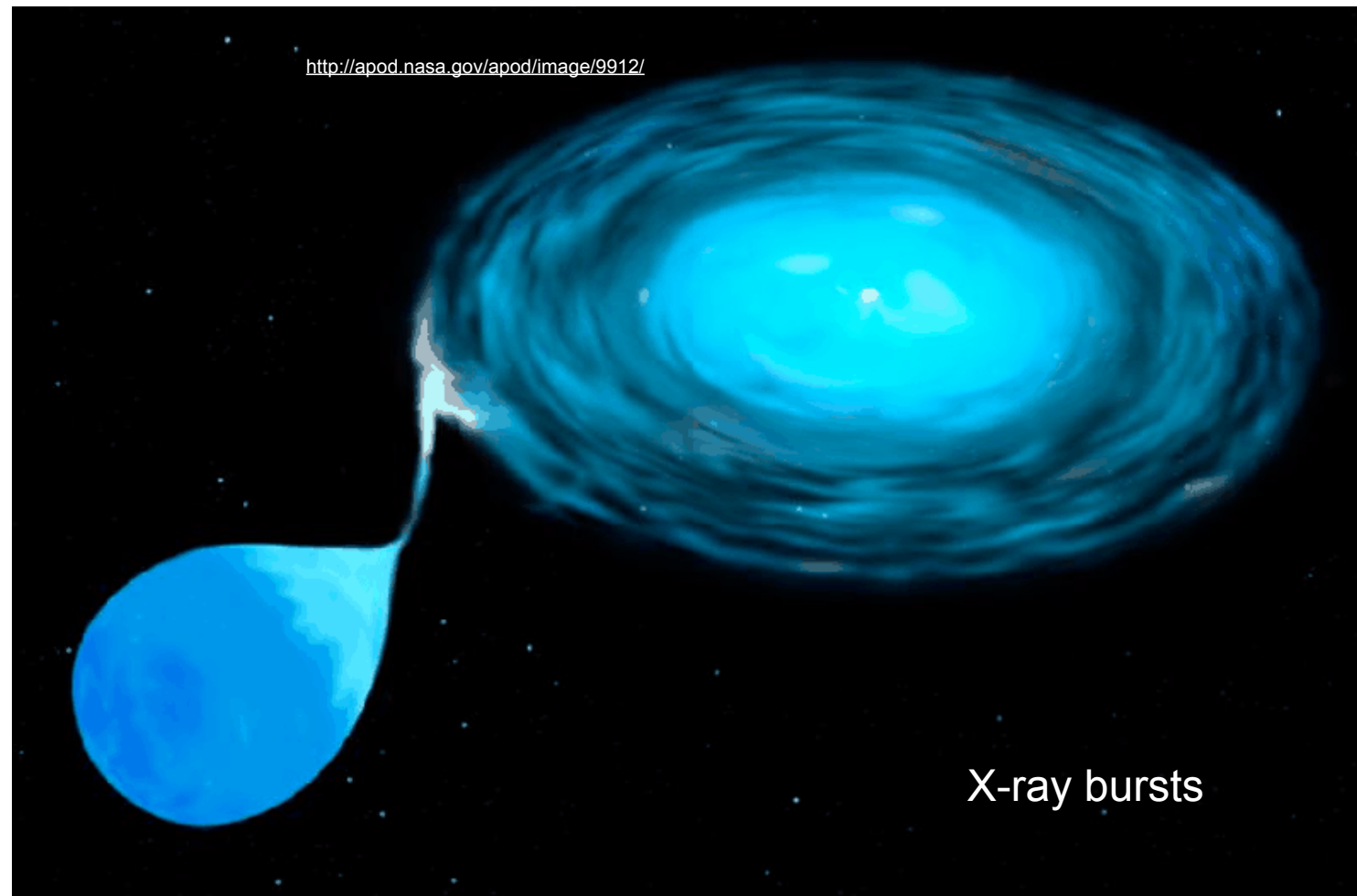


La Radioactividad y la Geología; Un viaje de ida y vuelta

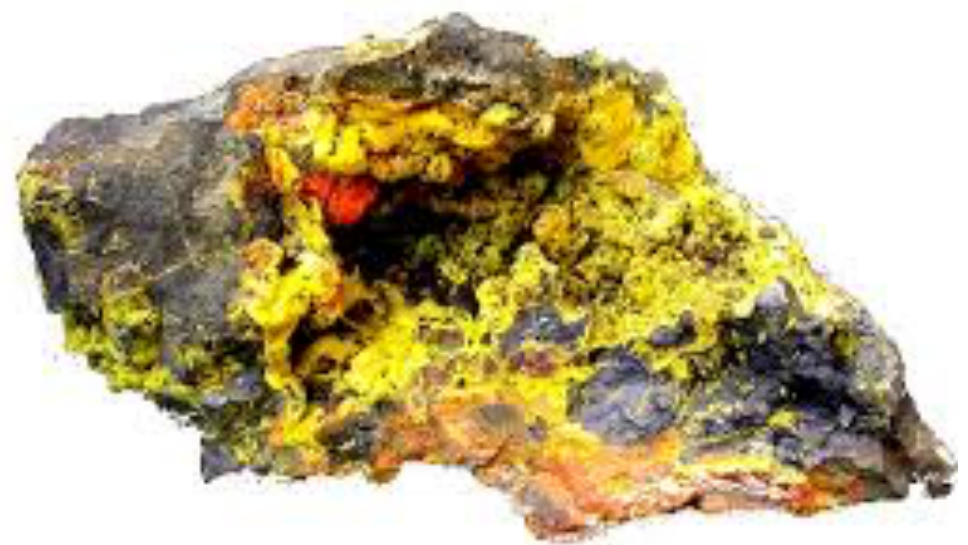


GEOSSEN Madrid, Mayo de 2025

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.**



Thomson



En 1789 y 1828 se descubren dos nuevos elementos químicos: El Uranio ($Z=92$) y el Torio ($Z=90$). Sus minerales (Uranitita, Pechblenda, Torita, Monacita, etc) no pasan de ser una curiosidad y se usan únicamente en la industria cerámica.

Pasará casi un siglo hasta que Becquerel y los Curie descubran sus asombrosas propiedades que anticipan la revolución cuántica

Becquerel, en sus investigaciones sobre la fluorescencia, estudiaba los minerales de Uranio y Torio que se encuentran en la naturaleza

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

¿En qué consiste la radioactividad ?

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 muy peligrosa como veremos a continuación).

RACHEL N° 1

POUDRE
THO-RADIA

A BASE DE
RADIUM & DE THORIUM
Selon la formule du

D^r ALFRED CURIE
PRÉPARÉE PAR
A. MOUSSALLI, Docteur en Pharmacie

DÉPOT GÉNÉRAL : SECOR
147, AVE 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 I.
MAURESQUEL



Extra-Fine,
adhérente
et mate

POUDRE
THO-RADIA

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

The advertisement features a woman's face with blonde hair, looking upwards. To the right of her face are two cylindrical tins of Poudre Tho-Radia. The background is a deep blue with a subtle pattern. The text is in a mix of white and orange colors.

AGUA RADIUM

A mais Radio activa de Portugal
Uma das mais radioactivas do mundo

*Estas aguas actuam quer junto das fontes, quer longe delas. (Pala-
vras do Prof. Dr. Armando Narciso).*

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

Reguladora da pressão arterial, evitando o perigo das apoplexias.

Aconchegada com effeito no arthritismo e em outros defeitos da nutrição.

Nas diabetes, elimina o açúcar das urinas.

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

Um remédio eficaz contra reumatismo e gota.

A grande superioridade da AGUA RADIUM, é consistir,
além da sua emissão de Rádio, de Sais de Rádio em dissolução «contingem
que nenhuma outra possui». (Relatório do Prof. Karl von Noorden).

Devido aos Sais de Rádio em dissolução que contém, conserva per-
fectamente todo o seu valor. (XIV.º Congresso Internacional de Hidro-
logia, Climatologia e Geologia Médica—Toulouse (França) 1933).

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, Litúrica, Radioactiva.

Manantial **El Bullidor**

(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.

Pídase en Hoteles y Restaurants. Venta en todas las farmacias.

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.

Pronto se concluyó que los rayos alfa se parecían al ión 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?

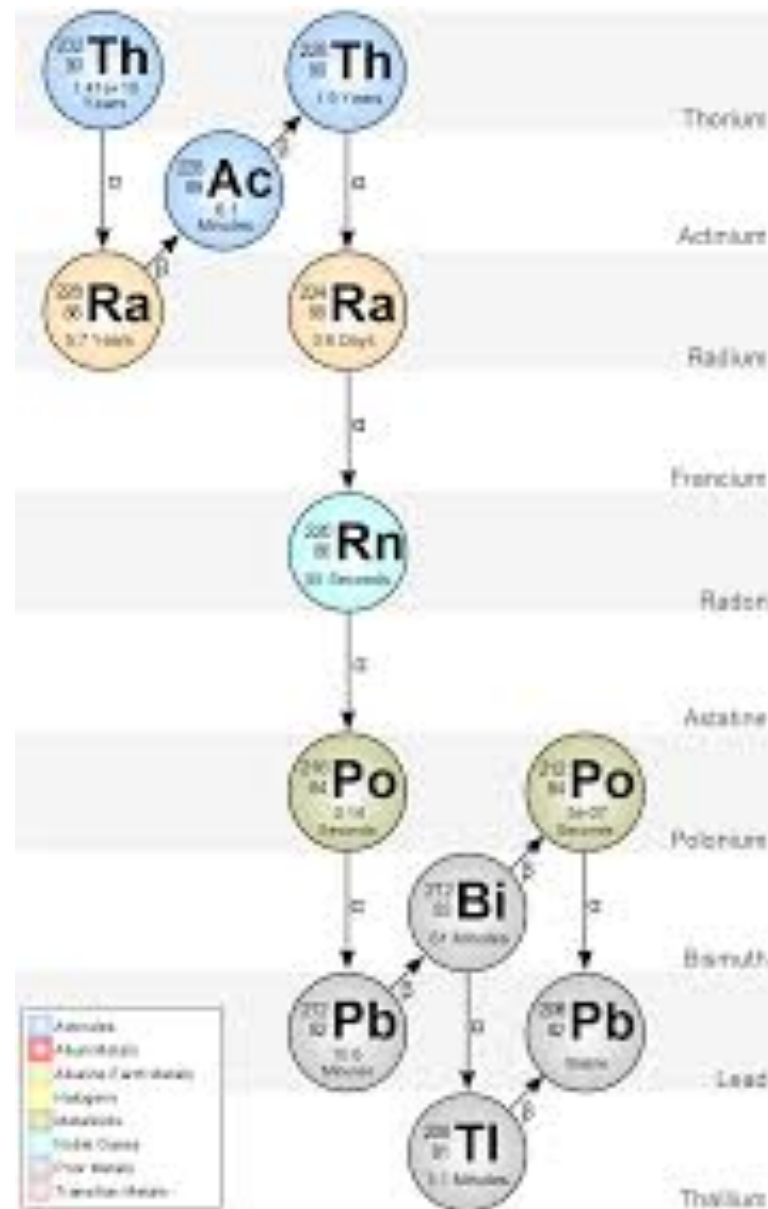
Conviene recordar que las únicas partículas “elementales” conocidas en ese momento eran el electrón y el ión H^+ (el protón).

