

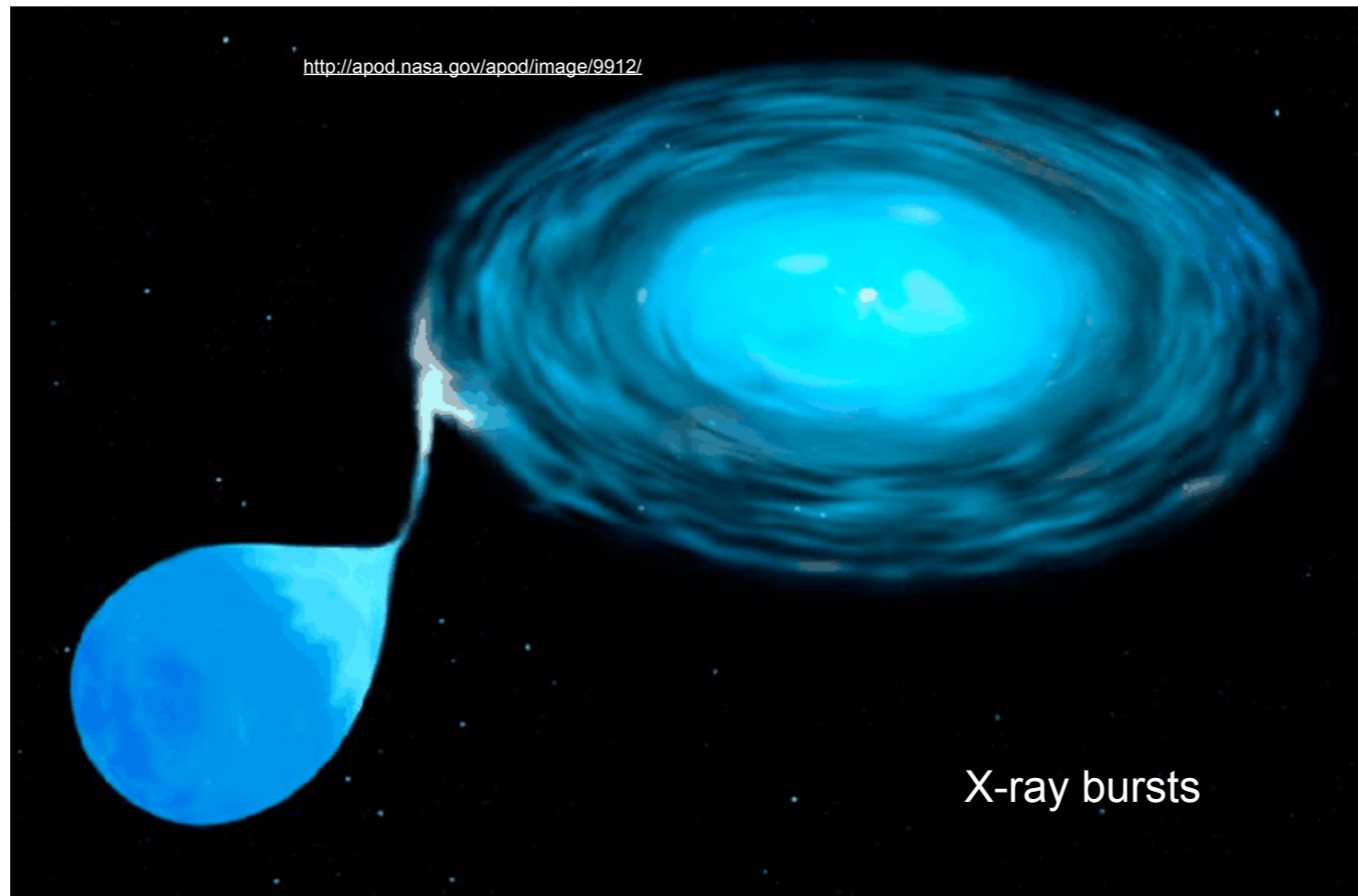
## Retos de la Física Fundamental

Ciclo de conferencias coordinado por Ángel Uranga, Instituto de Física Teórica UAM-CSIC



# Entremeses Nucleares

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

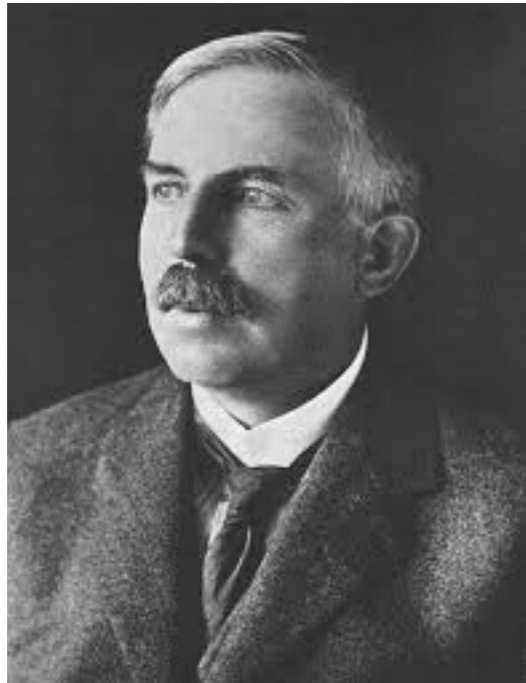
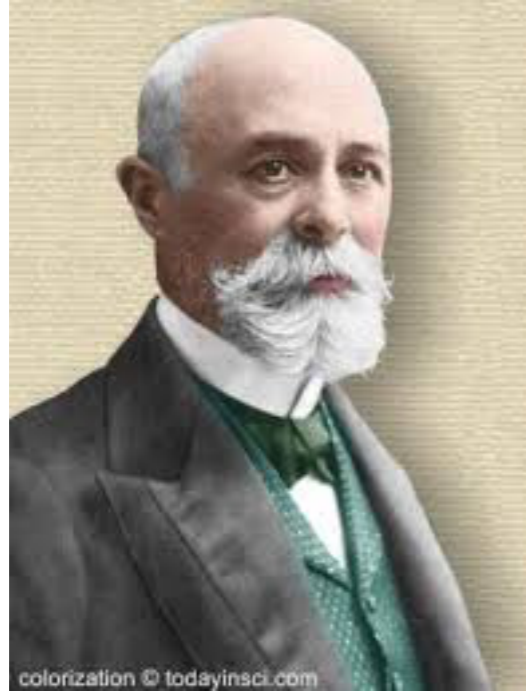


**I've seen things you people wouldn't believe.  
Attack ships on fire off the shoulder of Orion.  
I watched C-beams glitter in the dark near the Tannhauser gate.  
All those moments will be lost in time... like tears in rain... Time to die.**

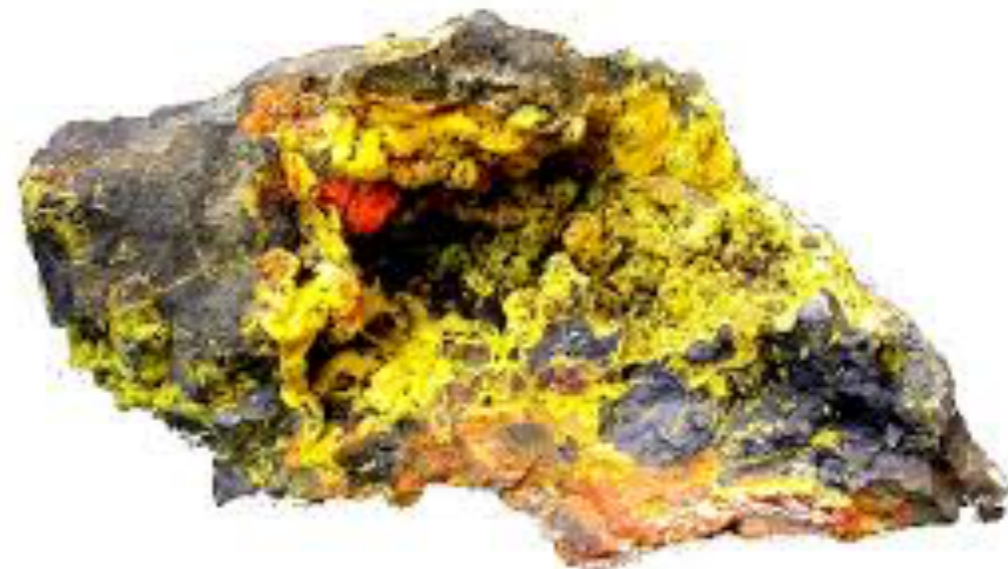
**En los años que van de 1896 a 1932, se produce una enorme revolución en nuestro conocimiento de la naturaleza, con la formulación de la Mecánica Cuántica y de la Relatividad Especial (que entre otras cosas implica la equivalencia entre masa y energía).**

**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.**







**En esta charla empezaremos por describir los aspectos básicos de la Radiactividad, seguiremos con el estudio la estructura del núcleo atómico, para terminar explicando como se produjeron los elementos químicos que dieron origen al descubrimiento de la Radiactividad**



RACHEL N° 1

**POUDRE  
THO-RADIA**

A BASE DE  
RADIUM & DE THORIUM  
Selon la formule du

D<sup>r</sup> ALFRED CURIE  
PRÉPARÉE PAR  
A. MOUSSALLI, Docteur en Pharmacie

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

FORMULE

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

DR. RACHEL 1.  
MAURENSQUEL



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, glowing 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 'Poudre Tho-Radia' 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.

Accionada com effeito no arrhythmia e em outros defectos da nutricao.

Nas diabetes, elimina o azucar das urinas.

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

Um remedio efficaes contra reumatismo e gota.

A grande superioridade da AGUA RADIUM, e 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-  
feitamente 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

# 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).

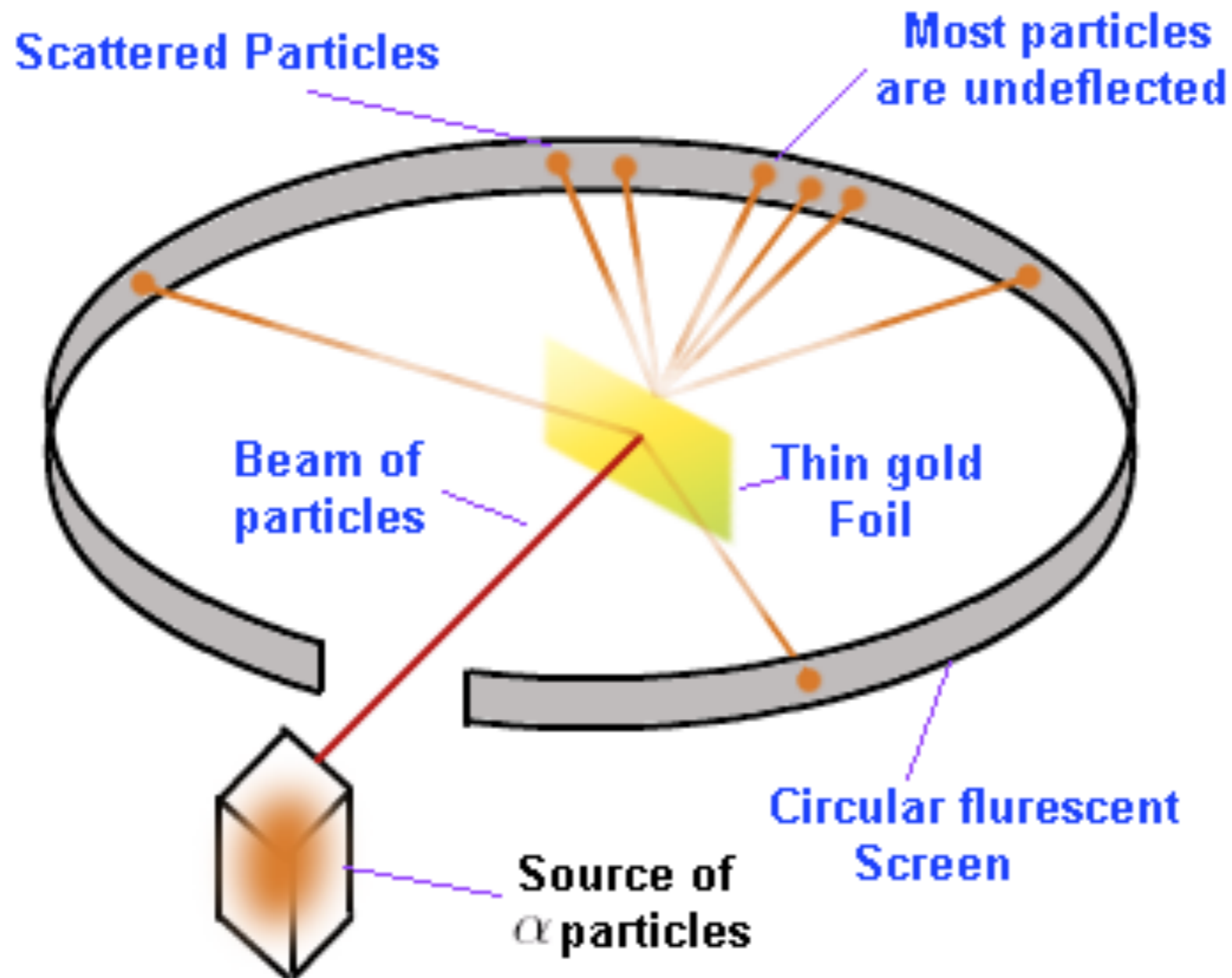
El agua IMPERIAL por su sabor exquisito y absoluta pureza constituye la más excelente agua de mesa. El que la bebe desconoce el dolor de estómago y destierra para siempre el artrismo.

