

Hornos nucleares: el origen de (casi) todo

Daniel López, elcielodecanarias.com

 CSIC



Benjamín Montesinos
Centro de Astrobiología (CAB, CSIC-INTA)



Prehistoria: ocre amarillo (O, Fe)
siena natural (O, Fe)
tierra verde (Fe, Si)
creta blanca (S, O, Ca)
negro de humo (C)



Cueva de las Manos, Argentina, c. 7350 a.C.

Siglo XX:

azul de manganeso (Mn, Ba)

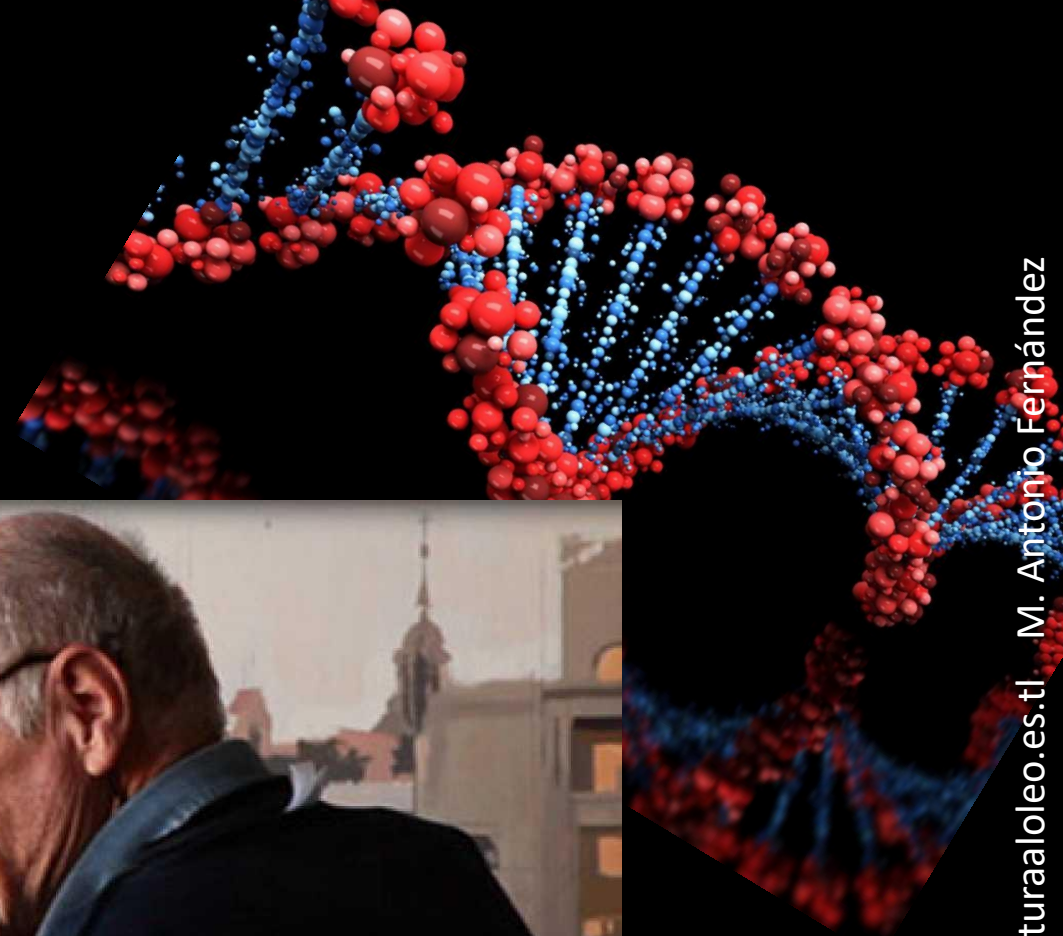
rojo de cadmio (Cd, S, Se)

amarillo de níquel (O, Ni, Ti)

azul cian (H, N, Cu)

azul monastral (H, N, Cu)

+ ...



Dmitri Mendeléeiev
(1834 - 1907)

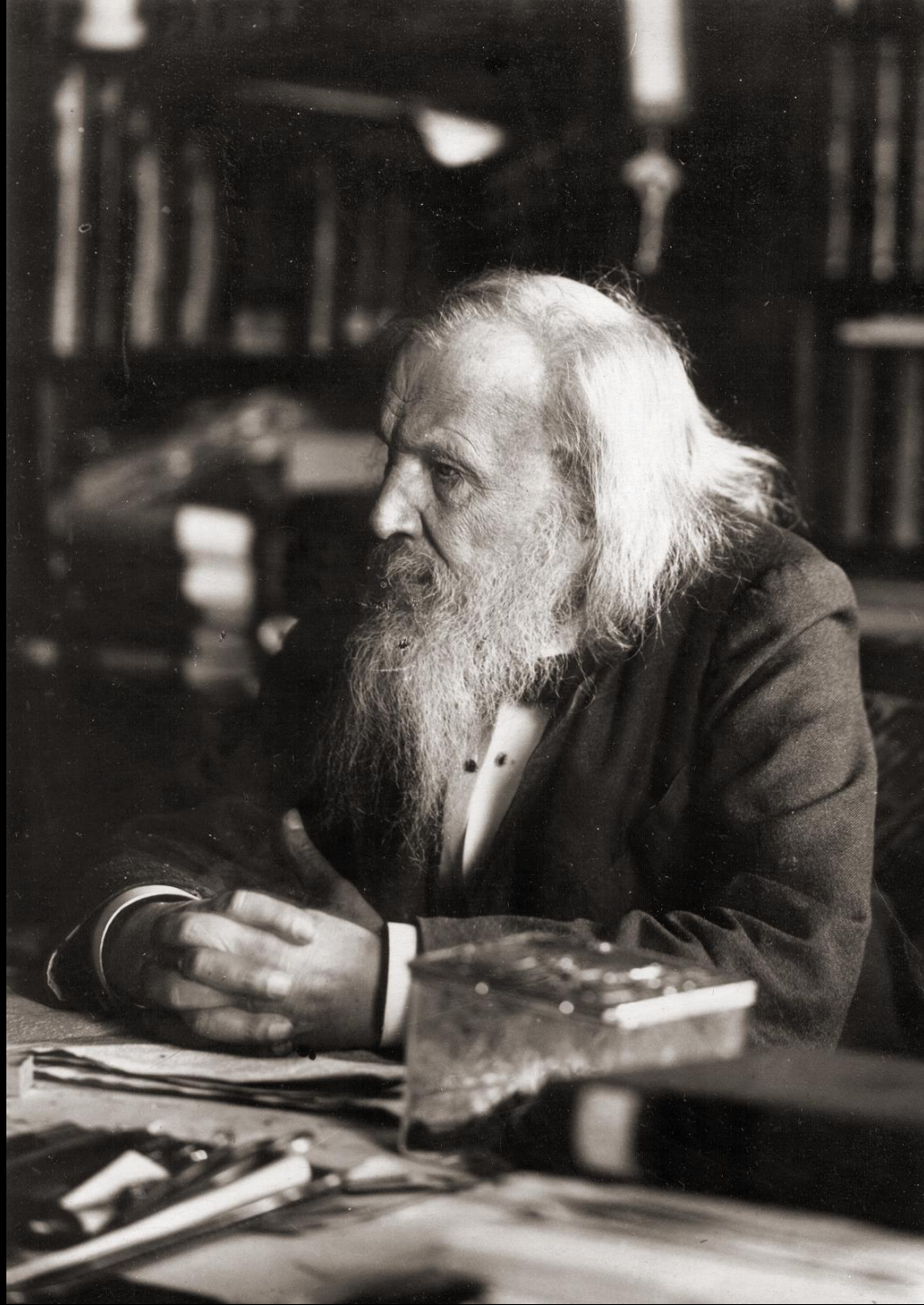


Tabla periódica de los elementos

grupo 1																	18							
período 1	1.00794 1312.0 2.20 H Hidrógeno 1s ¹																	4.002602 2372.3 He Helio 1s ²						
2	6.941 520.2 0.98 Li Litio 1s ² 2s ¹	9.012182 899.5 1.57 Be Berilio 1s ² 2s ²																	10.811 800.6 2.04 B Boro 1s ² 2s ² 2p ¹	12.0107 1086.5 2.55 C Carbono 1s ² 2s ² 2p ²	14.0067 1402.3 3.04 N Nitrógeno 1s ² 2s ² 2p ³	15.9994 1313.9 3.44 O Oxígeno 1s ² 2s ² 2p ⁴	18.998403 1681.0 3.98 F Flúor 1s ² 2s ² 2p ⁵	20.1797 2080.7 Ne Neón 1s ² 2s ² 2p ⁶
3	22.98976 495.8 0.93 Na Sodio [Ne] 3s ¹	24.3050 737.7 1.31 Mg Magnesio [Ne] 3s ²																	26.98153 577.5 1.61 Al Aluminio [Ne] 3s ² 3p ¹	28.0855 786.5 1.90 Si Silicio [Ne] 3s ² 3p ²	30.97696 1011.8 2.19 P Fósforo [Ne] 3s ² 3p ³	32.065 999.6 2.58 S Azufre [Ne] 3s ² 3p ⁴	35.453 1251.2 3.16 Cl Cloro [Ne] 3s ² 3p ⁵	39.948 1520.6 Ar Argón [Ne] 3s ² 3p ⁶
4	39.0983 418.8 0.82 K Potasio [Ar] 4s ¹	40.078 589.8 1.00 Ca Calcio [Ar] 4s ²	44.95591 633.1 1.36 Sc Escandio [Ar] 3d ¹ 4s ²	47.867 658.8 1.54 Ti Titanio [Ar] 3d ² 4s ²	50.9415 650.9 1.63 V Vanadio [Ar] 3d ³ 4s ²	51.9962 652.9 1.66 Cr Cromo [Ar] 3d ⁵ 4s ¹	54.93804 717.3 1.55 Mn Manganeso [Ar] 3d ⁵ 4s ²	55.845 762.5 1.83 Fe Hierro [Ar] 3d ⁶ 4s ²	58.93319 760.4 1.91 Co Cobalto [Ar] 3d ⁷ 4s ²	58.6934 737.1 1.88 Ni Níquel [Ar] 3d ⁸ 4s ²	63.546 745.5 1.90 Cu Cobre [Ar] 3d ¹⁰ 4s ¹	65.38 906.4 1.65 Zn Zinc [Ar] 3d ¹⁰ 4s ²	69.723 578.8 1.81 Ga Galio [Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 4p ¹	72.64 762.0 2.01 Ge Germanio [Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 4p ²	74.92160 947.0 2.18 As Arsénico [Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 4p ³	78.96 941.0 2.55 Se Selenio [Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁴	79.904 1139.9 2.96 Br Bromo [Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁵	83.798 1350.8 3.00 Kr Kriptón [Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶						
5	85.4678 403.0 0.82 Rb Rubidio [Kr] 5s ¹	87.62 549.5 0.95 Sr Estroncio [Kr] 5s ²	88.90585 600.0 1.22 Y Itrio [Kr] 4d ¹ 5s ²	91.224 640.1 1.33 Zr Zirconio [Kr] 4d ² 5s ²	92.90638 640.1 1.60 Nb Niobio [Kr] 4d ⁴ 5s ¹	95.96 684.3 2.16 Mo Molibdeno [Kr] 4d ⁵ 5s ¹	(98) 702.0 1.90 Tc Tecnecio [Kr] 4d ⁵ 5s ²	101.07 710.2 2.20 Ru Rutenio [Kr] 4d ⁷ 5s ¹	102.9055 719.7 2.28 Rh Rodio [Kr] 4d ⁸ 5s ¹	106.42 804.4 2.20 Pd Paladio [Kr] 4d ¹⁰	107.8682 731.0 1.93 Ag Plata [Kr] 4d ¹⁰ 5s ¹	112.441 867.8 1.69 Cd Cadmio [Kr] 4d ¹⁰ 5s ²	114.818 558.3 1.78 In Indio [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ¹	118.710 708.6 1.96 Sn Estaño [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ²	121.760 834.0 2.05 Sb Antimonio [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ³	127.60 869.3 2.10 Te Telurio [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁴	126.9044 1008.4 2.66 I Yodo [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁵	131.293 1170.4 2.60 Xe Xenón [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁶						
6	132.9054 375.7 0.79 Cs Cesio [Xe] 6s ¹	137.327 502.9 0.89 Ba Bario [Xe] 6s ²	174.9668 600.0 1.27 Lu Lutecio [Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹ 6s ²	178.49 658.5 1.30 Hf Hafnio [Xe] 4f ¹⁴ 5d ² 6s ²	180.9478 761.0 1.50 Ta Tantalio [Xe] 4f ¹⁴ 5d ³ 6s ²	183.84 770.0 2.36 W Wolframio [Xe] 4f ¹⁴ 5d ⁴ 6s ²	186.207 760.0 1.90 Re Renio [Xe] 4f ¹⁴ 5d ⁵ 6s ²	190.23 840.0 2.20 Os Osmio [Xe] 4f ¹⁴ 5d ⁶ 6s ²	192.217 880.0 2.20 Ir Iridio [Xe] 4f ¹⁴ 5d ⁷ 6s ²	195.084 870.0 2.28 Pt Platino [Xe] 4f ¹⁴ 5d ⁹ 6s ¹	196.9665 890.1 2.54 Au Oro [Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ¹	200.59 1007.1 2.00 Hg Mercurio [Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ²	204.3833 589.4 1.62 Tl Talio [Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ¹	207.2 715.6 2.33 Pb Plomo [Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ²	208.9804 703.0 2.02 Bi Bismuto [Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ³	(210) 812.1 2.00 Po Polonio [Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁴	(210) 890.0 2.20 At Astatio [Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁵	(220) 1037.0 Rn Radón [Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁶						
7	(223) 380.0 0.70 Fr Francio [Rn] 7s ¹	(226) 509.3 0.90 Ra Radio [Rn] 7s ²	(262) 470.0 Lr Laurencio [Rn] 5f ¹⁴ 7s ² 7p ¹	(261) 580.0 Rf Rutherfordio [Rn] 5f ¹⁴ 6d ² 7s ²	(262) Db Dubnio [Rn] 5f ¹⁴ 6d ³ 7s ²	(266) Sg Seaborgio [Rn] 5f ¹⁴ 6d ⁴ 7s ²	(264) Bh Bohrio [Rn] 5f ¹⁴ 6d ⁵ 7s ²	(277) Hs Hassio [Rn] 5f ¹⁴ 6d ⁶ 7s ²	(268) Mt Meitnerio [Rn] 5f ¹⁴ 6d ⁷ 7s ²	(271) Ds Darmstadio [Rn] 5f ¹⁴ 6d ⁸ 7s ²	(272) Rg Roentgenio [Rn] 5f ¹⁴ 6d ⁹ 7s ²	(285) Cn Copernicio [Rn] 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ²	(284) Nh Nihonio [Rn] 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ¹	(289) Fl Flerovio [Rn] 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ²	(288) Mc Moscovio [Rn] 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ³	(292) Lv Livermorio [Rn] 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ⁴	117 Ts Téneso [Rn] 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ⁵	(294) Og Oganesón [Rn] 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ⁶						

