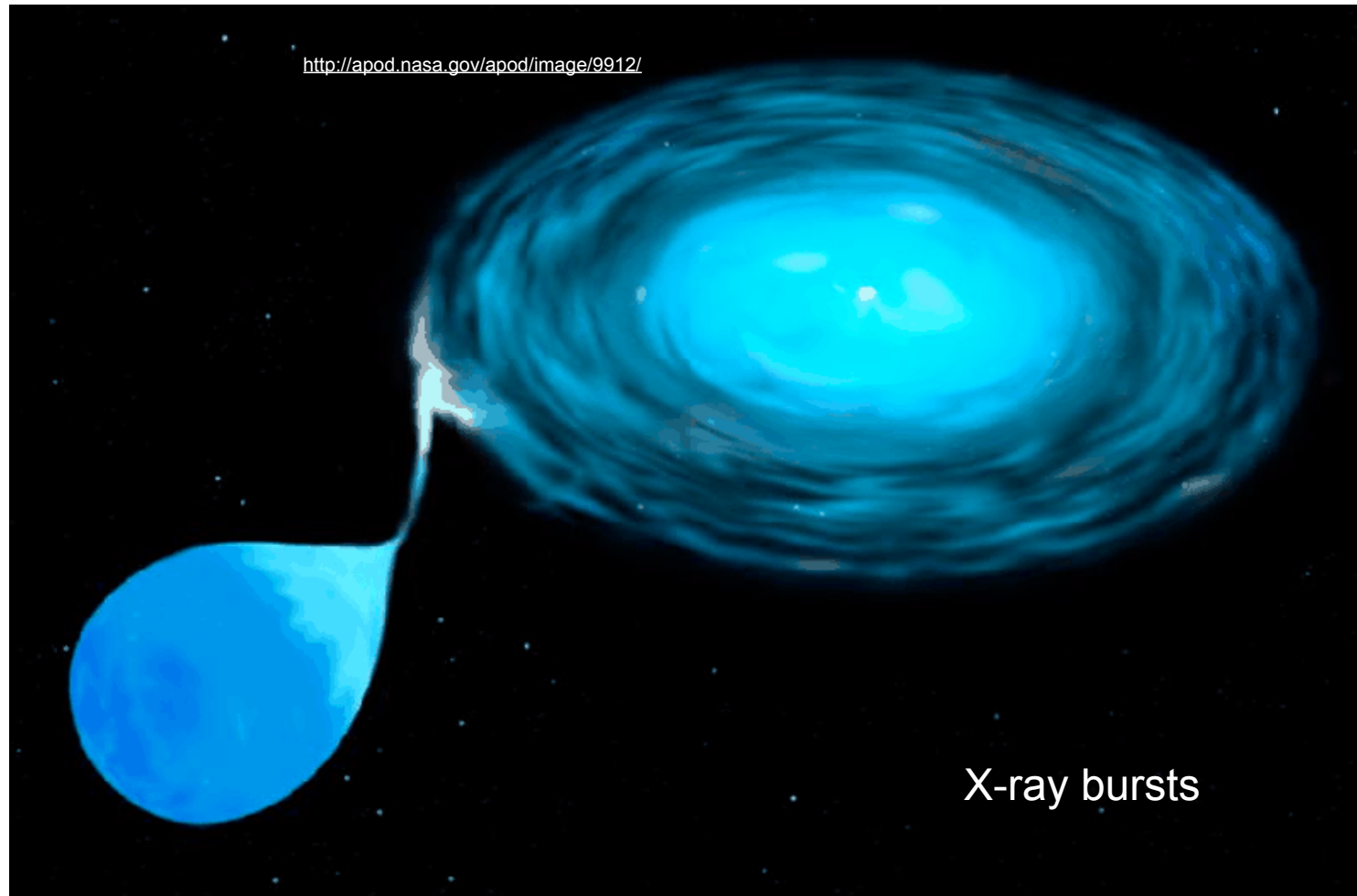


# **Viaje al interior de Núcleo Atómico**

**Alfredo Poves**  
**Departamento de Física Teórica**  
**e IFT, UAM-CSIC**



**I've seen things you people wouldn't believe.  
Attack ships on fire off the shoulder of Orion.  
I watched C-beams glitter in the dark near the Tannhauser gate.  
All those moments will be lost in time... like tears in rain... Time to die.**

**En los años que van de 1896 a 1932, se produce una enorme revolución en nuestro conocimiento de la naturaleza, con la formulación de la Mecánica Cuántica y de la Relatividad Especial (que entre otras cosas implica la equivalencia entre masa y energía).**

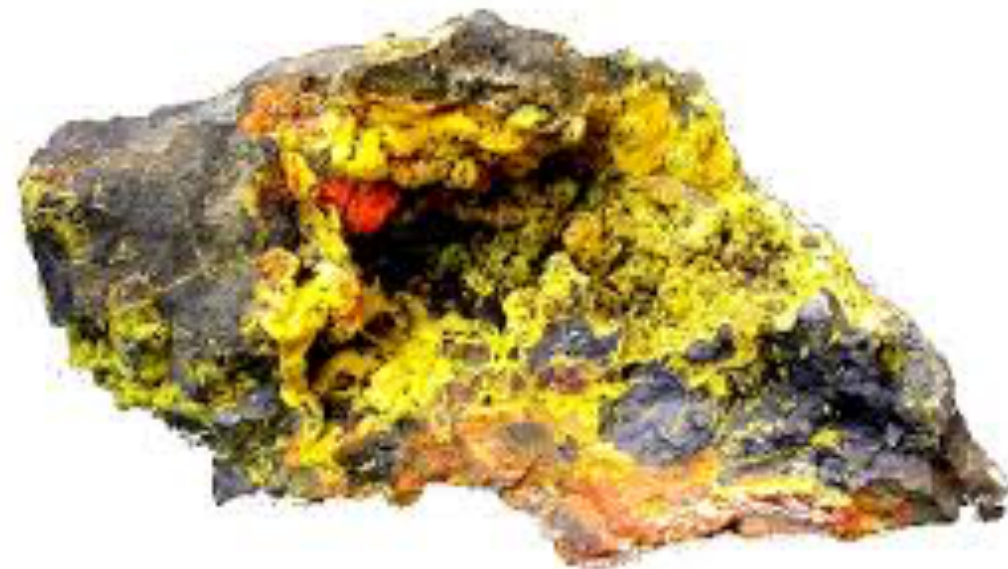
**Las investigaciones sobre la naturaleza del átomo y después de la de su núcleo juegan un papel protagonista durante esos años y, en particular conducen al descubrimiento de dos nuevas interacciones en la naturaleza; las interacciones nucleares fuerte y débil, que se añaden así a las ya conocidas interacciones electromagnética y gravitatoria.**

**Todo ello ya estaba oculto en el fenómeno mas sorprendente descubierto al final del siglo XIX, la radiactividad.**

**Becquerel, en sus investigaciones sobre fluorescencia, estudiaba los minerales de Uranio y Torio que se encuentran en la naturaleza (Uraninita, Pechblenda, Monacita).**

**Y descubrió que estos materiales emitían “algo” que ennegrecía las placas fotográficas sin necesidad de ser expuestas previamente a la radiación solar, esto es, espontáneamente.**





## ¿En qué consiste la radiactividad ?

En el cambio espontáneo de la naturaleza química de una sustancia, con emisión simultánea de radiaciones de muy alta energía

**Imaginen que un extraterrestre les regala un frasco con mercurio, que es un líquido gris, pero que en la droguería espacial le dan el isótopo  $A=197$  en vez del  $A=200$ . Pasados unos días en el frasco habría un sólido amarillo, oro, el sueño de los alquimistas, y su casa necesitaría una descontaminación a fondo.**

**Conceptualmente se trataba de un descubrimiento mayor, un efecto, la transmutación, carente de una causa (conocida).**

**Que produjo una fascinación social inaudita (y peligrosa).**



RACHEL N° 1

**THO-RADIA**

POUDRE

A BASE DE  
RADIUM & DE THORIUM

Selon la formule du  
D<sup>r</sup> ALFRED CURIE

PRÉPARÉE PAR  
A. MOUSSALLI, Docteur en Pharmacie

DEPOT GÉNÉRAL : SECOR  
147, AV<sup>e</sup> VICTOR-HUGO, PARIS

FORMULE

- Bromure Radium 0.01 microgr
  - Sulfate Thorium 0.10 grammes
  - Oxyde de Tilane 4 grammes
- Exc. Q.S.P. 100 gr

DR. RACHEL 1.  
MAURISQUEL



Extra-Fine,  
adhérente  
et mate

POUDRE  
**THO-RADIA**

BLANC . NATUREL . ROSE CLAIR . RACHEL 1 .  
RACHEL 2 . OCRE . OCRE ROSÉ . MAUBESQUE . TAHITI

The advertisement features a woman's face with a soft, matte complexion against a dark blue background. To the right of her face, the text 'Extra-Fine, adhérente et mate' is written in a light, elegant font. Below the woman's face, two cylindrical tins of Tho-Radia powder are shown, one slightly behind the other. The word 'POUDRE' is printed in white, and 'THO-RADIA' is in large, bold, orange letters. At the bottom, a list of color shades is provided in white text.

# AGUA RADIUM

A mais Radio activa de Portugal

Uma das mais radioactivas do mundo

*Estas aguas actuam quer junto das fontes, quer longe d'ellas. (Pala-  
vras do Prof. Dr. Amendo Narciso).*

De effeito seguro na arterio-esclerose, dissolvendo a cal das arterias  
assim como nos edemas nas doencas de coração e rim.

Reguladora da pressao arterial, evitando o perigo das apoplexias.

Aconchada com effeito no arthritismo e em outros defectos da nutricao.

Nas diabetes, elimina o azucar das urinas.

Revigoradora do sistema glandular, desenvolvendo o seu funciona-  
mento, tonificando poderosamente o organismo debilitado.

Um remedio effica contra reumatismo e gota.

A grande superioridade da **AGUA RADIUM**, é consistir,  
além de sua emanação de Rádio, *Sais de Rádio em dissolução ventogem  
que nenhuma outra possui.* (Relatório da Prof. Karl von Noorden).

*Devido aos Sais de Rádio em dissolução que contém, conserva per-  
fectamente Iodo e arsénio.* (XIV.º Congresso Internacional de Hidro-  
logia, Climatologia e Geologia Médica—Toulouse (França) 1913).

**AS TERMAS RADIUM em CARIA — Beira Baixa,**  
ESTÃO ABERTAS DE 1 DE JULHO A 15 DE OUTUBRO

Depositário: **Farmácia Grave — Castelo Branco**

**Investigaciones subsiguientes concluyeron que esas “emanaciones” eran de tres tipos:**

**Rayos Alfa (con carga positiva y poco penetrantes)**

**Rayos Beta (cargados y muy penetrantes)**

**Rayos Gamma (neutros y muy penetrantes)**

**Sus energías eran de algunos Mega ( $10^6$ ) eV (MeV) (las líneas espectrales del átomo de hidrógeno correspondían a energías del orden de los eV).**

**Si la mecánica cuántica hubiera sido conocida en ese momento se hubiera podido concluir que grandes energías implican ínfimas distancias. Pero ese no era el caso.**

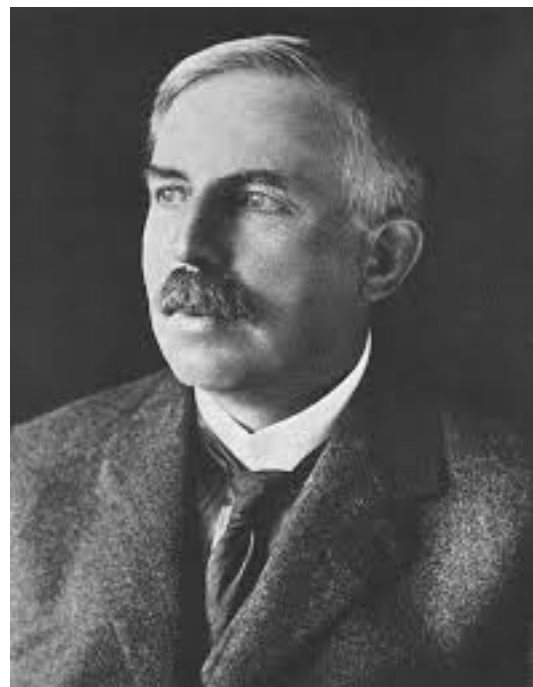
**Inmediatamente se descubrió que en el proceso se producían nuevos elementos químicos, el más famoso, el Radio (que viene del latín radium, rayo, y del que procede el nombre radiactividad), pero también el Polonio, el Radón y varios otros con vidas medias (\*) muy cortas comparadas con las de sus progenitores el Uranio y el Torio.**

**(\*) La ley de la desintegración radiactiva nos dice que si en  $t=0$  tenemos  $N(0)$  átomos, en el tiempo  $t$  tendremos:**

$$N(t) = N(0)e^{-\frac{t}{\tau}}$$

**tau es la vida media**





**Pronto se concluyó que los rayos alfa se parecían al ión  $\text{He}^{++}$ , los beta al electrón y que los gamma eran radiación electromagnética, más energética aún que los rayos X, descubiertos hacía poco por Roentgen, (el primer premio Nobel de física).**