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.**



# El experimento de Rutherford, Marsden y Geiger

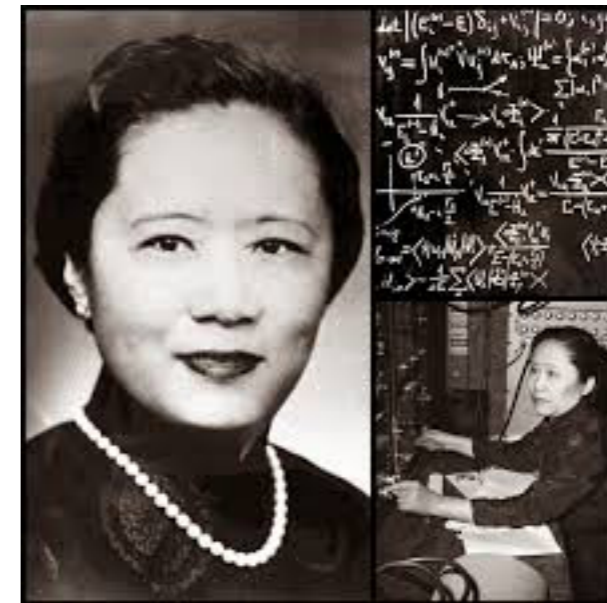


**Rutherford utilizó los rayos  $\alpha$  (que no son mas que núcleos de Helio-4 y cuya estructura se desconocía entonces) para descubrir la estructura del átomo y la existencia en él de un núcleo extremadamente pequeño el el que está concentrada toda la carga positiva y casi toda su masa (1911). Pero lo supone compuesto de las únicas partículas que tenía mano, electrones y núcleos de Hidrógeno (protones).**

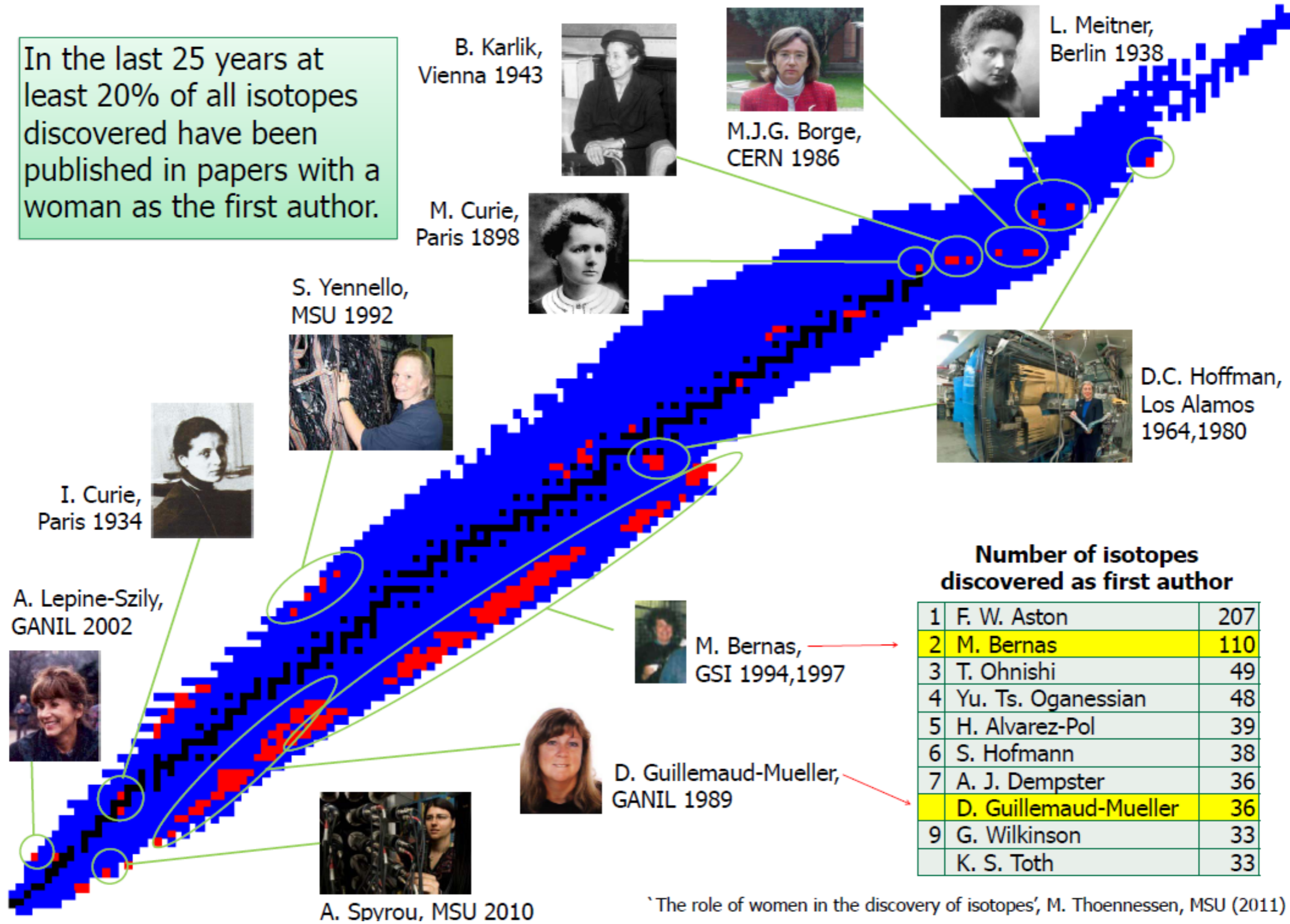
**Resolver ese problema hizo que aparecieran otros:**

- 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?**
- En la desintegración  $\beta$  se emiten electrones, de dónde salen?**
- La solución (parcial) tardó diez años en ser hallada.**

# Interludio de género



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



**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  |

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

**Chadwick (inspirado por los resultados de Frédéric Joliot e Irene Curie sobre la reacción  $\alpha + \text{Be-9}$  yendo a  $\text{C-12} + \text{X}$ ) descubre el neutrón. 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  $A-Z$  neutrones ligados por la interacción nuclear fuerte, que procede de las interacciones fundamentales entre quarks mediadas por los gluones.**

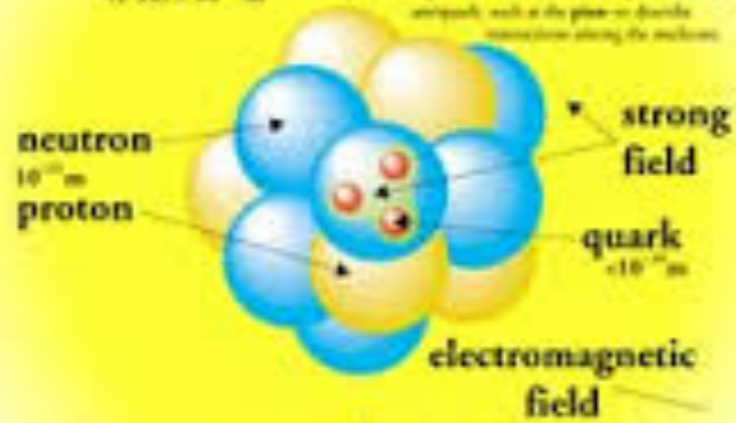
**Su tamaño varía entre 1 fm y 7 fm ( $10^{-15}$  m), y su energía de ligadura es típicamente de 8 MeV por nucleón.**



# The Nucleus

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

*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 interactions, which are mediated by gluons. In turn, the nucleus is held together by the strong interactions 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, to describe interactions among the nucleons.*

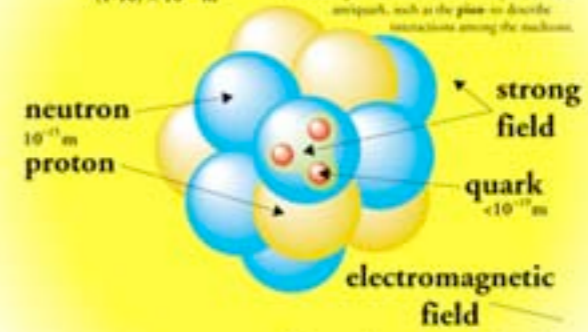


*In an atom, electrons range around the nucleus at distances typically up to 10,000 times the nuclear diameter. If the electron cloud were drawn to scale, this chart would cover a small room.*

# The Nucleus

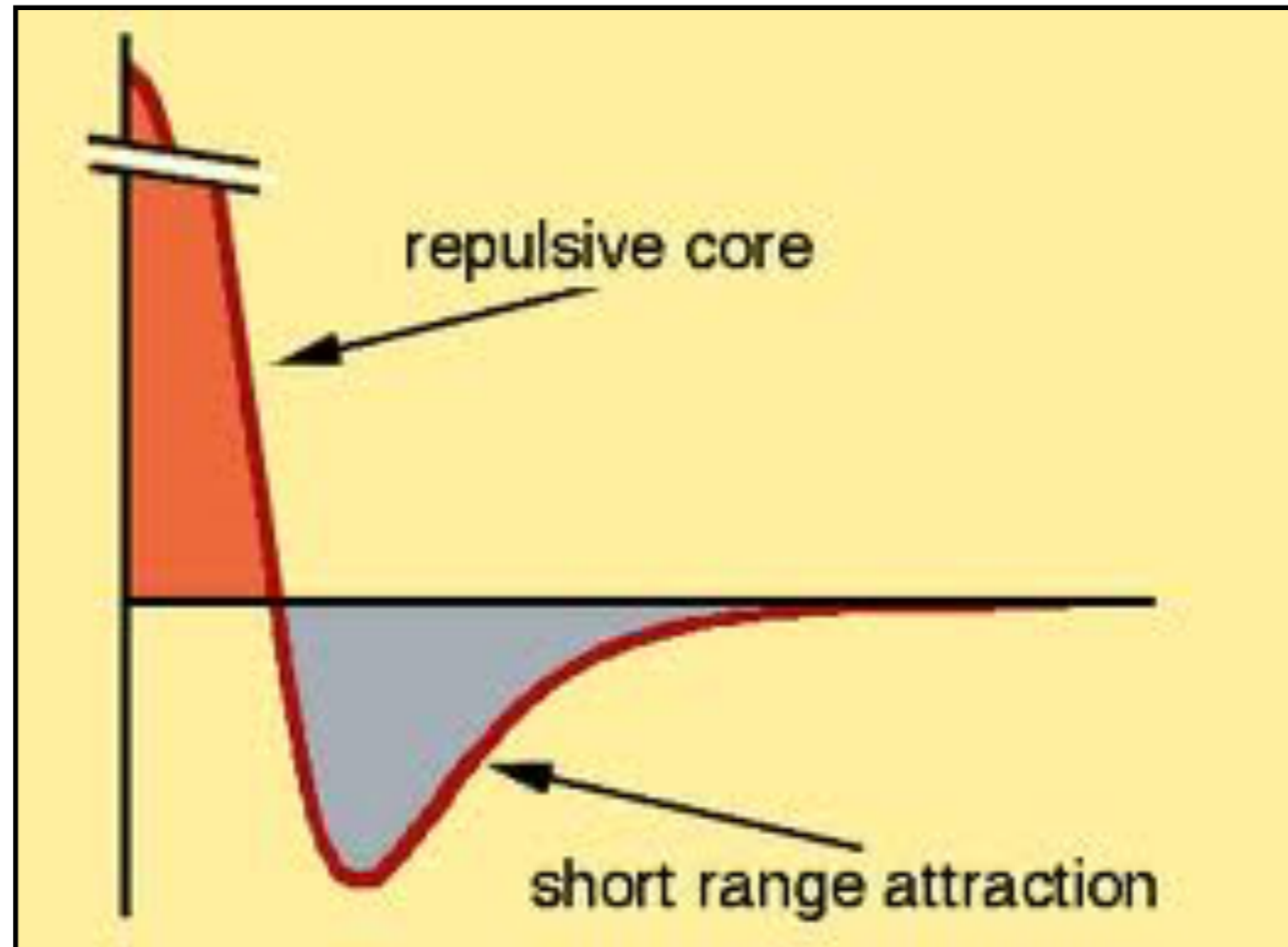
$(1-10) \times 10^{-17} \text{ m}$

*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 interactions, which are mediated by gluons. In turn, the nucleus is held together by the strong interactions 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, to describe interactions among the nucleons.*



