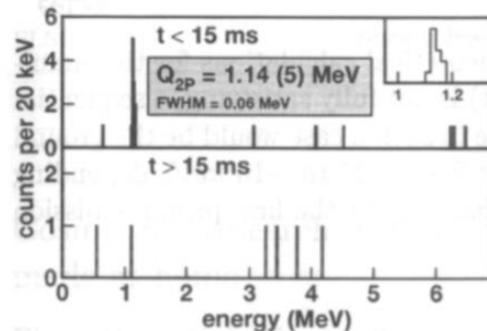


Figure 2. Energy distribution of decay events correlated to a  $^{45}\text{Fe}$  implantation. A peak clearly appears for short times after implantation (upper part). This peak is identified as the two-proton decay from the ground state. Longer time events (lower part) are compatible with a subsequent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

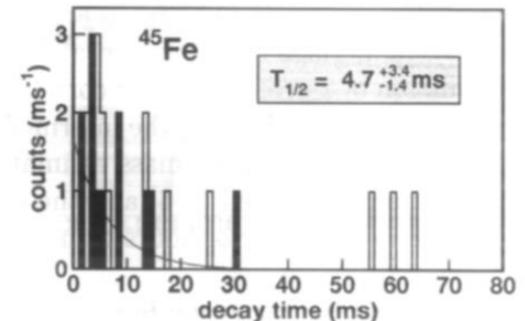
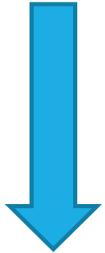


Figure 3. Time distribution of decay events after a  $^{45}\text{Fe}$  implantation. The dark spectrum corresponds to the time distribution of the events in the 1.14 MeV two-proton peak, for which a half-life of  $4.7^{+3.4}_{-1.4}$  ms is estimated. If all events are taken into account, this distribution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

## Detectores de silicona

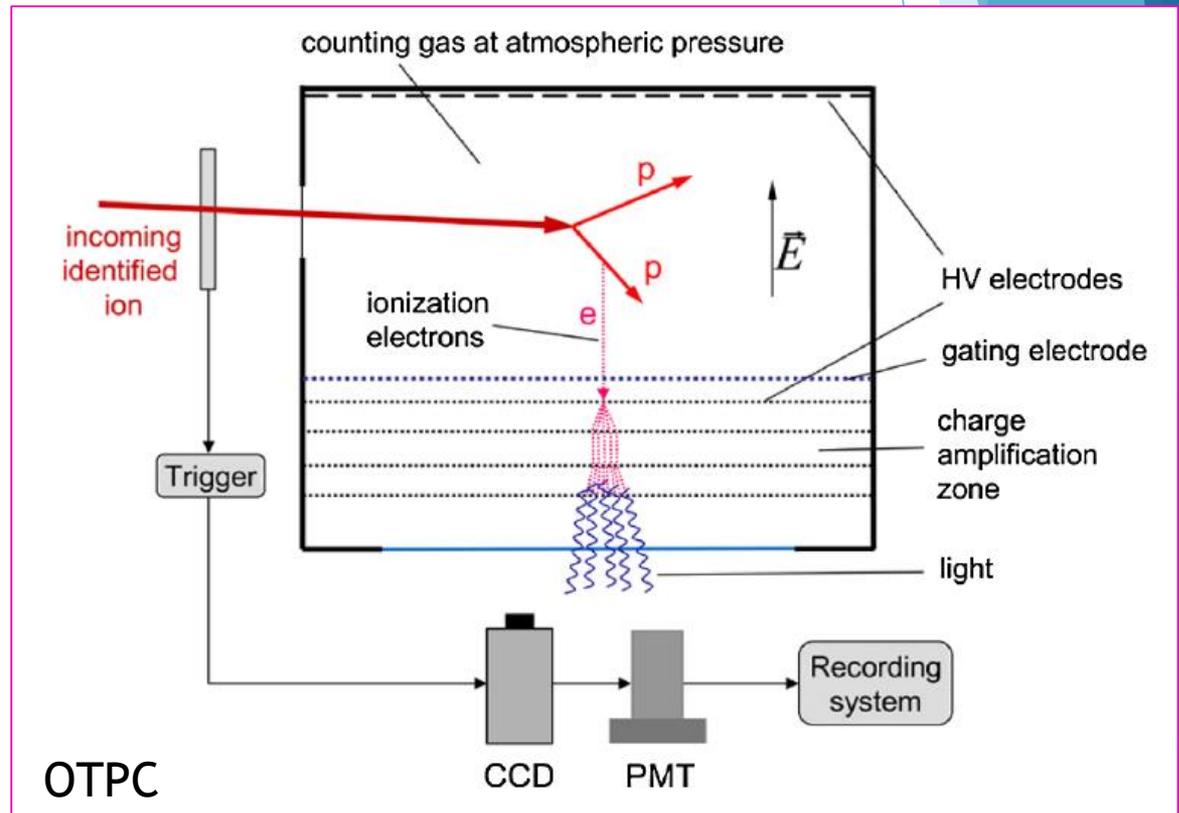
Solo pueden medir la energía depositada en el medio  
No se puede obtener en detalle las energía de los productos o las correlaciones de los momentos