**Pero, de dónde procedían esos rayos? y cómo era posible que fueran tan energéticos?**

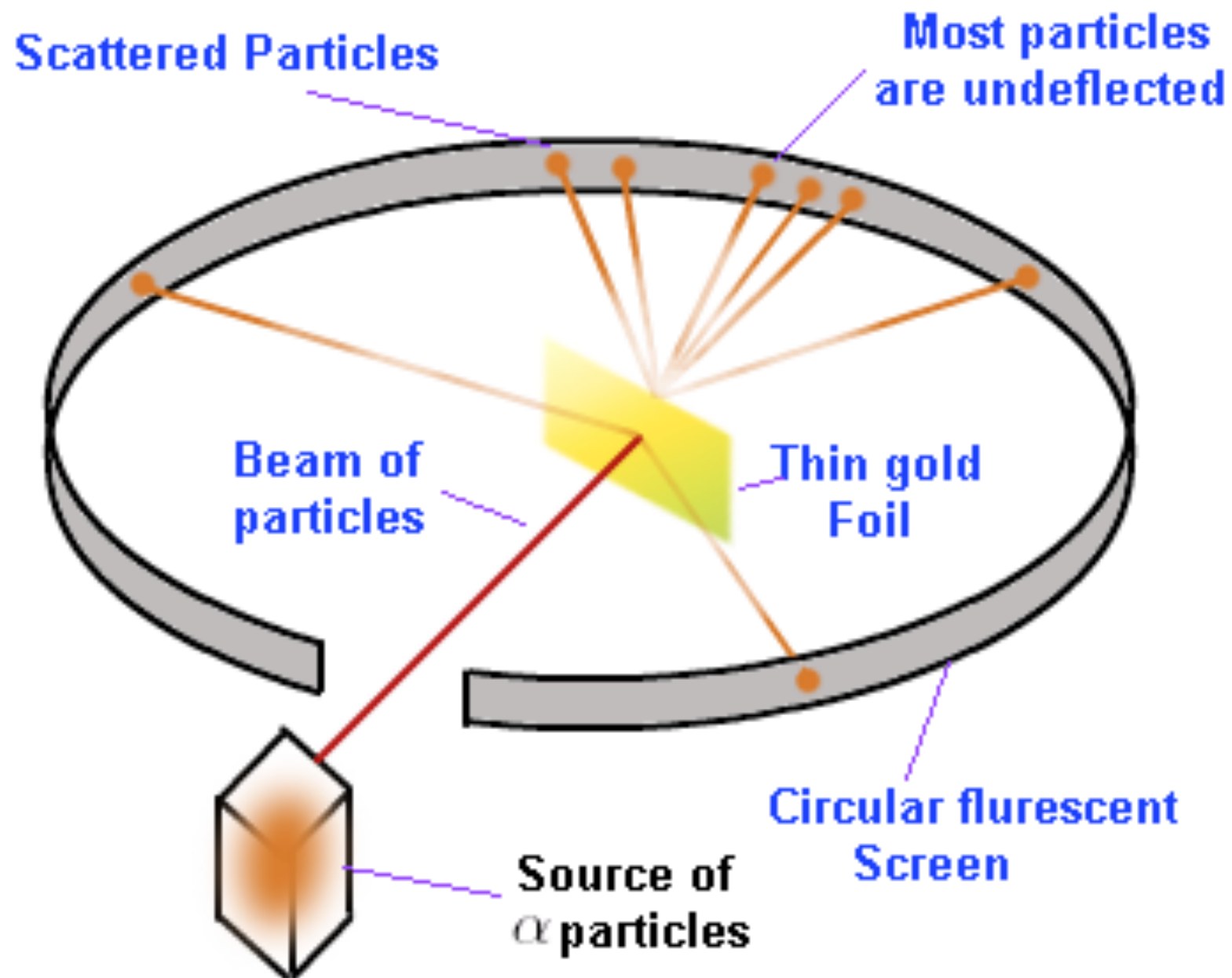
**Conviene recordar que las únicas partículas “elementales” conocidas en ese momento eran el electrón y el ión  $\text{H}^+$  (el protón).**



**Poco después, Rutherford se dio cuenta de que con los rayos alfa se podían bombardear otras sustancias y de que examinando como se dispersaban se podría deducir el tamaño de la fuente dispersora y las características de la interacción responsable de la misma; es decir utilizar el material radiactivo como un acelerador natural de partículas.**

**Y con ese instrumento empezó a poner las bases de la física moderna.**

# El experimento de Rutherford, Marsden y Geiger



**Rutherford utilizó los rayos  $\alpha$  para explorar la estructura del átomo y descubrió la existencia en él de un núcleo extremadamente pequeño  $O(10 \text{ fm})$  en el que está concentrada toda la carga positiva y casi toda su masa (1911). Pero lo supuso compuesto de las únicas partículas que tenía a mano, electrones y núcleos de Hidrógeno (protones).**

**Resolver ese problema hizo que aparecieran otros:**

- El átomo es neutro y tiene  $Z$  electrones, pero la masa del núcleo es  $A$  veces la masa del proton con  $A > 2Z$**
- La interacción electromagnética entre los protones es repulsiva, entonces, porqué se mantienen unidos?**
- Se propusieron modelos con  $A$  protones y  $A-Z$  electrones que eran artificiosos y nada satisfactorios.**
- La solución tardó diez años en ser hallada.**

**Chadwick (inspirado por los resultados de Frederic Joliot e Irene Curie sobre la reacción  $\alpha + \text{Be-9} \rightarrow \text{C-12} + \text{X}$ ) descubrió el neutrón, que tiene una masa similar (1 GeV) a la del protón y carga cero. La última pieza del puzzle. A partir de ese momento (1932) las cosas se mueven muy deprisa.**

**El modelo estándar: Un núcleo de masa  $A$  y carga  $Z$  está compuesto de  $Z$  protones y  $N=A-Z$  neutrones ligados por la interacción nuclear fuerte. Ahora sabemos que ésta procede de las interacciones fundamentales entre quarks mediadas por los gluones.**

**Su tamaño varía entre 1 fm y 7 fm ( $10^{-15}$  m), y su energía de ligadura es típicamente de 8 MeV por nucleón.**

**La energía de ligadura ( $B$ ) no es más que la diferencia entre la suma de las masas de los neutrones y los protones y la masa del núcleo:**

$$M(N,Z) = Z m(\text{protón}) + N m(\text{neutrón}) - B$$

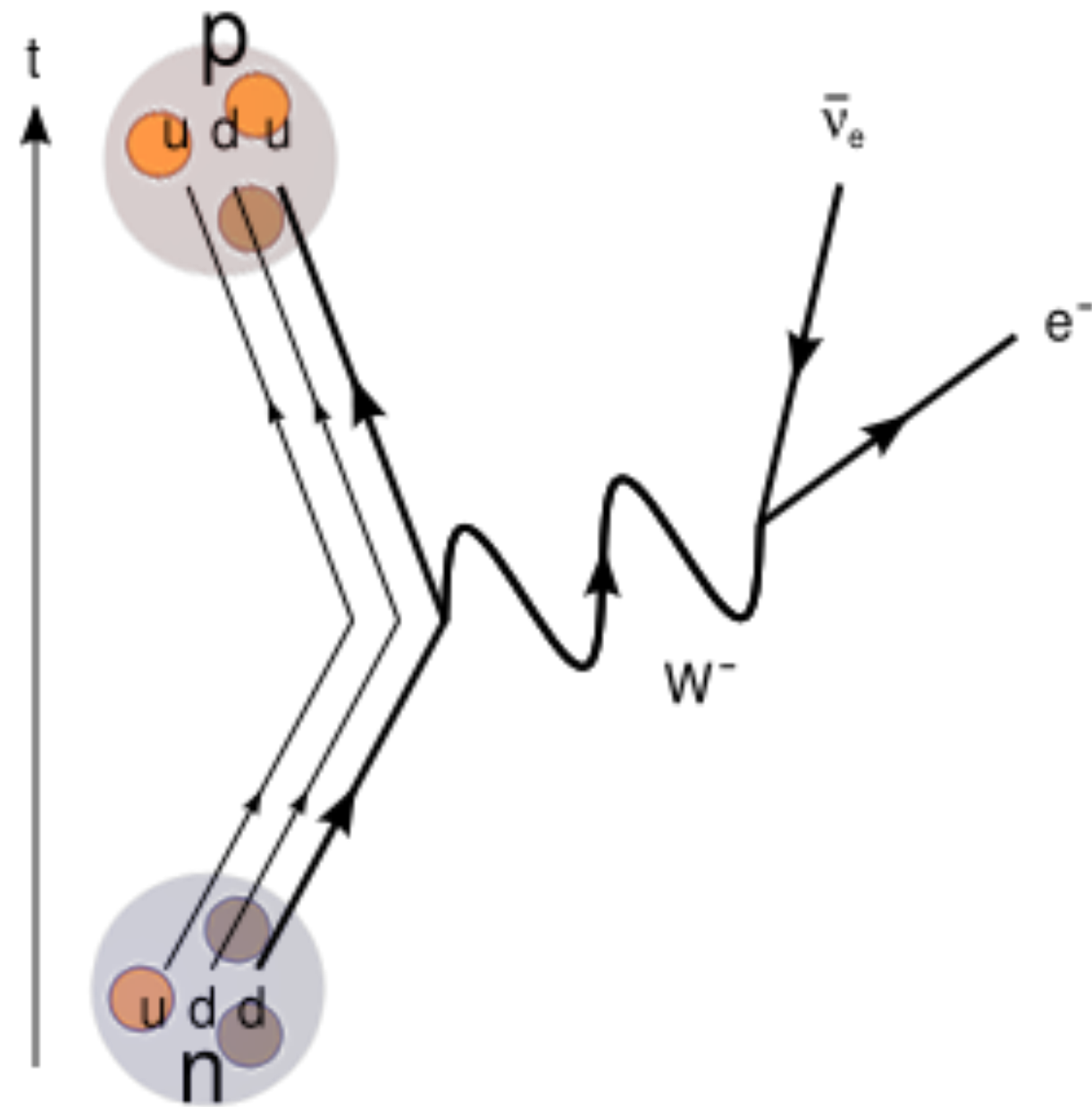
**El protón, el núcleo del átomo de Hidrógeno, es estable, y ligeramente menos pesado que el neutrón. No es una partícula elemental; está compuesto de tres quarks dos del tipo up y uno del tipo down (los físicos, a veces, son sobrios en el nombrar). Su masa en las unidades habituales en física nuclear, se expresa como su equivalente en energía ( $mc^2$ ) y es  $10^9$  eV, o  $1 \sim \text{GeV}$ .**

**El neutrón, compuesto por un quark up y dos quarks down no es estable. Tiene una vida media de aproximadamente 10 minutos y se desintegra mediante la interacción débil, que transforma un quark down en uno up, un electrón y un antineutrino. O lo que es lo mismo, el neutrón se desintegra en un protón, un electrón y un antineutrino.**

**Los neutrinos fueron inicialmente unos invitados incómodos en la fiesta de las partículas elementales, unos hijos exóticos de la interacción débil, que, sin embargo, han abierto nuevos caminos en nuestra comprensión de las leyes fundamentales de la naturaleza.**



# El protón y el neutrón





**Lisa Meitner**



**Maria Goeppert-Mayer**



**Irene Joliot-Curie**

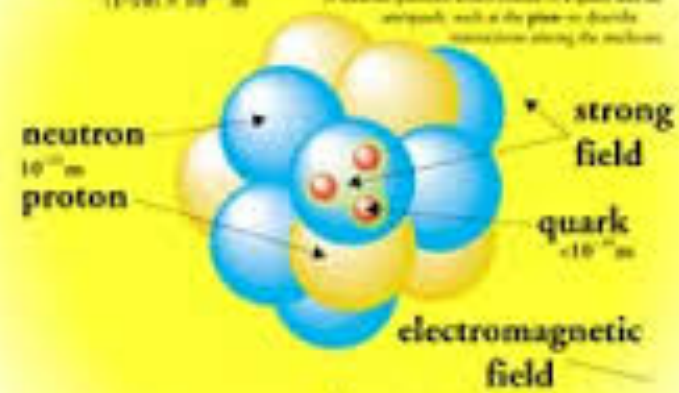


**Chien-Shiung Wu**

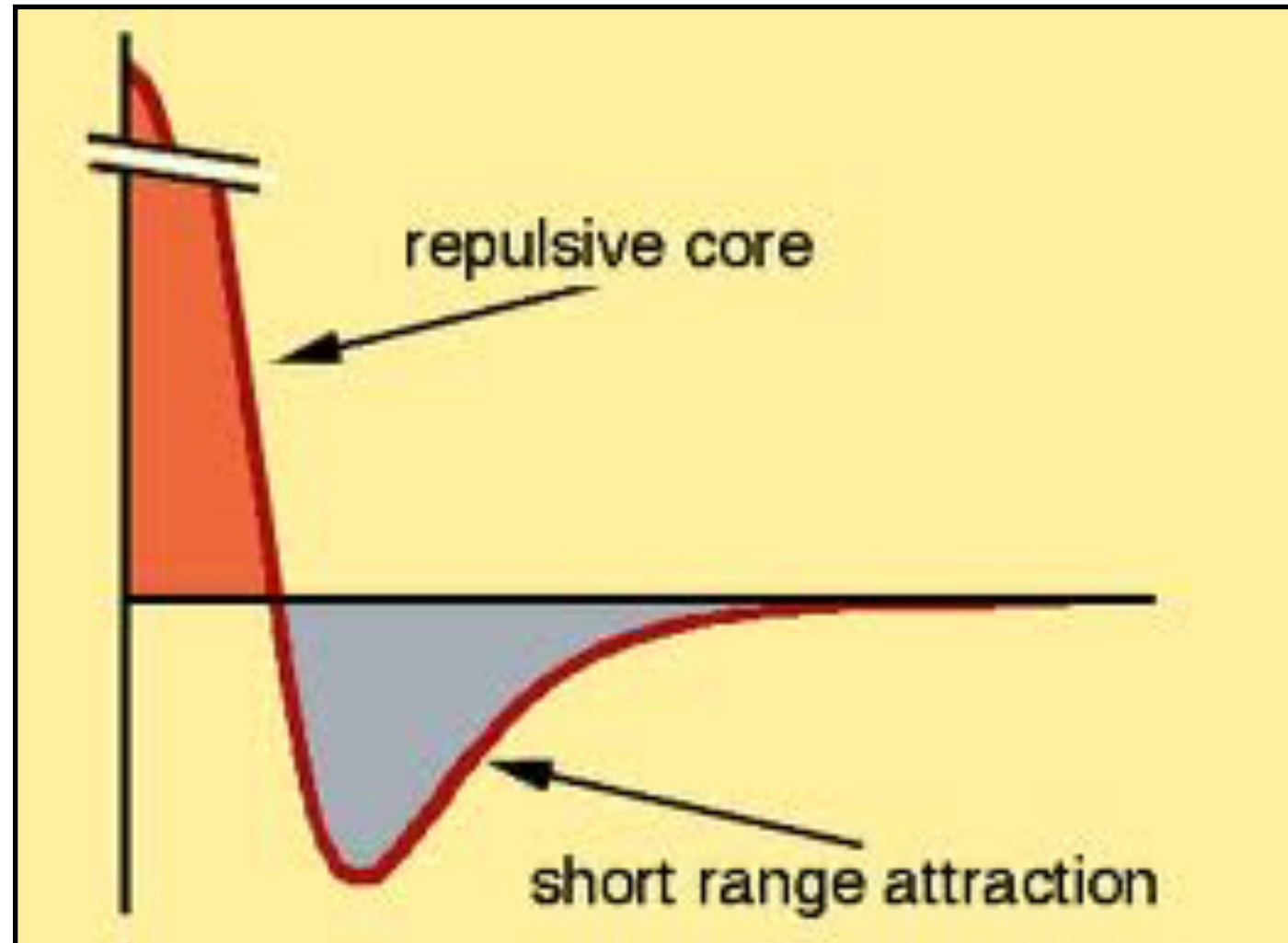
# The Nucleus

$(1-20) \times 10^{-17}$  m

*At the center of the atom is a nucleus formed from nucleons: protons and neutrons. Each nucleon is made from three quarks held together by their strong interaction, which is mediated by gluons. In turn, the nucleus is held together by the strong interaction between the gluon and quark constituents of neighboring nucleons. Nuclear physicists often use the exchange of meson particles which consist of a quark and an antiquark, such as the pion or deuteron interaction among the nucleons.*



*In an atom, electrons orbit the nucleus at distances typically up to 10,000 times the nuclear diameter. If the electron cloud were dense or static, this cloud would cause a small atom.*



**El alcance de la interacción nuclear fuerte es de 1.5 fm**

## **A vueltas con $E=mc^2$**

**Porqué los neutrones y protones que forman un núcleo se mantienen juntos (es decir en una región finita del espacio) en vez de alejarse los unos de los otros?**

**Porque la interacción fuerte, atractiva, sobre todo entre neutrones y protones, compensa sobradamente la repulsión Coulombiana de los protones y las energías cinéticas de los protones y los neutrones, haciendo que la masa del núcleo sea menor que la suma de las masas de los neutrones y protones que lo componen.**