*In an atom, electrons range around the nucleus at distances typically up to 10,000 times the nuclear diameter. If the electron cloud were drawn to scale, this chart would cover a small room.*





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

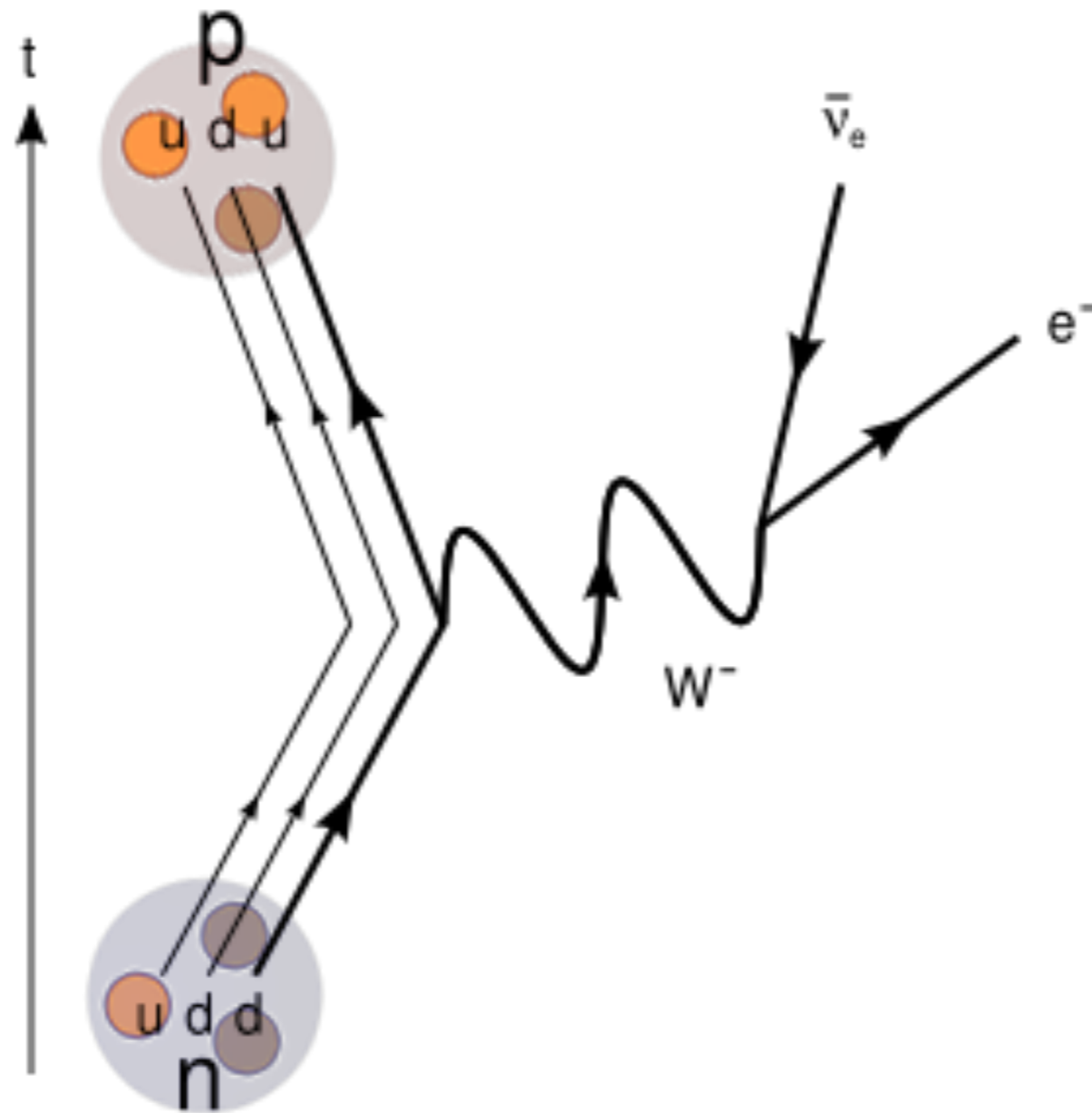
# A vueltas con la masa

**Sabemos ahora (o creemos saber) que el contenido energético total del universo está dominado al 75% por algo que llamamos energía oscura, misteriosa como su nombre indica. Item mas, parece que otro 20% corresponde a una forma de masa (la materia oscura) cuya naturaleza desconocemos. Nosotros estamos hechos del 5% que queda. Como veremos además ese 5% es sobre todo Hidrógeno**

**También sabemos que el campo de Higgs dota de masa a las partículas elementales. Pero eso no explica la masa del protón, ya que los quarks up y down son muy ligeros (5 MeV a comparar con la masa del proton que es de 1000 MeV). La explicación, aún incompleta) está en la interacción confinante de sus constituyentes, los quarks y los gluones, la Cromodinámica Cuántica.**

**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 masa del núcleo es menor que la suma de las masas de los neutrones y protones que lo componen.**

# El protón y el neutrón



**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~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.**

# De la estabilidad de la materia

**Porqué es una partícula o un núcleo estable? porque no le queda mas remedio. Motto; todo lo que no está prohibido está permitido.**

**Quien dicta las prohibiciones: Las leyes de conservación, primero la de la energía; para que algo se pueda desintegrar tiene que poder “ir” 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. He citado el K-40 por que es el que hace que nosotros, los vertebrados, seamos radiactivos (también los animales que tengan exoesqueletos calcáreos obviamente).**

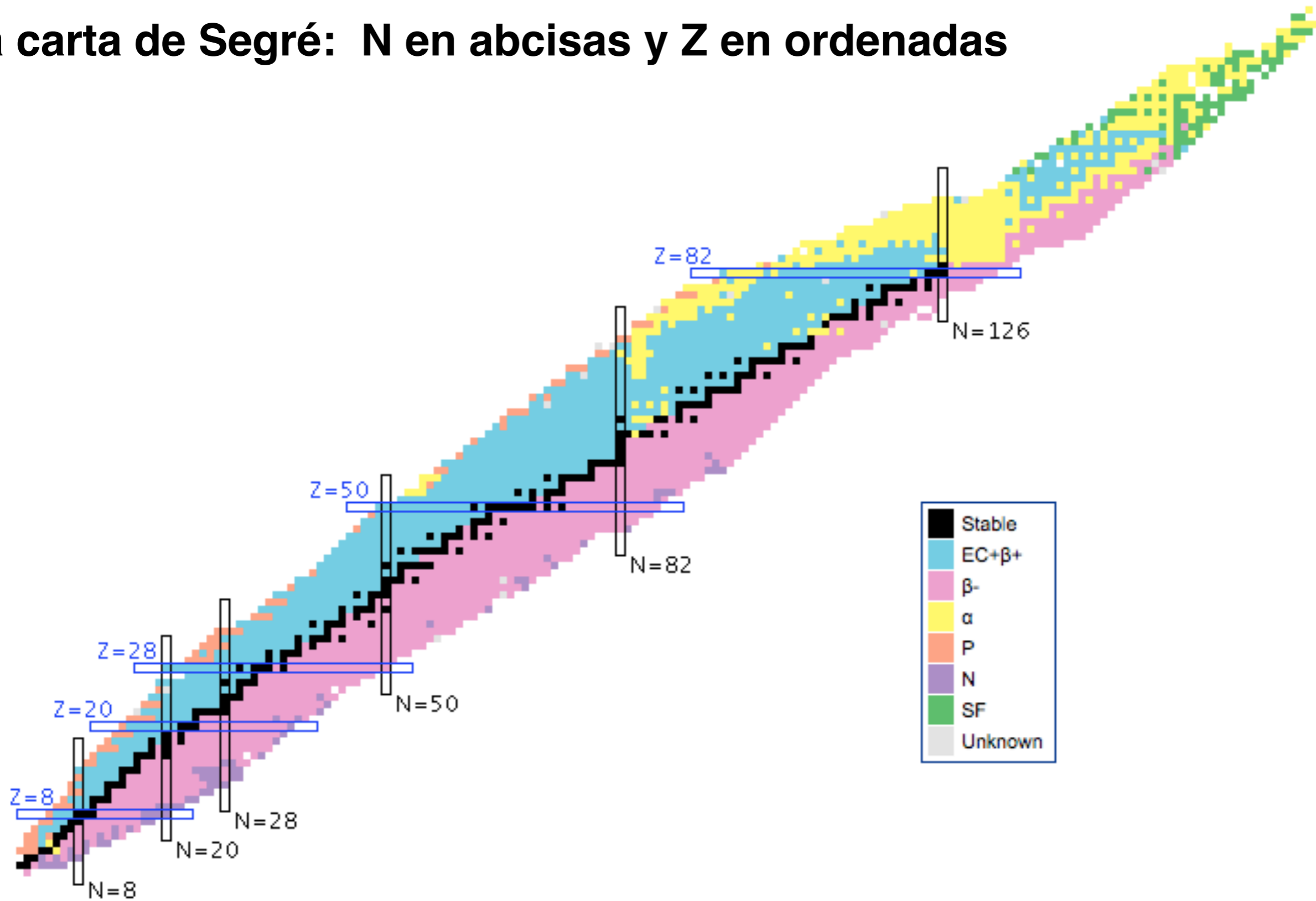
**Las leyes de conservación pueden ser universales o dinámicas, es decir propias de cada interacción.**