Simultáneamente 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 radioactividad), pero también el Polonio, el Radón y varios otros con vidas medias (*) muy cortas comparadas con las de sus progenitores el Uranio-238 y el Torio-232 que son de $4.5 \cdot 10^9$ y $14.0 \cdot 10^9$ años respectivamente.

(*) 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 siéndo la vida media



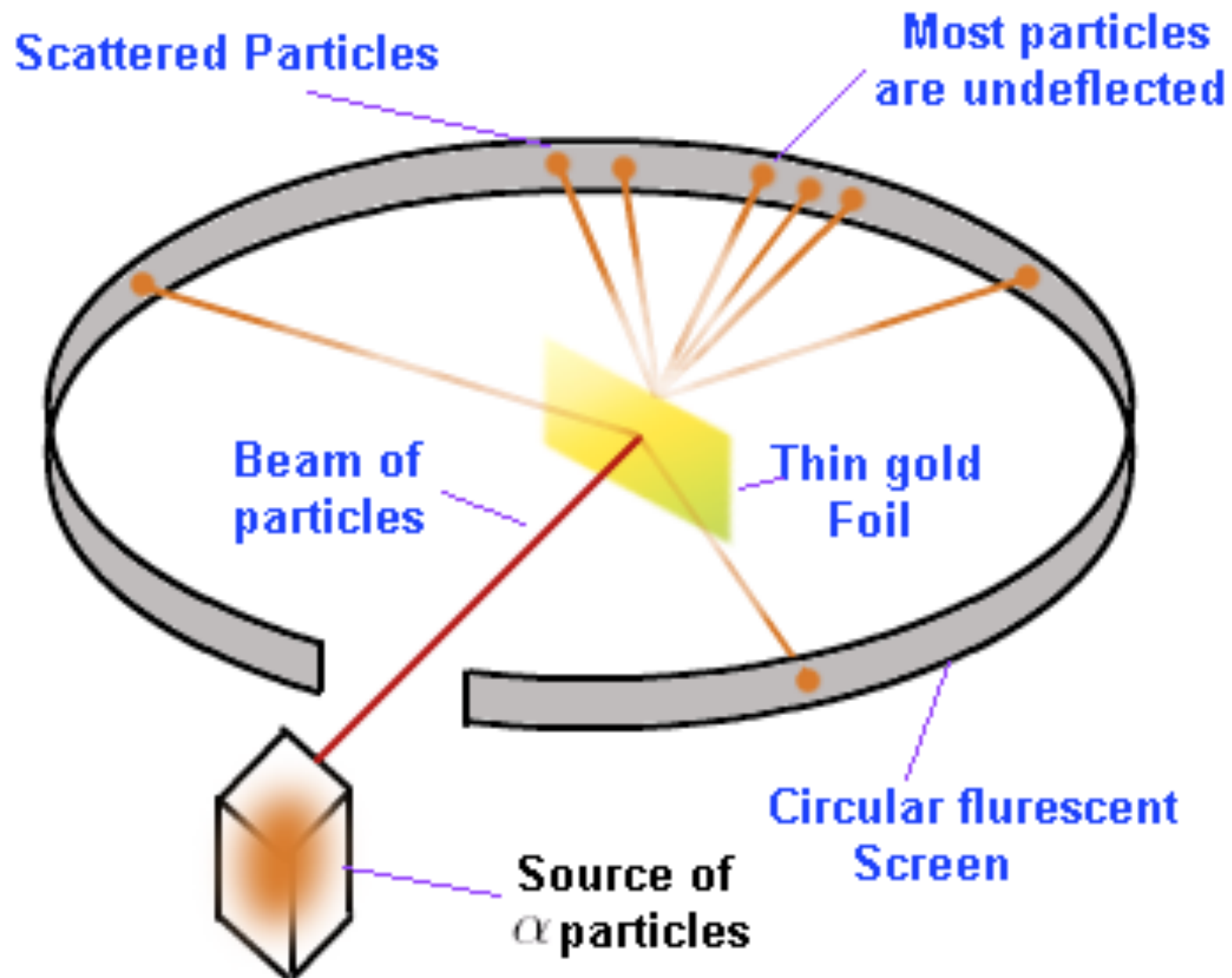
Desintegración del ^{232}Th , vida media $= 1.4 \cdot 10^{10}$ años, la del ^{238}U es $4.5 \cdot 10^9$ años y la del ^{235}U , $0.7 \cdot 10^9$ años.

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.

El experimento de Rutherford, Marsden y Geiger



Rutherford utilizó los rayos alfa (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, luego hacían falta A protones y $A-Z$ electrones

La interacción electromagnética entre los protones es repulsiva, entonces, porqué se mantienen unidos? La presencia de $A-Z$ electrones no solucionaba el problema.

La solución (parcial) tardó veinte años en ser hallada al descubrirse una nueva partícula, el neutrón (neutro) con una masa sólo ligeramente mayor que la del protón.

Chadwick (inspirado por los resultados de Frédéric Joliot e Irene Curie sobre la reacción $\alpha + \text{Be-9} \rightarrow \text{C-12} + \text{X}$) 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 $A-Z=N$ 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.

(*) 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~GeV.

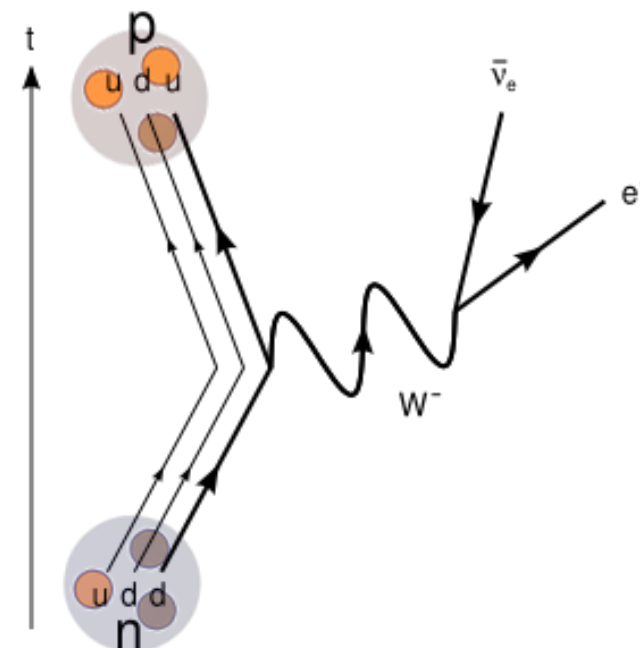
El neutrón, compuesto por un quark up y dos quarks down no es estable. Tiene una vida media de aproximadamente 10 minutos y se desintegra mediante la interacción débil, que transforma un quark down en uno up, un electrón y un antineutrino. O lo que es lo mismo, el neutrón se desintegra en un protón,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

El neutrino y la interacción nuclear débil

Para entender la desintegración beta hubo que proponer la existencia de una nueva partícula, neutra y sin masa pero de espín 1/2, el neutrino, y una nueva interacción, la nuclear débil, casi nada!

Salvadas las grandes leyes de conservación, el neutrino no ha dejado de deparar sorpresas (violación de la paridad, masa no nula (que no conocemos aún) oscilaciones, etc)

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.



$$E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$$

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

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. 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.

Motto; todo lo que no está prohibido está permitido.

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). Otras leyes de conservación son la de la carga eléctrica y la del momento angular total

De la estabilidad de la materia

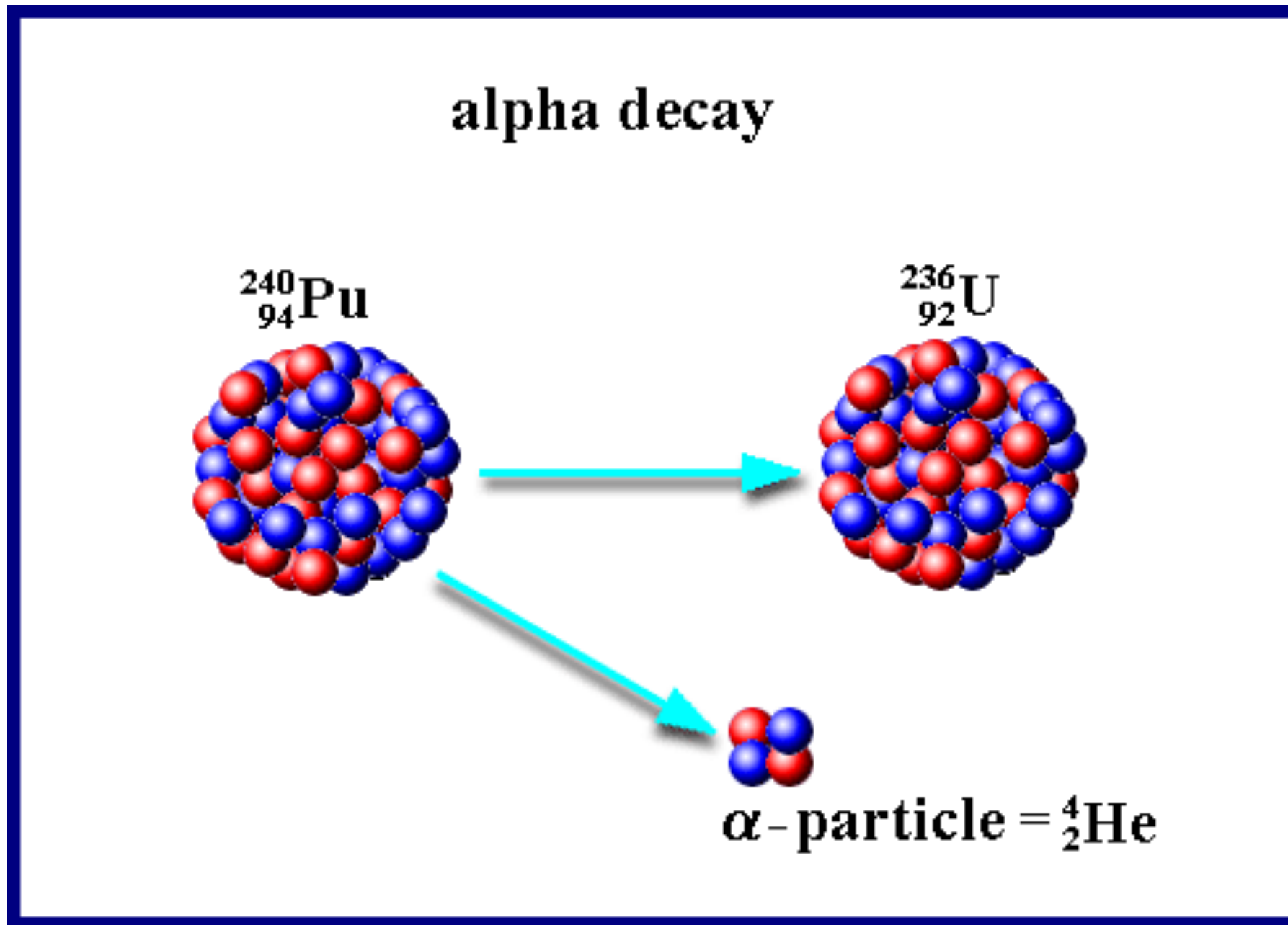
Los núcleos inestables (radiactivos), que son la mayoría, se desintegran beta cuando al cambiar un neutrón en un protón o viceversa el núcleo resultante tiene menor masa.