**De hecho, la interacción fuerte entre los neutrones no lo hace, no existen núcleos formados sólo por neutrones**

# De la estabilidad de la materia

**Porqué es una partícula o un núcleo estable? porque no puede desintegrarse. Pero, quién se lo prohíbe? Las leyes de conservación.**

**En primer lugar la de la energía; para que algo se pueda desintegrar tiene que poder pasar a otro "estado" diferente, que tenga su misma energía. Por ejemplo, el núcleo de K-40 es inestable porque el de Ca-40 pesa menos que él, luego (mediante la interacción débil) puede transformar un neutrón en un protón, emitiendo un electrón y un antineutrino. El K-40 hace que nosotros, los vertebrados, seamos radiactivos (también los animales que tengan exoesqueletos calcáreos obviamente).**

# De la estabilidad de la materia

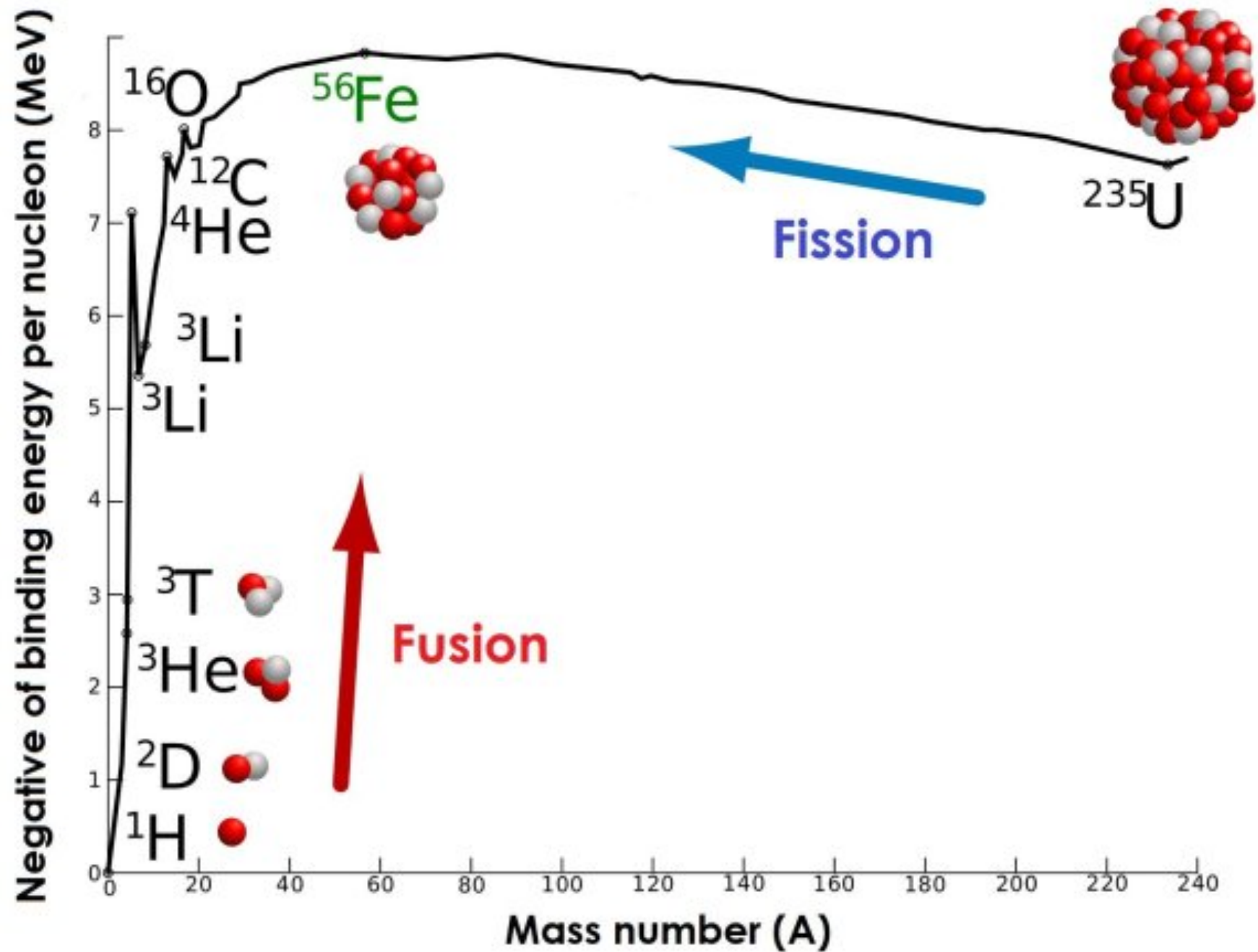
**Los núcleos inestables (radiactivos), que son la mayoría, se desintegran beta cuando al cambiar un neutrón en un protón o viceversa el núcleo resultante tiene menor masa.**

$$M(N,Z) > M(N-1,Z+1) + m(\text{electrón}) + m(\text{antineutrino})$$

**Y se desintegran alfa cuando su masa es mayor que la suma de las masas del núcleo con N-2 neutrones y Z-2 protones y de la partícula alfa.**

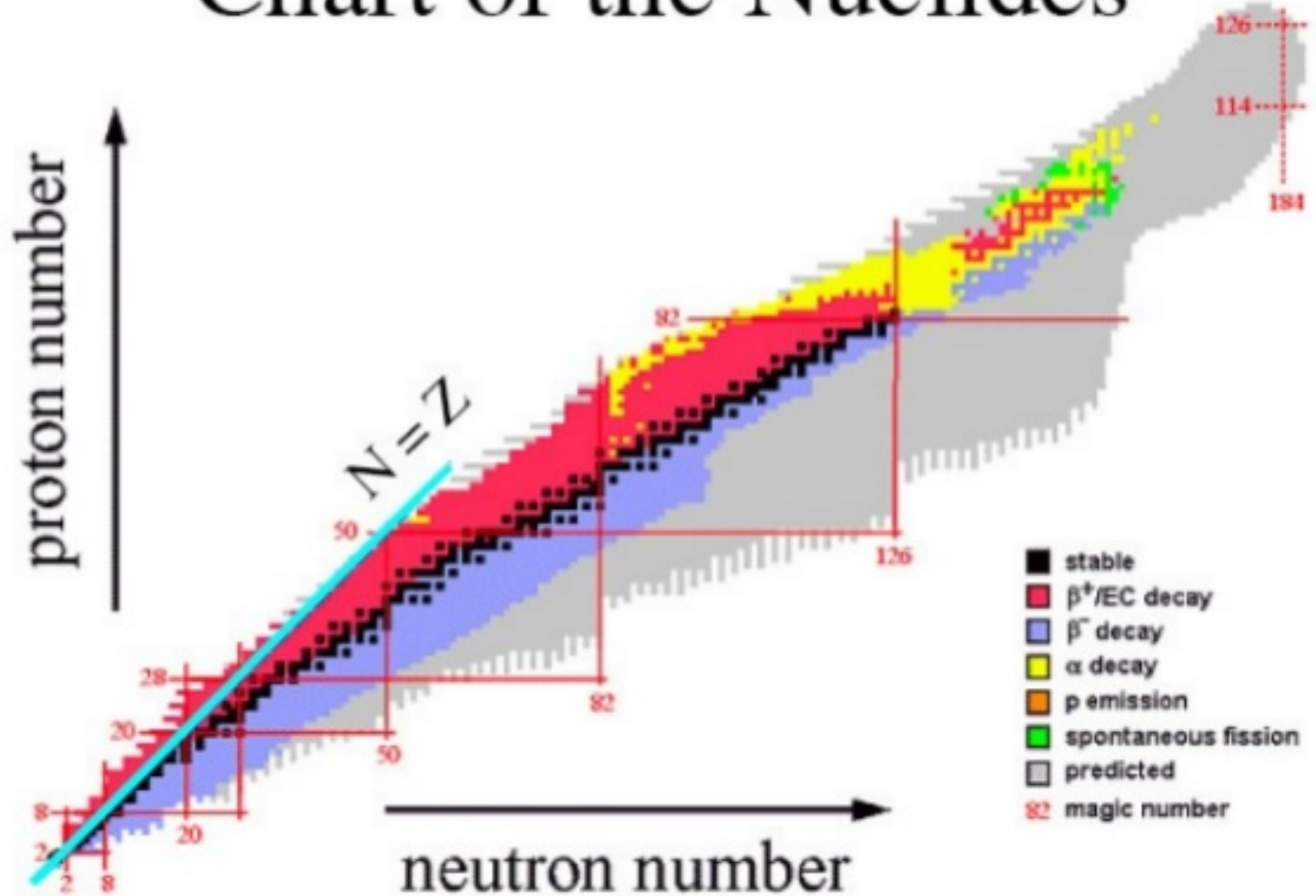
$$M(N,Z) > M(N-2,Z-2) + M(\text{alfa})$$

# Energía de ligadura / A como función de A



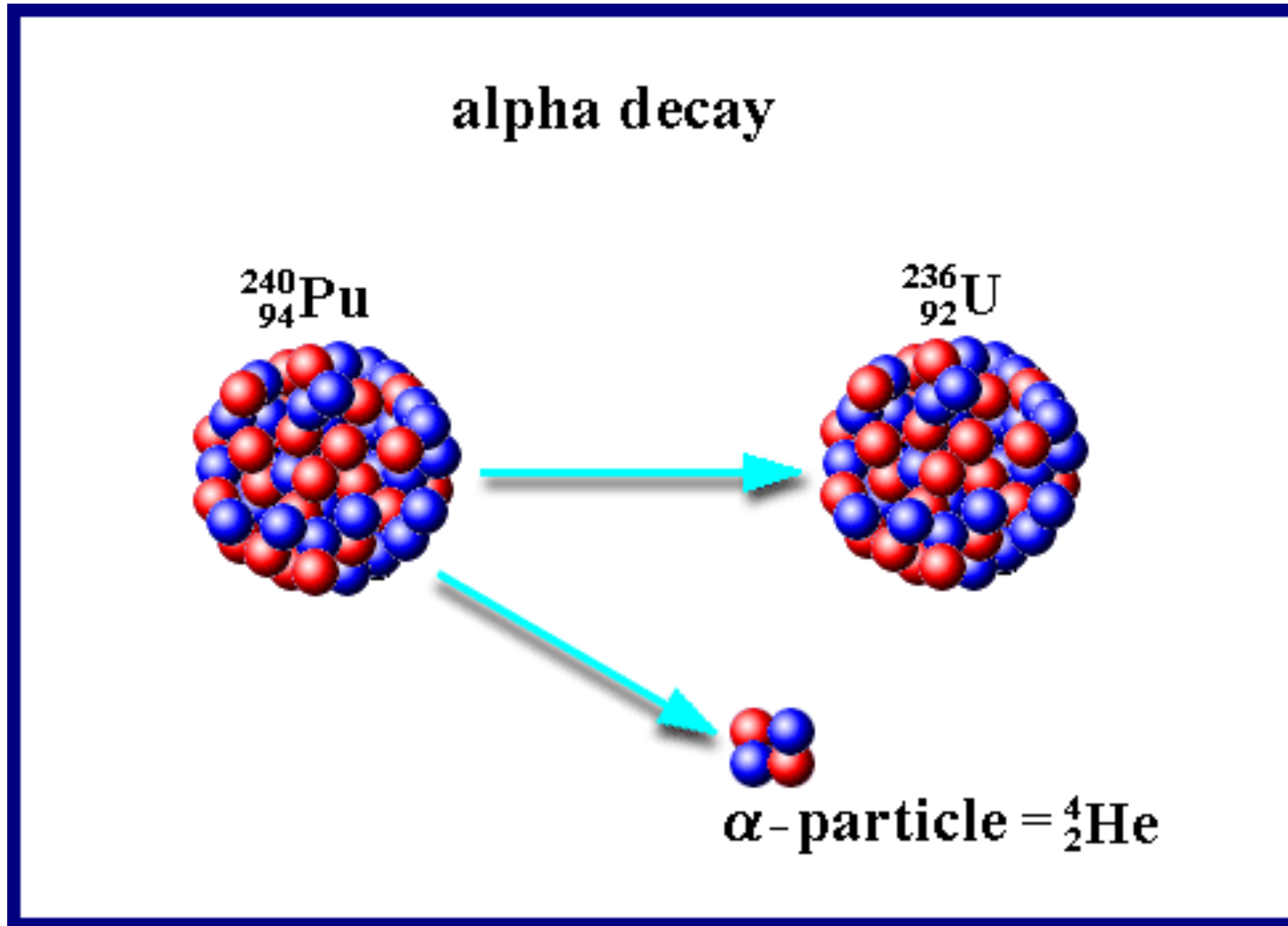


# Chart of the Nuclides

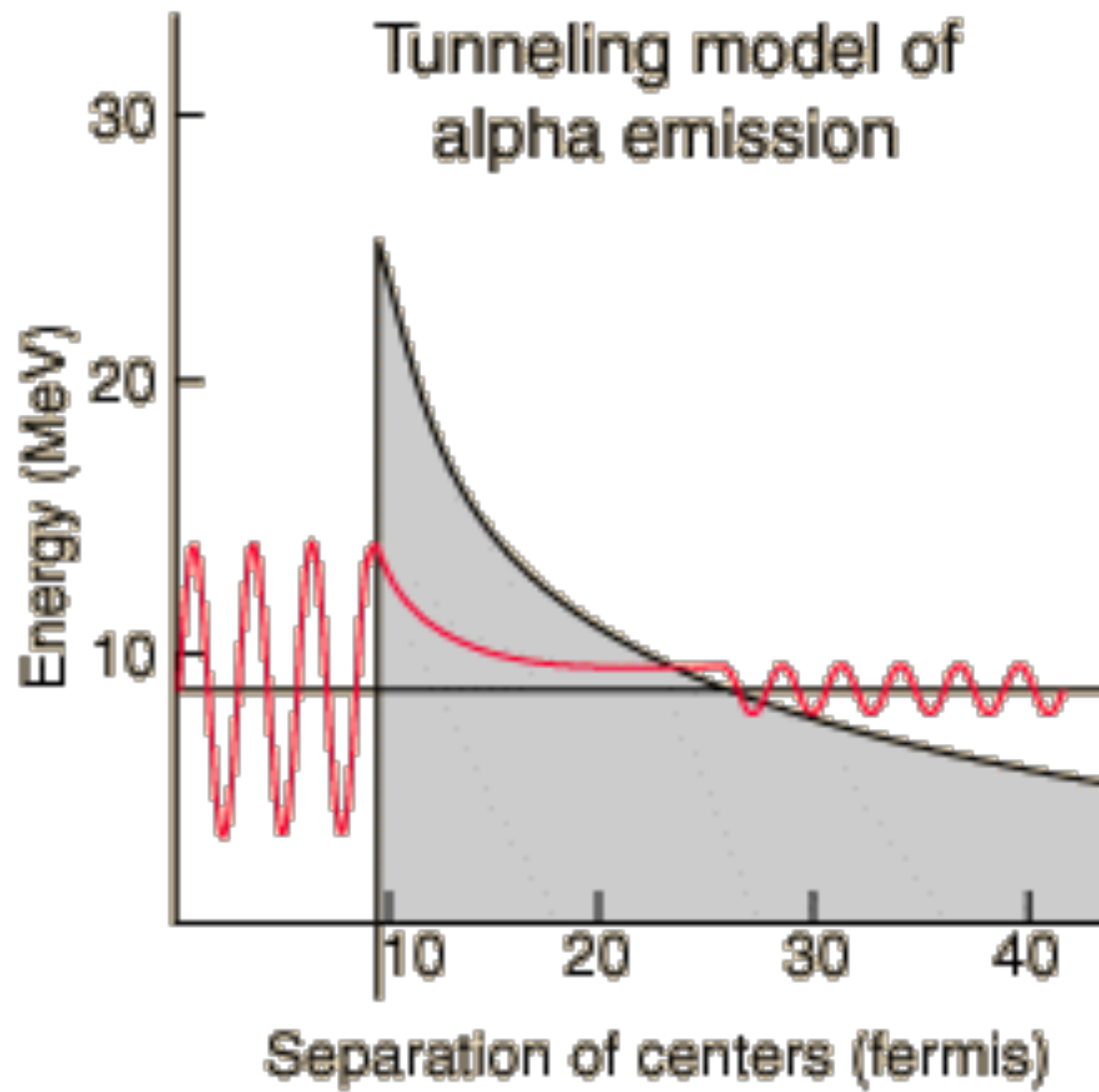


Symmetric: Equal numbers of protons and neutrons  
Asymmetric: Unequal numbers of protons and neutrons

