

# EL ORIGEN DE LA TABLA PERIÓDICA: DEL BIG BANG A LOS NÚCLEOS DE ESTRELLAS

J. J. Ruiz-Lorenzo

Departamento de Física,  
Instituto de Computación Científica Avanzada (ICCAEx),  
Universidad de Extremadura  
[http://landau.unex.es/~sphinx/juan/juan\\_talks.html](http://landau.unex.es/~sphinx/juan/juan_talks.html)  
I.E.S. Bioclimático (Badajoz)

Badajoz, 15 de Noviembre 2023

CIENCIA CIRCULAR



R.S.E.F.

Real  
Sociedad  
Española de  
Física



# La Tabla Periódica

## Tabla periódica de los elementos

grupo 1																		18																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
periodo 1																		2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
1																		2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
H Hidrógeno																		He Helio																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
2																		3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
6.94 Li Litio																		9.012182 4 Be Berilio																		5																		6																		7																		8																		9																		10																																																																																																																																																																																																					
22.989769 11 Na Sodio																		24.3050 12 Mg Magnesio																		13																		14																		15																		16																		17																		18																																																																																																																																																																																																					
39.0983 19 K Potasio																		40.078 20 Ca Calcio																		44.95591 21 Sc Escandio																		47.867 22 Ti Titanio																		50.9415 23 V Vanadio																		51.9962 24 Cr Cromo																		54.938045 25 Mn Manganeso																		55.845 26 Fe Hierro																		58.931327 27 Co Cobalto																		58.931327 28 Ni Níquel																		63.546 29 Cu Cobre																		65.38 30 Zn Zinc																		69.723 31 Ga Galio																		72.64 32 Ge Germanio																		74.921603 33 As Arsénico																		78.96 34 Se Selenio																		79.904 35 Br Bromo																		83.798 36 Kr Kriptón																	
85.4678 37 Rb Rubidio																		87.62 38 Sr Estroncio																		88.90585 39 Y Ytrio																		91.224 40 Zr Zirconio																		92.90638 41 Nb Niobio																		95.96 42 Mo Molibdeno																		(98) 43 Tc Tecnecio																		101.07 44 Ru Rubidio																		102.905545 45 Rh Rodio																		106.42 46 Pd Paladio																		107.868247 47 Ag Plata																		112.414 48 Cd Cadmio																		114.818 49 In Indio																		118.710 50 Sn Estaño																		127.60 51 Sb Antimonio																		127.60 52 Te Teluro																		126.90453 53 I Yodo																		131.293 54 Xe Xenón																	
132.90545 55 Cs Cesio																		137.327 56 Ba Bario																		174.9668 57 Lu Lutecio																		178.49 58 Hf Hafnio																		180.94788 59 Ta Tantalio																		183.84 60 W Wolframio																		186.207 61 Re Renio																		190.23 62 Os Osmio																		192.22 63 Ir Iridio																		195.084 64 Pt Platino																		196.966579 65 Au Oro																		200.59 66 Hg Mercurio																		204.38381 67 Tl Talio																		207.2 68 Pb Plomo																		208.980483 69 Bi Bismuto																		(210) 70 Po Polonio																		(210) 71 At Astatido																		(210) 72 Rn Radón																	
(223) 87 Fr Francio																		(226) 88 Ra Radium																		(261) 103 Lr Lawrencio																		(261) 104 Rf Rutherfordio																		(262) 105 Db Dubnio																		(262) 106 Sg Seaborgio																		(264) 107 Bh Bohrio																		(264) 108 Hs Hascio																		(265) 109 Mt Meitnerio																		(267) 110 Ds Darmstadtio																		(268) 111 Rg Roentgenio																		(268) 112 Cn Copernicium																		(268) 113 Nh Nihonio																		(269) 114 Fl Flerovio																		(269) 115 Mc Moscovio																		(269) 116 Lv Livermorio																		(271) 117 Ts Teneso																		(271) 118 Og Oganesson																	

masa atómica y número atómico del sodio más o menos

1ª energía de ionización en kJ/mol

símbolo químico

nombre

configuración electrónica

55.845 26

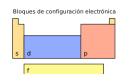
762.5 1.83

Fe

Hierro

[Ar] 3d<sup>6</sup> 4s<sup>2</sup>

- metales alcalinos
- alcalinotérros
- otros metales
- metales de transición
- lanfánidos
- actínidos
- metaloides
- no metales
- halógenos
- gases nobles
- elementos desconocidos
- masas de elementos radiactivos entre paréntesis