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

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.

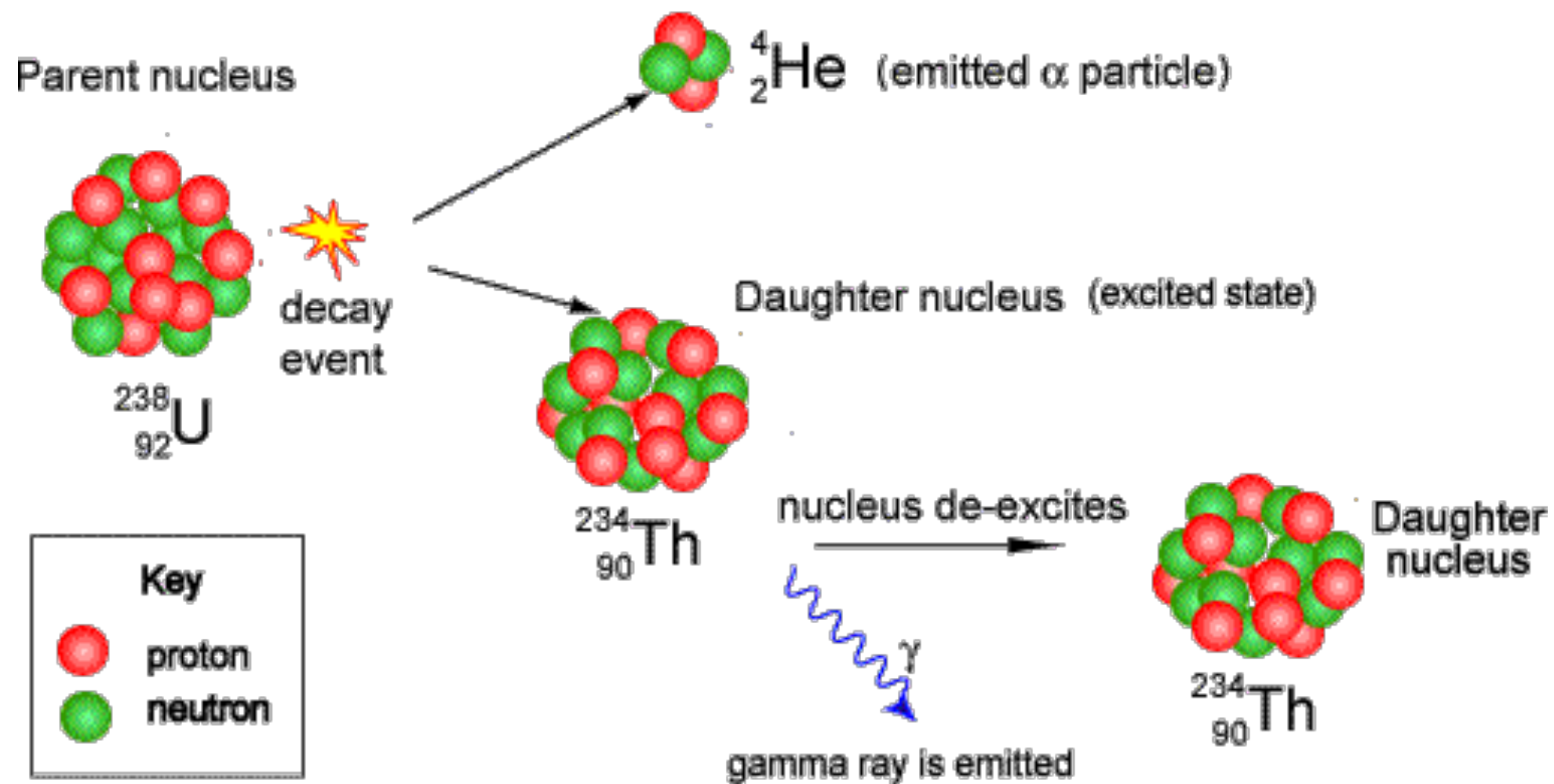
$$M(N,Z) > M(N-2,Z-2) + M(\text{alfa})$$