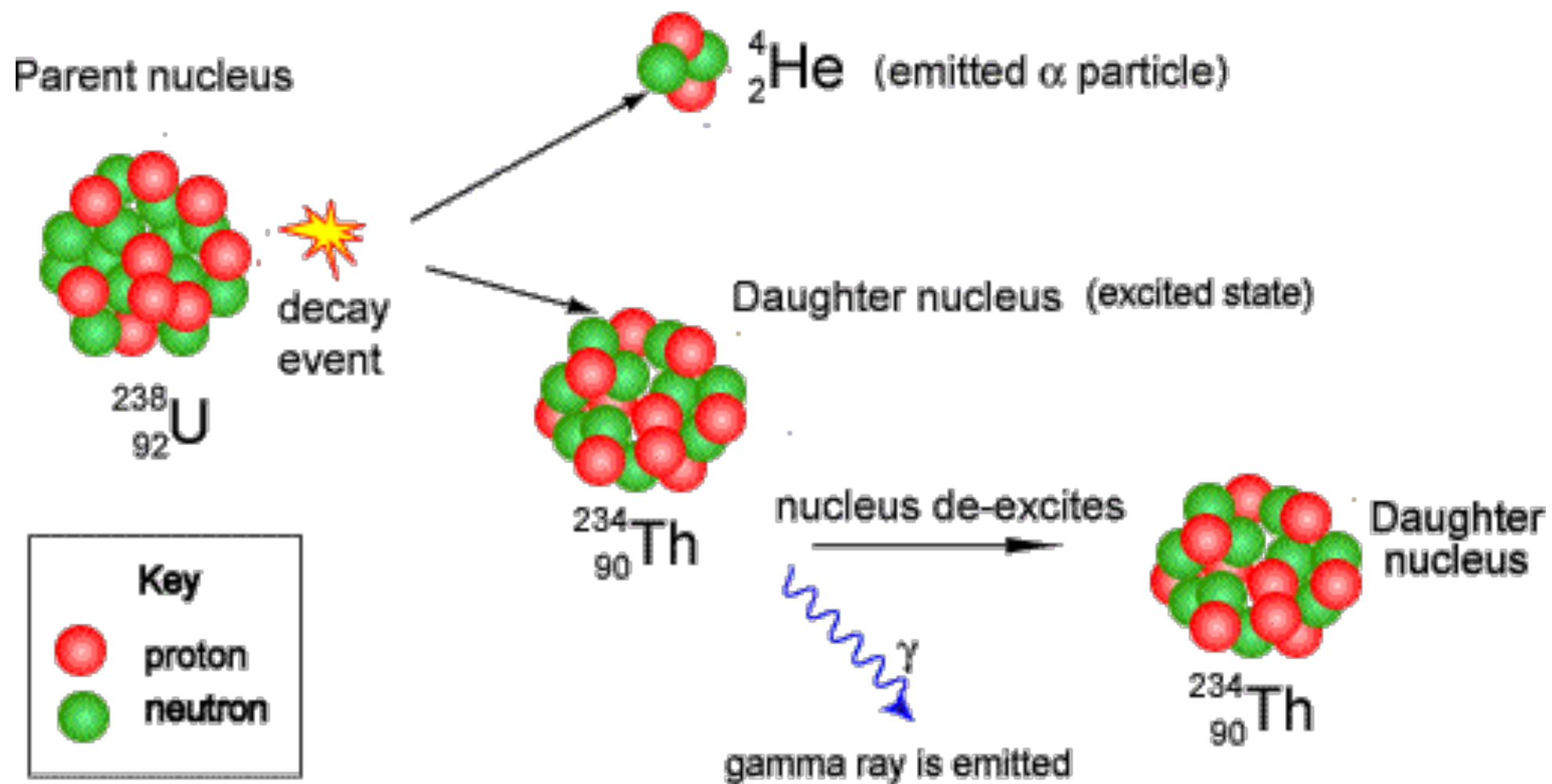
# La radiactividad ilustrada



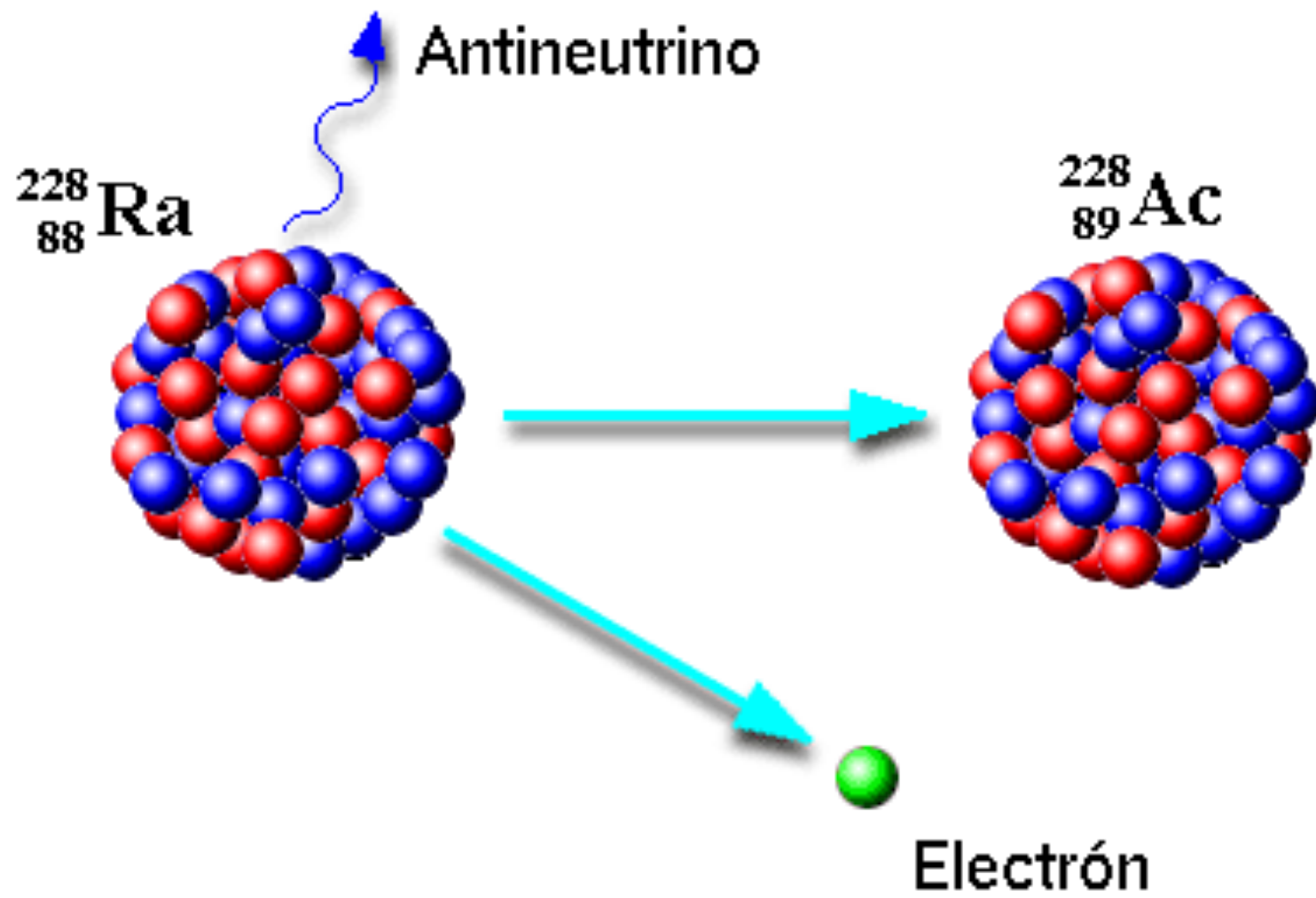
Mediada por la interacciones electromagnética y fuerte,  
procede por efecto túnel