Notas

- + 1) (u) = 98.485 uV
- \* Todos los elementos tienen un estado de oxidación +1 (u) en ceros.
- Usos estadísticos de ionización de los elementos 108, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117 y 118 son predicciones.
- Usos configuraciones electrónicas de los elementos 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117 y 118 son predicciones.

138.90545 57 La Lantano	140.116 58 Ce Cerio	140.90765 59 Pr Praseodimio	144.242 60 Nd Neodimio	(145) 61 Pm Prometio	150.36 62 Sm Samario	151.964 63 Eu Europio	157.25 64 Gd Gadolinio	158.92535 65 Tb Terbio	162.500 66 Dy Disprosio	164.930367 67 Ho Holmio	167.259 68 Er Eritio	168.934269 69 Tm Talio	173.054 70 Yb Ytterbio
(227) 89 Ac Actinio	232.03806 90 Th Torio	231.03891 91 Pa Protactinio	238.02891 92 U Uranio	(237) 93 Np Neptunio	244 94 Pu Plutonio	(243) 95 Am Americio	(247) 96 Cm Curcio	(251) 97 Bk Berkelio	(252) 98 Cf Californio	(257) 99 Es Eiseinsteinio	(257) 100 Fm Fermio	(258) 101 Md Mendelevio	(259) 102 No Nihonio



Original file: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Periodic\\_table\\_large-es.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Periodic_table_large-es.svg)

[Wiki]

## Composition of the Universe

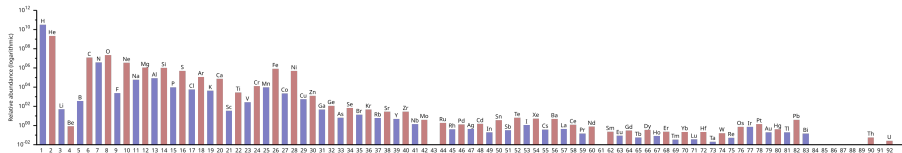
### Element Abundance

Approximately 92% of the atoms in the universe are hydrogen and 7.1% are helium.

Hydrogen and helium account for 75% and 23% of the universe's mass, respectively.

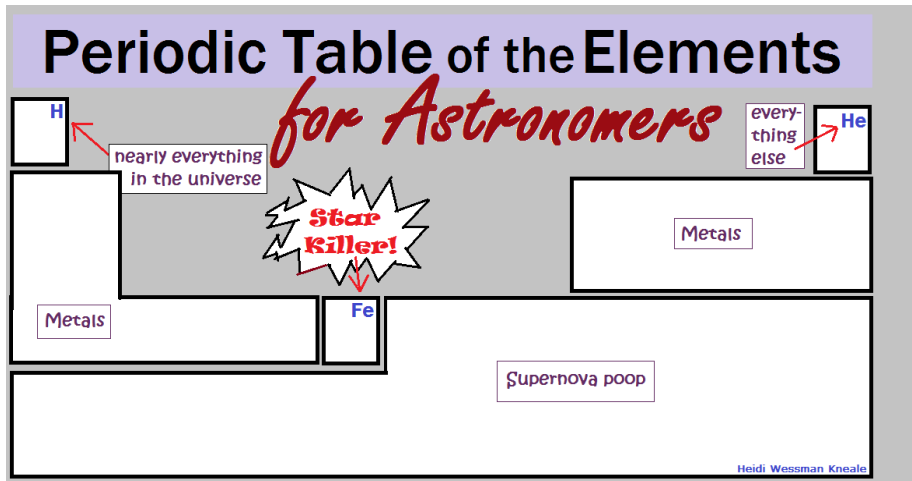
hydrogen	75%
helium	23%
oxygen	1%
carbon	0.5%
neon	0.1%
iron	0.1%
nitrogen	0.1%
all others	0.2%