## Nuevas tecnologías basadas en TPC=time projection chamber

### Detectores Gaseosos

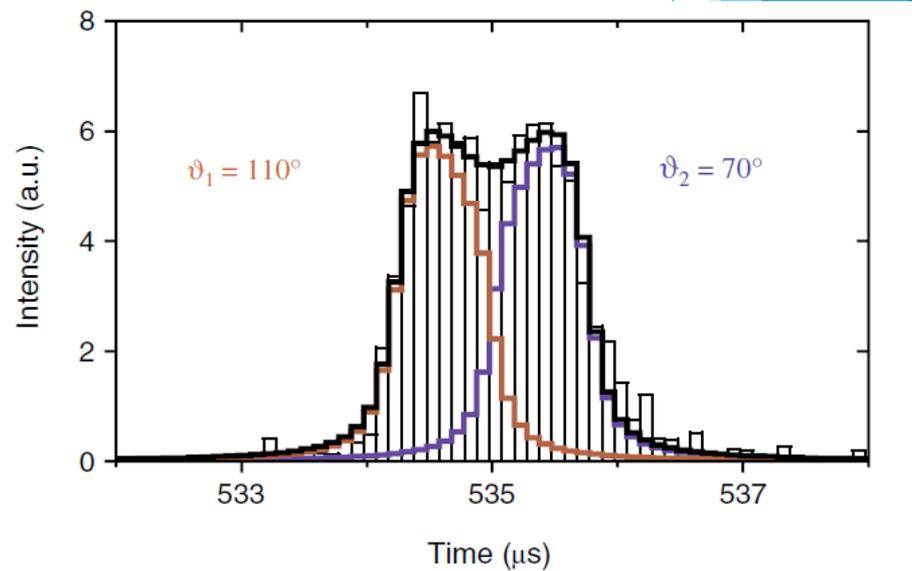
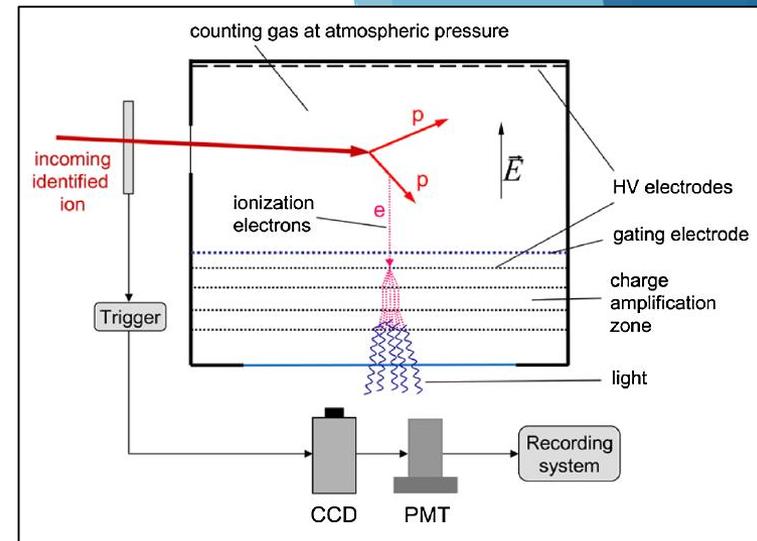
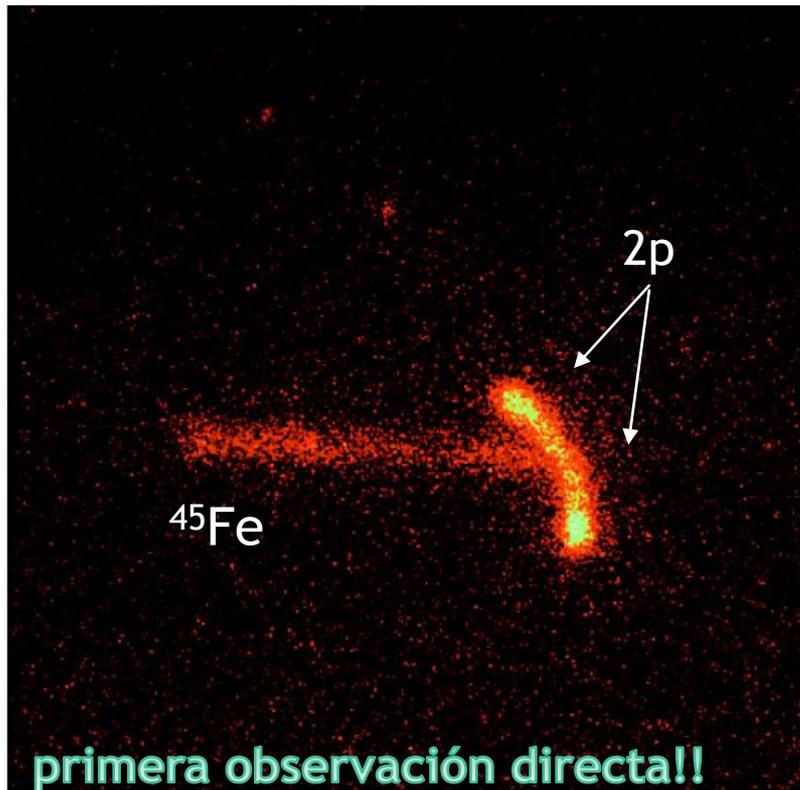
➤ A través de la ionización en el gas de la cámara se puede obtener la **traza de las partículas cargadas**