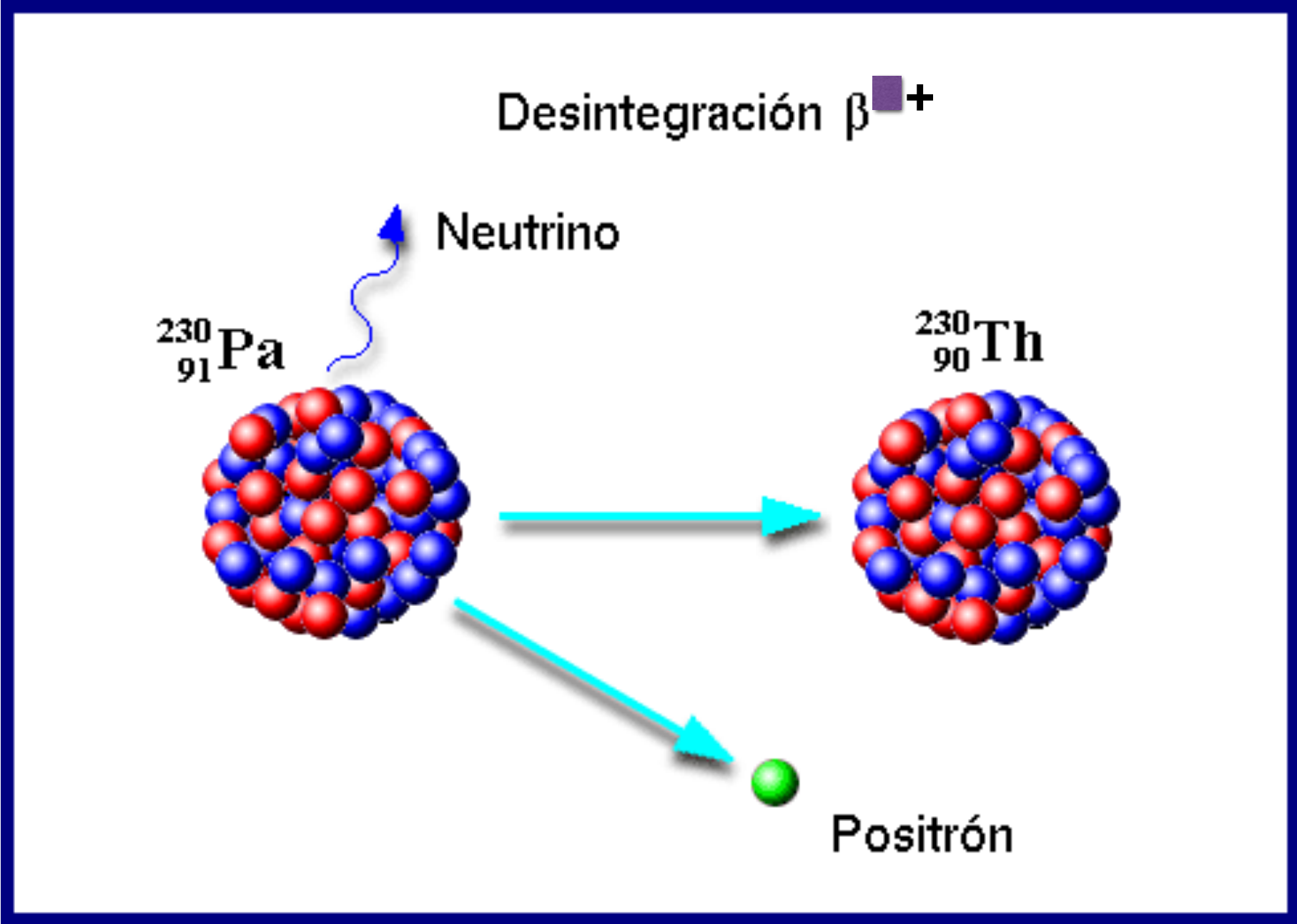


## Alpha Decay of a Uranium-238 nucleus



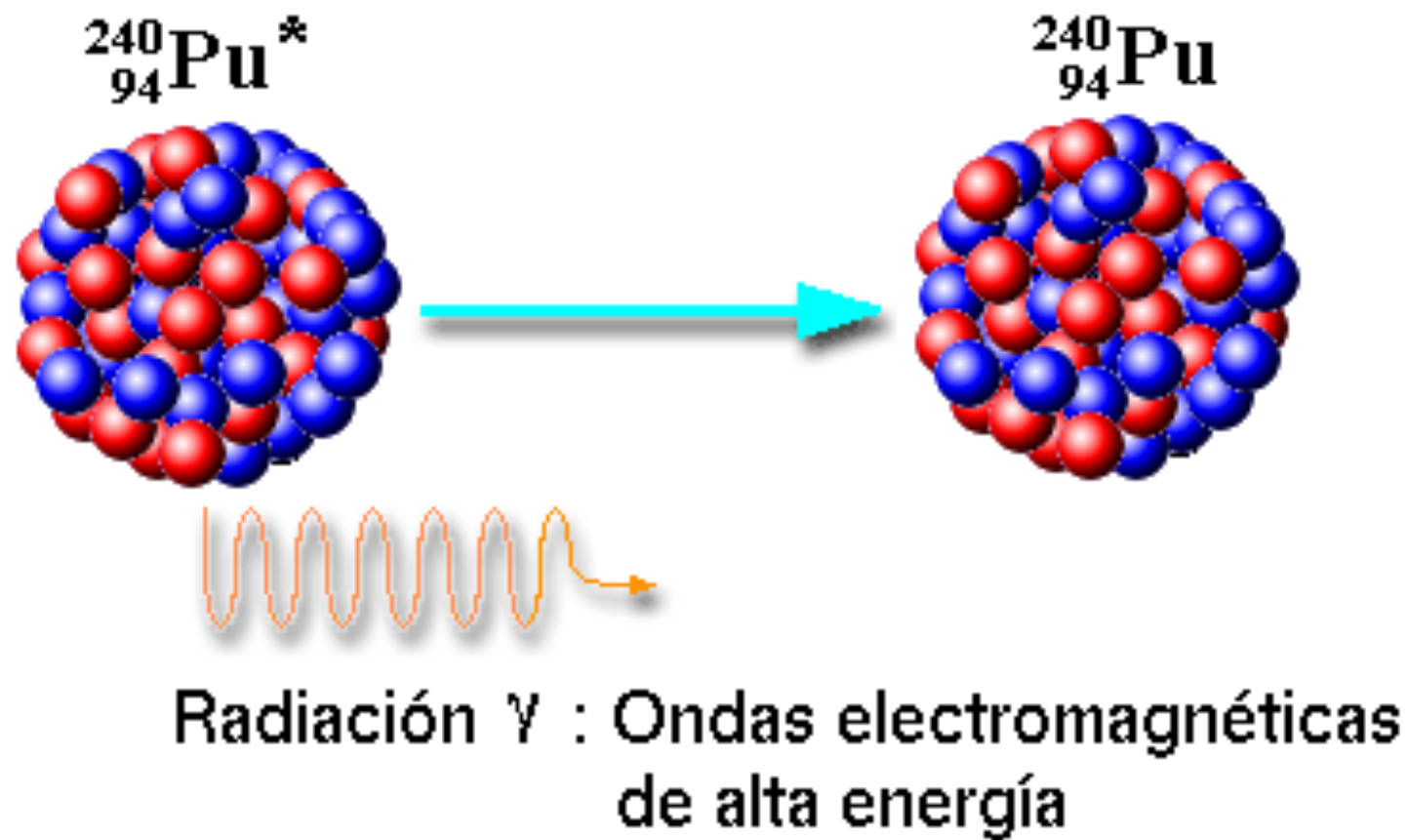
# Desintegración $\beta^-$





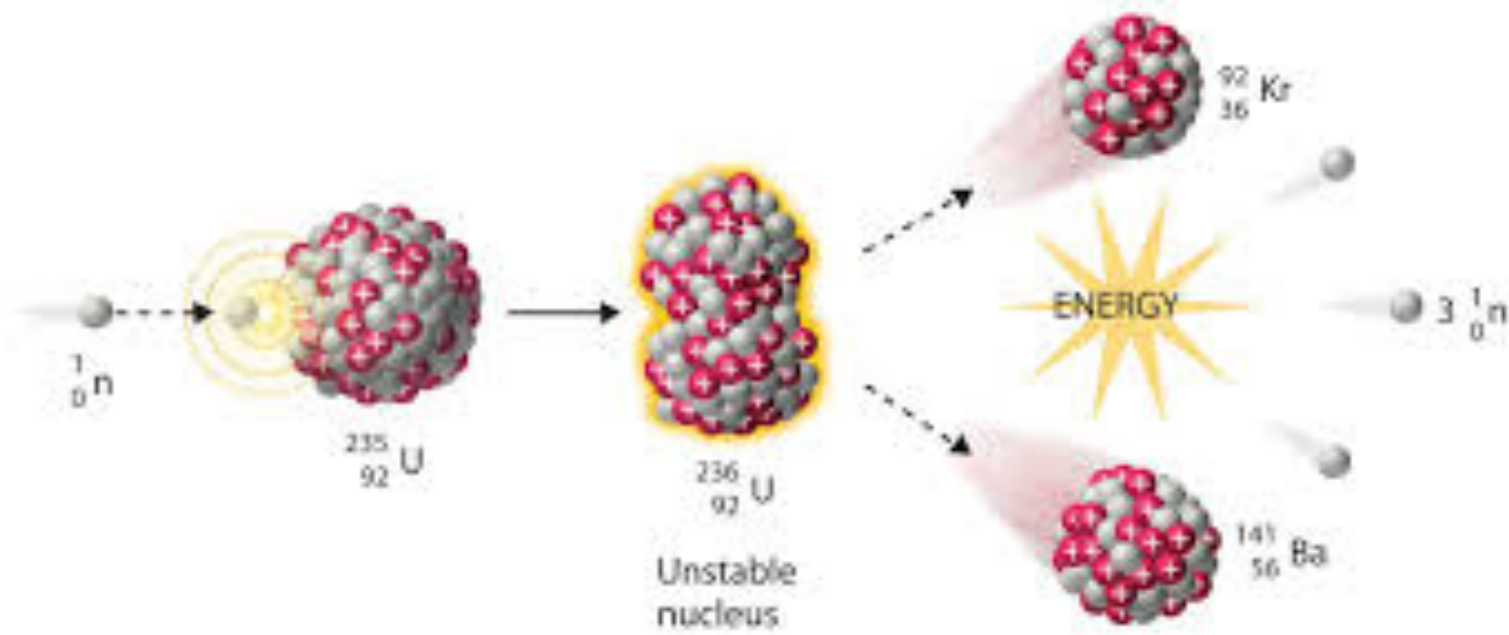
**Interacción Débil**

## Desintegración $\gamma$



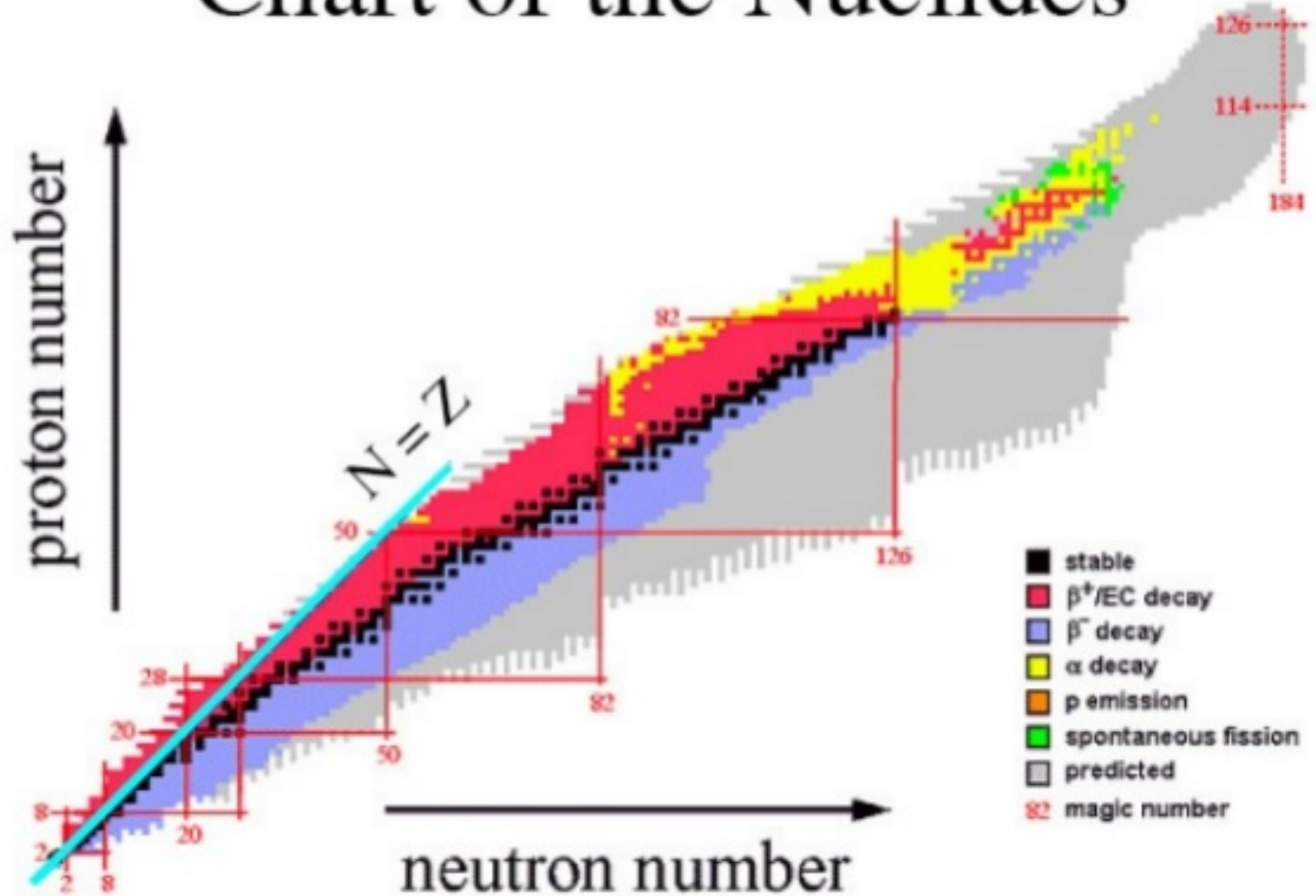


# Fisión





# Chart of the Nuclides



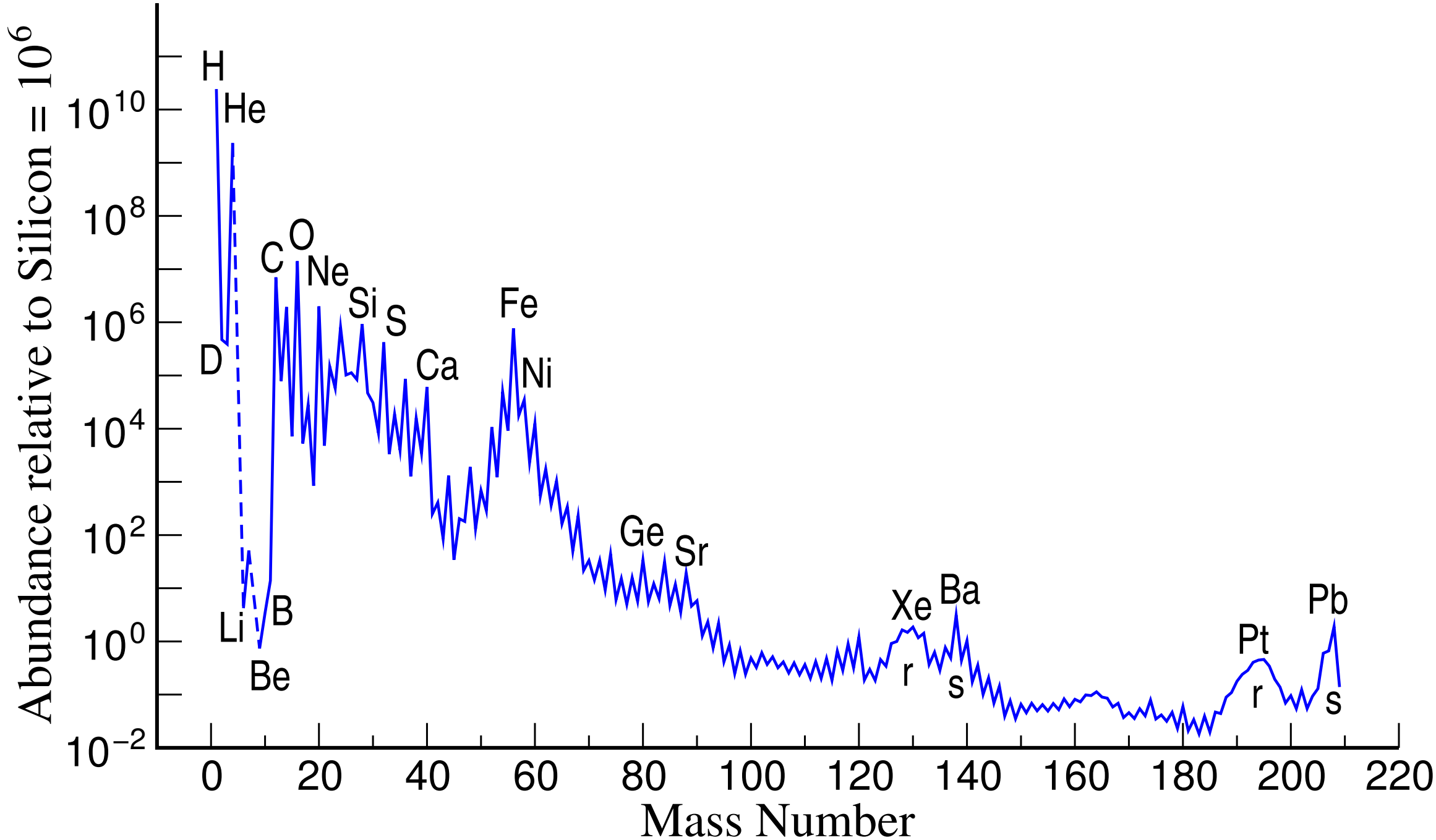
Symmetric: Equal numbers of protons and neutrons  
Asymmetric: Unequal numbers of protons and neutrons

# Periodic table of the elements

group	1*	2											13	14	15	16	17	18										
period 1	1 <b>H</b>																	2 <b>He</b>										
2	3 <b>Li</b>	4 <b>Be</b>											5 <b>B</b>	6 <b>C</b>	7 <b>N</b>	8 <b>O</b>	9 <b>F</b>	10 <b>Ne</b>										
3	11 <b>Na</b>	12 <b>Mg</b>	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 <b>Al</b>	14 <b>Si</b>	15 <b>P</b>	16 <b>S</b>	17 <b>Cl</b>	18 <b>Ar</b>										
4	19 <b>K</b>	20 <b>Ca</b>	21 <b>Sc</b>	22 <b>Ti</b>	23 <b>V</b>	24 <b>Cr</b>	25 <b>Mn</b>	26 <b>Fe</b>	27 <b>Co</b>	28 <b>Ni</b>	29 <b>Cu</b>	30 <b>Zn</b>	31 <b>Ga</b>	32 <b>Ge</b>	33 <b>As</b>	34 <b>Se</b>	35 <b>Br</b>	36 <b>Kr</b>										
5	37 <b>Rb</b>	38 <b>Sr</b>	39 <b>Y</b>	40 <b>Zr</b>	41 <b>Nb</b>	42 <b>Mo</b>	43 <b>Tc</b>	44 <b>Ru</b>	45 <b>Rh</b>	46 <b>Pd</b>	47 <b>Ag</b>	48 <b>Cd</b>	49 <b>In</b>	50 <b>Sn</b>	51 <b>Sb</b>	52 <b>Te</b>	53 <b>I</b>	54 <b>Xe</b>										
6	55 <b>Cs</b>	56 <b>Ba</b>	57 <b>La</b>	72 <b>Hf</b>	73 <b>Ta</b>	74 <b>W</b>	75 <b>Re</b>	76 <b>Os</b>	77 <b>Ir</b>	78 <b>Pt</b>	79 <b>Au</b>	80 <b>Hg</b>	81 <b>Tl</b>	82 <b>Pb</b>	83 <b>Bi</b>	84 <b>Po</b>	85 <b>At</b>	86 <b>Rn</b>										
7	87 <b>Fr</b>	88 <b>Ra</b>	89 <b>Ac</b>	104 <b>Rf</b>	105 <b>Db</b>	106 <b>Sg</b>	107 <b>Bh</b>	108 <b>Hs</b>	109 <b>Mt</b>	110 <b>Ds</b>	111 <b>Rg</b>	112 <b>Cn</b>	113 <b>Nh</b>	114 <b>Fl</b>	115 <b>Mc</b>	116 <b>Lv</b>	117 <b>Ts</b>	118 <b>Og</b>										
lanthanoid series 6	<table border="1"> <tr> <td>58 <b>Ce</b></td> <td>59 <b>Pr</b></td> <td>60 <b>Nd</b></td> <td>61 <b>Pm</b></td> <td>62 <b>Sm</b></td> <td>63 <b>Eu</b></td> <td>64 <b>Gd</b></td> <td>65 <b>Tb</b></td> <td>66 <b>Dy</b></td> <td>67 <b>Ho</b></td> <td>68 <b>Er</b></td> <td>69 <b>Tm</b></td> <td>70 <b>Yb</b></td> <td>71 <b>Lu</b></td> </tr> </table>														58 <b>Ce</b>	59 <b>Pr</b>	60 <b>Nd</b>	61 <b>Pm</b>	62 <b>Sm</b>	63 <b>Eu</b>	64 <b>Gd</b>	65 <b>Tb</b>	66 <b>Dy</b>	67 <b>Ho</b>	68 <b>Er</b>	69 <b>Tm</b>	70 <b>Yb</b>	71 <b>Lu</b>
58 <b>Ce</b>	59 <b>Pr</b>	60 <b>Nd</b>	61 <b>Pm</b>	62 <b>Sm</b>	63 <b>Eu</b>	64 <b>Gd</b>	65 <b>Tb</b>	66 <b>Dy</b>	67 <b>Ho</b>	68 <b>Er</b>	69 <b>Tm</b>	70 <b>Yb</b>	71 <b>Lu</b>															
actinoid series 7	<table border="1"> <tr> <td>90 <b>Th</b></td> <td>91 <b>Pa</b></td> <td>92 <b>U</b></td> <td>93 <b>Np</b></td> <td>94 <b>Pu</b></td> <td>95 <b>Am</b></td> <td>96 <b>Cm</b></td> <td>97 <b>Bk</b></td> <td>98 <b>Cf</b></td> <td>99 <b>Es</b></td> <td>100 <b>Fm</b></td> <td>101 <b>Md</b></td> <td>102 <b>No</b></td> <td>103 <b>Lr</b></td> </tr> </table>														90 <b>Th</b>	91 <b>Pa</b>	92 <b>U</b>	93 <b>Np</b>	94 <b>Pu</b>	95 <b>Am</b>	96 <b>Cm</b>	97 <b>Bk</b>	98 <b>Cf</b>	99 <b>Es</b>	100 <b>Fm</b>	101 <b>Md</b>	102 <b>No</b>	103 <b>Lr</b>
90 <b>Th</b>	91 <b>Pa</b>	92 <b>U</b>	93 <b>Np</b>	94 <b>Pu</b>	95 <b>Am</b>	96 <b>Cm</b>	97 <b>Bk</b>	98 <b>Cf</b>	99 <b>Es</b>	100 <b>Fm</b>	101 <b>Md</b>	102 <b>No</b>	103 <b>Lr</b>															