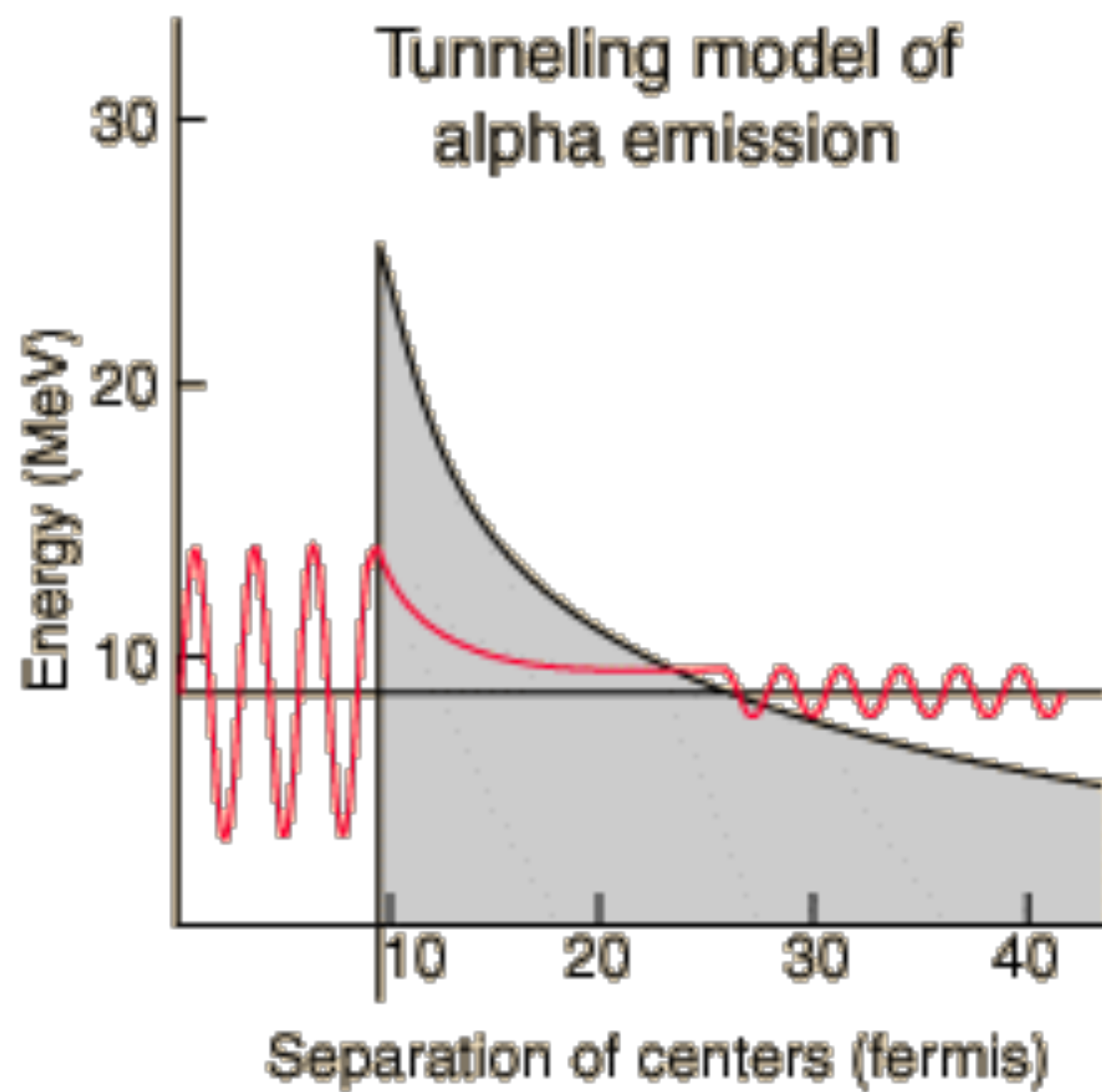
La radiactividad ilustrada

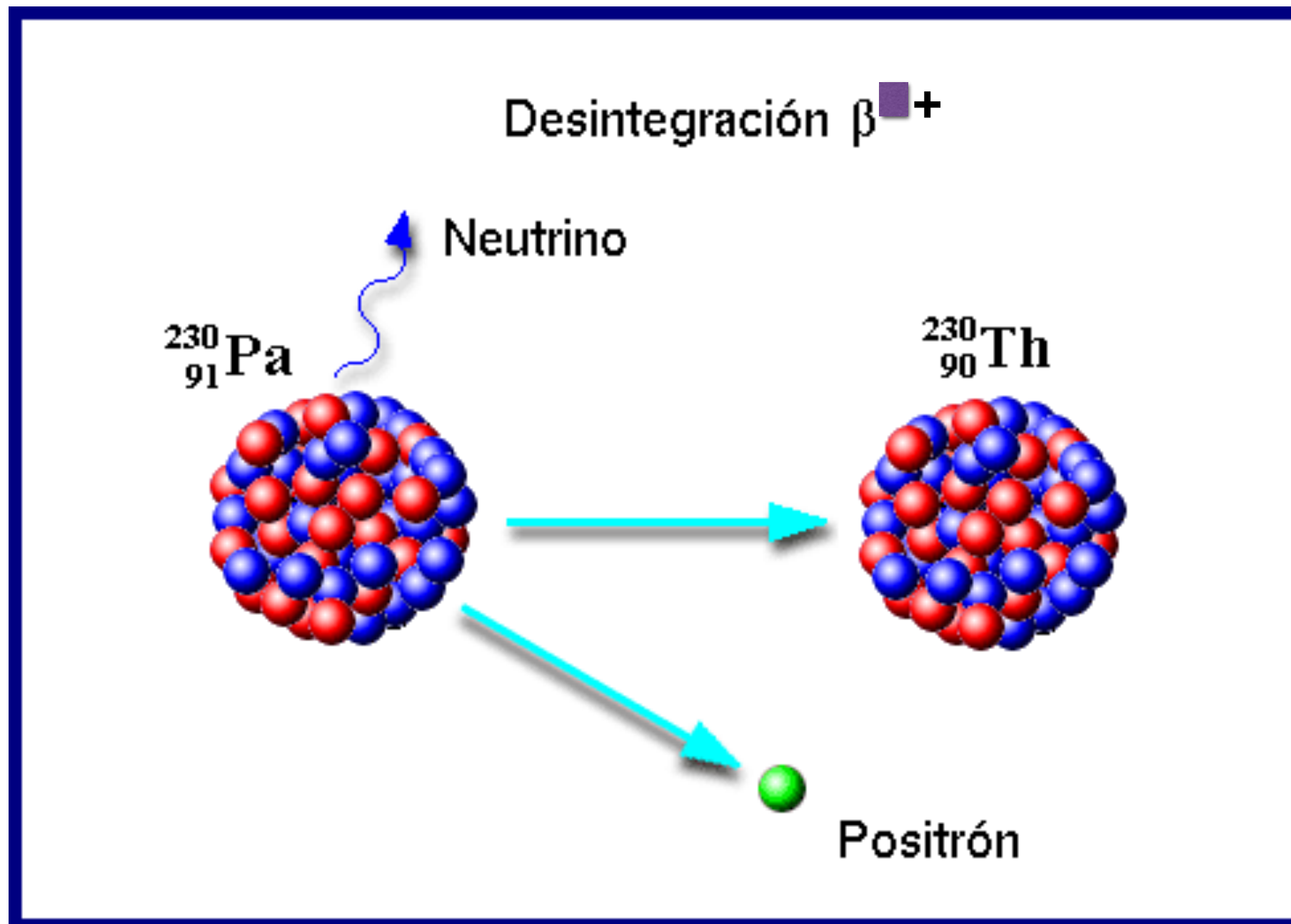


Mediada por la interacciones electromagnética y fuerte,
procede por efecto túnel

Alpha Decay of a Uranium-238 nucleus

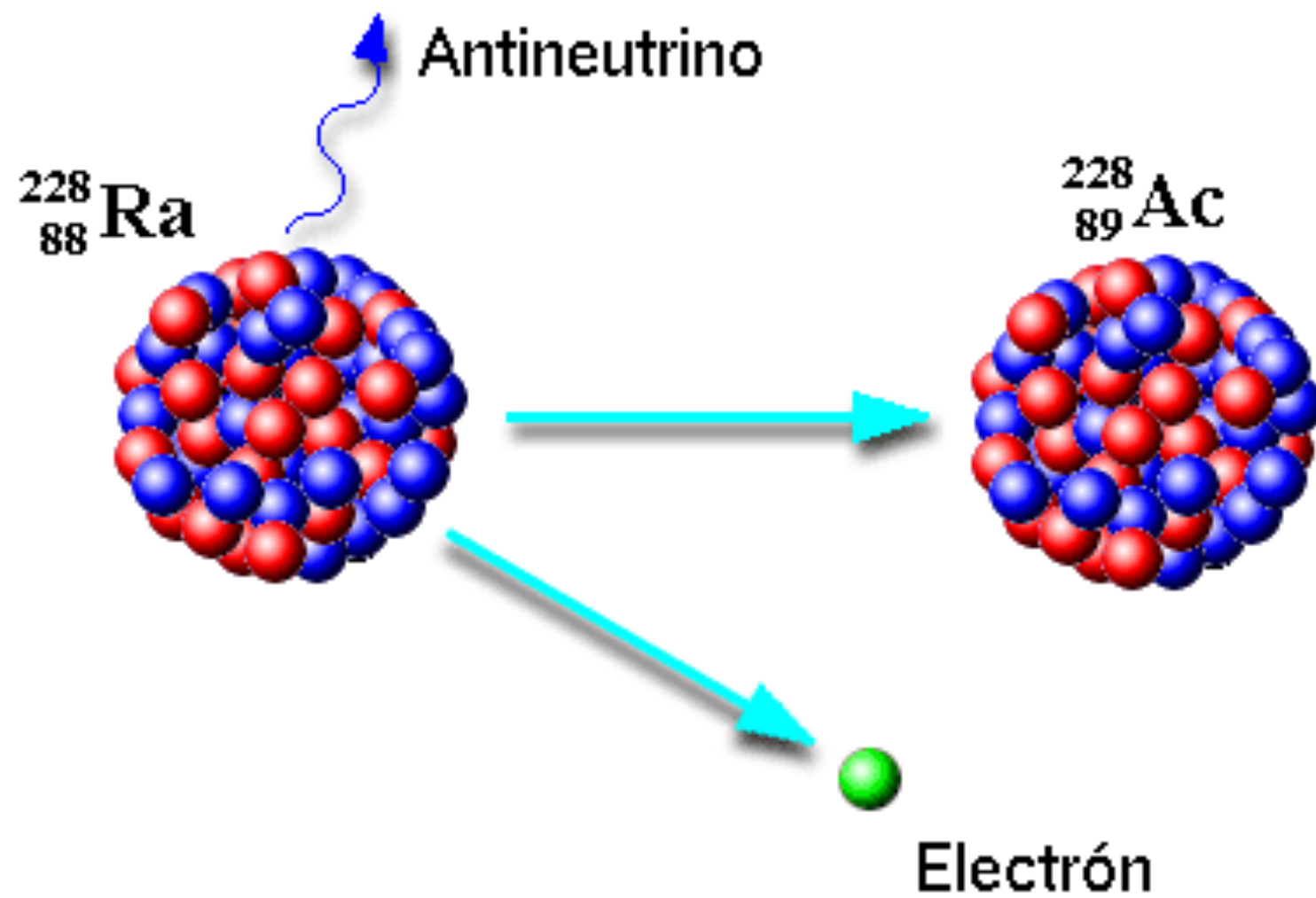




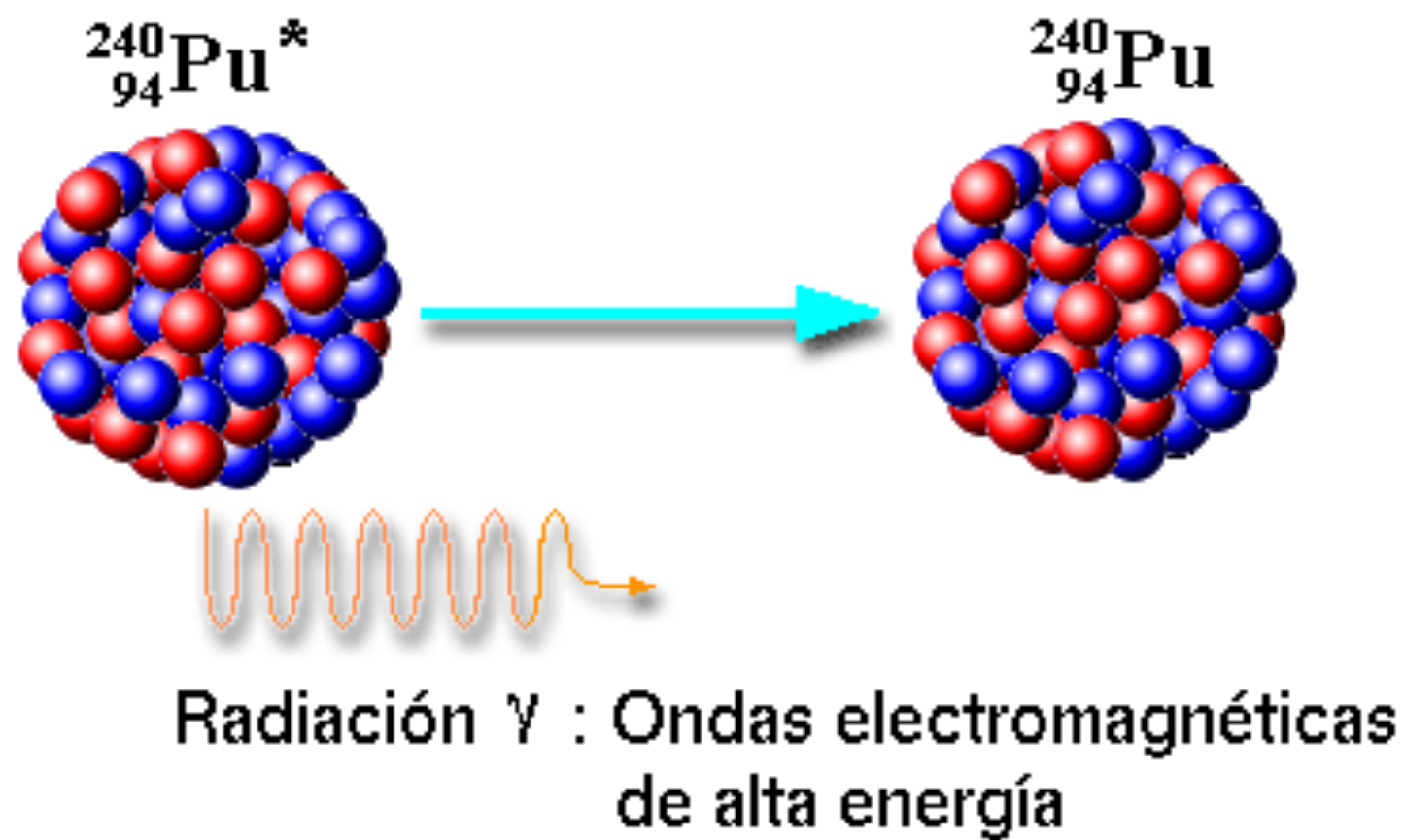


Interacción Débil

Desintegración β^-



Desintegración γ



La radioactividad natural contribuye al balance térmico del planeta tierra y permite la deriva de los continentes y el vulcanismo

A día de hoy, la mitad del flujo de calor de la tierra tiene ese origen. Y se puede medir observando los geoneutrinos

nature
geoscience

ARTICLES

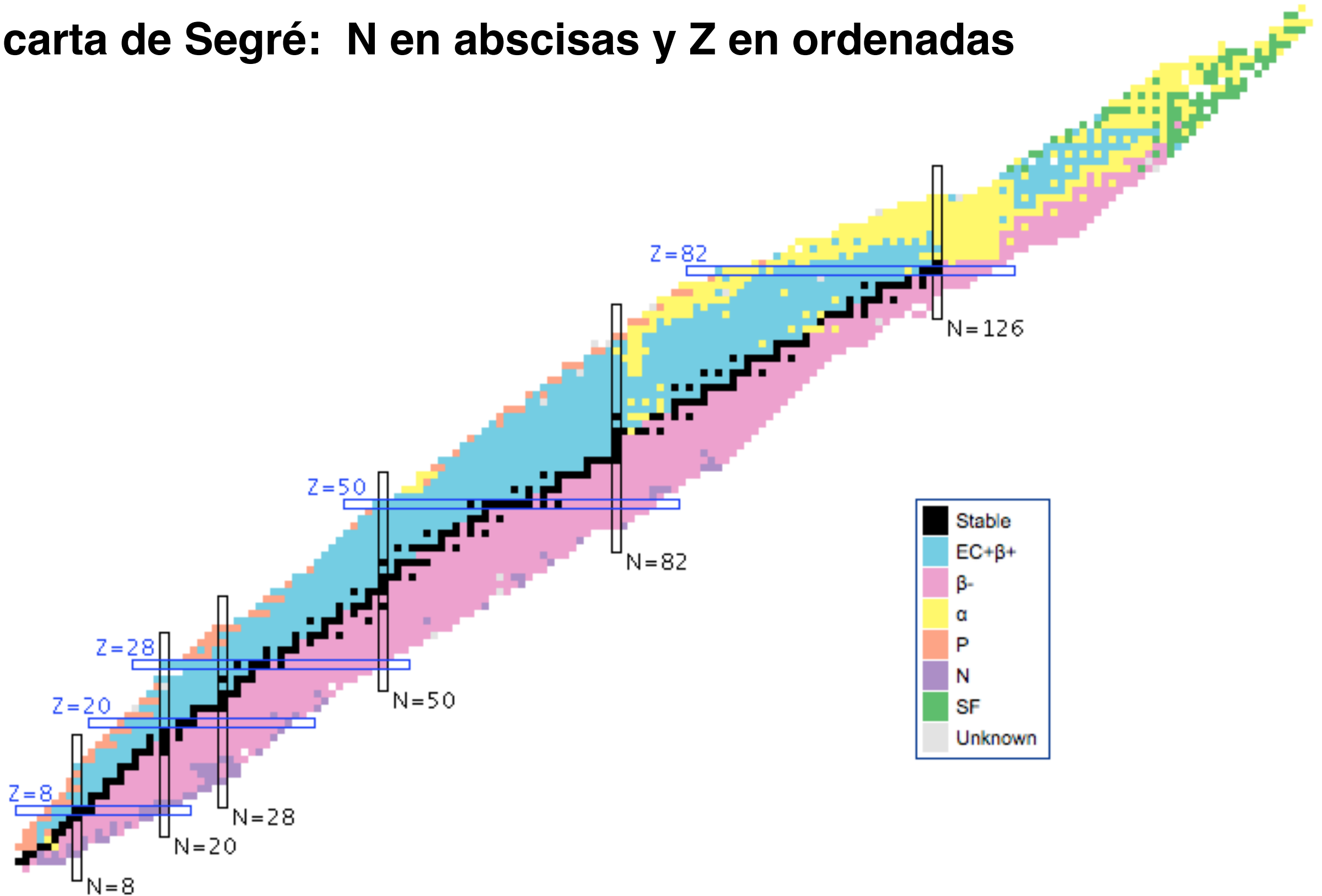
PUBLISHED ONLINE: 17 JULY 2011 | DOI: 10.1038/NCEO1205