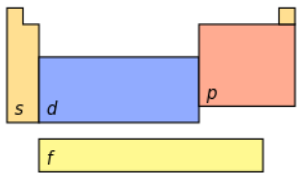
masa atómica o número másico del isótopo más estable
 1.ª energía de ionización en kJ/mol
 símbolo químico
 nombre
 configuración electrónica

número atómico
 electronegatividad
 estados de oxidación más comunes están en negrita

metales alcalinos
 alcalinotérreos
 otros metales
 metales de transición
 lantánidos
 actínidos

metaloides
 no metales
 halógenos
 gases nobles
 elementos desconocidos
 masas de elementos radiactivos entre paréntesis

bloques de configuración electrónica



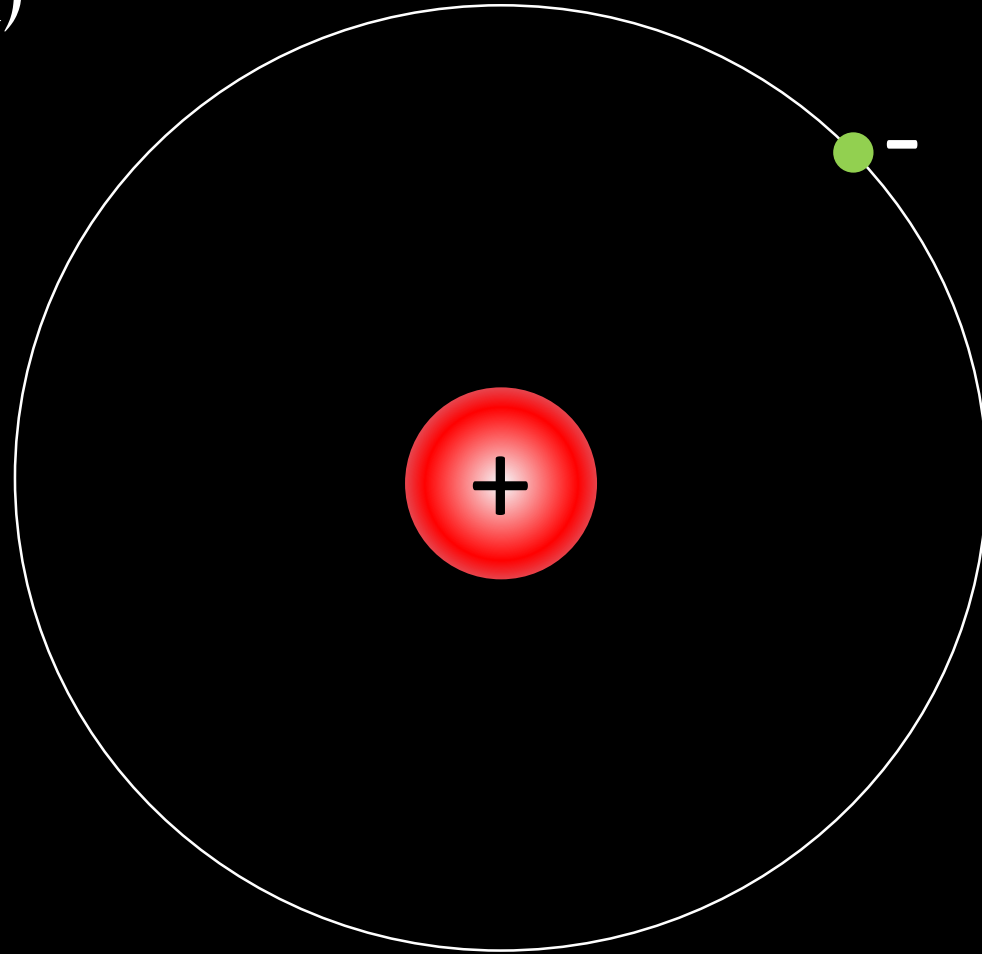
notas

- por ahora, los elementos 113, 115, 117 y 118 no tienen nombre oficial designado por la IUPAC.
- 1 kJ/mol ≈ 96.485 eV.
- todos los elementos tienen un estado de oxidación implícito cero.

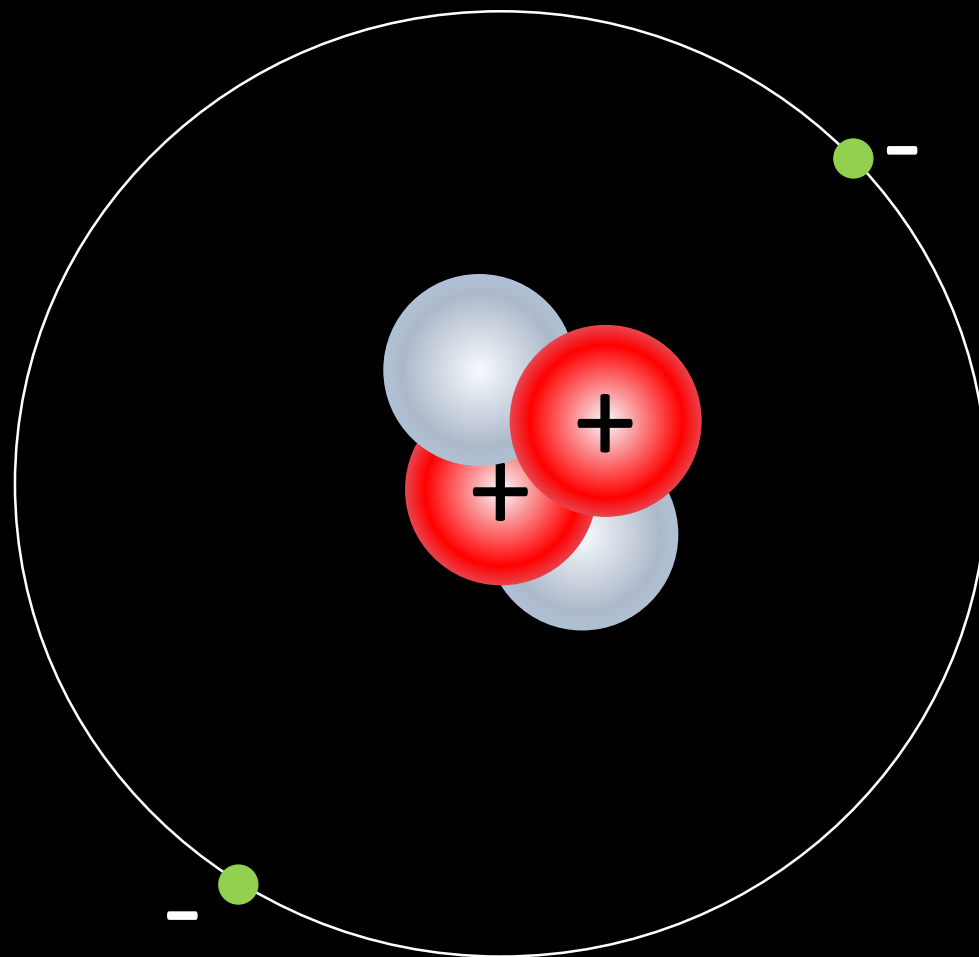
138.9054 538.1 1.10 La Lantano [Xe] 5d ¹ 6s ²	140.116 534.4 1.12 Ce Cerio [Xe] 4f ¹ 5d ¹ 6s ²	140.9076 527.0 1.13 Pr Praseodimio [Xe] 4f ³ 6s ²	144.242 533.1 1.14 Nd Neodimio [Xe] 4f ⁴ 6s ²	(145) 540.0 Pm Prometio [Xe] 4f ⁵ 6s ²	150.36 544.5 1.17 Sm Samario [Xe] 4f ⁶ 6s ²	151.964 547.1 Eu Europio [Xe] 4f ⁷ 6s ²	157.25 593.4 1.20 Gd Gadolinio [Xe] 4f ⁷ 5d ¹ 6s ²	158.9253 565.8 Tb Terbio [Xe] 4f ⁹ 6s ²	162.500 573.0 1.22 Dy Disprosio [Xe] 4f ¹⁰ 6s ²	164.9303 581.0 1.23 Ho Holmio [Xe] 4f ¹¹ 6s ²	167.259 589.3 1.24 Er Erbio [Xe] 4f ¹² 6s ²	168.9342 596.7 1.25 Tm Tulio [Xe] 4f ¹³ 6s ²	173.054 603.4 Yb Iterbio [Xe] 4f ¹⁴ 6s ²
(227) 499.0 1.10 Ac Actinio [Rn] 6d ¹ 7s ²	232.0380 587.0 1.30 Th Torio [Rn] 6d ² 7s ²	231.0358 658.0 1.50 Pa Protactinio [Rn] 5f ² 6d ¹ 7s ²	238.0289 597.6 1.38 U Uranio [Rn] 5f ³ 6d ¹ 7s ²	(237) 604.5 1.36 Np Neptunio [Rn] 5f ⁴ 6d ¹ 7s ²	(244) 584.7 1.28 Pu Plutonio [Rn] 5f ⁶ 7s ²	(243) 578.0 1.30 Am Americio [Rn] 5f ⁷ 7s ²	(247) 581.0 1.30 Cm Curio [Rn] 5f ⁷ 6d ¹ 7s ²	(247) 601.0 1.30 Bk Berkelio [Rn] 5f ⁹ 7s ²	(251) 608.0 1.30 Cf Californio [Rn] 5f ¹⁰ 7s ²	(252) 619.0 1.30 Es Einstenio [Rn] 5f ¹¹ 6s ²	(257) 627.0 1.30 Fm Fermio [Rn] 5f ¹² 7s ²	(258) 635.0 1.30 Md Mendelevio [Rn] 5f ¹³ 7s ²	(259) 642.0 1.30 No Nobelio [Rn] 5f ¹⁴ 7s ²

Elemento químico: es un tipo de materia, constituida por átomos de la misma clase, con un número determinado de **protones** en su núcleo. Tradicionalmente, se define como aquella sustancia que no puede ser descompuesta mediante una reacción química, en otras más simples.