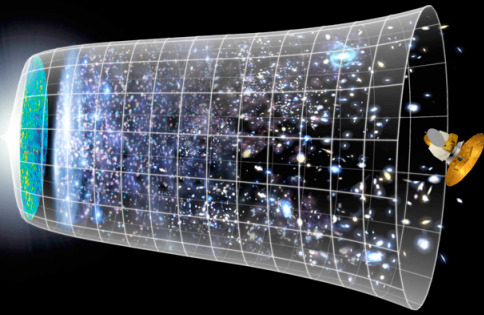
\*Numbering system adopted by the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC).

# La abundancia de los elementos en el Universo



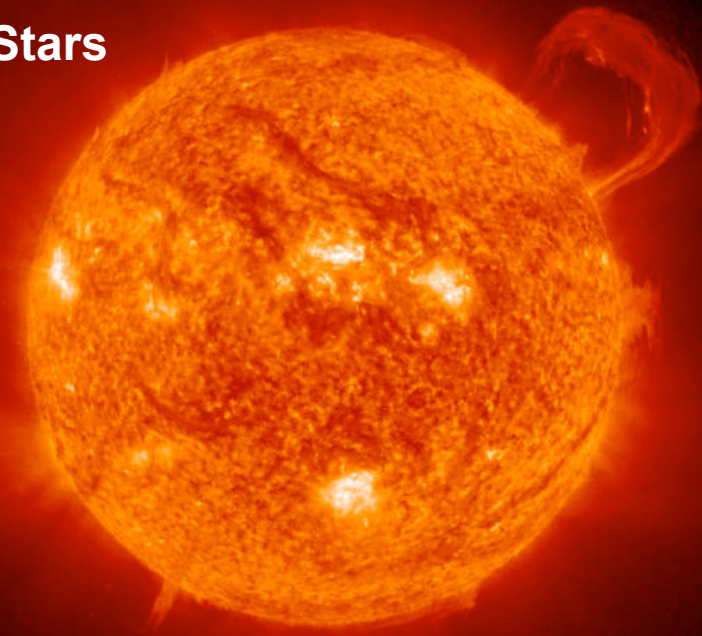


# Big Bang

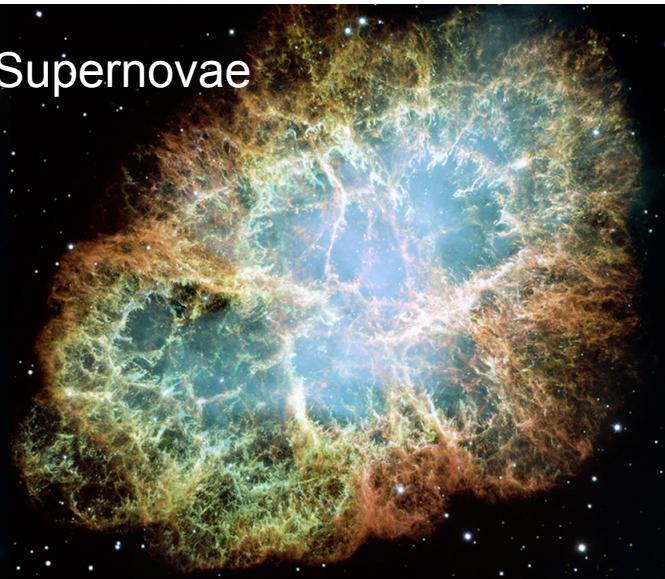


NASA/WMAP Science Team

# Stars

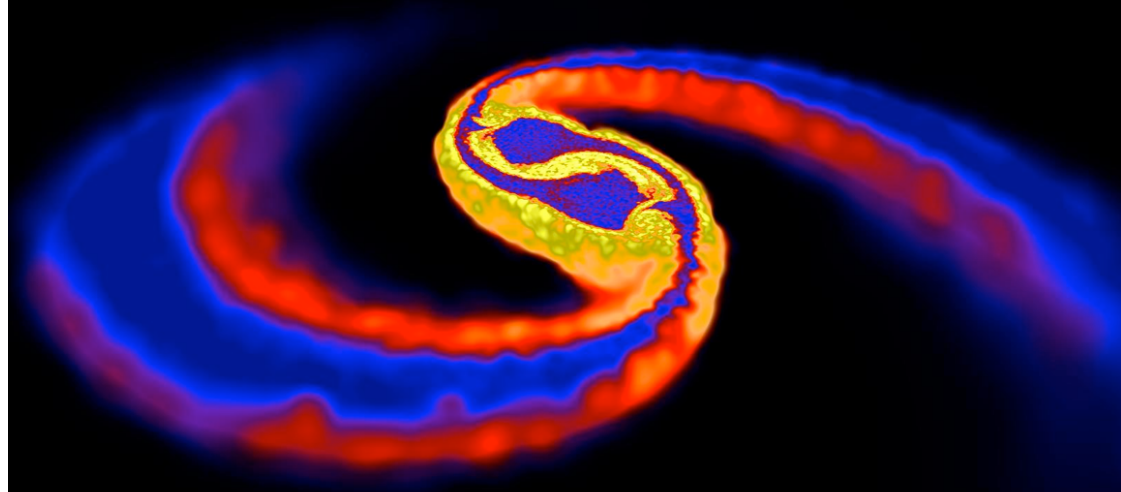


# Supernovae

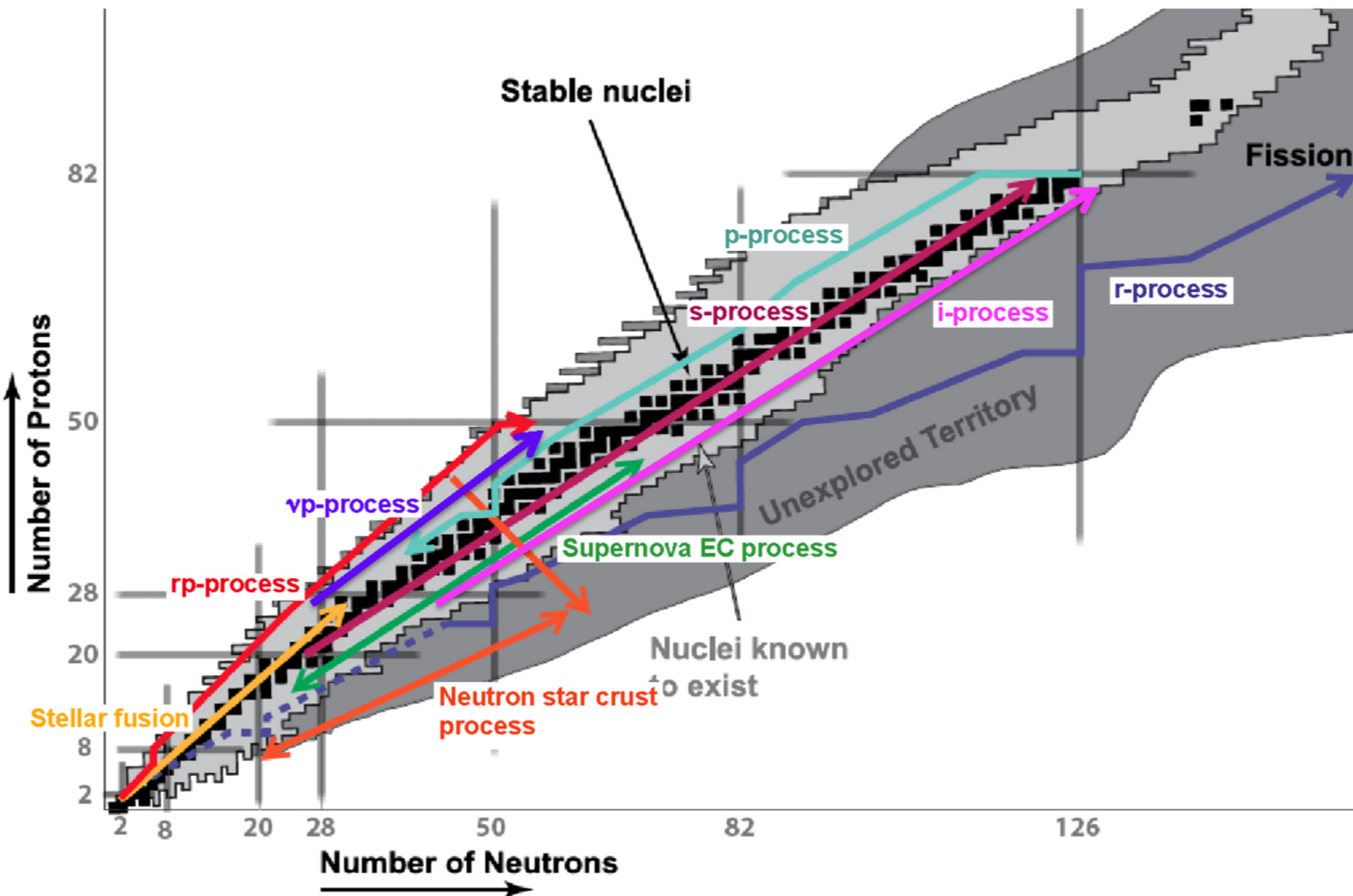


Mosaic of The Crab Nebula HUBBLESITE.org

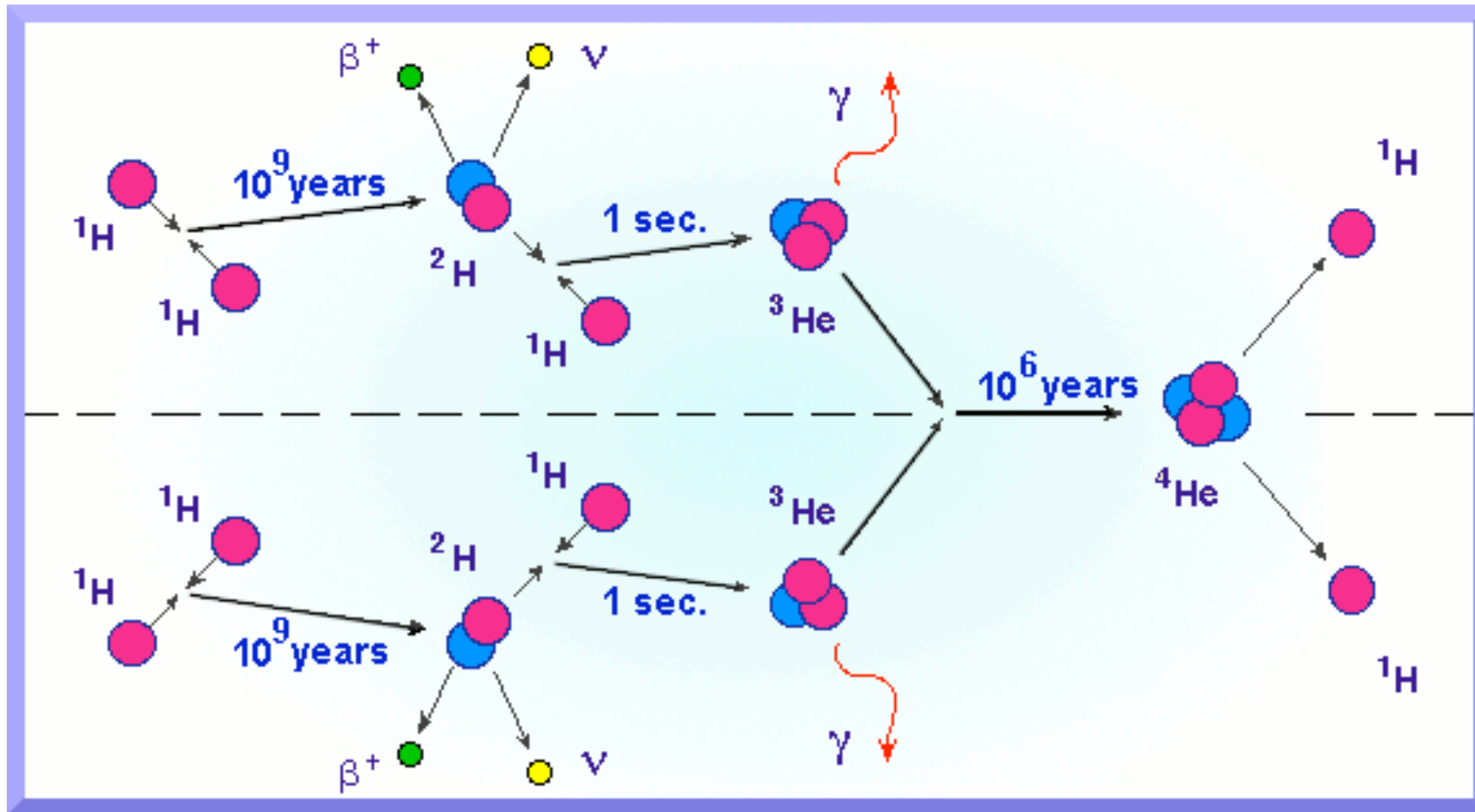
# Neutron star mergers



Credit: Daniel Price (U/Exeter) and Stephan Rosswog (Int. U/Bremen)