Partial radiogenic heat model for Earth revealed by geoneutrino measurements

The KamLAND Collaboration*

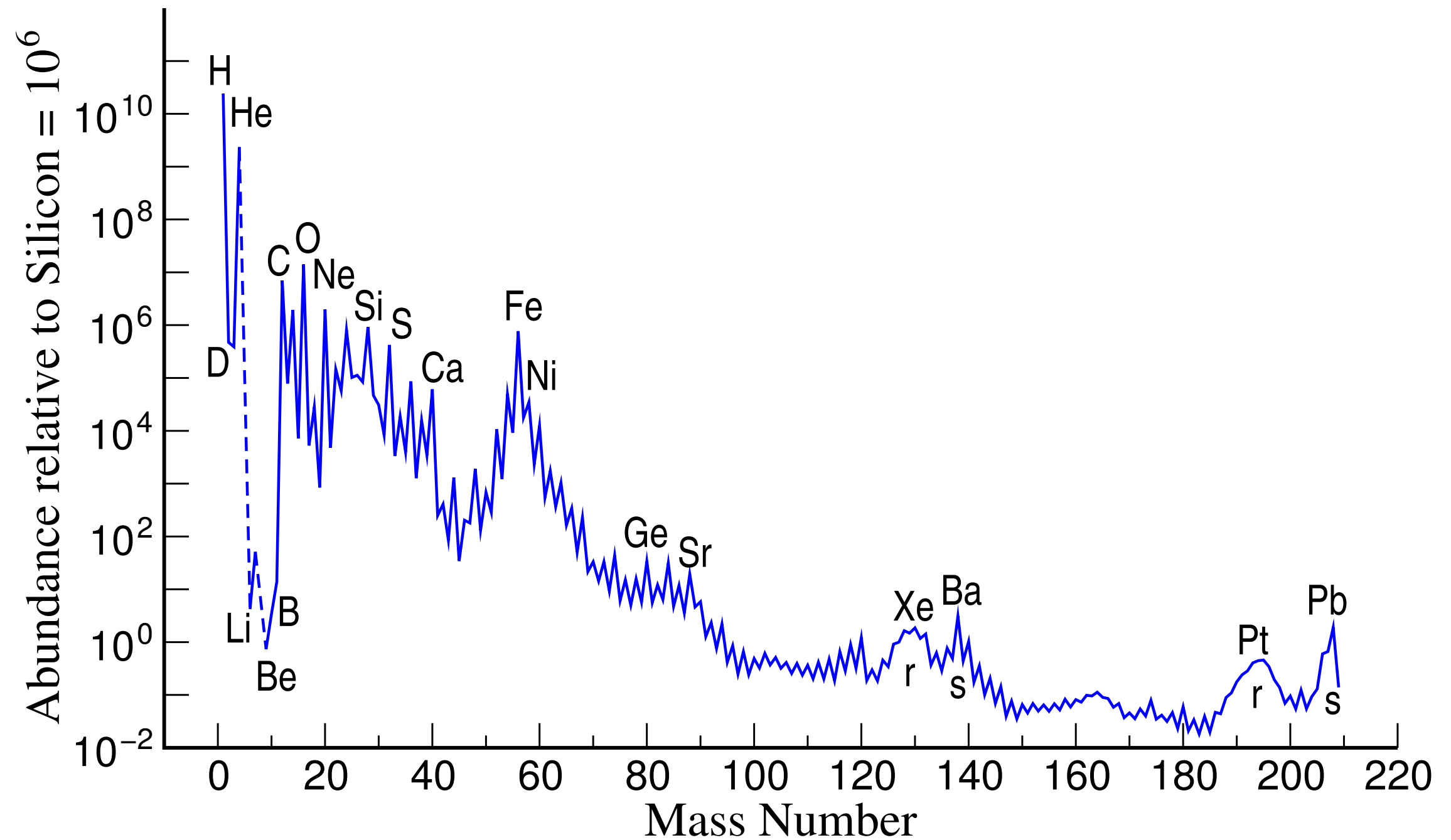
The Earth has cooled since its formation, yet the decay of radiogenic isotopes, and in particular uranium, thorium and potassium, in the planet's interior provides a continuing heat source. The current total heat flux from the Earth to space is 44.2 ± 1.0 TW, but the relative contributions from residual primordial heat and radiogenic decay remain uncertain. However, radiogenic decay can be estimated from the flux of geoneutrinos, electrically neutral particles that are emitted during radioactive decay and can pass through the Earth virtually unaffected. Here we combine precise measurements of the geoneutrino flux from the Kamioka Liquid-Scintillator Antineutrino Detector, Japan, with existing measurements from the Borexino detector, Italy. We find that decay of uranium-238 and thorium-232 together contribute $20.0^{+8.8}_{-8.6}$ TW to Earth's heat flux. The neutrinos emitted from the decay of potassium-40 are below the limits of detection in our experiments, but are known to contribute 4 TW. Taken together, our observations indicate that heat from radioactive decay contributes about half of Earth's total heat flux. We therefore conclude that Earth's primordial heat supply has not yet been exhausted.