# OPTICAL TIME PROJECTION CHAMBER

- permite medir la correlación entre protones

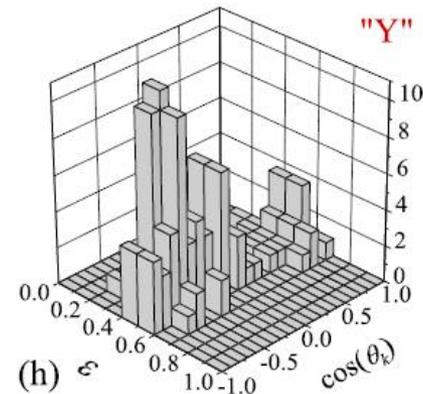
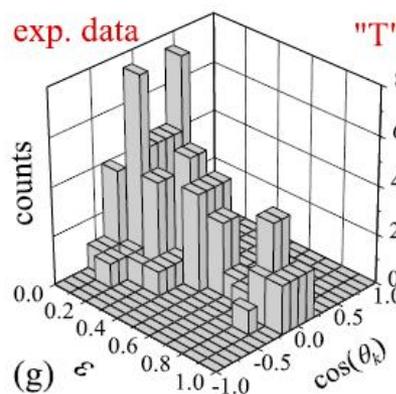
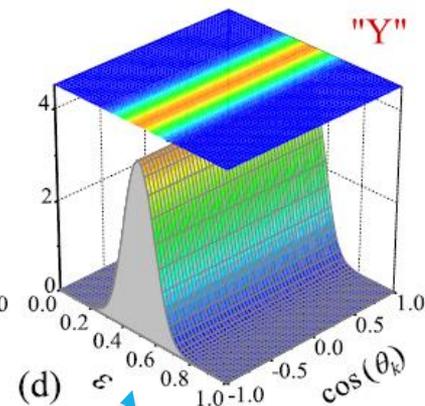
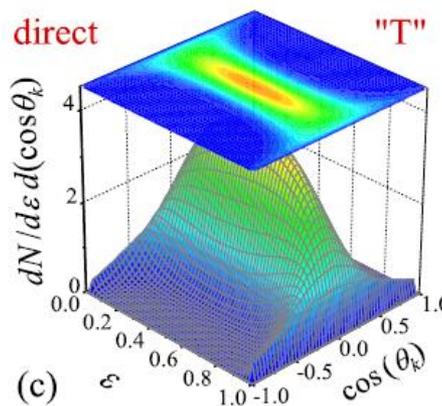
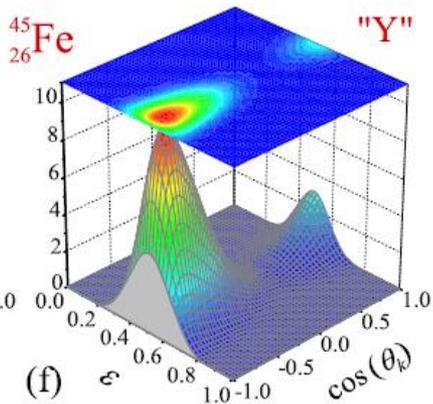
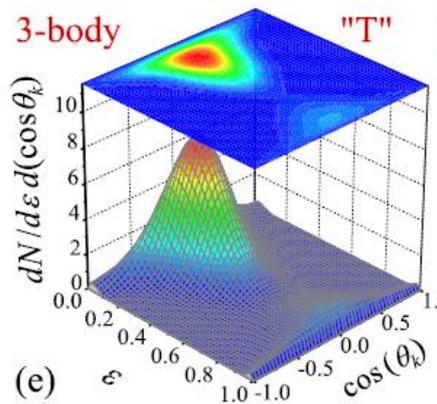
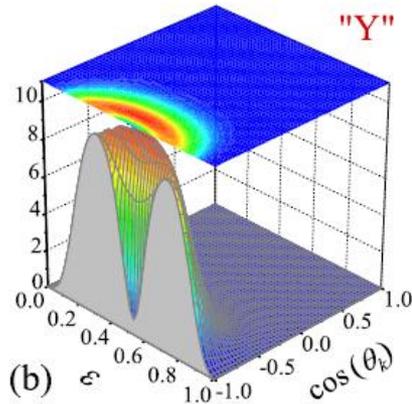
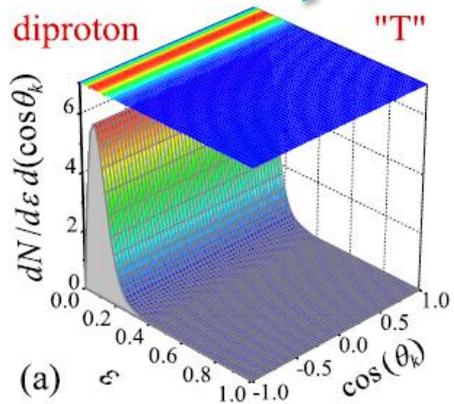
Imagen 2D de CCD en un tiempo de exposición de 25ms. Los brazos son protones de 0.6MeV emitidos a 535 $\mu$ s luego de la implantación