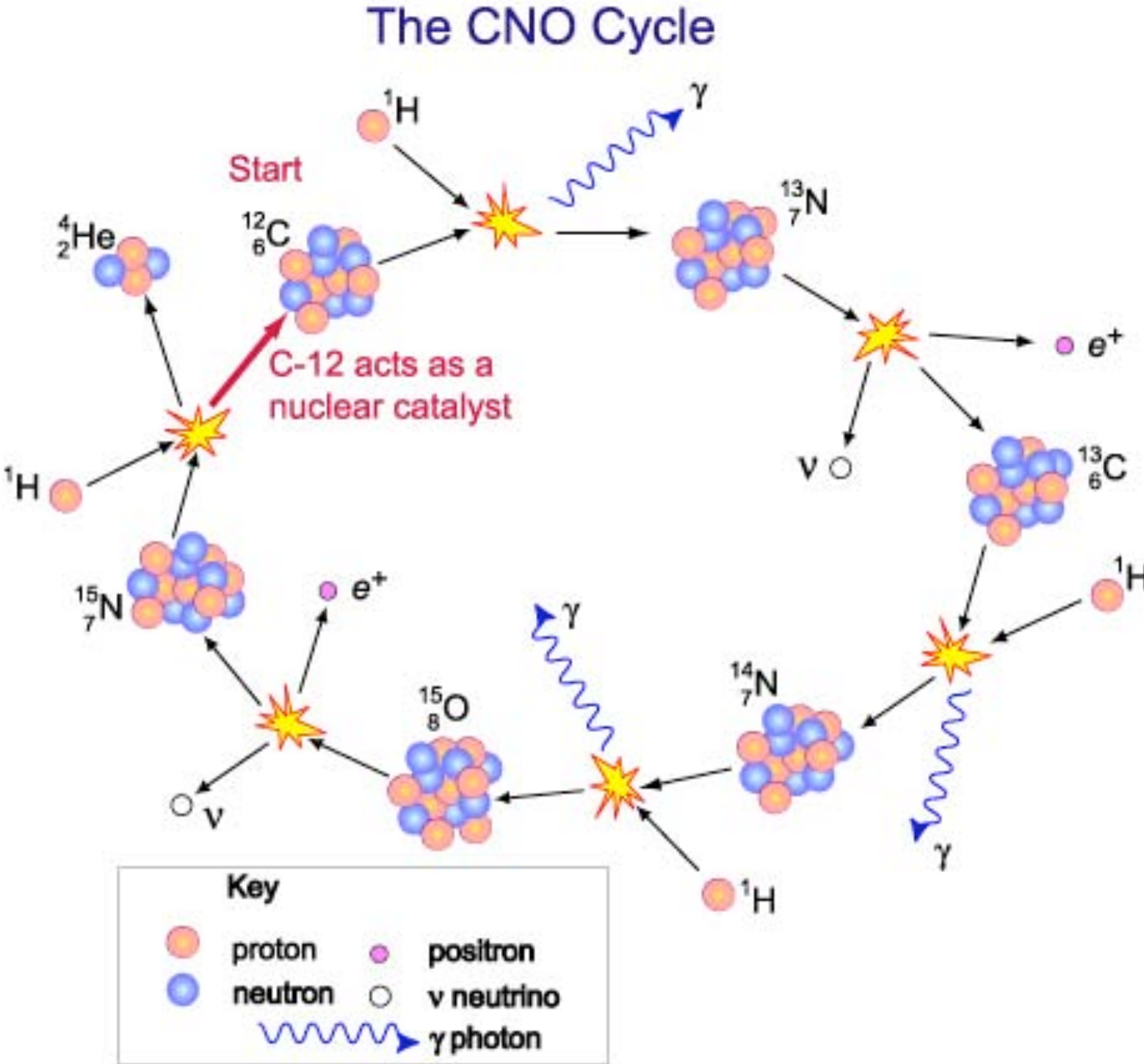
# El ciclo p-p en las estrellas



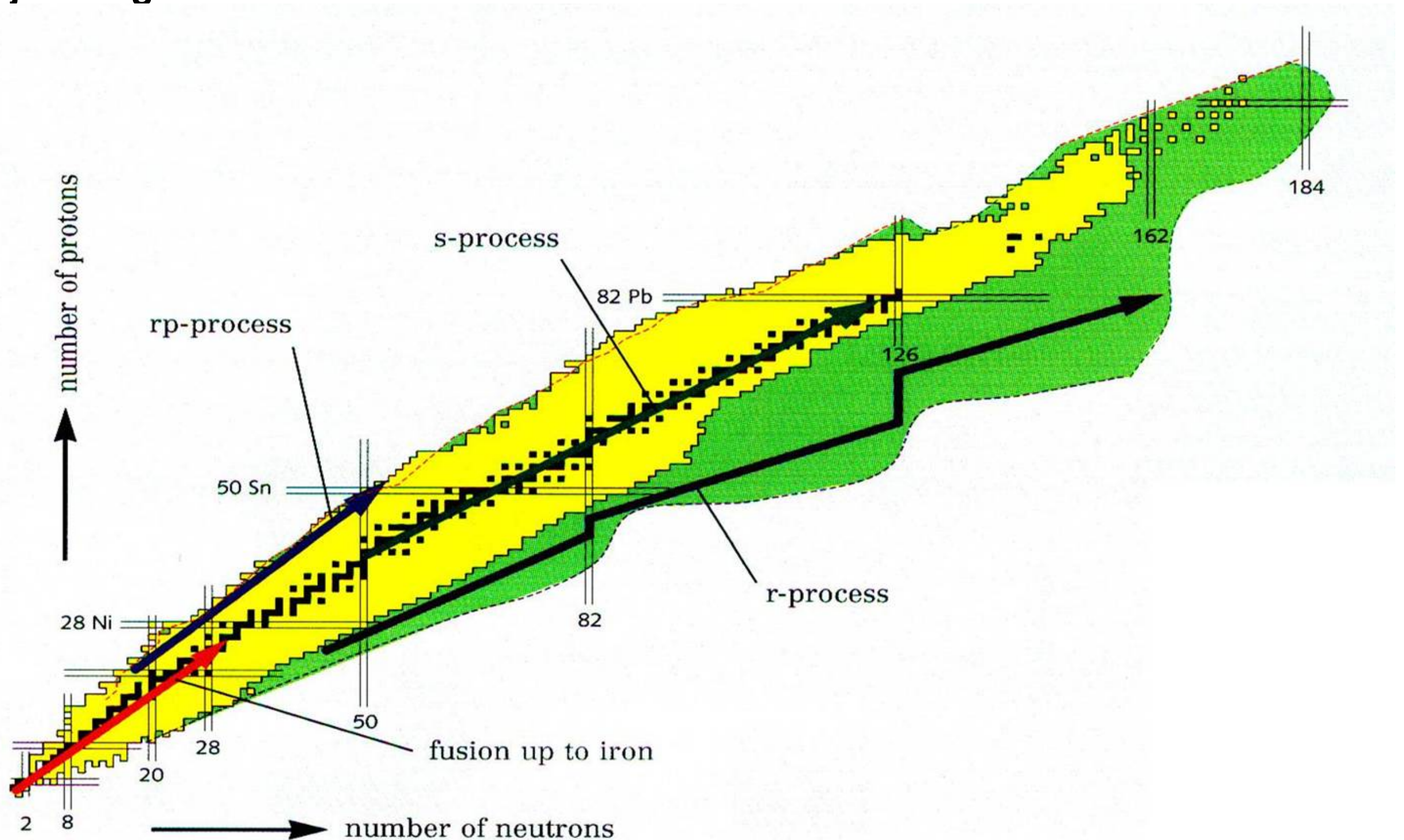
O cómo nos calienta el Sol



# El ciclo CNO



El proceso r produce los elementos pesados, incluidos los responsables de la radiactividad natural. Todavía no está claro en que entorno astrofísico se produce, aunque muy recientemente se han encontrado indicios de que puede ocurrir en la fusión gravitatoria de dos estrellas de neutrones o de una estrella de neutrones y un agujero negro.





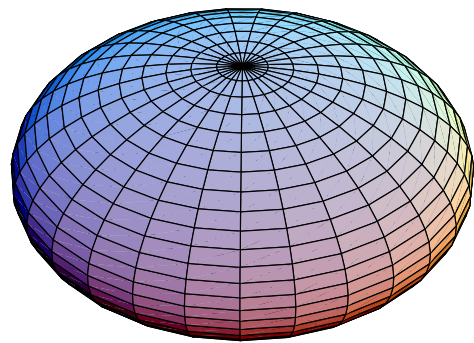
**Gracias por su atención**

# Explotando el núcleo

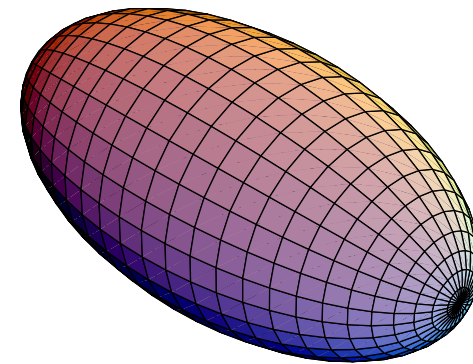
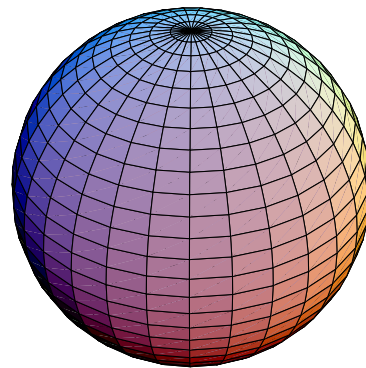
- Transmutación de los residuos radiactivos (bombardeo neutrones)
- Reactores nucleares subcríticos (ADS, Torio)
- Fusión nuclear (ITER)
- Almacenamiento de energía (isómeros)
  
- Resonancia magnética nuclear
- Tomografía por emisión de positrones (PET)
  
- Difracción de neutrones
- Haces iónicos
- Nuevos materiales
  
- Radioterapia



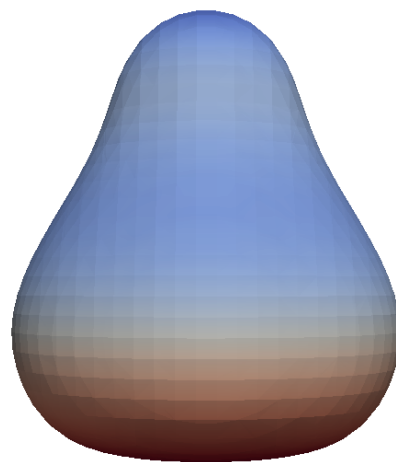
# Formas nucleares y ruptura espontánea de la simetría rotacional