**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)**

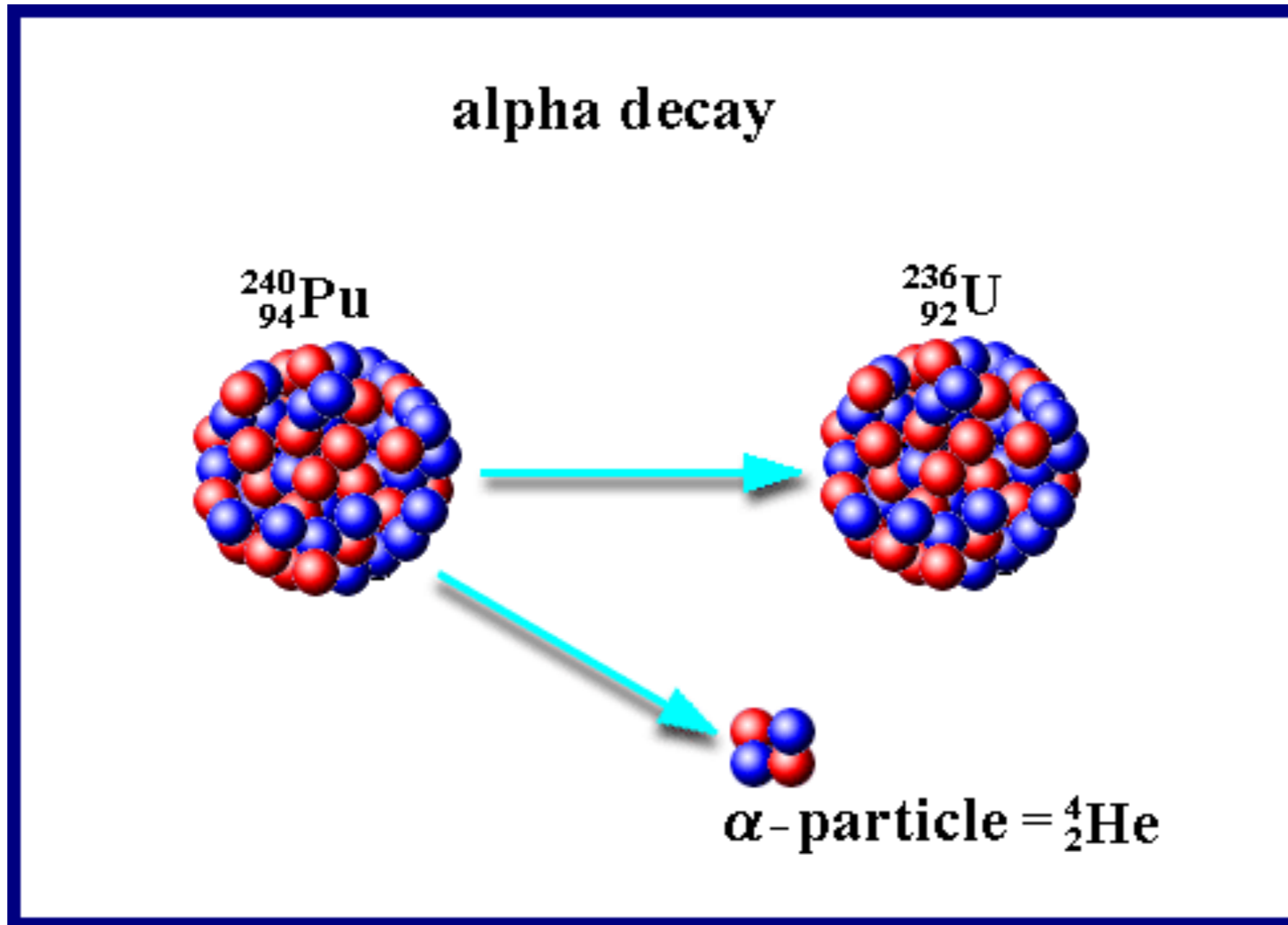


# La carta de Segré: N en abcisas y Z en ordenadas

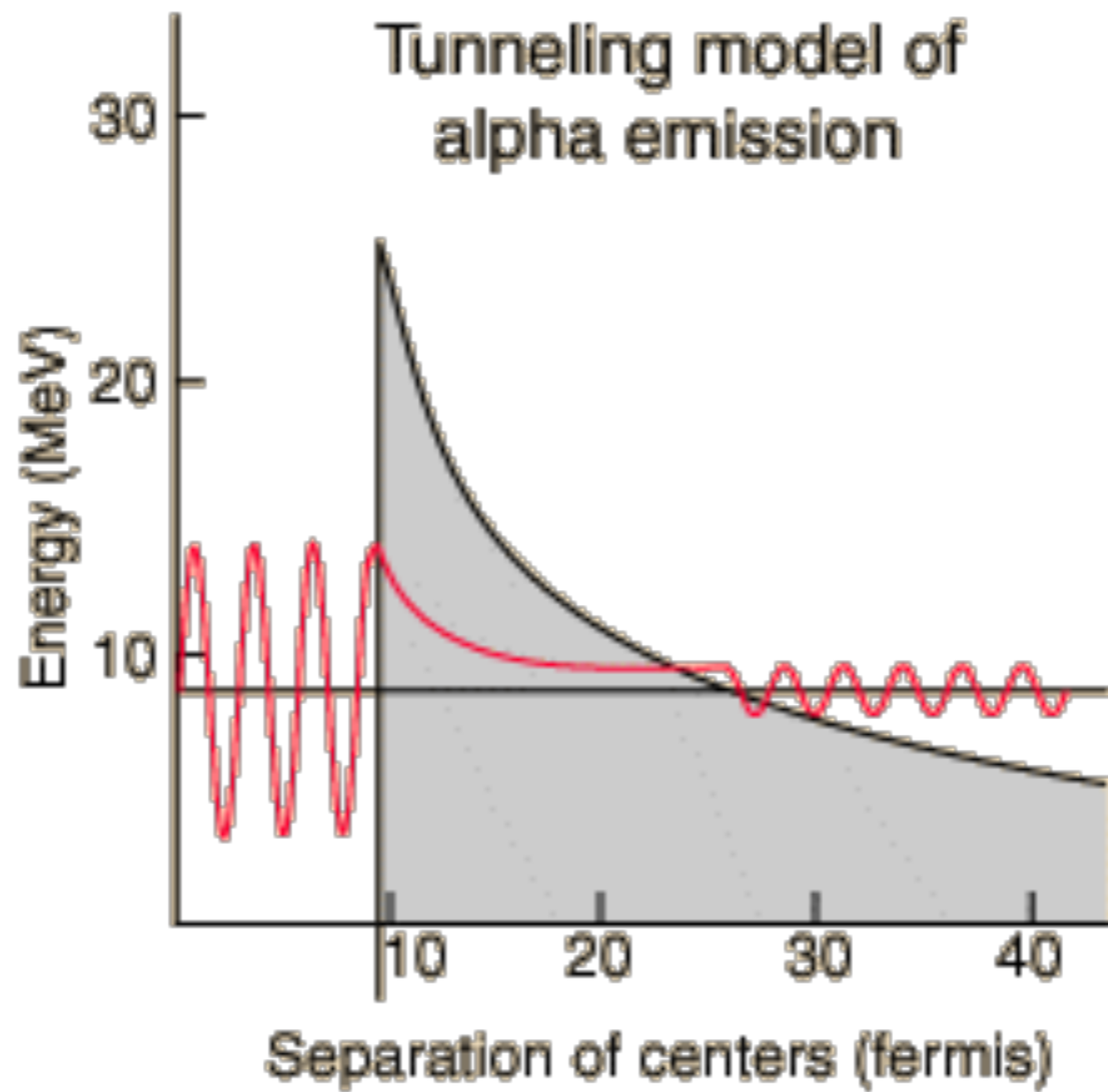


**Cada pixel representa un núcleo: en negro si es estable**

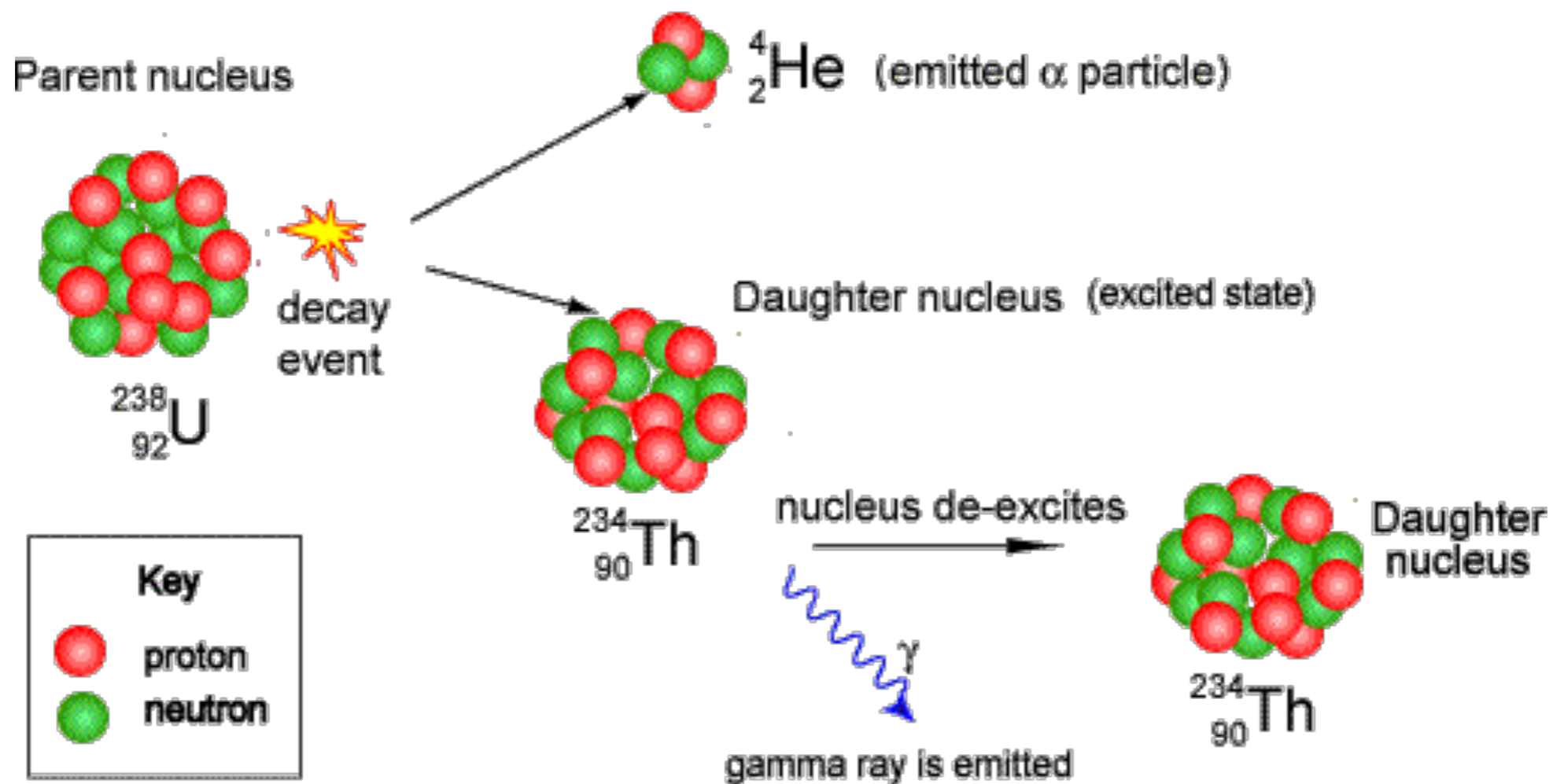
# La radiactividad ilustrada

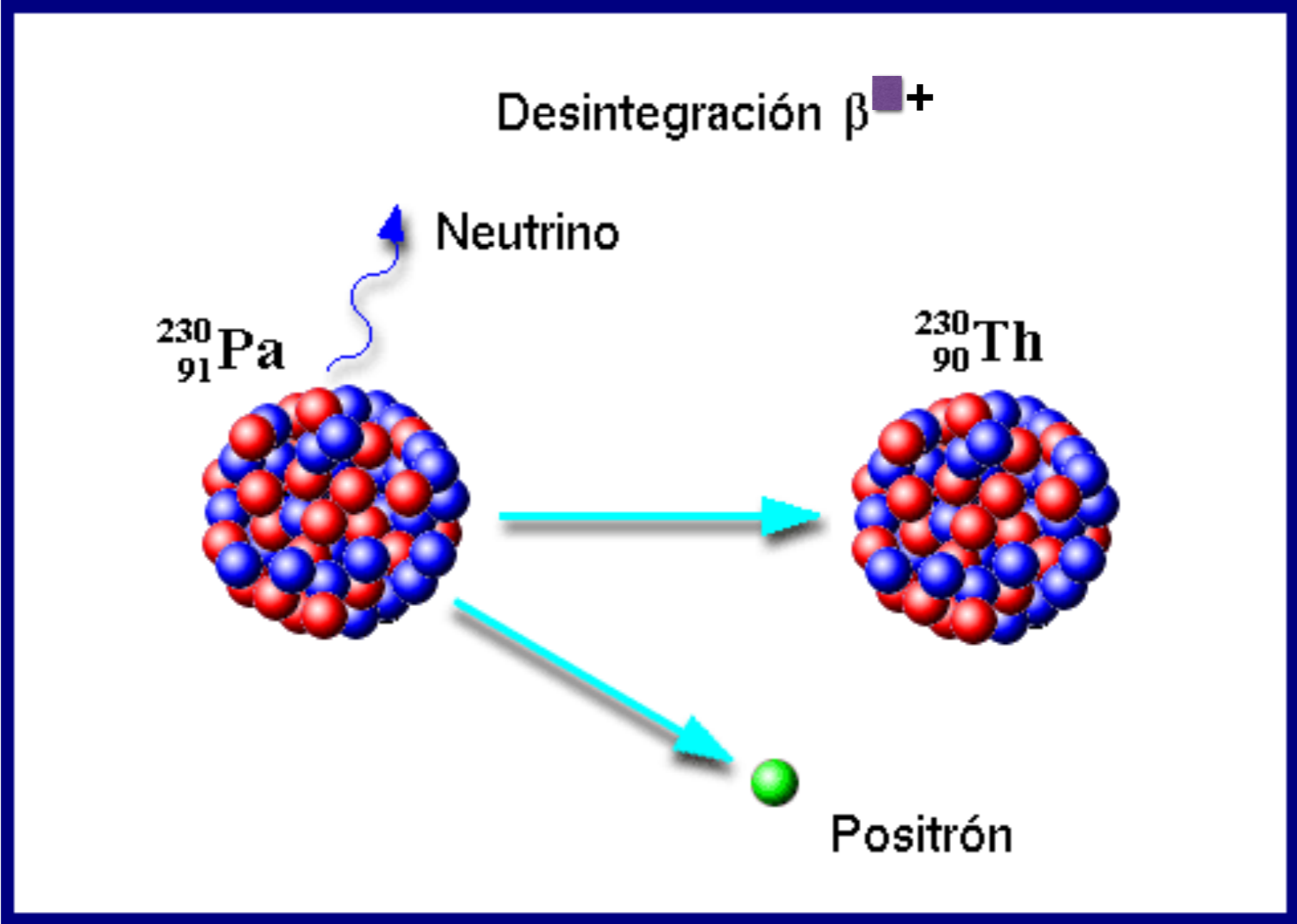


Mediada por la interacciones electromagnética y fuerte,  
procede por efecto túnel