Hidrógeno (H)

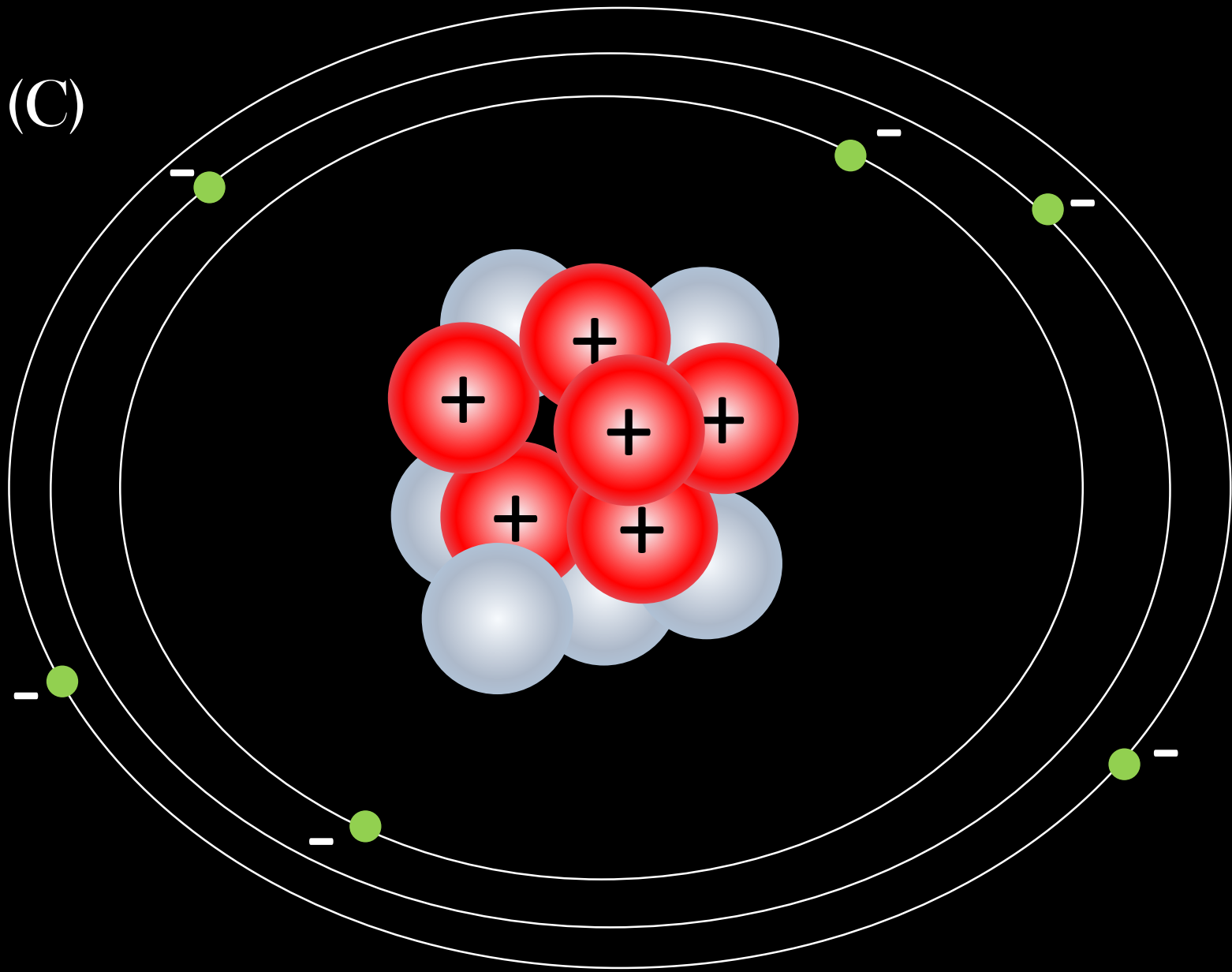


Helio (He)



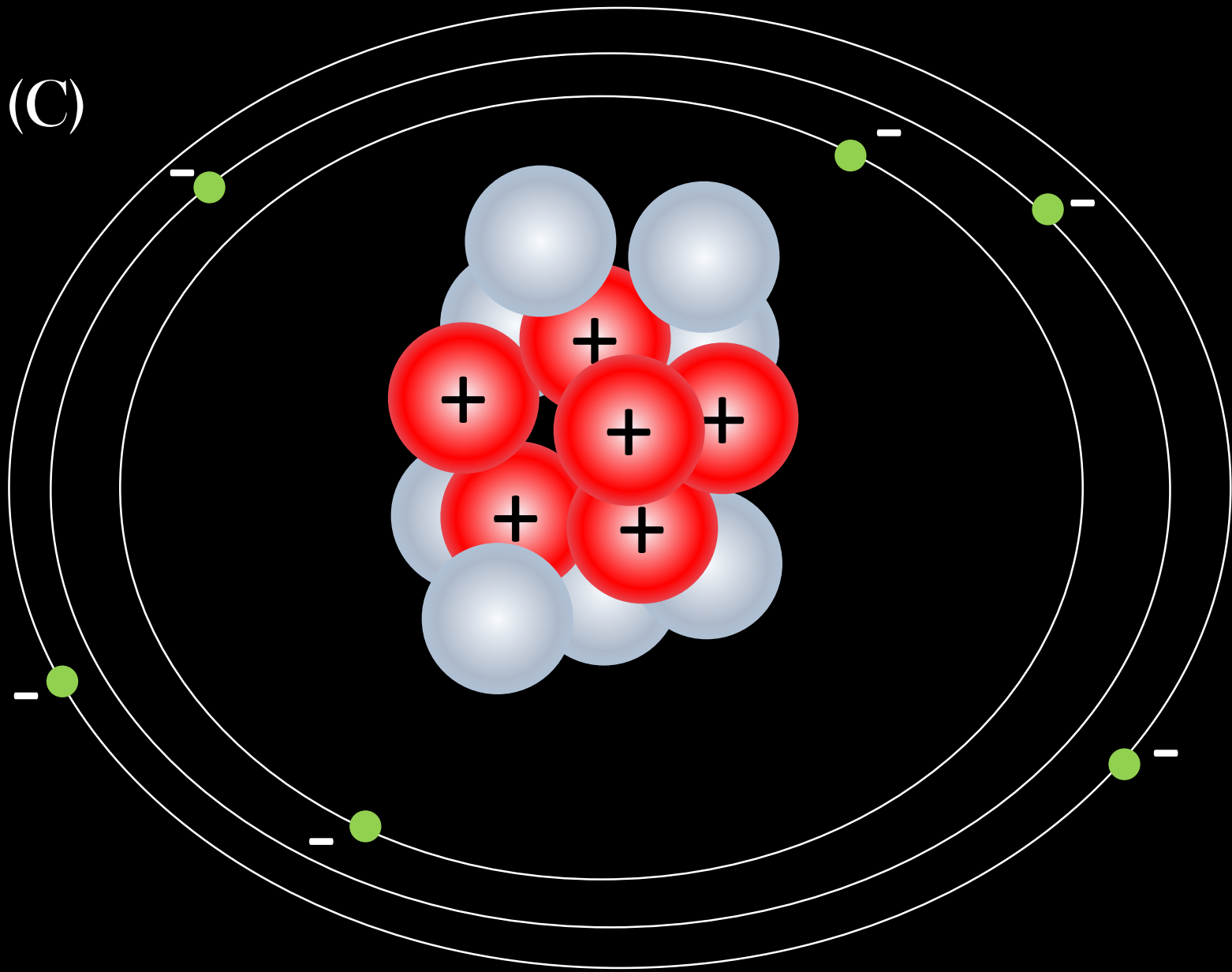
Carbono (C)

^{12}C



Carbono (C)

^{14}C



Hace ~13.800 millones de años

La “tabla periódica” 20 minutos después del Big Bang era

H

1

He

2

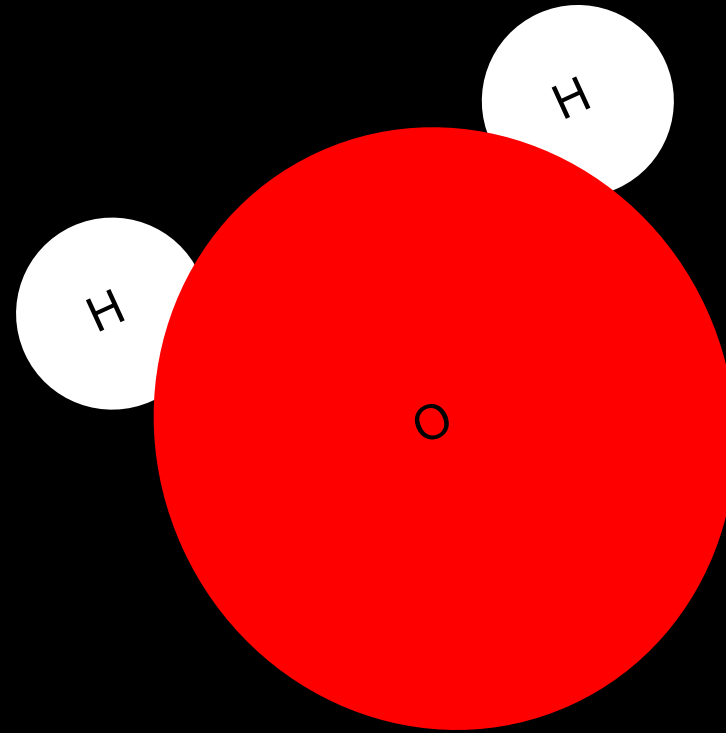
Li

3

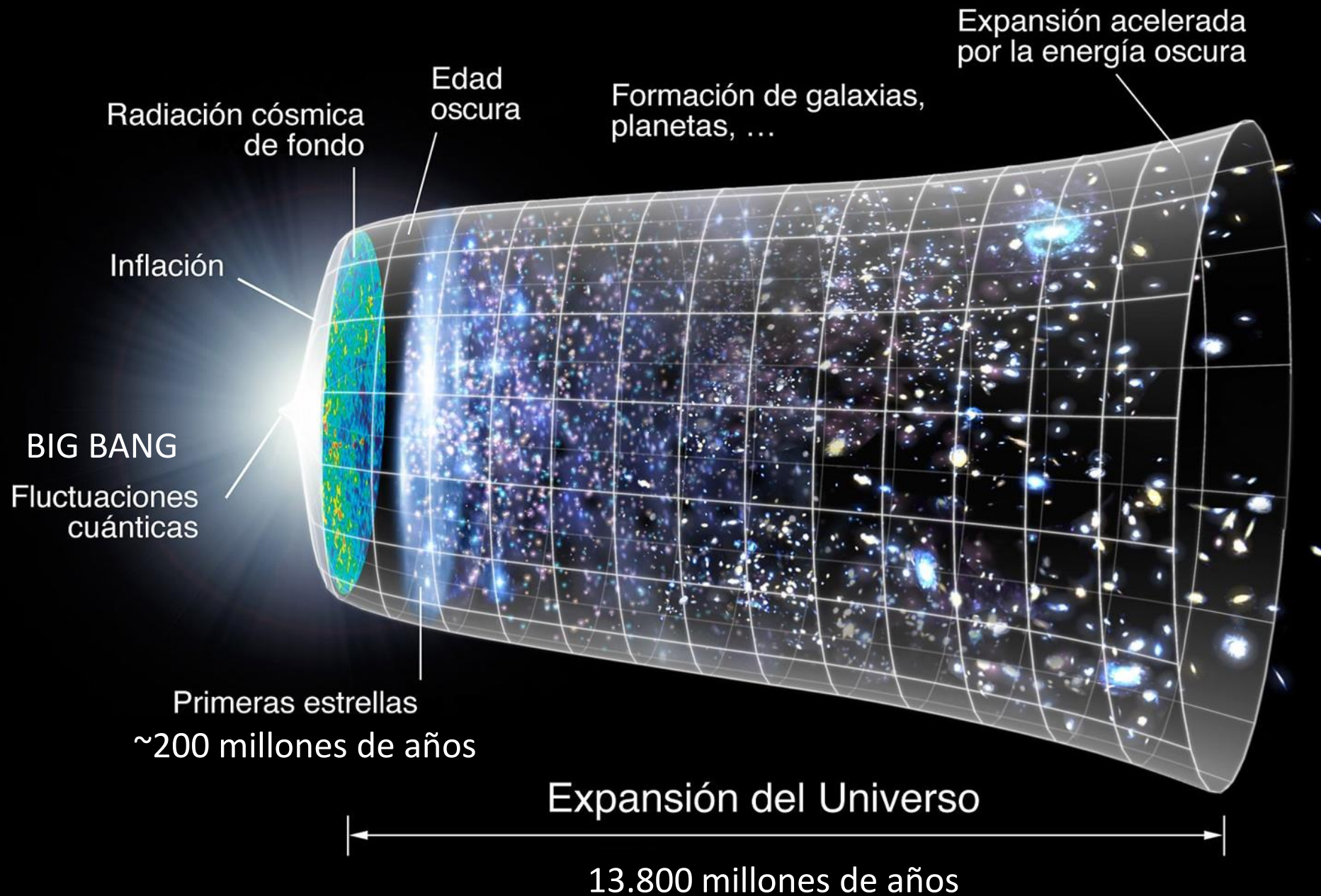
+pequeñas cantidades de
 ^2H , ^3H , ^3He , ^7Li y ^7Be