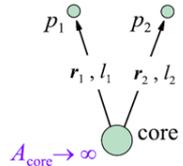
Intensidad total medida por PMT

# RESULTADOS EN $^{45}\text{Fe}$

-un solo pico angosto de energía  
-distribución angular isotrópica



(c) Shell model "V"



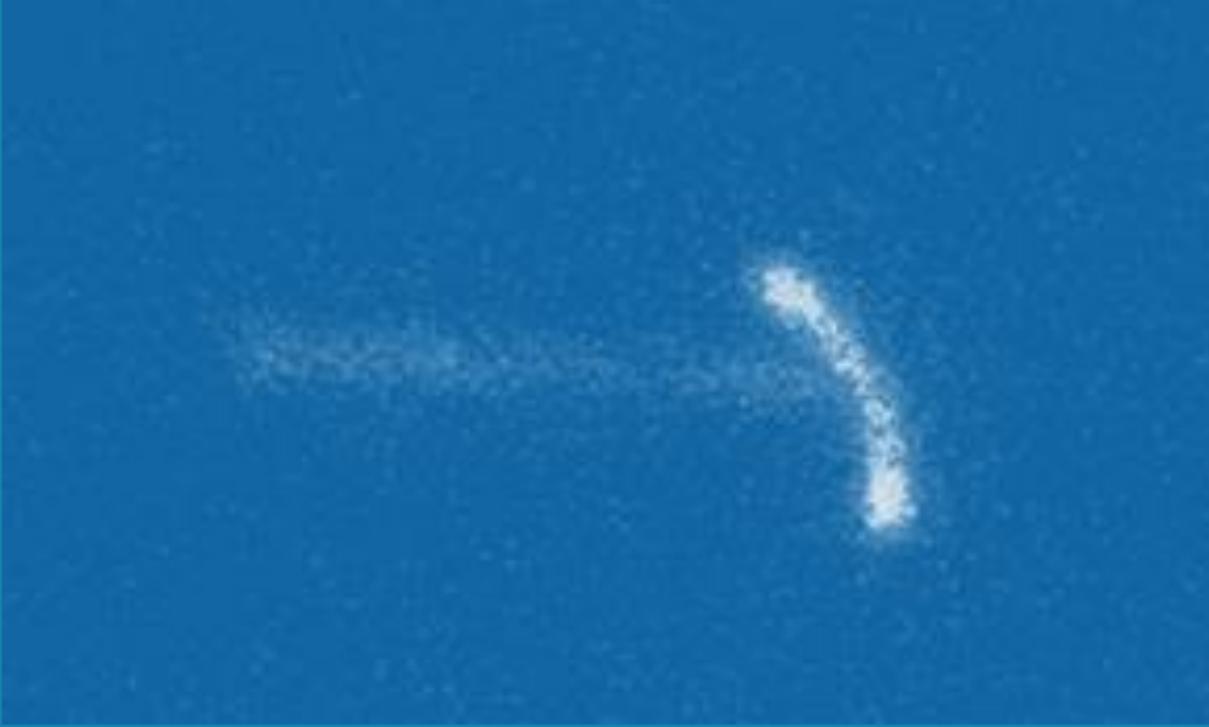
-pico bien definido en  $\epsilon=0,5$   
refleja la simetría entre los  $2p$

# 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 fenómeno 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  $\varepsilon$  y  $\cos\theta$  de los sistemas usados T y Y.



*Gracias por su  
atención!*