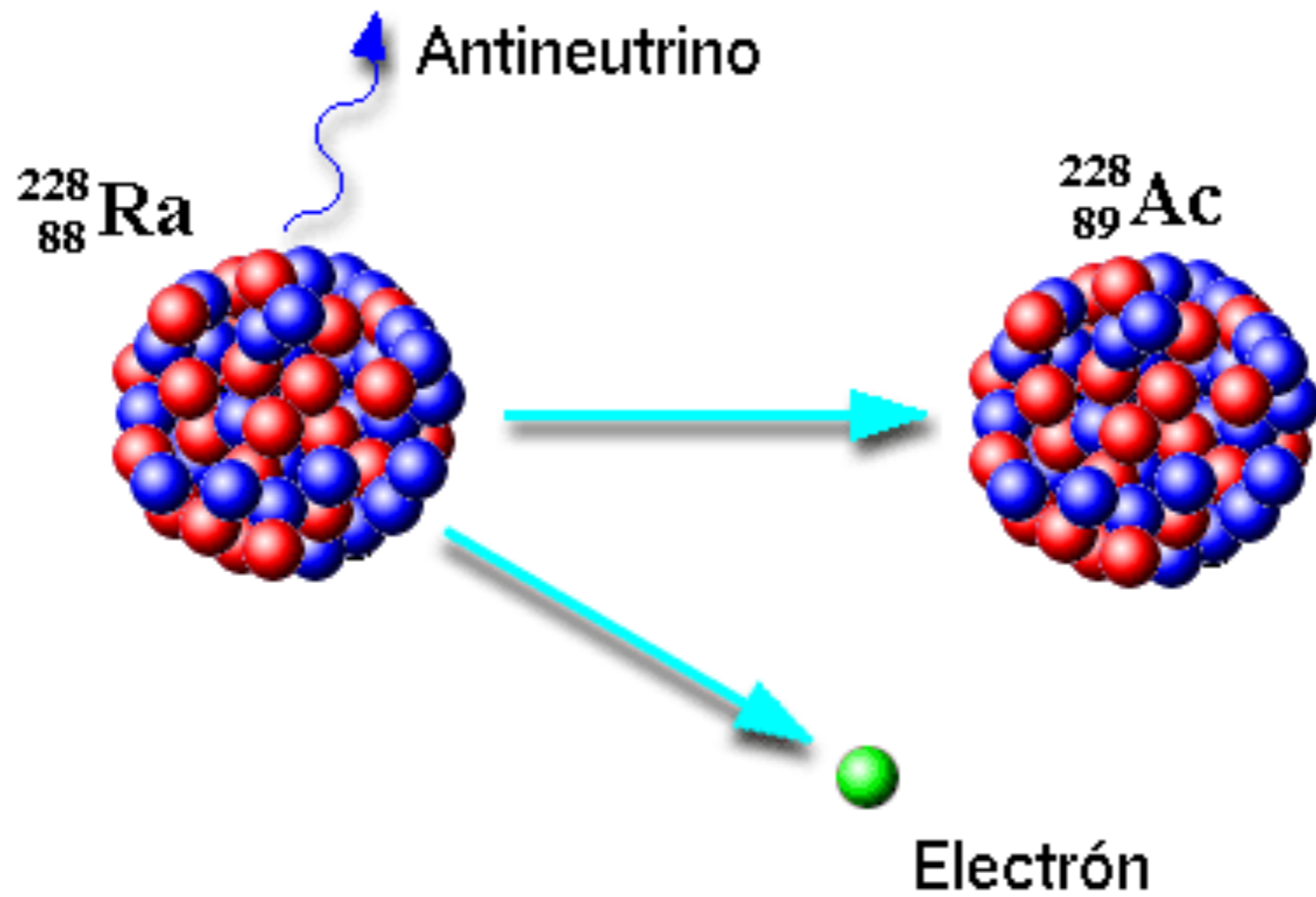
## Alpha Decay of a Uranium-238 nucleus





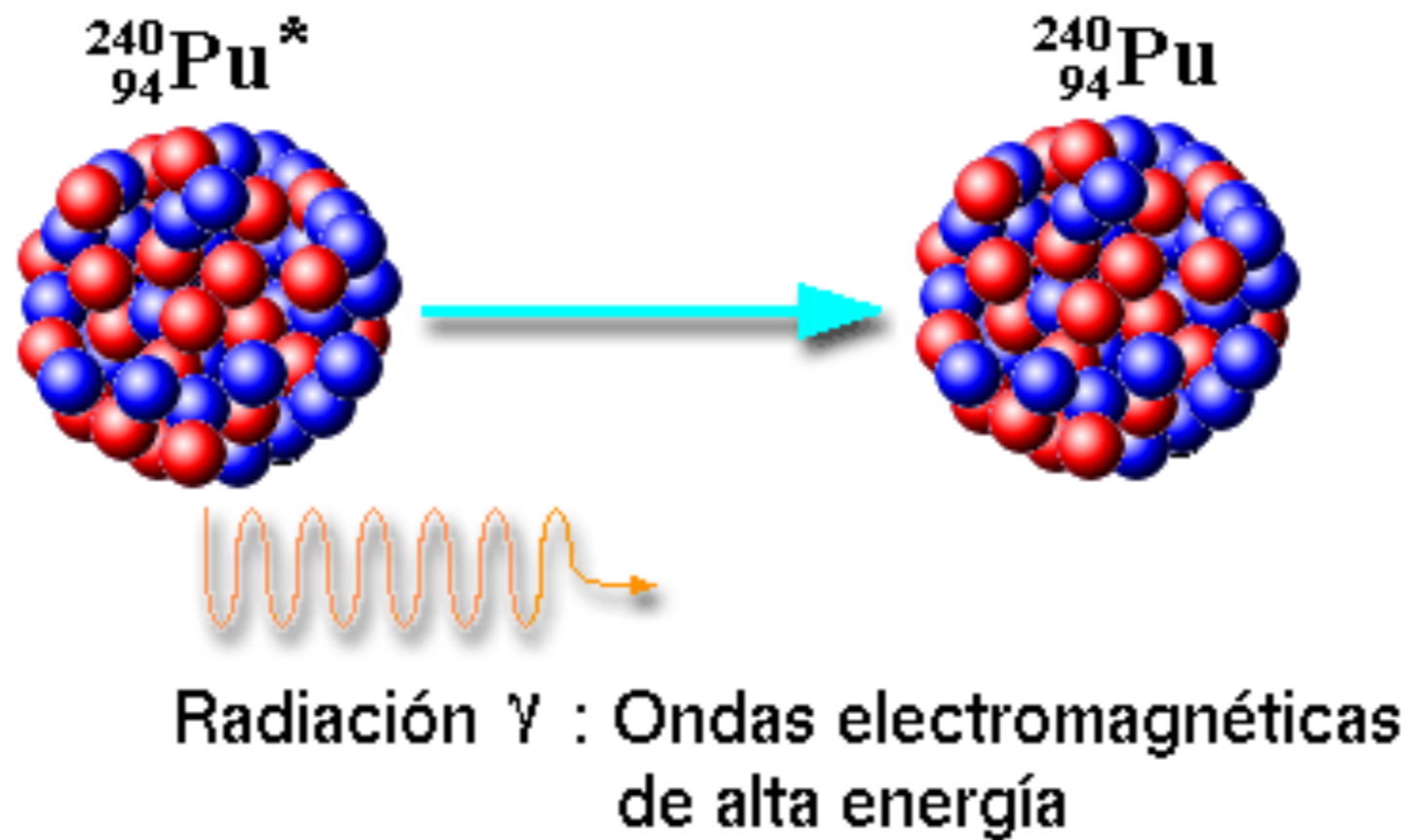
**Interacción Débil**

# Desintegración $\beta^-$

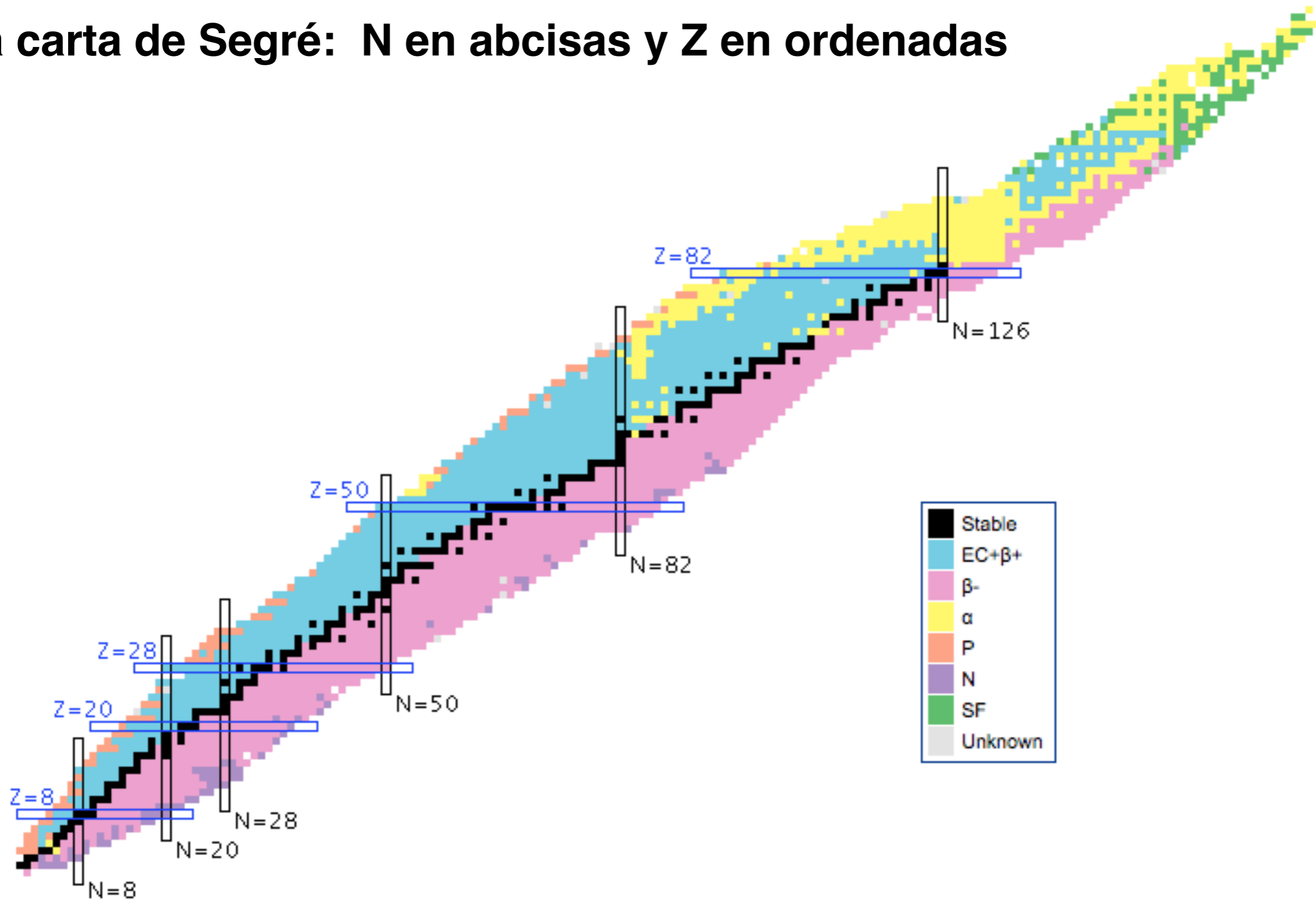




## Desintegración $\gamma$



# La carta de Segré: N en abcisas y Z en ordenadas



**Cada pixel representa un núcleo: en negro si es estable**

# La última fila de la tabla periódica

Periodic Table by Article Value

|       |      | Quality  |     |               |  |  |
|-------|------|----------|-----|---------------|--|--|
|       |      | High     | Mid | Low           |  |  |
| Views | High | Showcase |     | Blemish       |  |  |
|       | Mid  |          |     |               |  |  |
|       | Low  | Treasure |     | Under the Rug |  |  |