El hidrógeno del H_2O que bebemos cada día y que compone aproximadamente el 65% de nuestro cuerpo se formó hace

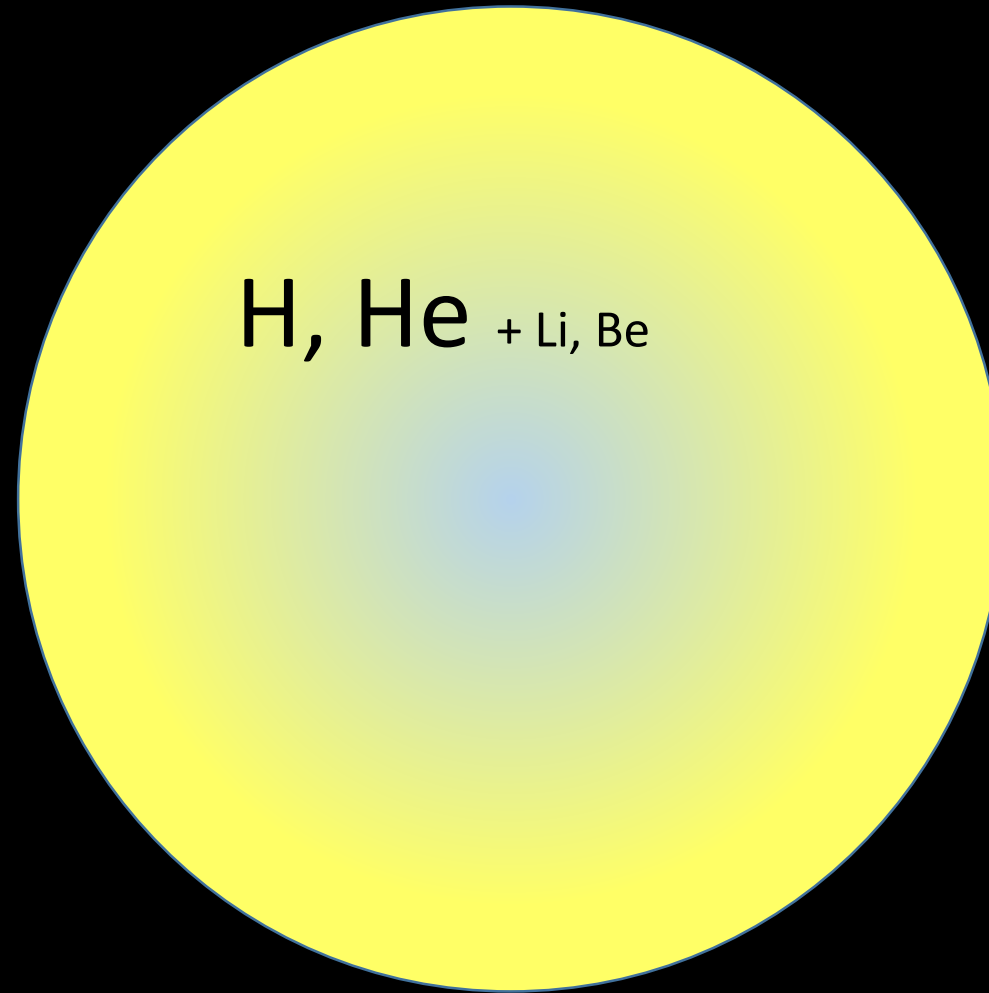
!!! 13.800.000.000 años !!!



...entonces, ¿cómo y dónde se produjeron todos los demás elementos químicos?

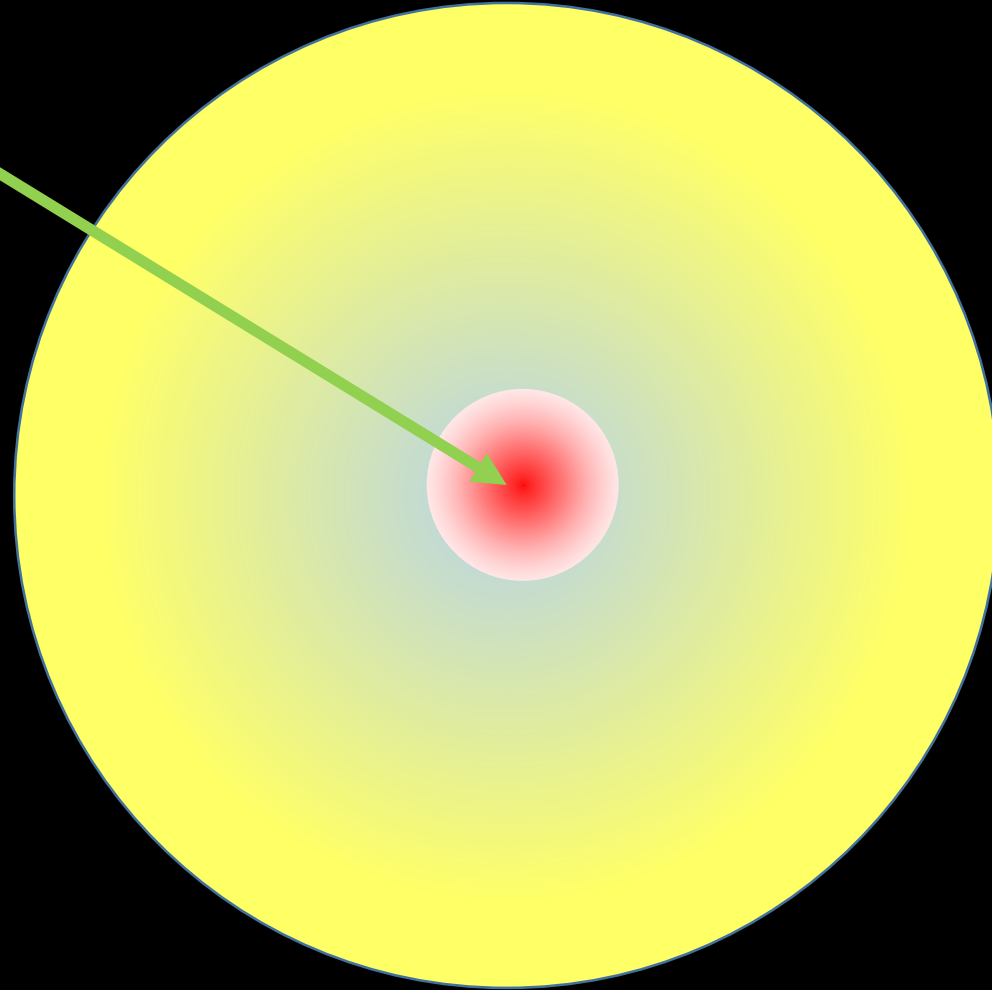


Primera generación de estrellas: ...¿masas $1000 M_{\text{Sol}}$?...



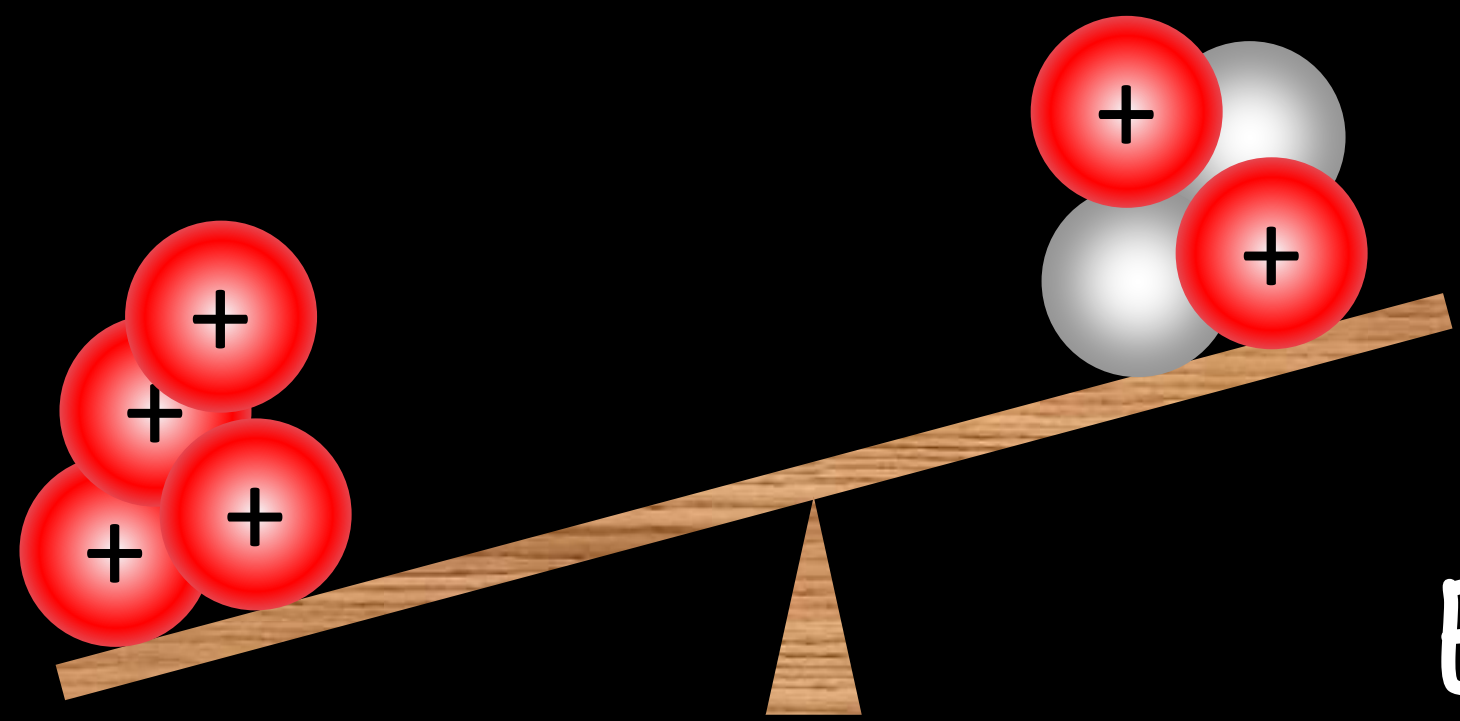
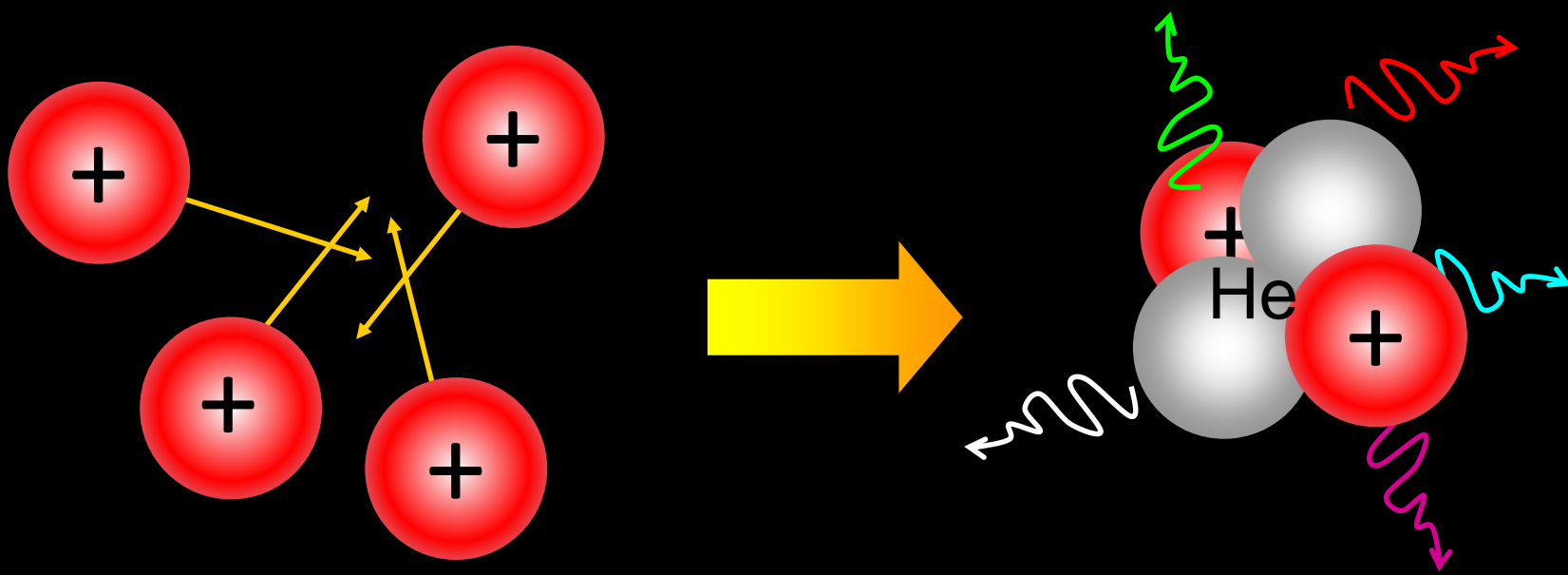
Hace ~13.600 millones de años