La carta de Segré: N en abscisas y Z en ordenadas

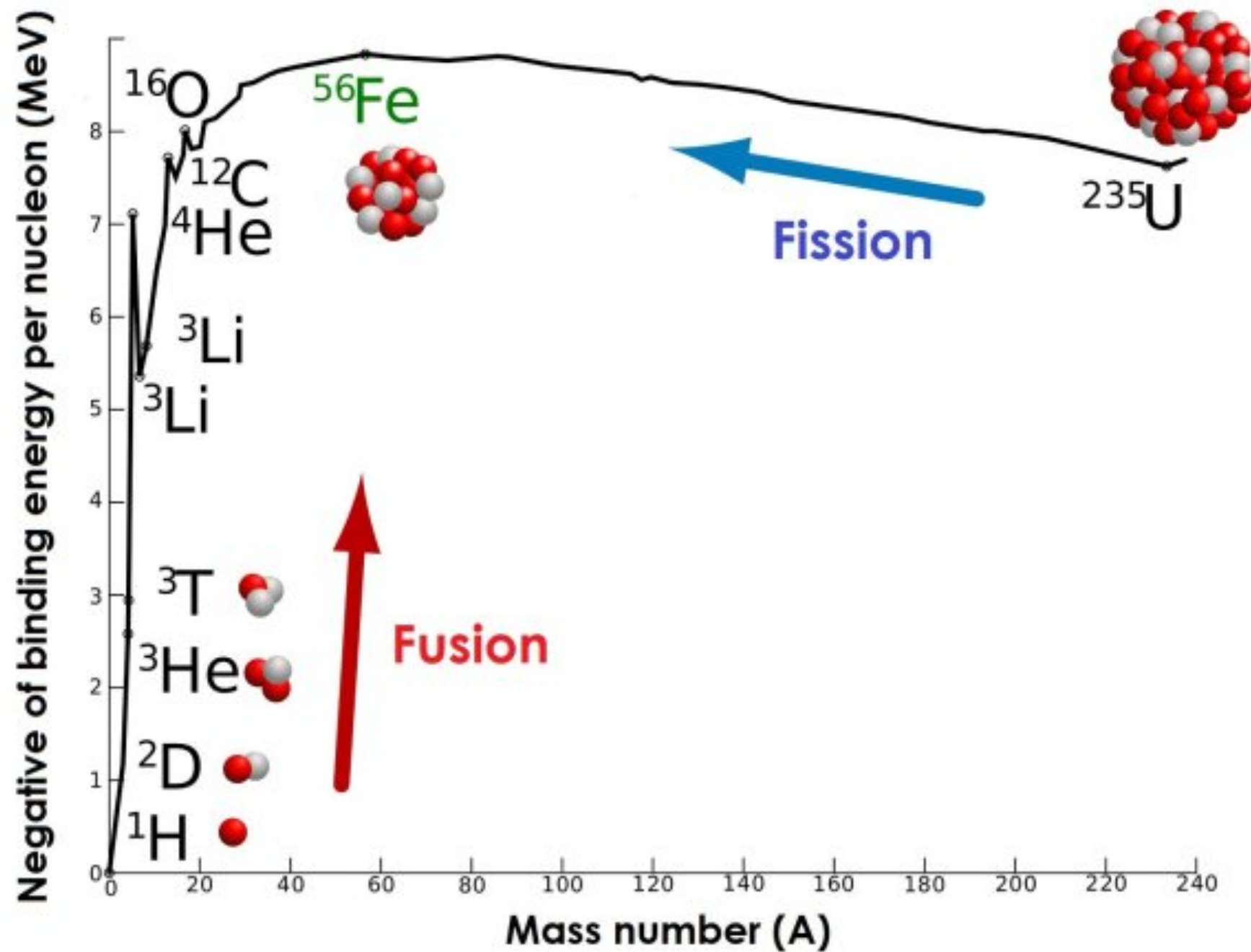


Cada pixel representa un núcleo: en negro si es estable

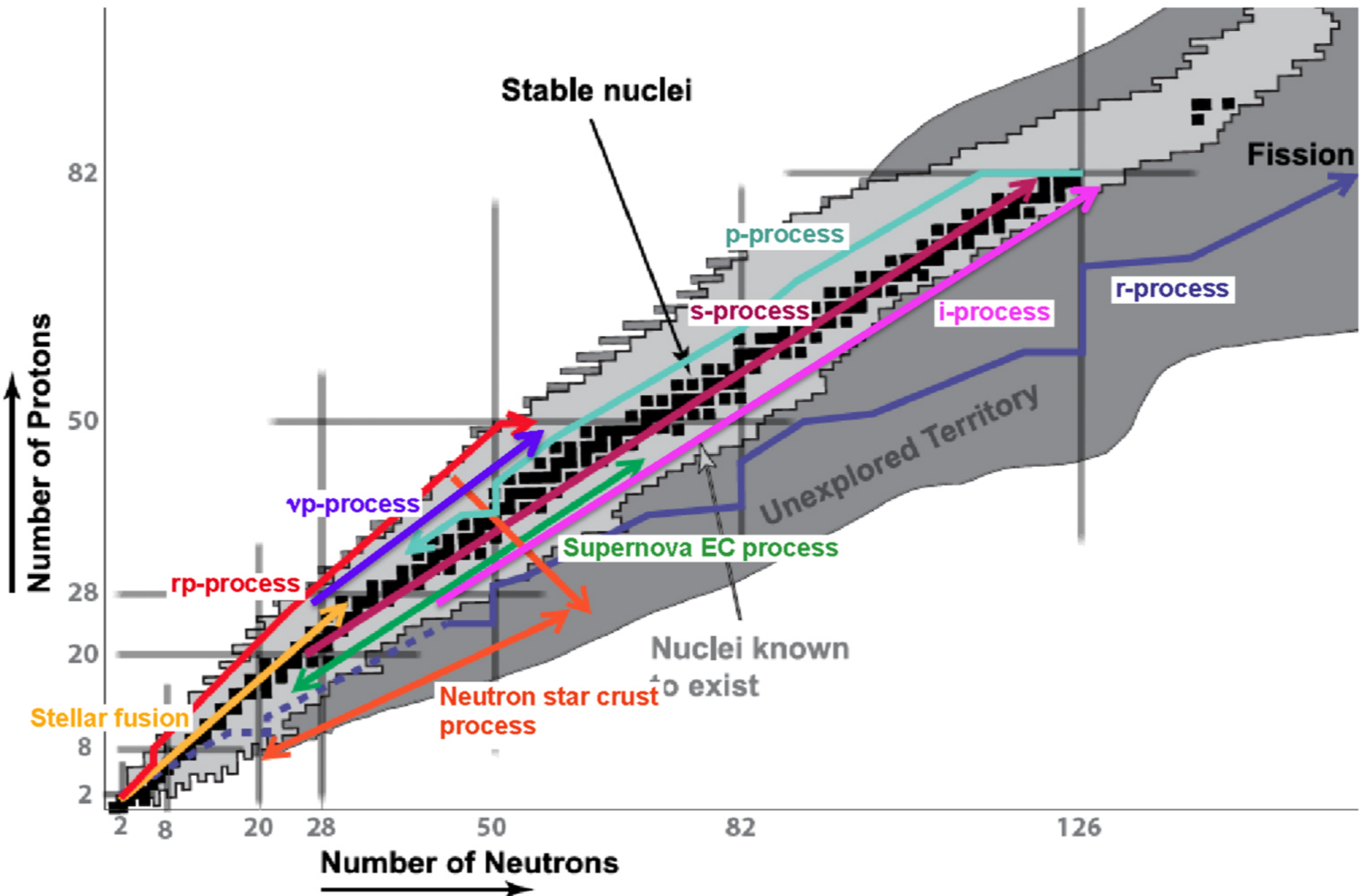
La abundancia de los elementos en el Universo



Energía de ligadura /A, como función de A



NUCLEOSÍNTESIS



Nucleosíntesis Primordial

Tiene lugar minutos después de Bing-Bang. El balance final es: 75% de H, 25% de He, y trazas de deuterio y litio

Nucleosíntesis Estelar

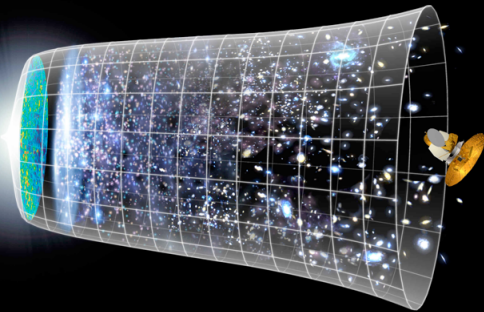
Procede mediante procesos de fusión, y el elemento más pesado que puede producir es el hierro. Tiene un cuello de botella para generar el carbono a partir de tres partículas alfa, ya que el berilio 8 no está ligado

Más allá del Hierro

Los elementos más pesados se forman por captura de neutrones y posterior desintegración beta. En general requieren explosiones cósmicas; supernovas o fusión de estrellas de neutrones.

Donde se producen los elementos químicos?