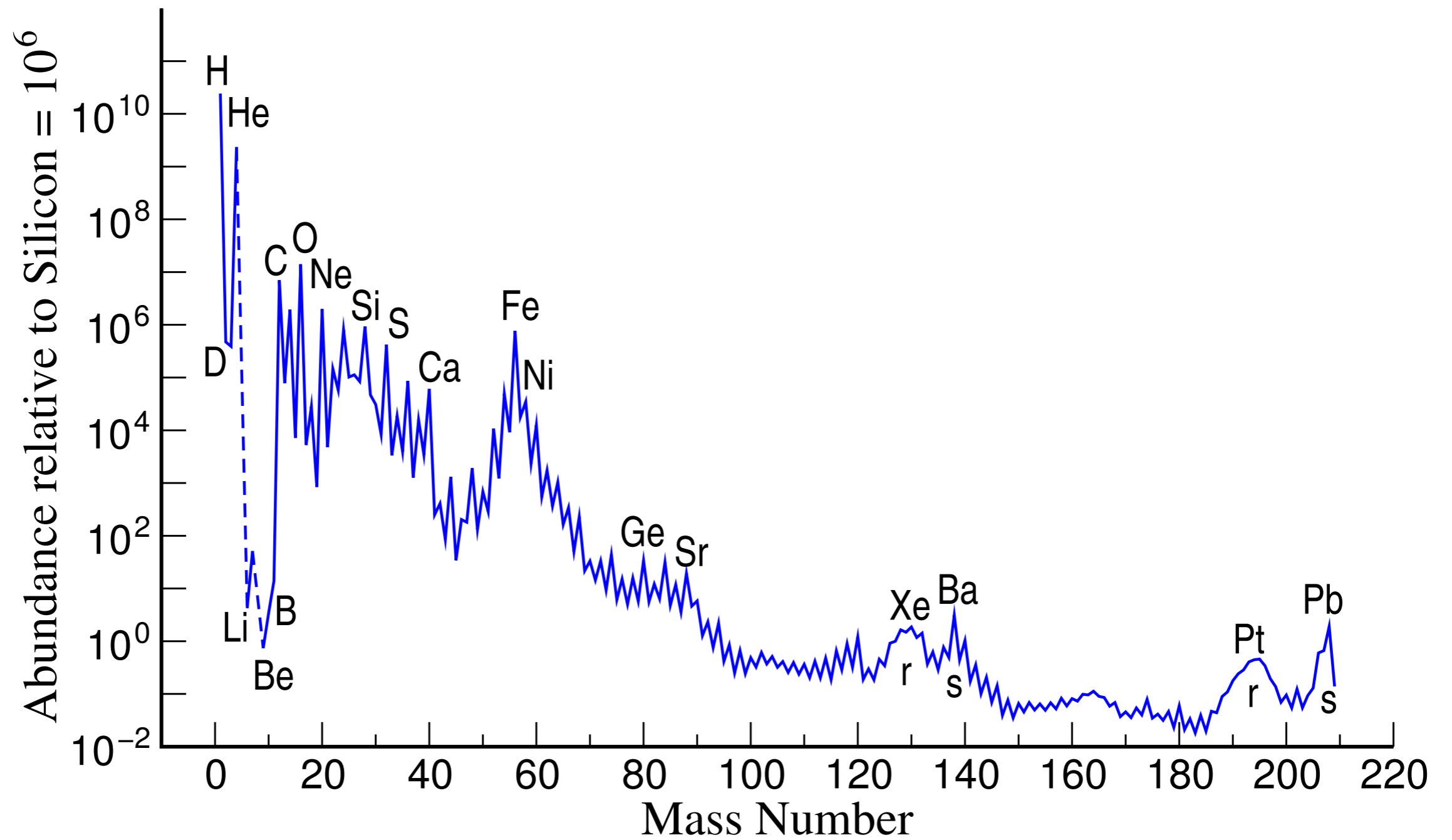
  

|                      |                       |                        |                            |                       |                         |                        |                       |                         |                           |                          |                          |                         |                          |                           |                          |                           |                          |                       |                   |                      |                   |
|----------------------|-----------------------|------------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| 1<br>H<br>Hydrogen   |                       |                        |                            |                       |                         |                        |                       |                         |                           |                          |                          |                         |                          |                           |                          |                           | 2<br>He<br>Helium        |                       |                   |                      |                   |
| 3<br>Li<br>Lithium   | 4<br>Be<br>Beryllium  |                        |                            |                       |                         |                        |                       |                         |                           |                          |                          |                         |                          |                           |                          | 5<br>B<br>Boron           | 6<br>C<br>Carbon         | 7<br>N<br>Nitrogen    | 8<br>O<br>Oxygen  | 9<br>F<br>Fluorine   | 10<br>Ne<br>Neon  |
| 11<br>Na<br>Sodium   | 12<br>Mg<br>Magnesium |                        |                            |                       |                         |                        |                       |                         |                           |                          |                          |                         |                          |                           |                          | 13<br>Al<br>Aluminum      | 14<br>Si<br>Silicon      | 15<br>P<br>Phosphorus | 16<br>S<br>Sulfur | 17<br>Cl<br>Chlorine | 18<br>Ar<br>Argon |
| 19<br>K<br>Potassium | 20<br>Ca<br>Calcium   | 21<br>Sc<br>Scandium   | 22<br>Ti<br>Titanium       | 23<br>V<br>Vanadium   | 24<br>Cr<br>Chromium    | 25<br>Mn<br>Manganese  | 26<br>Fe<br>Iron      | 27<br>Co<br>Cobalt      | 28<br>Ni<br>Nickel        | 29<br>Cu<br>Copper       | 30<br>Zn<br>Zinc         | 31<br>Ga<br>Gallium     | 32<br>Ge<br>Germanium    | 33<br>As<br>Arsenic       | 34<br>Se<br>Selenium     | 35<br>Br<br>Bromine       | 36<br>Kr<br>Krypton      |                       |                   |                      |                   |
| 37<br>Rb<br>Rubidium | 38<br>Sr<br>Strontium | 39<br>Y<br>Yttrium     | 40<br>Zr<br>Zirconium      | 41<br>Nb<br>Niobium   | 42<br>Mo<br>Molybdenum  | 43<br>Tc<br>Technetium | 44<br>Ru<br>Ruthenium | 45<br>Rh<br>Rhodium     | 46<br>Pd<br>Palladium     | 47<br>Ag<br>Silver       | 48<br>Cd<br>Cadmium      | 49<br>In<br>Indium      | 50<br>Sn<br>Tin          | 51<br>Sb<br>Antimony      | 52<br>Te<br>Tellurium    | 53<br>I<br>Iodine         | 54<br>Xe<br>Xenon        |                       |                   |                      |                   |
| 55<br>Cs<br>Cesium   | 56<br>Ba<br>Barium    | 57*<br>La<br>Lanthanum | 72<br>Hf<br>Hafnium        | 73<br>Ta<br>Tantalum  | 74<br>W<br>Tungsten     | 75<br>Re<br>Rhenium    | 76<br>Os<br>Osmium    | 77<br>Ir<br>Iridium     | 78<br>Pt<br>Platinum      | 79<br>Au<br>Gold         | 80<br>Hg<br>Mercury      | 81<br>Tl<br>Thallium    | 82<br>Pb<br>Lead         | 83<br>Bi<br>Bismuth       | 84<br>Po<br>Polonium     | 85<br>At<br>Astatine      | 86<br>Rn<br>Radon        |                       |                   |                      |                   |
| 87<br>Fr<br>Francium | 88<br>Ra<br>Radium    | 89**<br>Ac<br>Actinium | 104<br>Rf<br>Rutherfordium | 105<br>Db<br>Dubnium  | 106<br>Sg<br>Seaborgium | 107<br>Bh<br>Bohrium   | 108<br>Hs<br>Hassium  | 109<br>Mt<br>Meitnerium | 110<br>Ds<br>Darmstadtium | 111<br>Rg<br>Roentgenium | 112<br>Cn<br>Copernicium | 113<br>Uut<br>Ununtrium | 114<br>Fl<br>Flerovium   | 115<br>Uup<br>Ununpentium | 116<br>Lv<br>Livermorium | 117<br>Uus<br>Ununseptium | 118<br>Uuo<br>Ununoctium |                       |                   |                      |                   |
|                      |                       | 58<br>Ce<br>Cerium     | 59<br>Pr<br>Praseodymium   | 60<br>Nd<br>Neodymium | 61<br>Pm<br>Promethium  | 62<br>Sm<br>Samarium   | 63<br>Eu<br>Europium  | 64<br>Gd<br>Gadolinium  | 65<br>Tb<br>Terbium       | 66<br>Dy<br>Dysprosium   | 67<br>Ho<br>Holmium      | 68<br>Er<br>Erbium      | 69<br>Tm<br>Thulium      | 70<br>Yb<br>Ytterbium     | 71<br>Lu<br>Lutetium     |                           |                          |                       |                   |                      |                   |
|                      |                       | 90<br>Th<br>Thorium    | 91<br>Pa<br>Protactinium   | 92<br>U<br>Uranium    | 93<br>Np<br>Neptunium   | 94<br>Pu<br>Plutonium  | 95<br>Am<br>Americium | 96<br>Cm<br>Curium      | 97<br>Bk<br>Berkelium     | 98<br>Cf<br>Californium  | 99<br>Es<br>Einsteinium  | 100<br>Fm<br>Fermium    | 101<br>Md<br>Mendelevium | 102<br>No<br>Nobelium     | 103<br>Lr<br>Lawrencium  |                           |                          |                       |                   |                      |                   |

Z=113, (Nh) Nihonium, Z=114, (Fl) Flerovium, Z=115, (Mc) Moscovium, Z=117, (Ts) Tennessine, Z=118. (Og) Oganesson.

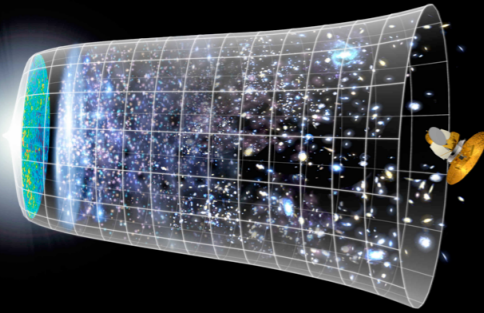
Para reparar el entuerto hecho a Lisa Meitner, se dio su nombre al elemento con Z=109 (Mt) Meitnerium.