Reacciones nucleares en
el corazón de la estrella

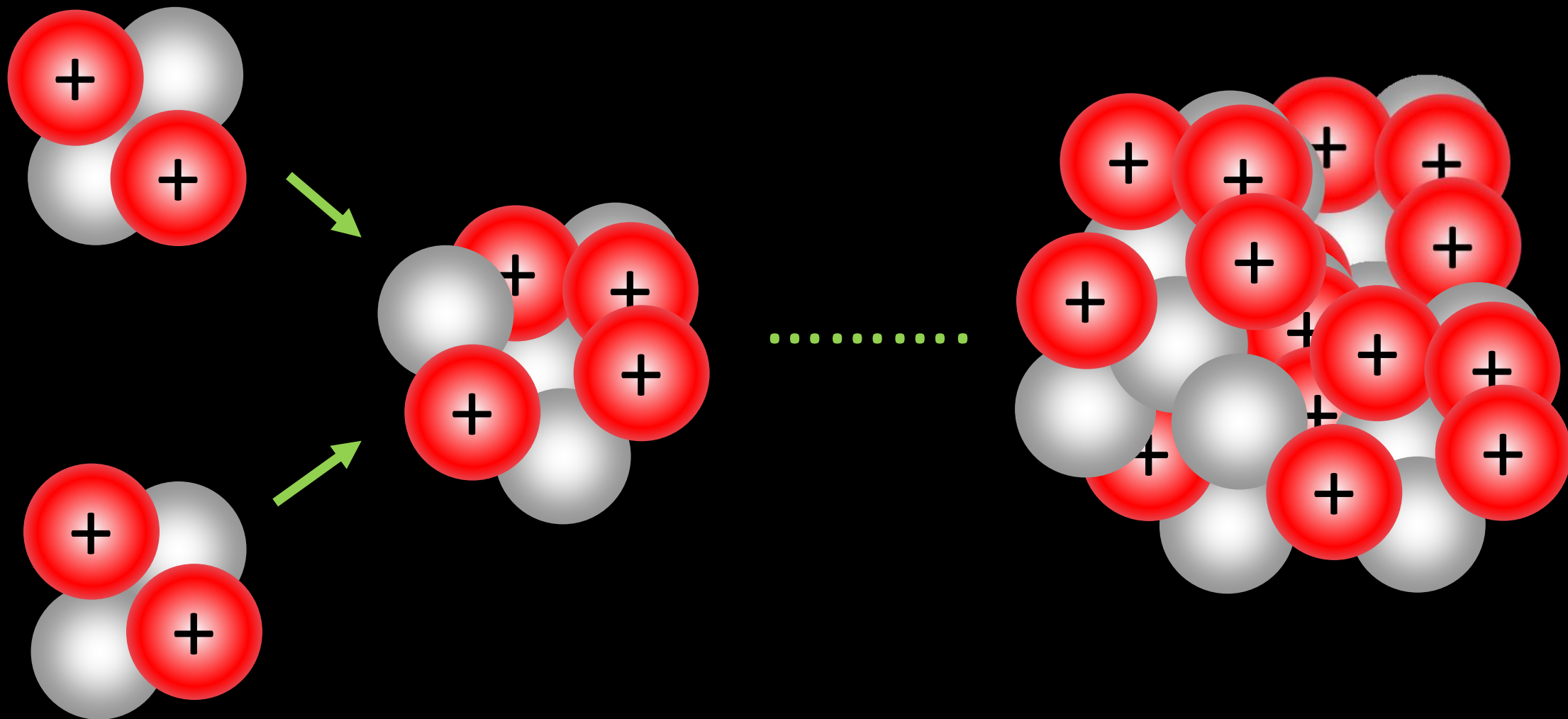


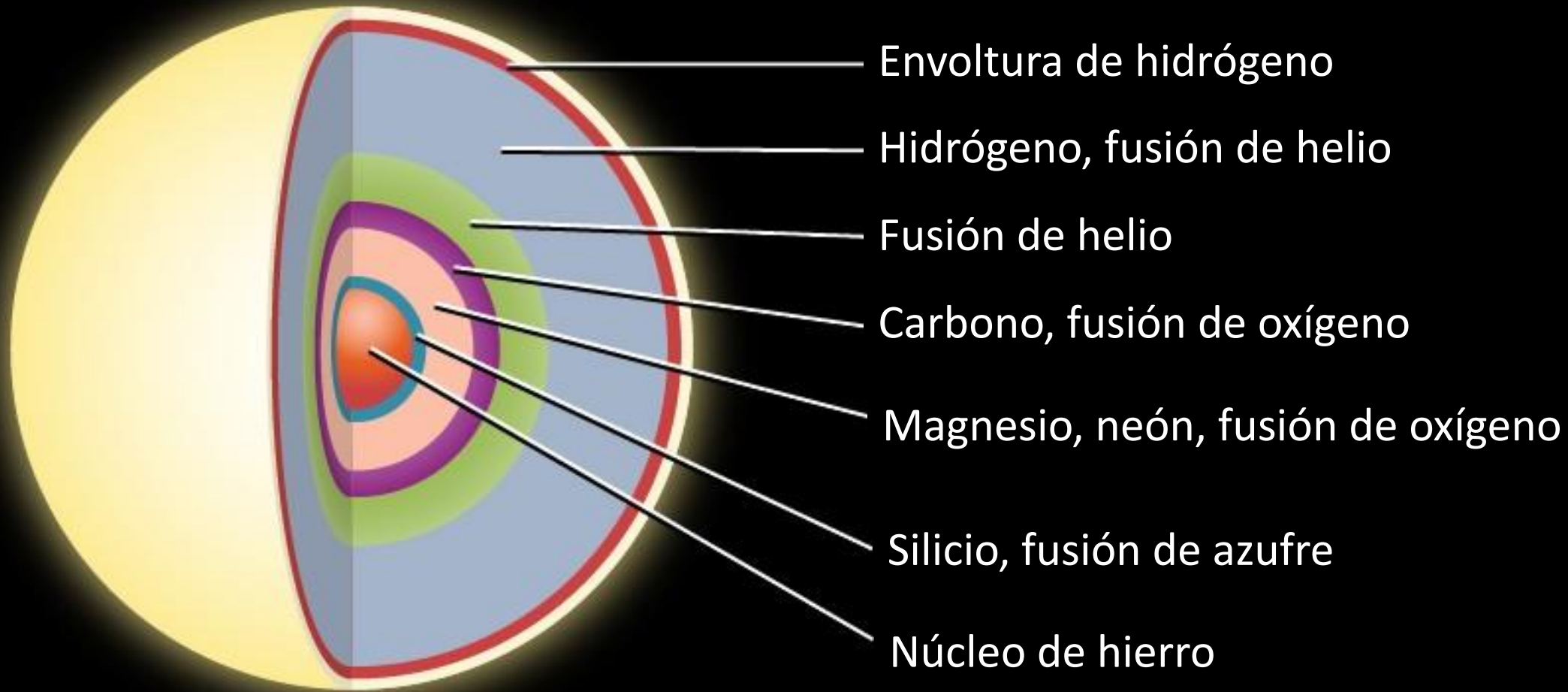
Hace ~13.600 millones de años
(~200 millones de años después del Big Bang)





$$E = mc^2$$





Envoltura de hidrógeno

Hidrógeno, fusión de helio

Fusión de helio

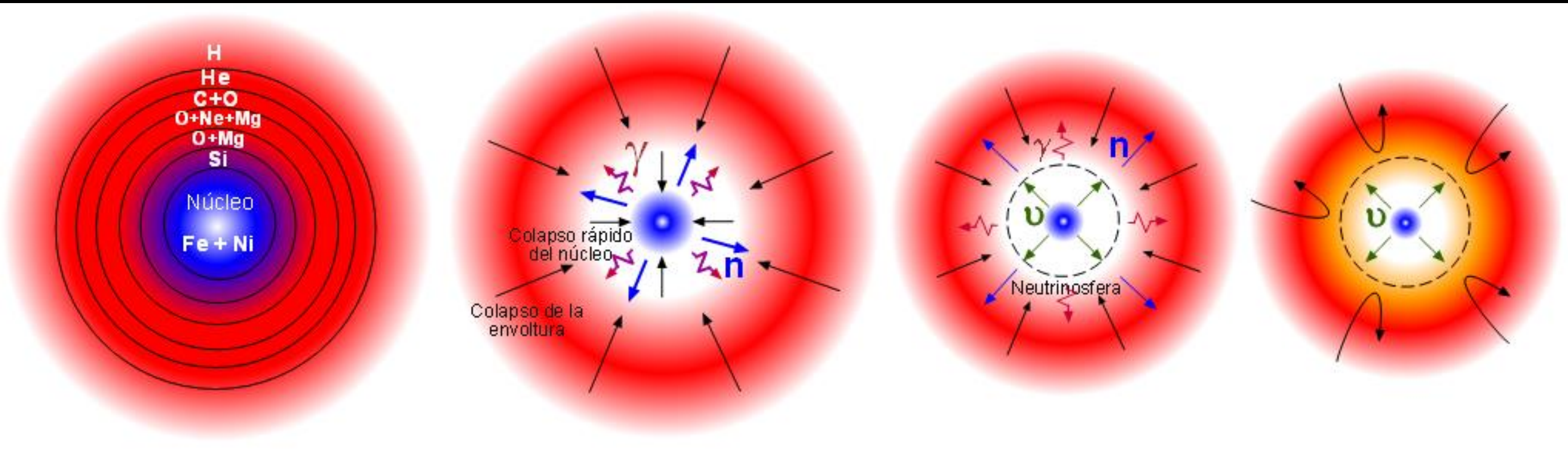
Carbono, fusión de oxígeno

Magnesio, neón, fusión de oxígeno

Silicio, fusión de azufre

Núcleo de hierro

Diseminando material “procesado” al espacio



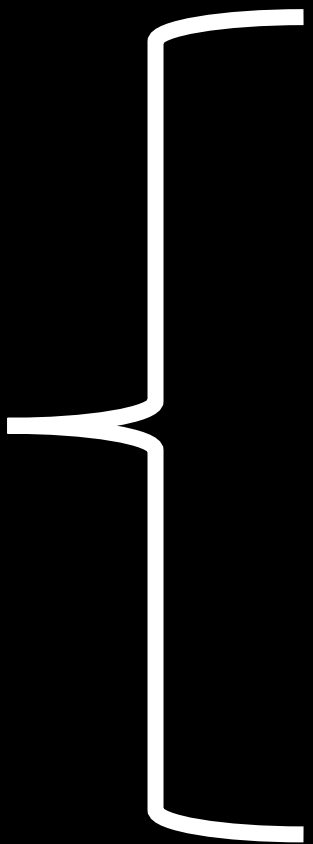
...el espacio se enriqueció con elementos químicos que antes no existían...

...pero solo hasta el hierro (Fe), faltan piezas del rompecabezas....