Big Bang

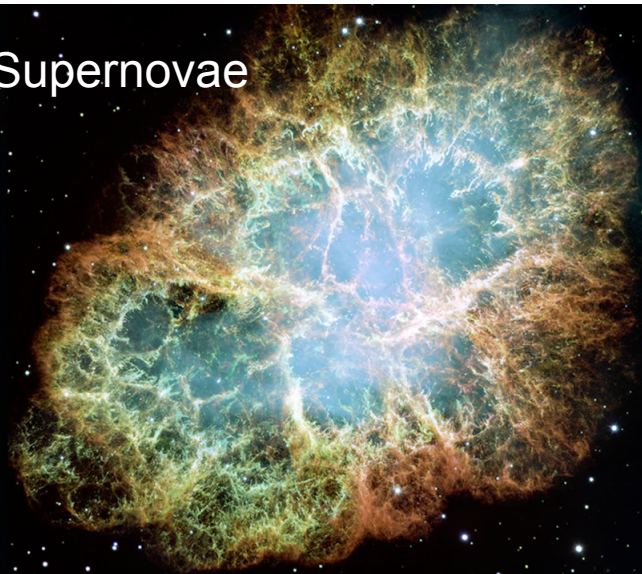


NASA/WMAP Science Team

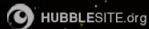
Stars



Supernovae

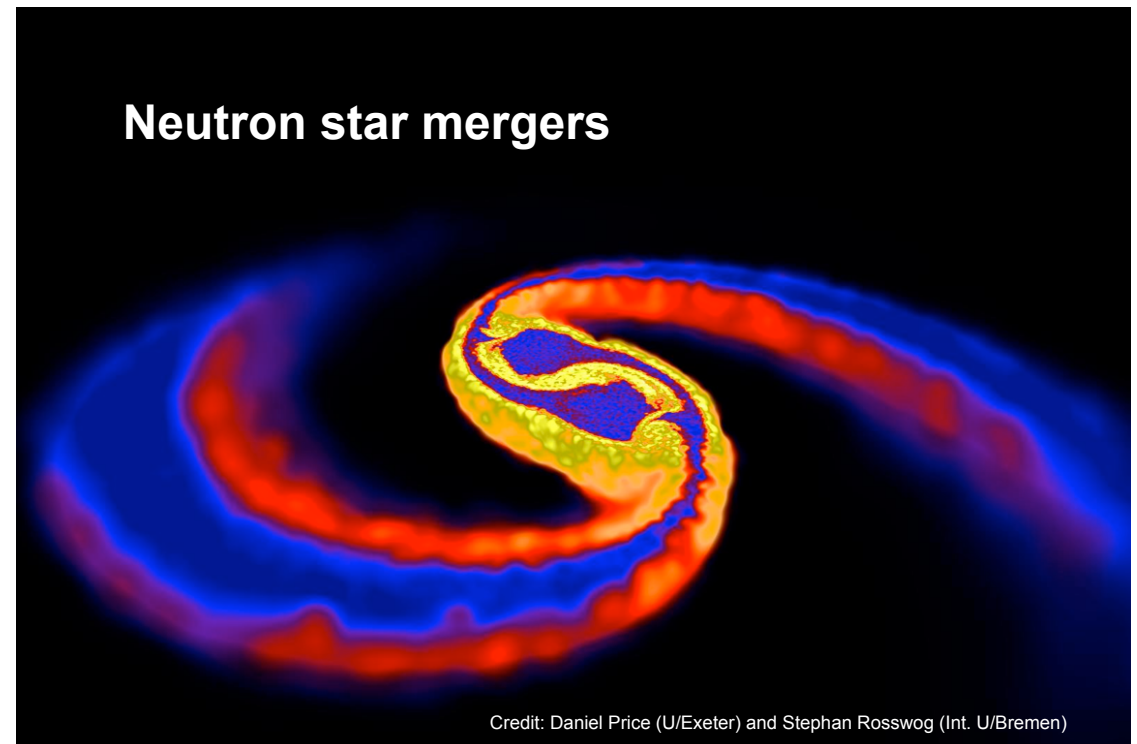


Mosaic of The Crab Nebula



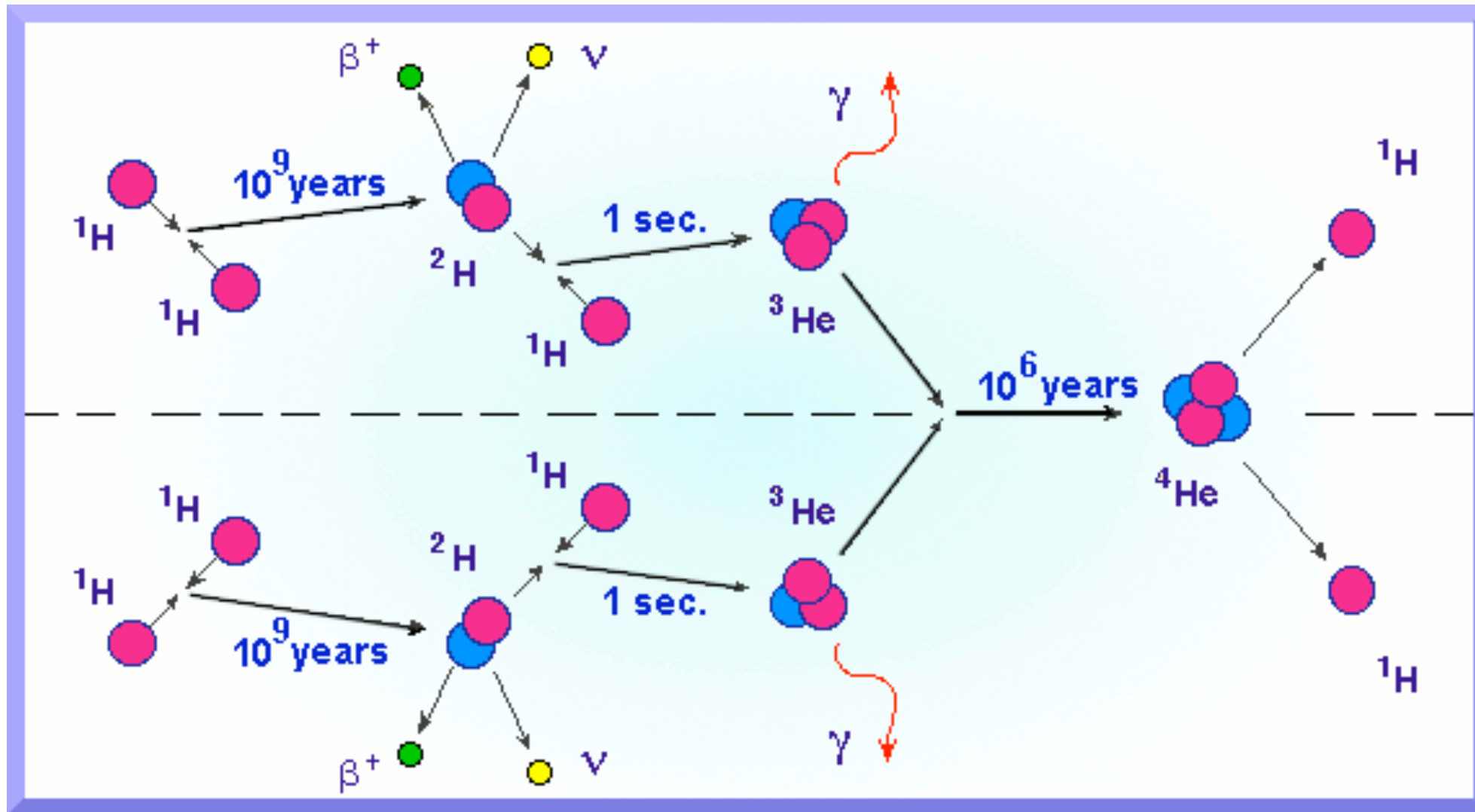
HUBBLESITE.org

Neutron star mergers

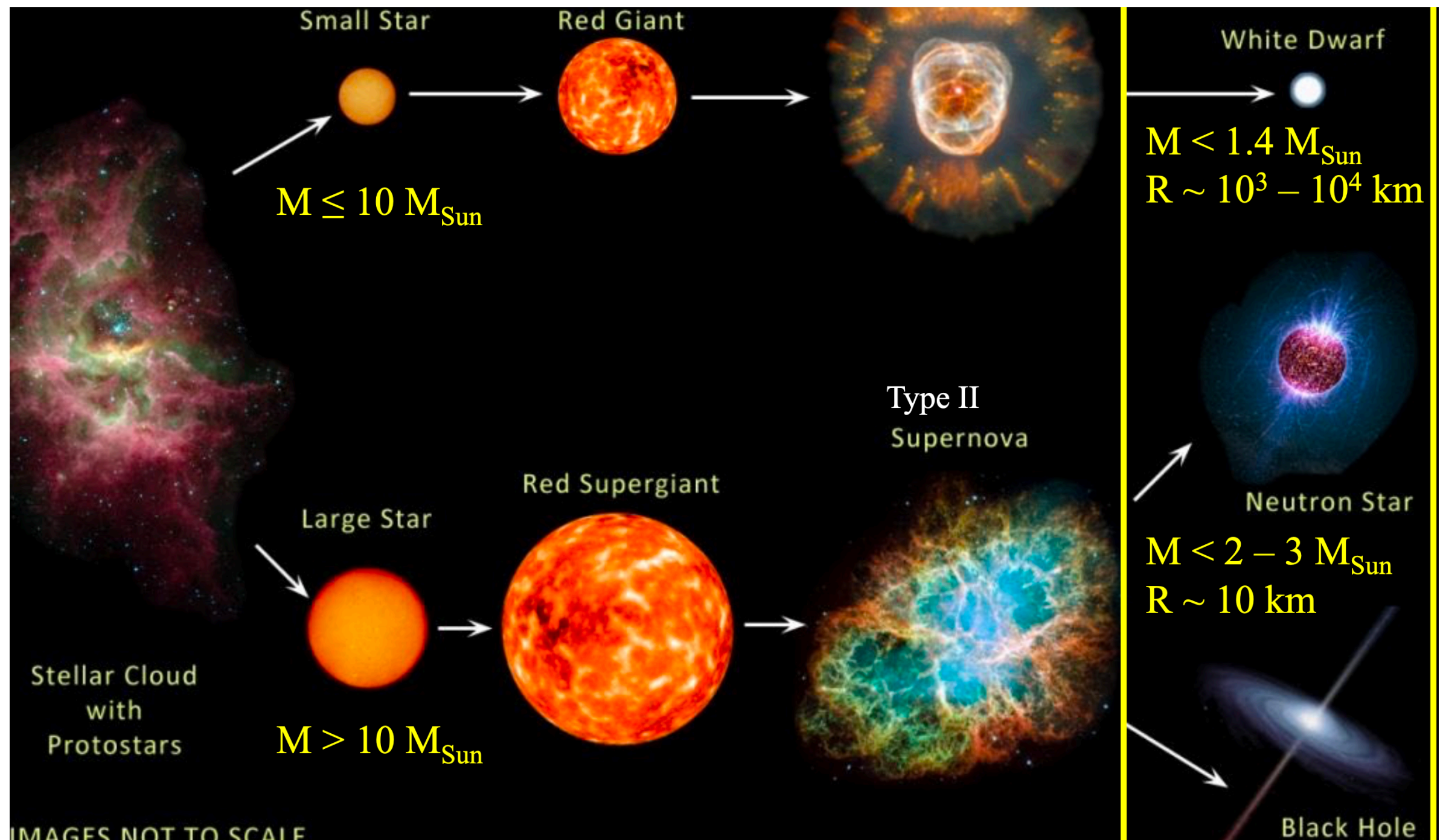


Credit: Daniel Price (U/Exeter) and Stephan Rosswog (Int. U/Bremen)