# La abundancia de los elementos en el Universo



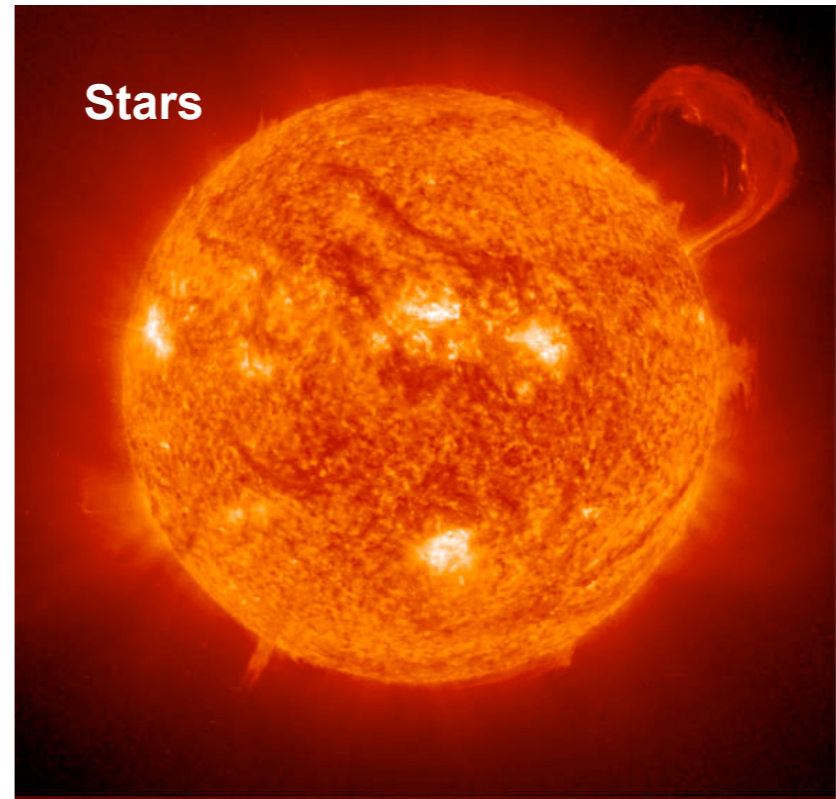


# Big Bang

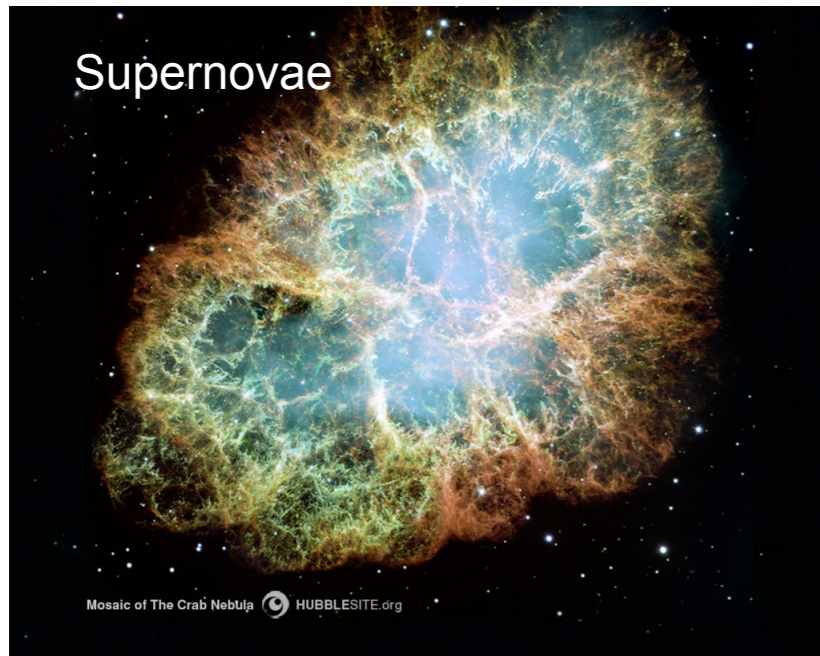



NASA/WMAP Science Team

# Stars

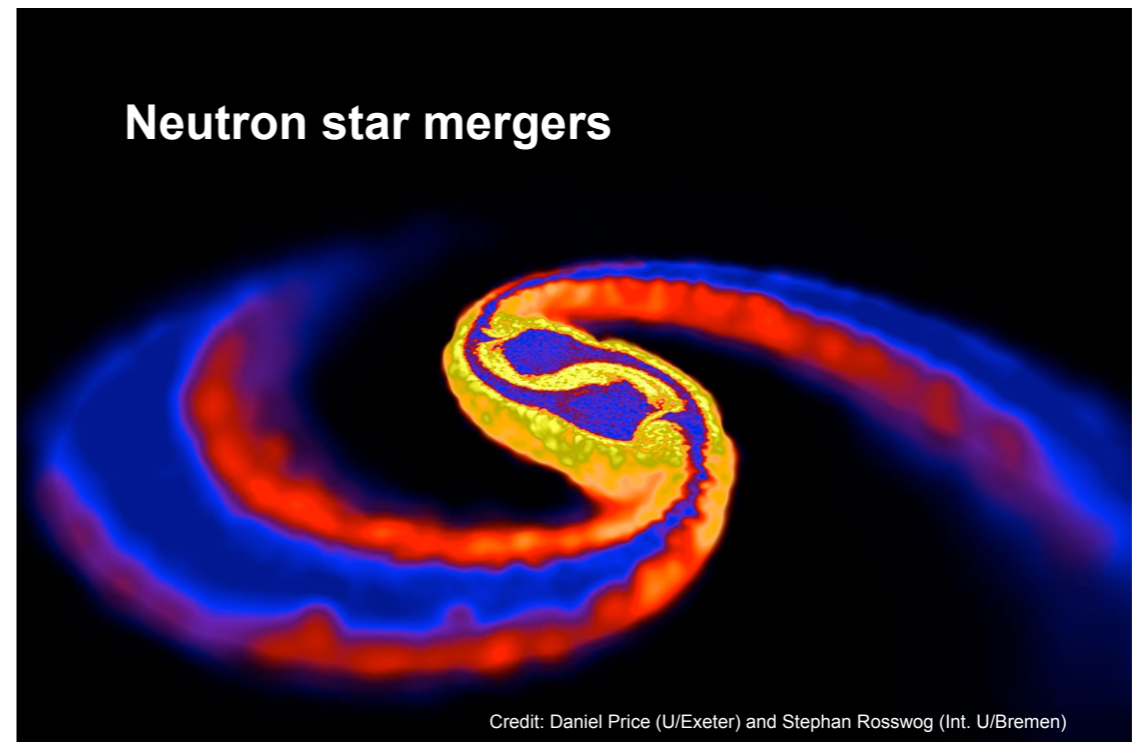


# Supernovae



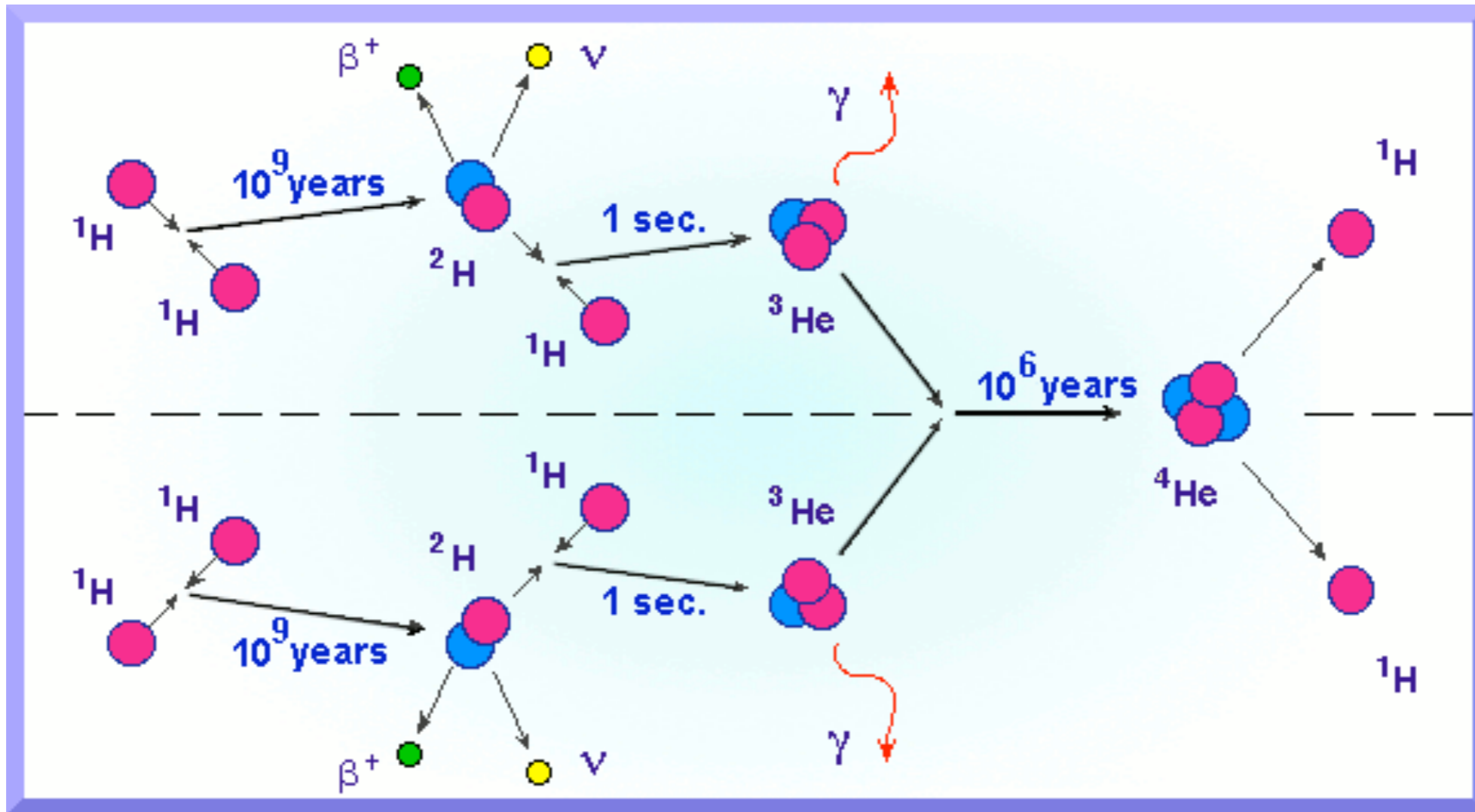
Mosaic of The Crab Nebula  HUBBLESITE.org

# Neutron star mergers



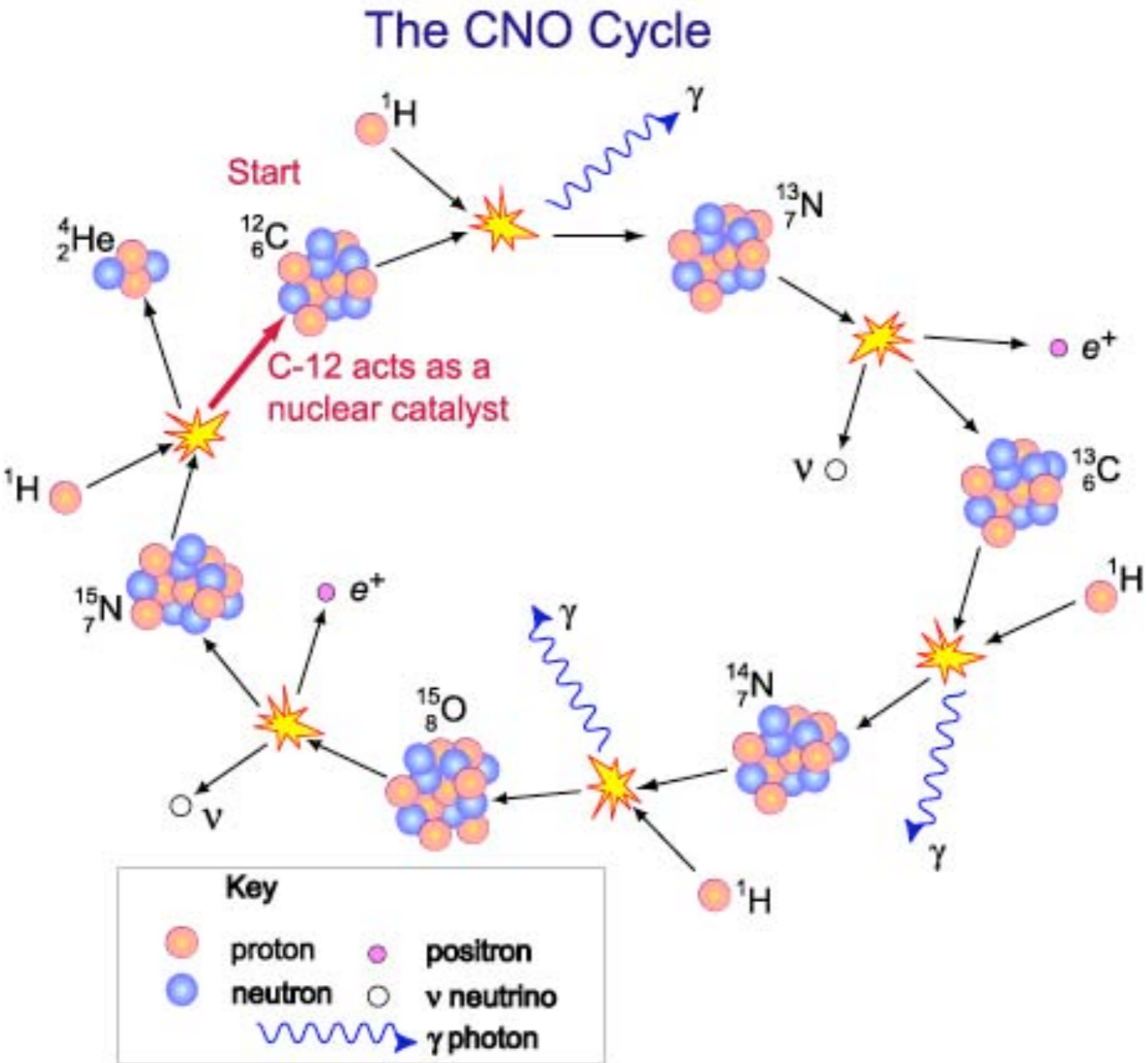
Credit: Daniel Price (U/Exeter) and Stephan Rosswog (Int. U/Bremen)

# El ciclo p-p en las estrellas



O cómo nos calienta el Sol

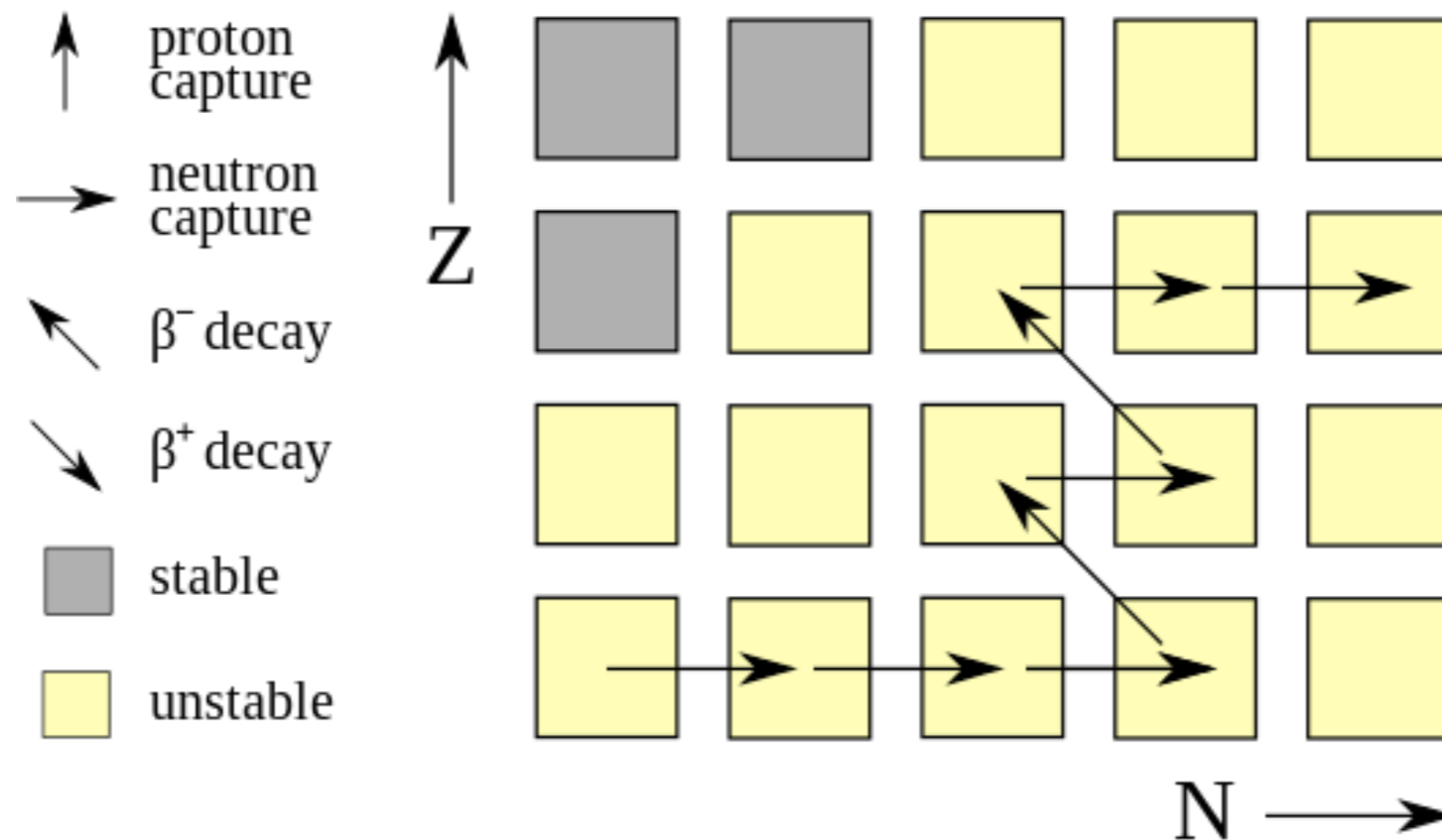
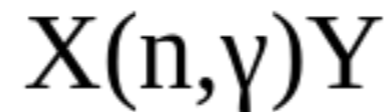
# El ciclo CNO