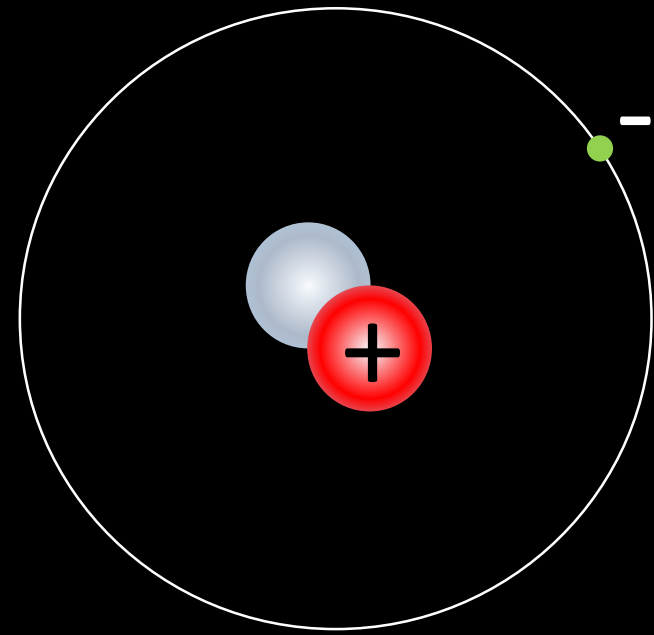
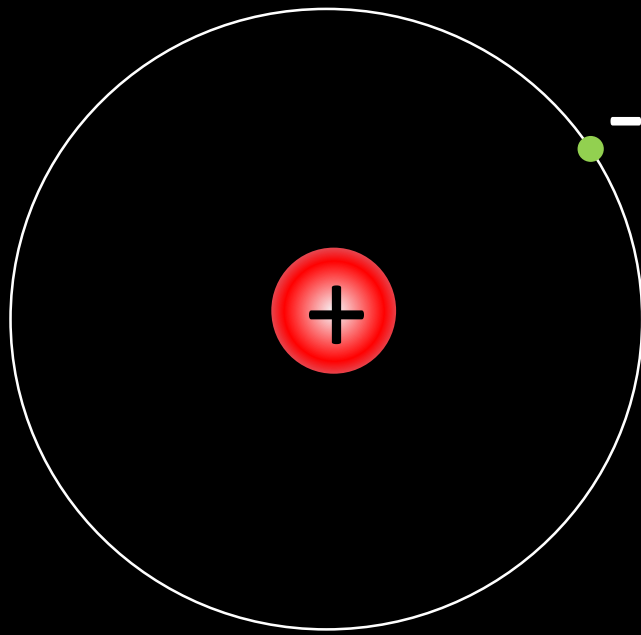
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	H																	He
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe										
5																		
6																		
7																		
8																		
9																		

؟ ?

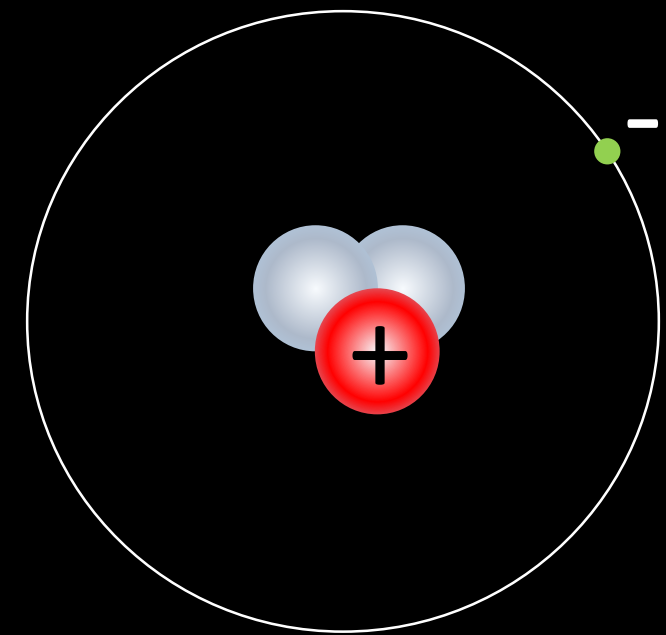
¿cómo se forman los elementos más pesados?



A un elemento químico le caracteriza el número de protones en el núcleo: un ejemplo sencillo, estos tres átomos son H

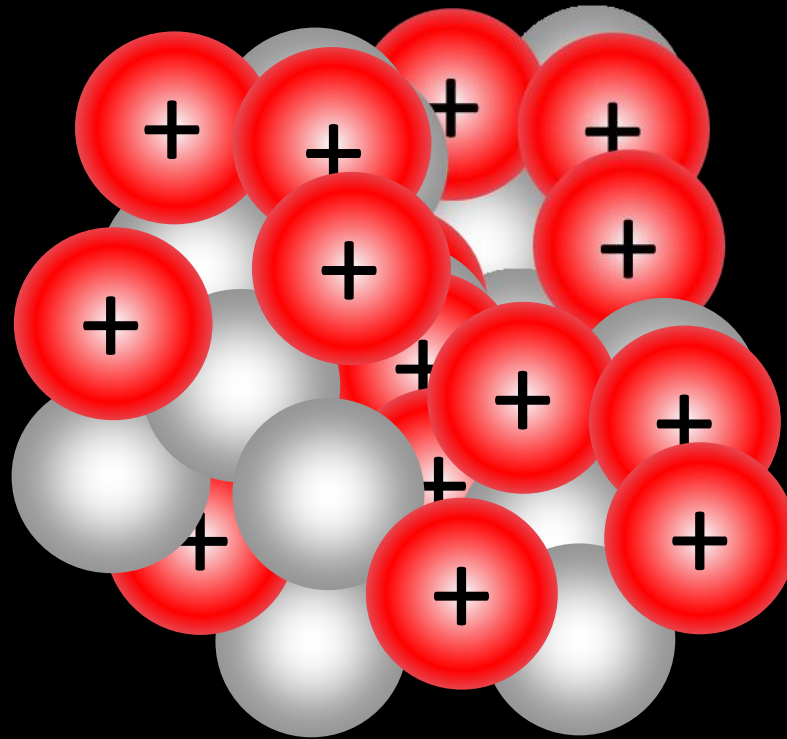


Deuterio



Tritio

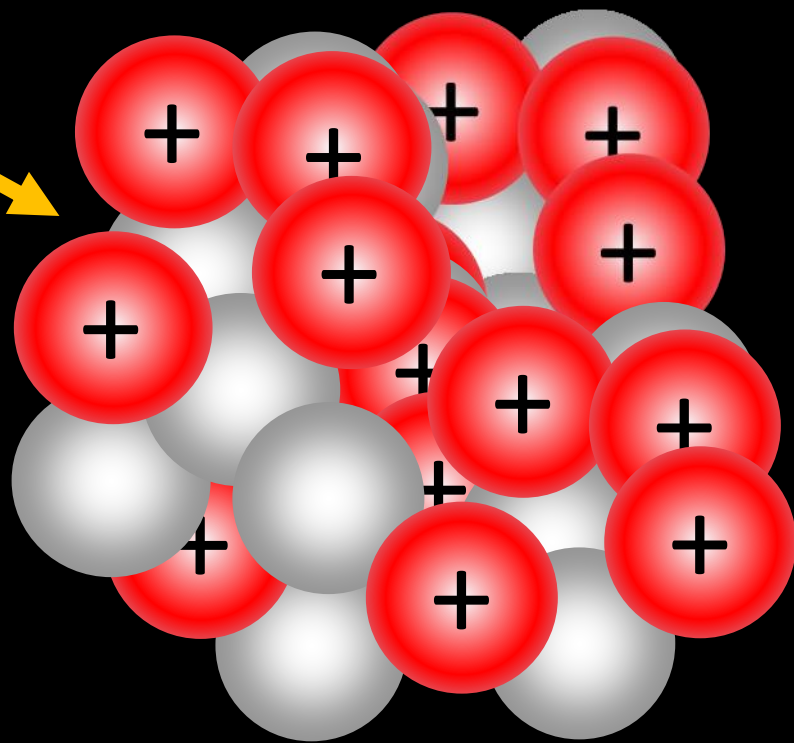
La única forma de que un elemento químico cambie su DNI es aumentando él número de protones



Plata (Ag): 47 protones
62 neutrones

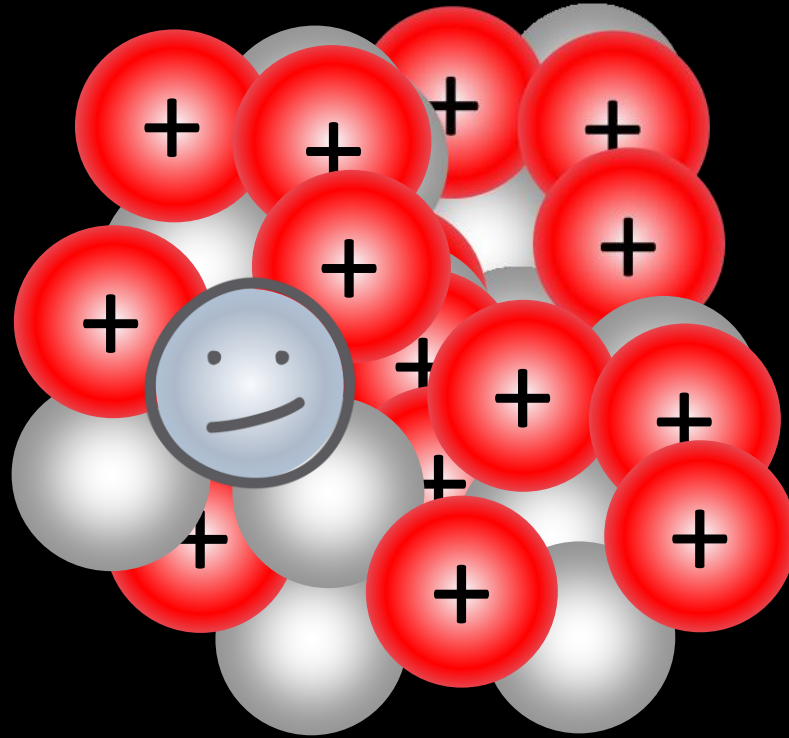


¡Bombardeo con neutrones!

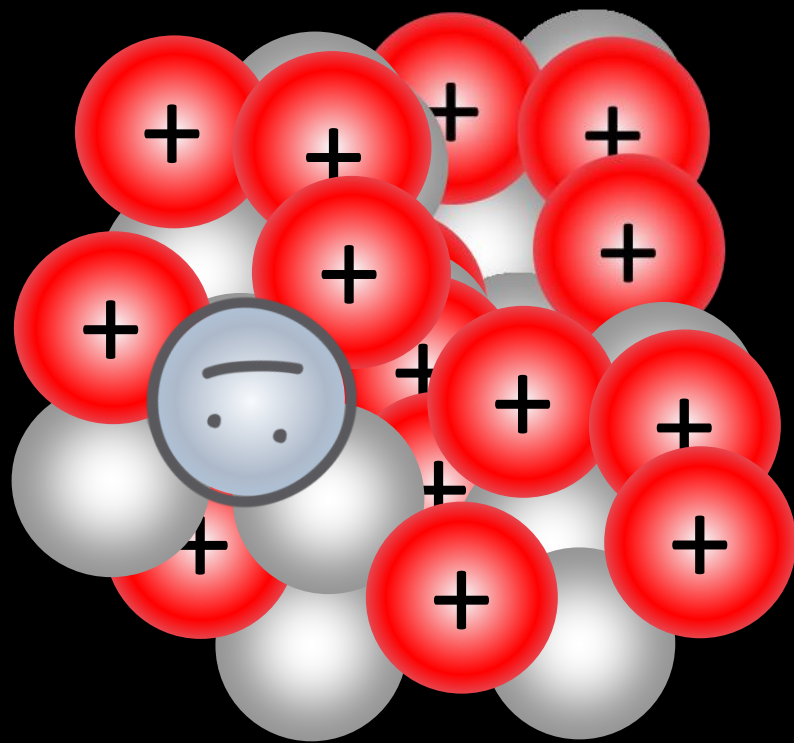


Plata (Ag): 47 protones
62 neutrones
(protones + neutrones = 109)

¡Bombardeo con neutrones!