**Achatado (Oblate)**

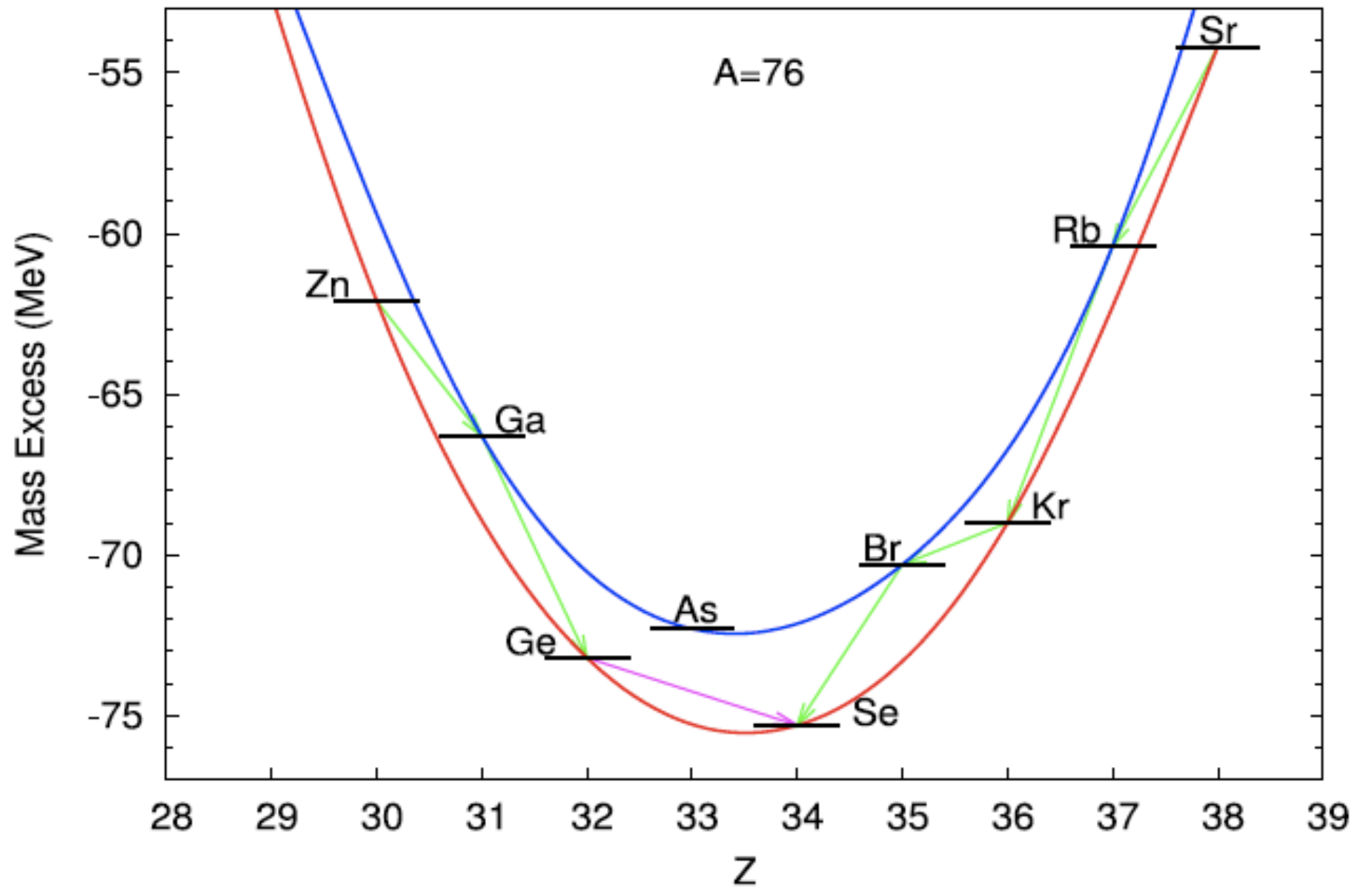


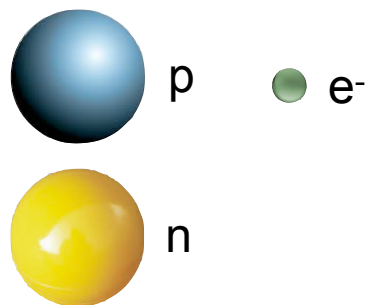
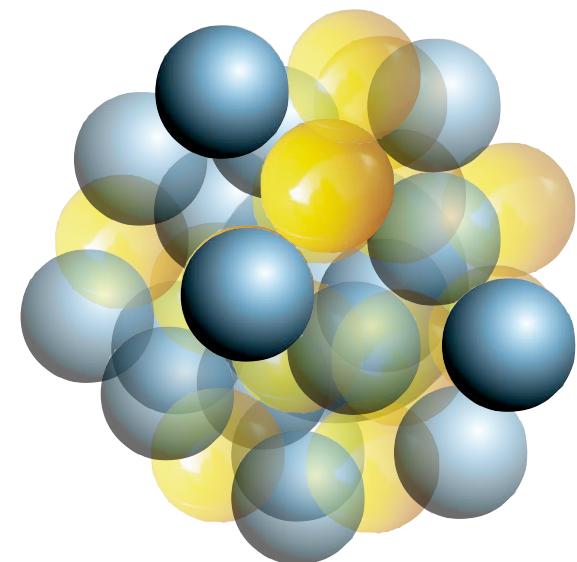
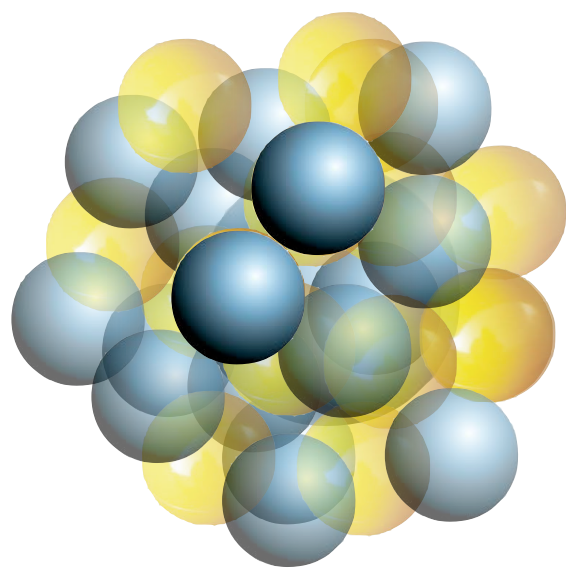
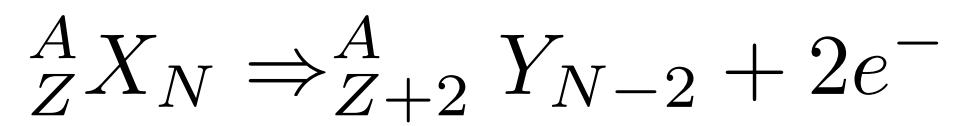
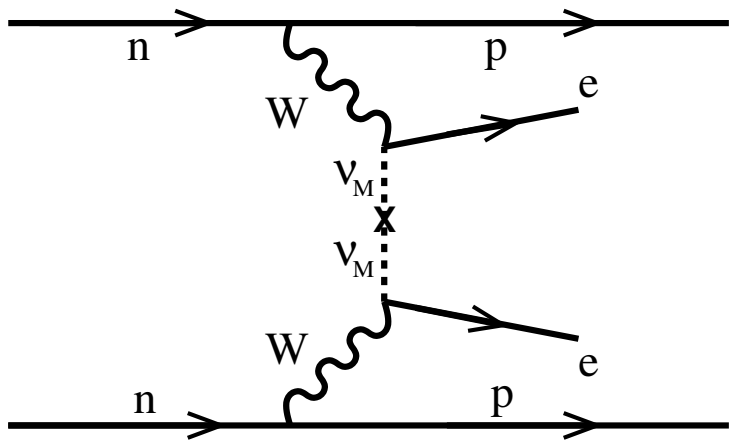
**Alargado (Prolate)**



**O incluso con forma de pera !**

# Desintegración beta doble





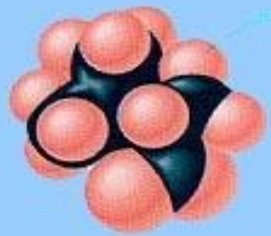
$$\left( T_{1/2}^{0\nu\beta\beta}(0^+ \rightarrow 0^+) \right)^{-1} = G_{01} |M^{0\nu\beta\beta}|^2 \left( \frac{\langle m_\nu \rangle}{m_e} \right)^2$$

**La luna, que no sirve para nada  
salvo mover el mar**

*Carlos Piera*

*Religio y otros poemas*

$10^{-9}$  m



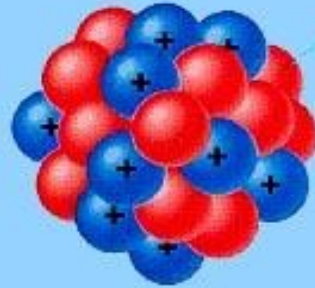
Molécula

$10^{-10}$  m



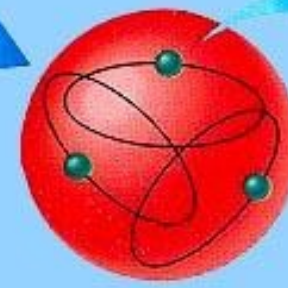
Àtomo

$10^{-15}$  m



Núcleo

$10^{-16}$  m



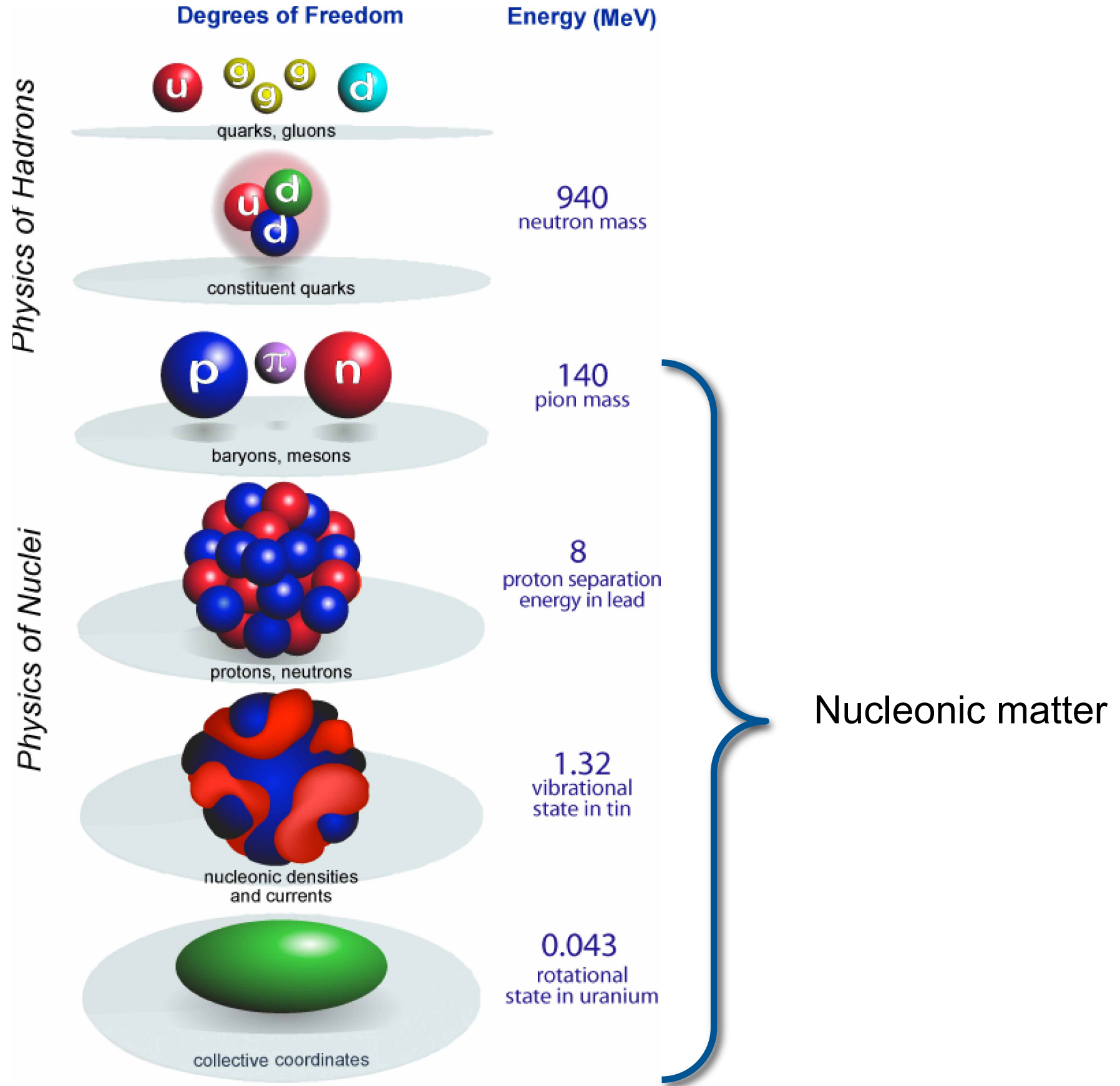
Protón o Neutrón

$10^{-18}$  m



Quark







# AGUA IMPERIAL

Carbónica Natural, Bicarbonatada Sódica, Litúfica, Radioactiva.

Manantial **Els Bullidors**

(Registrado).



Autorizada por el Estado

en R. O. de 30 de Julio 1902

CALDAS DE MALAVELLA (Gerona).

El agua IMPERIAL por su sabor exquisito y absoluta pureza constituye la más excelente agua de mesa. El que la bebe desconoce el dolor de estómago y destierra para siempre el artrismo.

Emerge a 60°, se embotella sin contacto con el aire **previa la esterilización de los envases.** Es la mejor defensa contra el **Cólera, Tifus** y demás enfermedades infecciosas.

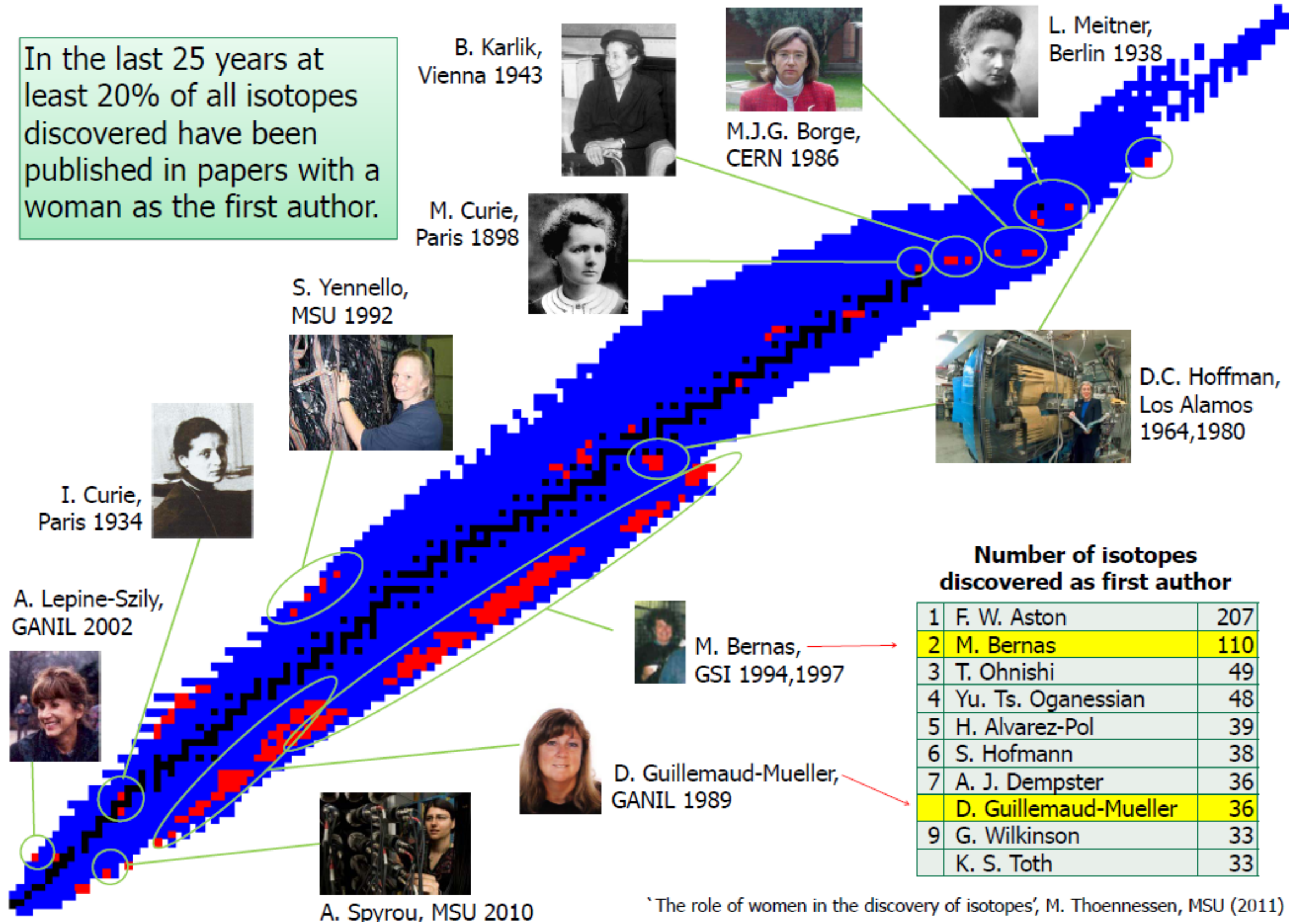
**Pidase en Hoteles y Restaurants.      Venta en todas las farmacias.**

**Las leyes de conservación pueden ser universales o dinámicas, es decir propias de cada interacción.**

**Sin una dinámica adecuada, una desintegración permitida por las leyes de conservación universales, no se podría producir.**

**Porqué es el protón estable? Porque, aunque energéticamente podría desintegrarse, ya que existen partículas mas ligeras que él, como el electrón, el muón, el pión, y el kaón, las leyes conservación dinámicas, en este caso la conservación del número de quarks, lo prohíben (por el momento, en ciertas teorías gran unificación, el protón no es estable)**

In the last 25 years at least 20% of all isotopes discovered have been published in papers with a woman as the first author.



B. Karlik, Vienna 1943



M.J.G. Borge, CERN 1986



L. Meitner, Berlin 1938

M. Curie, Paris 1898



S. Yennello, MSU 1992



I. Curie, Paris 1934



A. Lepine-Szily, GANIL 2002



D.C. Hoffman, Los Alamos 1964, 1980



**Number of isotopes discovered as first author**

1	F. W. Aston	207
2	M. Bernas	110
3	T. Ohnishi	49
4	Yu. Ts. Oganessian	48
5	H. Alvarez-Pol	39
6	S. Hofmann	38
7	A. J. Dempster	36
	D. Guillemaud-Mueller	36
9	G. Wilkinson	33
	K. S. Toth	33

M. Bernas, GSI 1994, 1997



D. Guillemaud-Mueller, GANIL 1989



A. Spyrou, MSU 2010



'The role of women in the discovery of isotopes', M. Thoennesen, MSU (2011)