**El proceso r produce los elementos pesados, incluidos los responsables de la radiactividad natural. Todavía no está claro en que entorno astrofísico se produce**

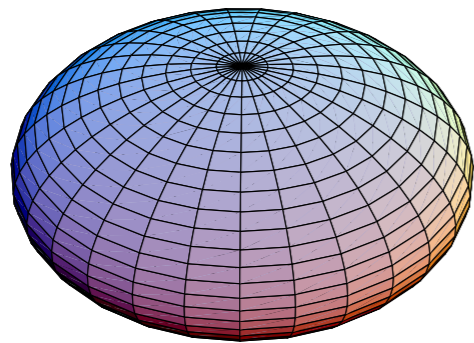
r-process  
rapid neutron captures



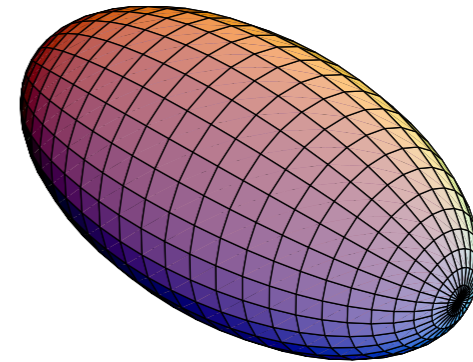
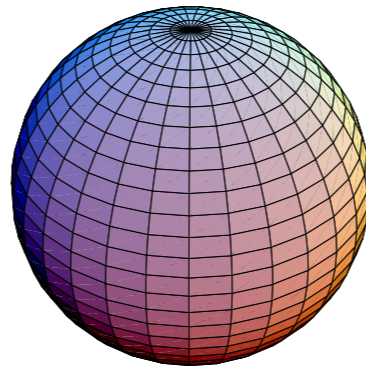
synthesis of neutron-rich nuclei

$A > 60$

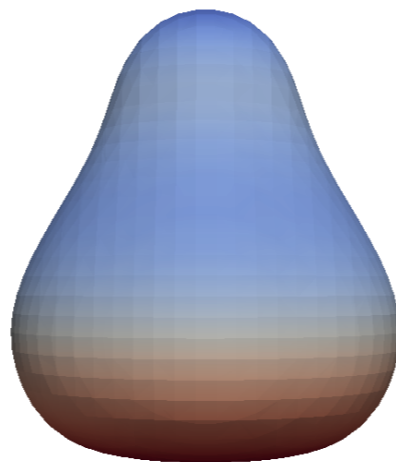
# Formas nucleares y ruptura espontánea de la simetría rotacional



**Achatado (Oblate)**

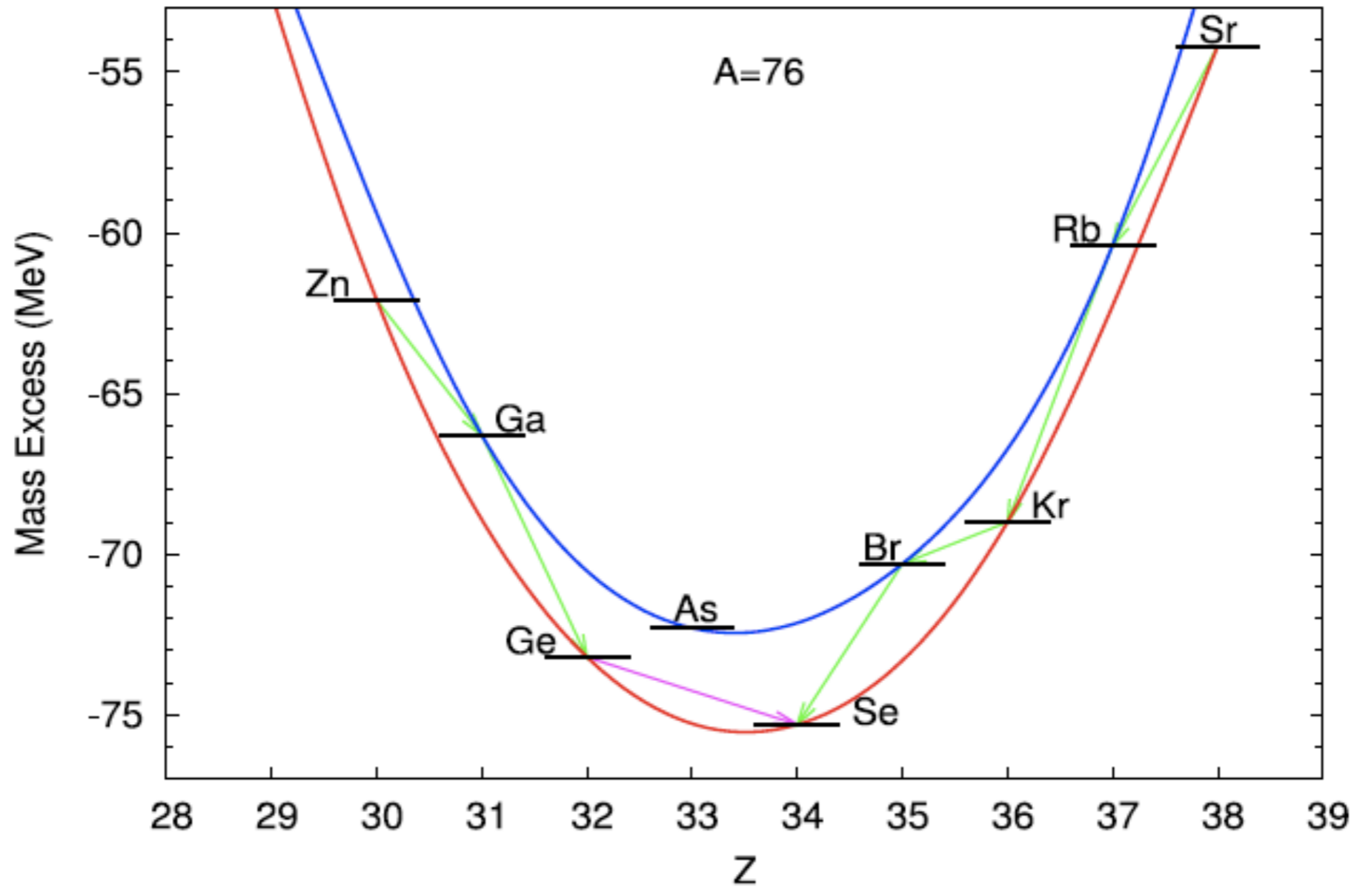


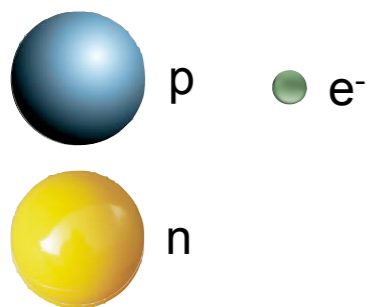
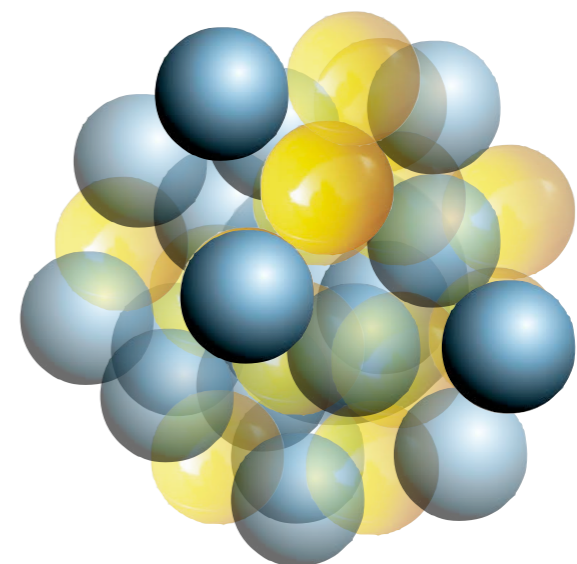
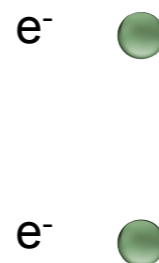
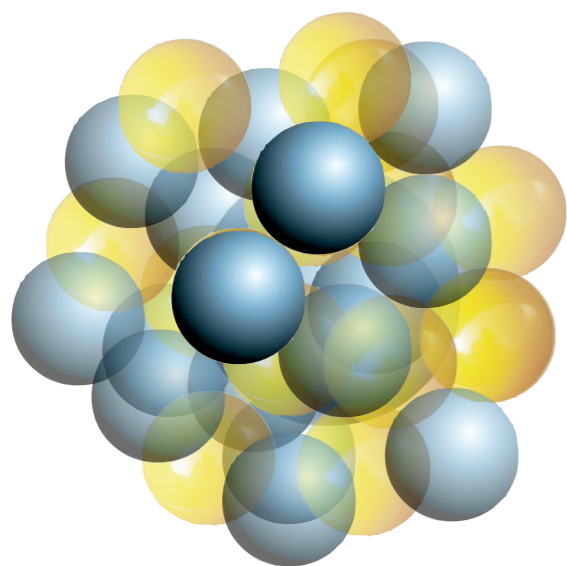
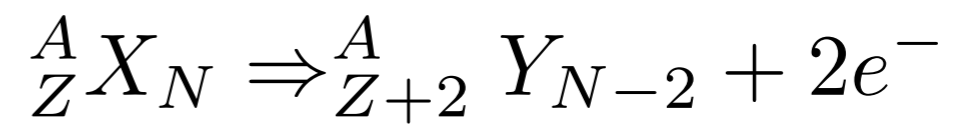
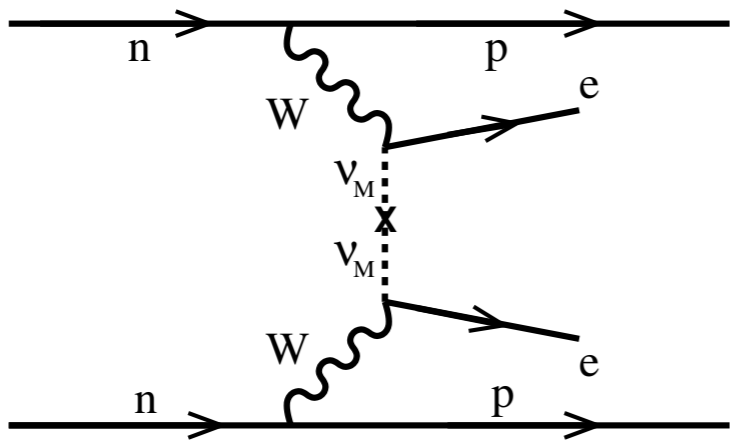
**Alargado (Prolate)**



**O incluso con forma de pera !**

# Desintegración beta doble





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

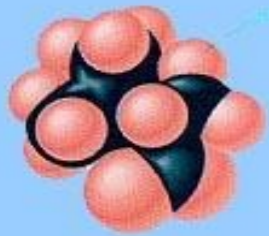
**La luna, que no sirve para nada  
salvo mover el mar**

*Carlos Piera*

*Religio y otros poemas*



$10^{-9}$  m



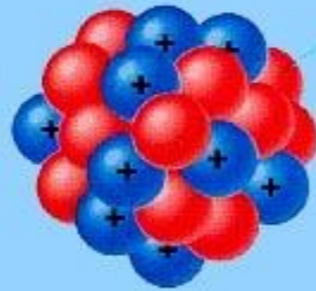
Molécula

$10^{-10}$  m



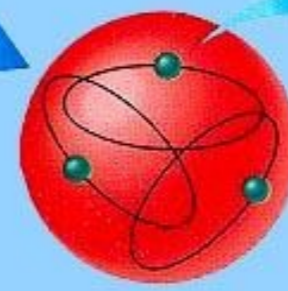
Àtomo

$10^{-15}$  m



Núcleo

$10^{-16}$  m



Protón o Neutrón

$10^{-18}$  m



Quark