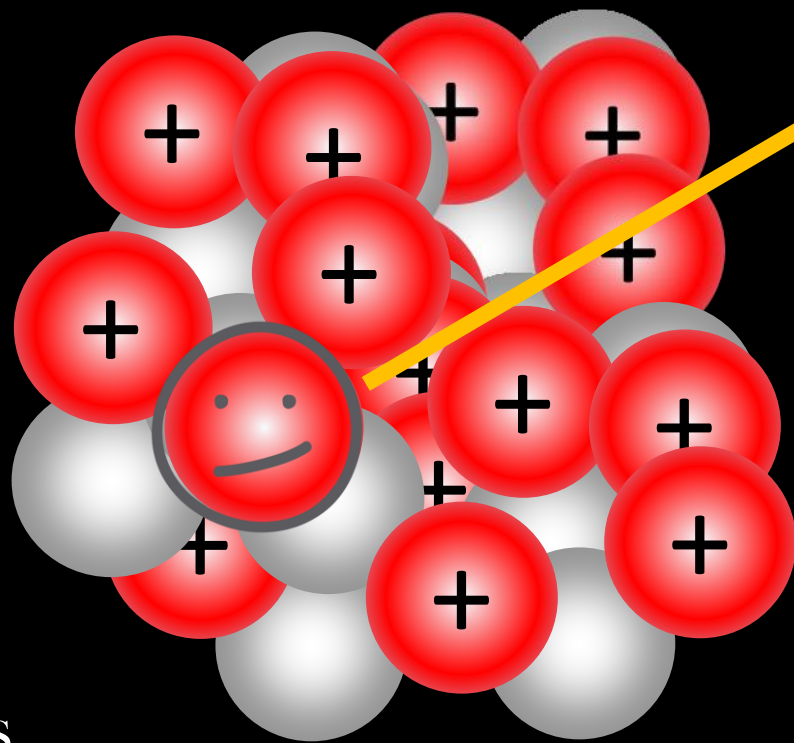


Plata (Ag): 47 protones
62 +1 neutrones



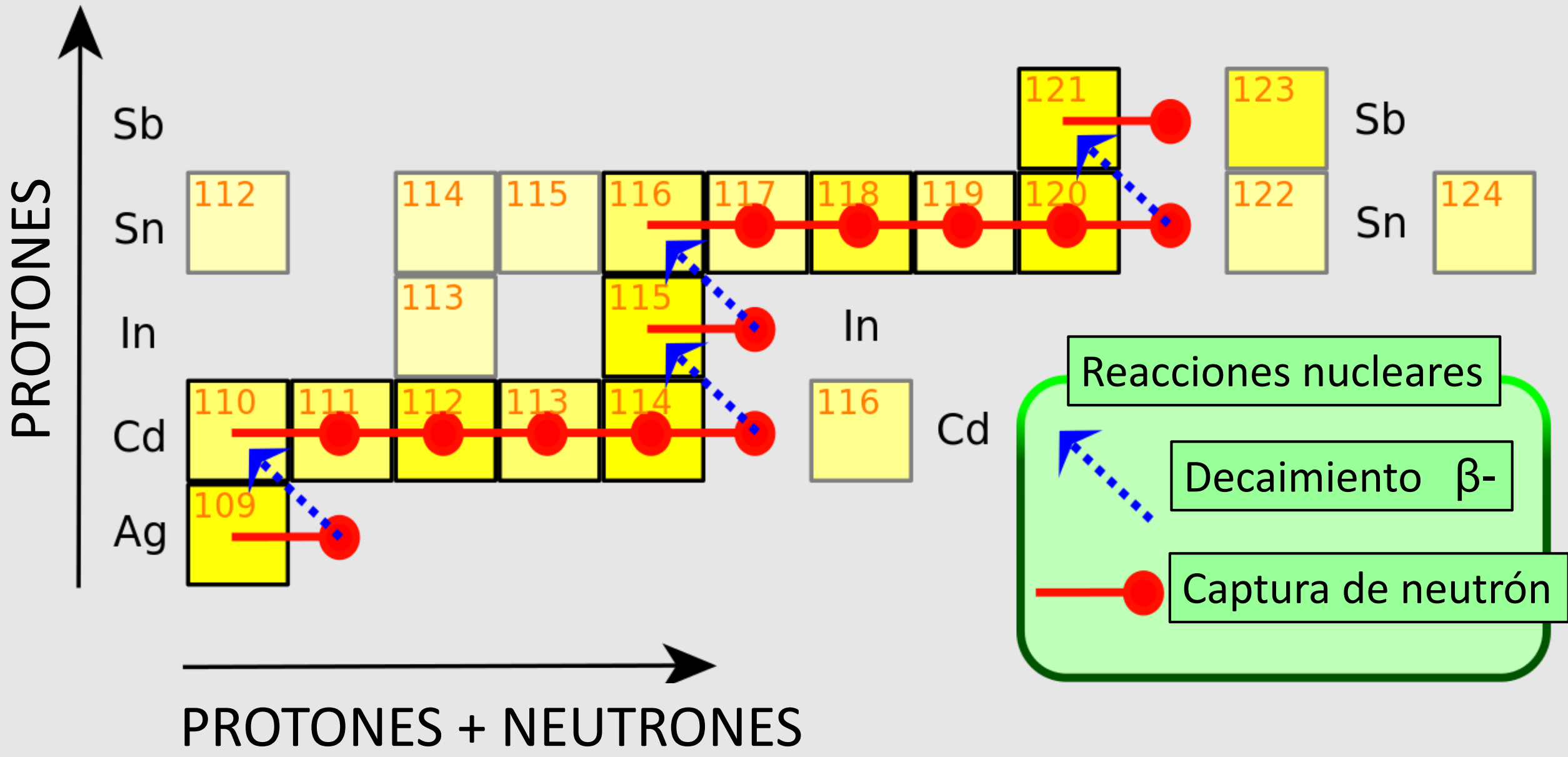
Plata (Ag): 47 protones

62 +1 neutrones ❗❗inestable!!!



“Decaimiento β^- ”

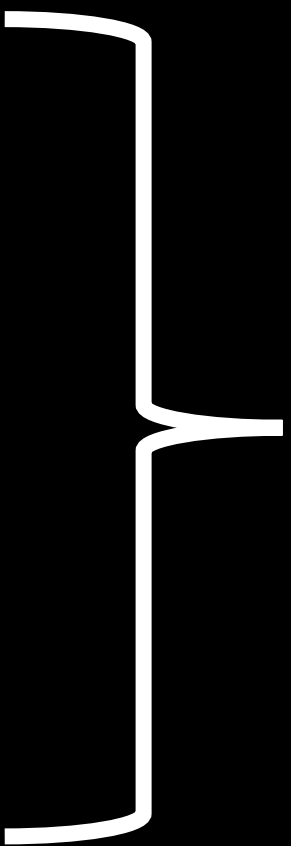
Cadmio (Cd): 48 protones
62 neutrones
(protones + neutrones = 110)



Reacciones nucleares

Decaimiento β^-

Captura de neutrón



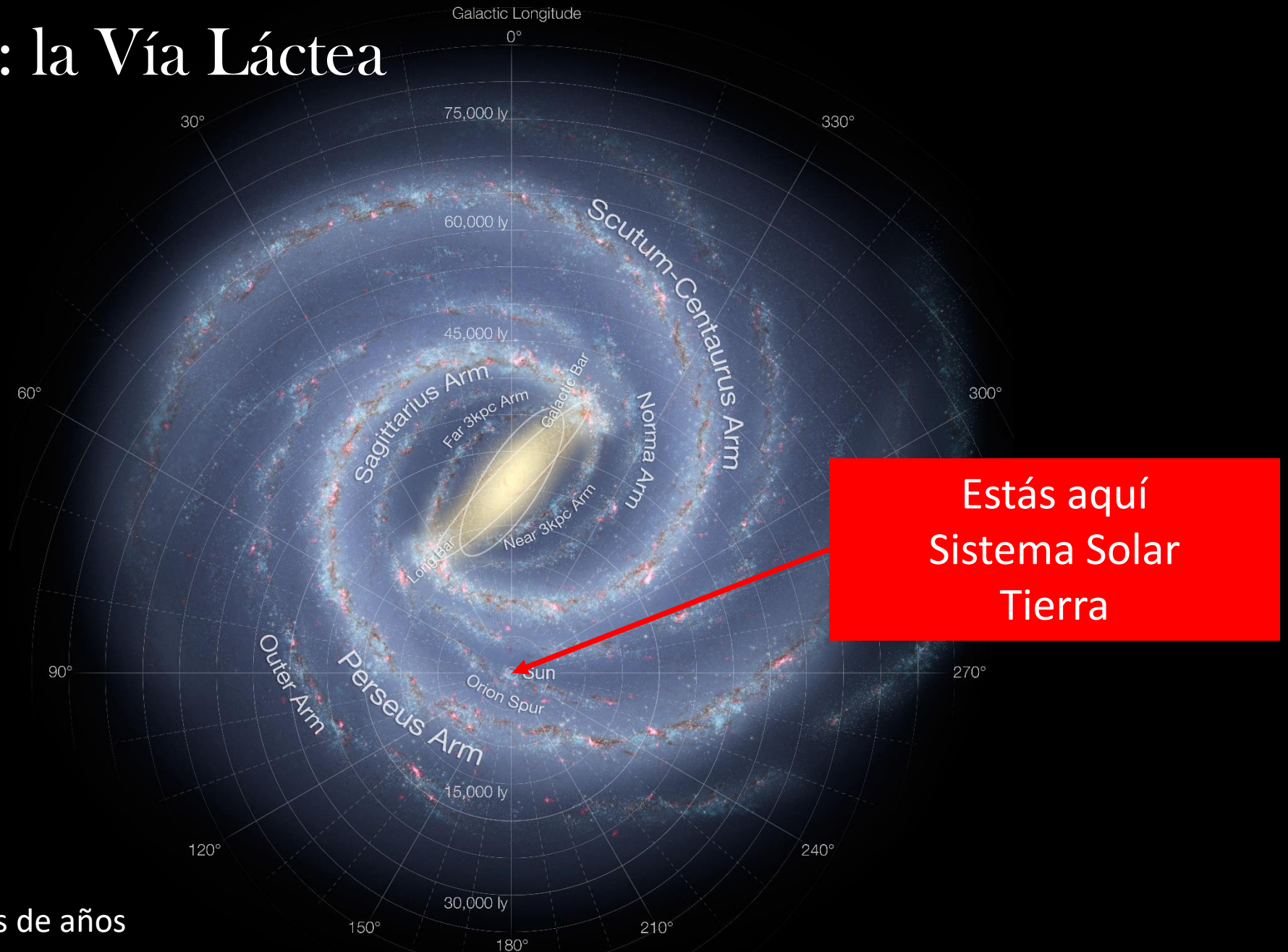
Se crean las primeras galaxias



GN-z11, la galaxia más lejana (...de momento)

Hace 13.400 millones de años

Nuestra galaxia: la Vía Láctea



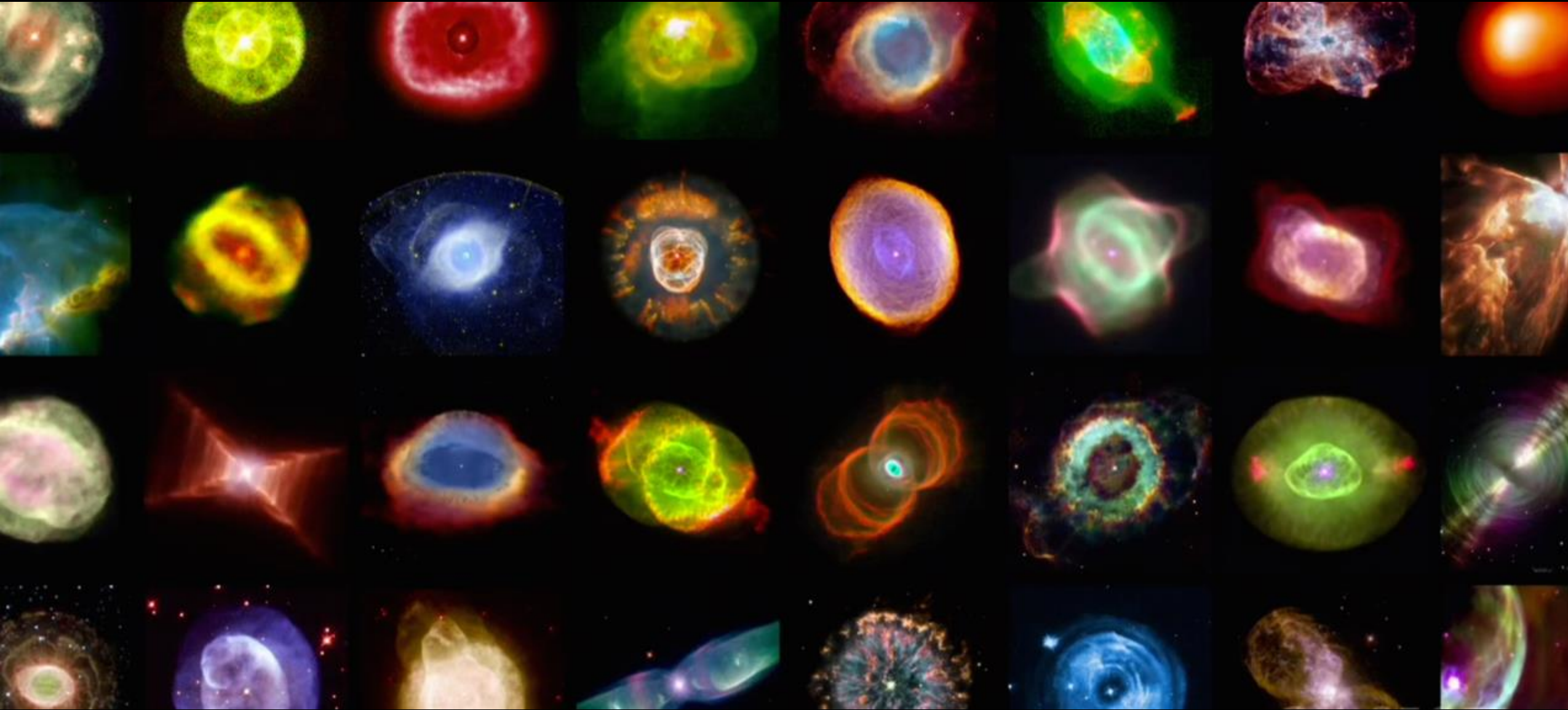
Hace ~11.000 millones de años

...a partir del gas enriquecido por la primera generación de estrellas se formaron generaciones sucesivas...