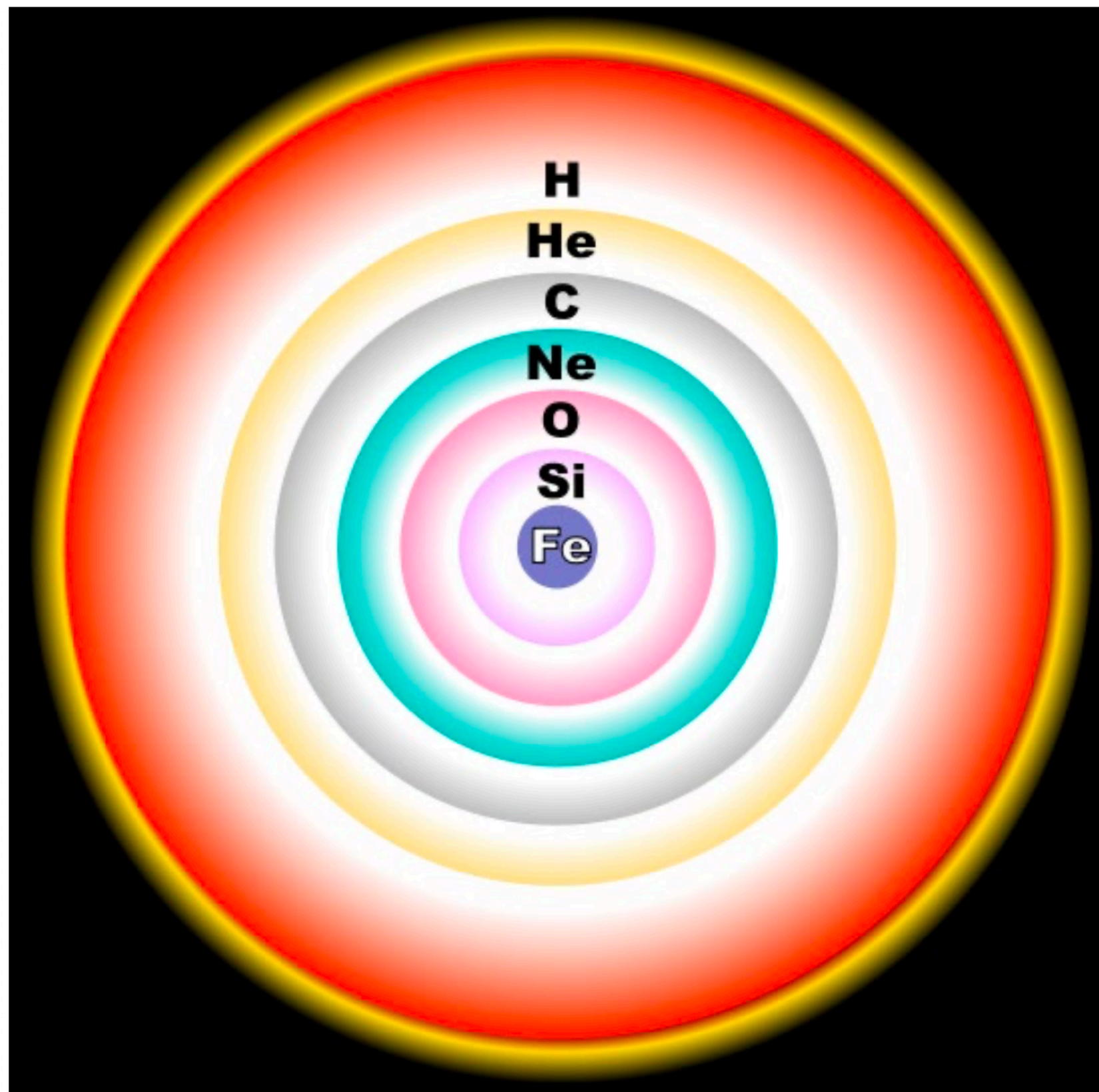
El ciclo p-p en las estrellas



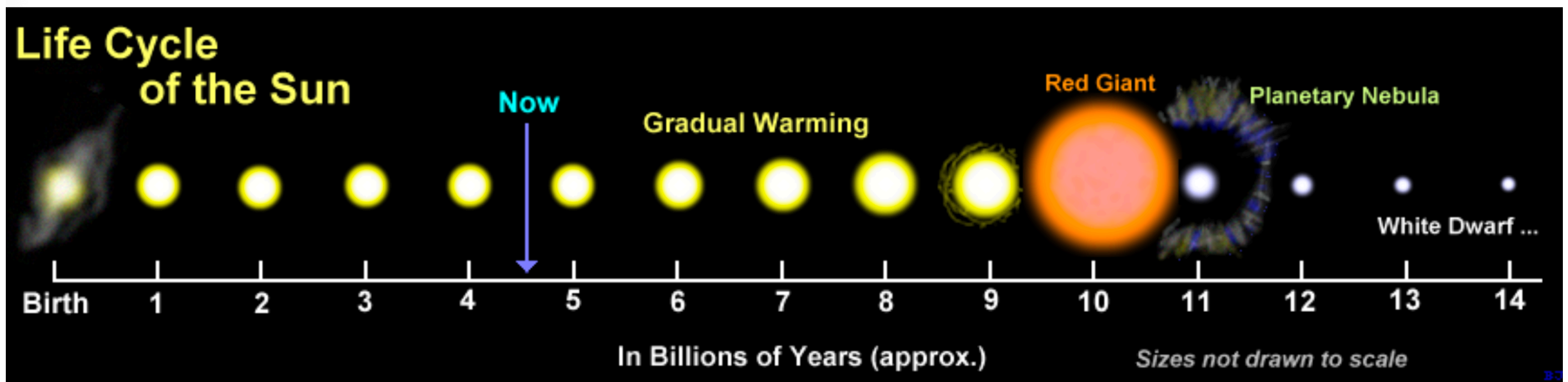
O cómo nos calienta el Sol



Cortesía de Jordi José, UPC



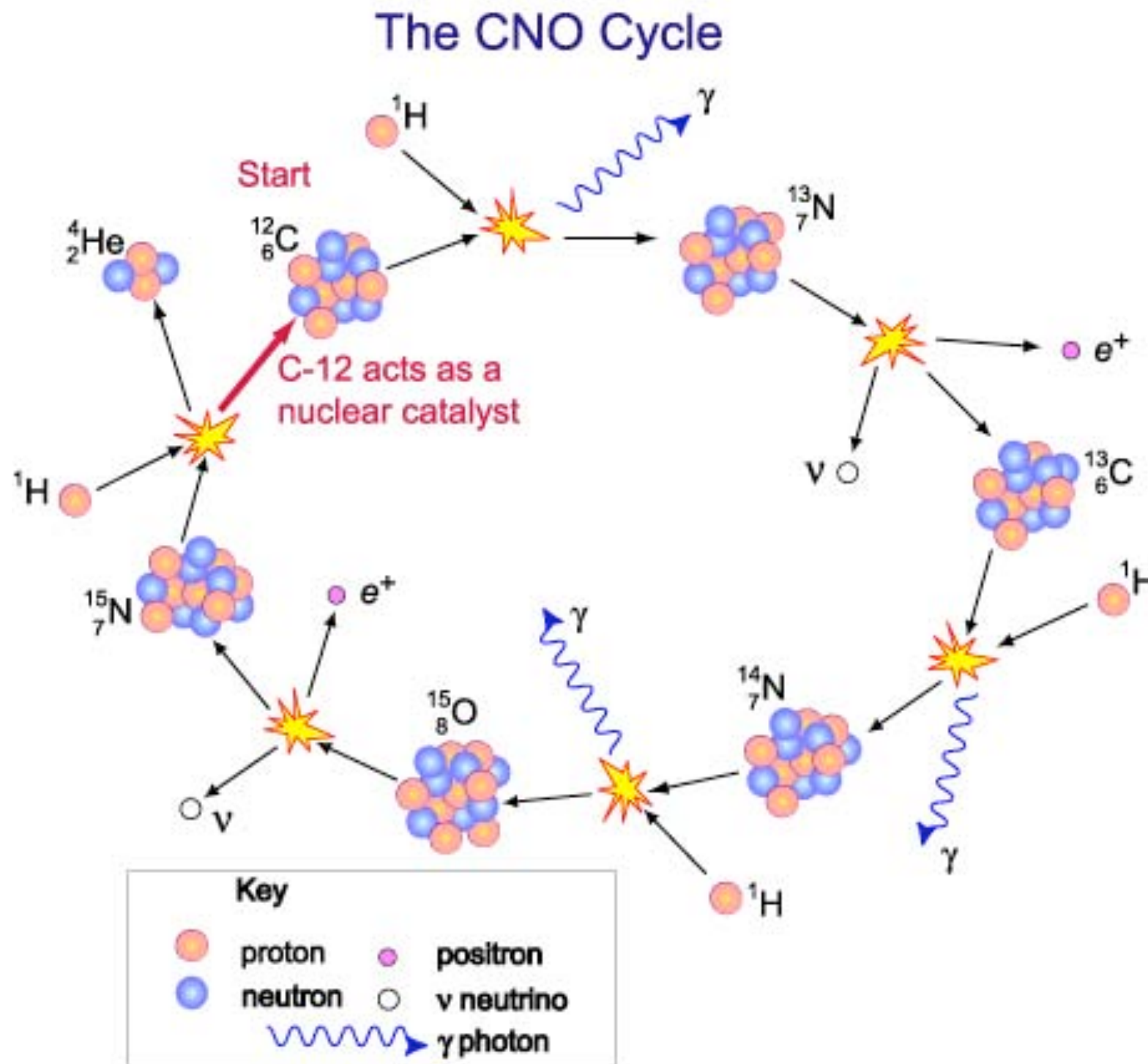
The Sun will only undergo **two sequential fusion stages**: H and He fusion → (CO-rich) white dwarf star

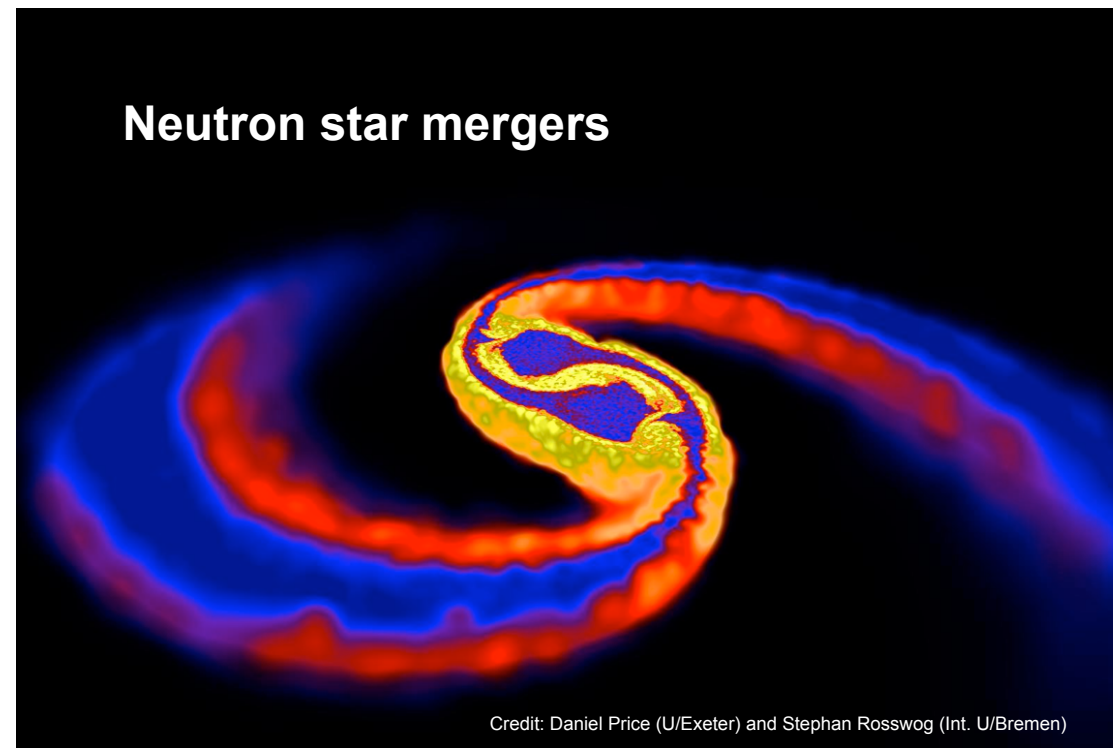


In the process, however, the **Earth will be destroyed** (in about **4 – 5 Gyr** from now; no rush!)

Cortesía de Jordi José, UPC

El ciclo CNO





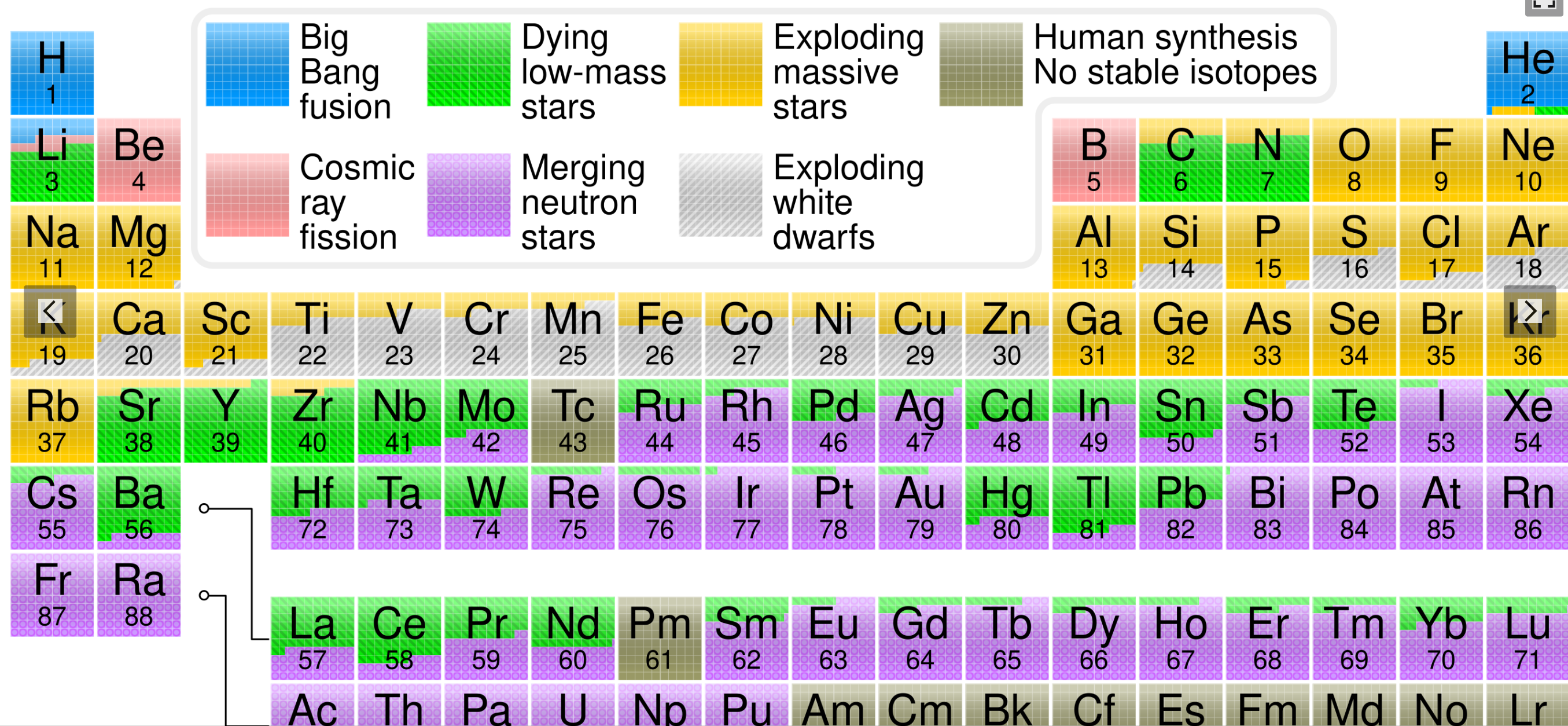
La hipótesis mas plausible es que el proceso r ocurra en la fusión de dos estrellas de neutrones produciendo una Kilonova

Lo que fue predicho en 2010 y confirmado por las observaciones que siguieron a la detección de las ondas gravitacionales del episodio GW170817

Electromagnetic counterparts of compact object mergers powered by the radioactive decay of *r*-process nuclei

B. D. Metzger,^{1★†} G. Martínez-Pinedo,² S. Darbha,³ E. Quataert,³ A. Arcones,^{2,4}
D. Kasen,^{5‡} R. Thomas,⁶ P. Nugent,⁶ I. V. Panov^{7,8,9} and N. T. Zinner¹⁰

**Con la participación estelar de nuestros
colegas Gabriel y Almudena**



A version of the periodic table indicating the origins – including stellar nucleosynthesis – of the elements.

More details

Cmglee - Own work

A periodic table showing the origins of the elements in the Solar System, based on data by [Jennifer Johnson at Ohio State University](#). The percentages of each element's origins are represented by squares (out of a hundred) to make it easier to estimate proportions; hovering over [the SVG image](#) gives precise figures as tooltips. Elements above lawrencium are not included. [Johnson's explanation](#) cautions, "We still don't know everything..." The image is NASA's *Astronomy Picture of the Day* [2020-08-09](#), [2017-10-24](#) and [2023-01-08](#).

CC BY-SA 3.0

File: Nucleosynthesis periodic table.svg

Created: 25 March 2017

Uploaded: 4 November 2017

Gracias por su atención