Enanas blancas y nebulosas planetarias



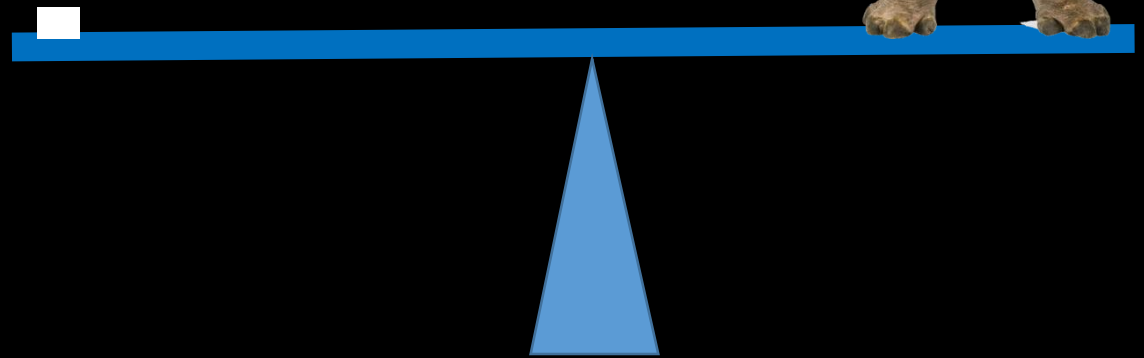
Enanas blancas

Masa $< 1.44 M_{\text{Sol}}$

Densidad $\sim 1\,000\,000 \text{ g/cm}^3$

Radio $\sim 1 R_{\text{Tierra}}$

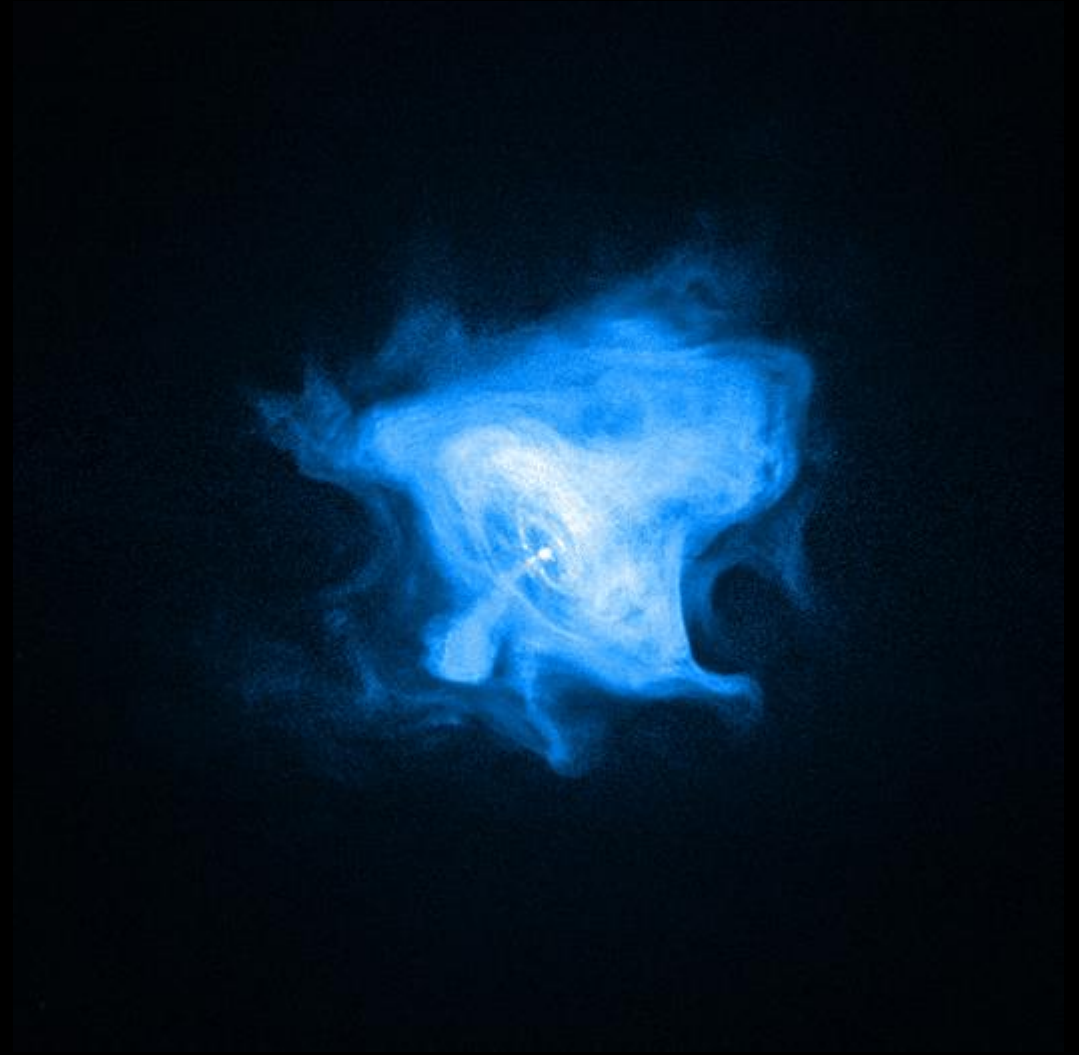
Un “terrón de azúcar”
de enana blanca



Estrellas de neutrones



NASA/ESA HST, STScI



NASA/CXC/SAO/F. Seward et al

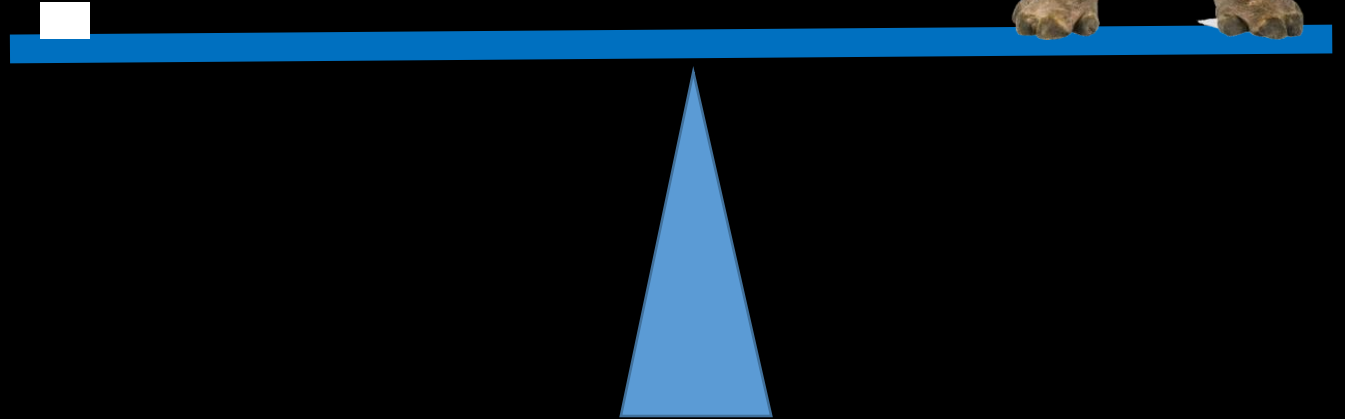
Estrellas de neutrones

$1.44 M_{\text{Sol}} < \text{Masa} < 3 M_{\text{Sol}}$

Densidad $\sim 10^{14} \text{ g/cm}^3$

Radio $\sim 30 \text{ km}$

Un “terrón de azúcar”
de estrella de neutrones



10 000 000

Origen de los elementos

1 H																	2 He	
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
55 Cs	56 Ba			72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra																	
		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		
		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U													

Estrellas de neutrones binarias

Estrellas poco masivas

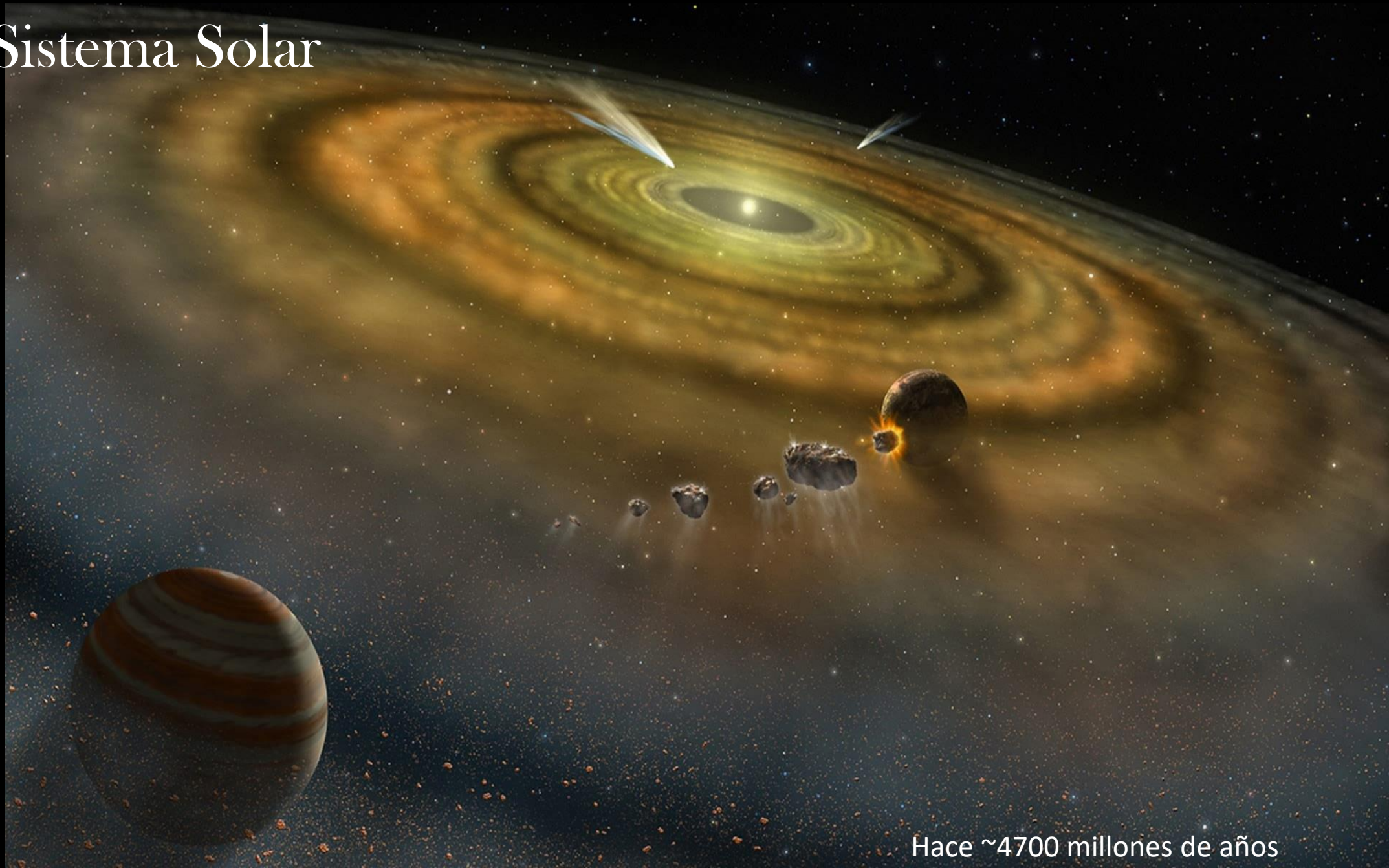
Explosiones de supernovas

Explosiones en enanas blancas

Big Bang

Fisión por rayos cósmicos

Nuestro Sistema Solar



Hace ~4700 millones de años

Los elementos químicos que nos componen, y que componen todo lo que nos rodea, ya existían cuando se formó el Sistema Solar.

calcio



fósforo



oro



plomo, cadmio, antimonio,
cinc, estaño...



carbono, nitrógeno,
oxígeno, azufre...



hierro



wolframio



¡Gracias!