# Proporciones de los elementos químicos en el universo

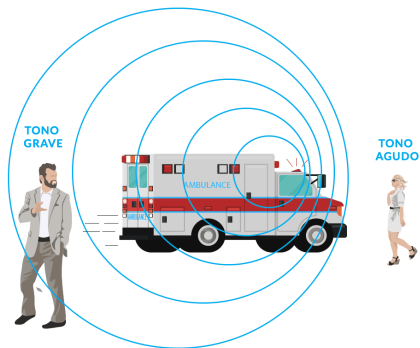


[Wiki]

- 1 Mini-introducción al Big Bang (BB).
- 2 Nucleosíntesis de los elementos químicos ligeros en el BB.
- 3 ¿Cómo generan energía las estrellas?
- 4 Generación de los elementos pesados en los núcleos estelares.
- 5 ¿Qué le ocurre a una estrella cuando agota su combustible?
- 6 Etapas de la evolución estelar.



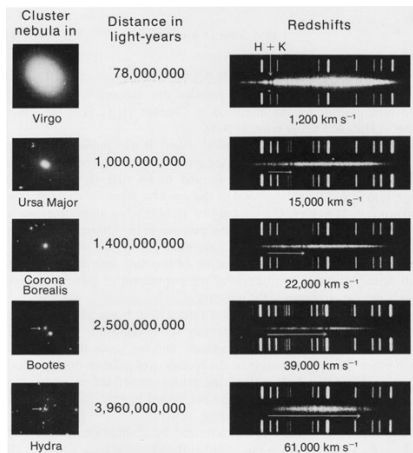
# Expansión del Universo



$$\nu = c/\lambda$$

$$\nu = \frac{c}{c \pm v_a} \nu_0$$

# Expansión del Universo



$$z = \frac{\lambda_g - \lambda_o}{\lambda_o}$$

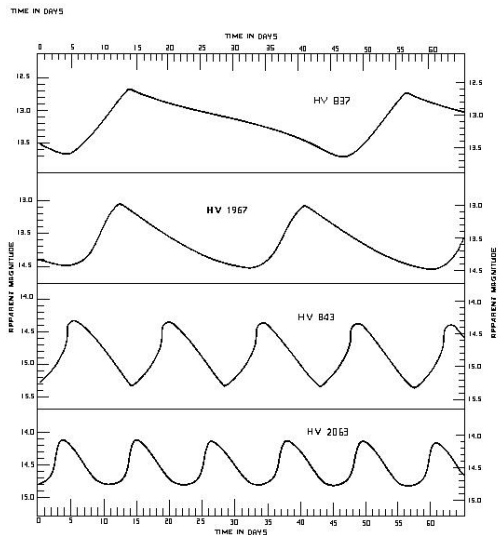
## Vesto Slipher





# Expansión de Universo

## Curvas de luz para Cefeidas.



Cefeidas. Relación Periodo-Luminosidad:

$$M_v = -2.81 \log_{10}(P) - (1.43 \pm 0.1)$$

Descubierta por Henrietta Swan Leavitt.



$$5 \log_{10} \left( \frac{D_L}{10 \text{pc}} \right) = m_B - M_B$$

## A RELATION BETWEEN DISTANCE AND RADIAL VELOCITY AMONG EXTRA-GALACTIC NEBULAE

BY EDWIN HUBBLE

MOUNT WILSON OBSERVATORY, CARNEGIE INSTITUTION OF WASHINGTON

Communicated January 17, 1929

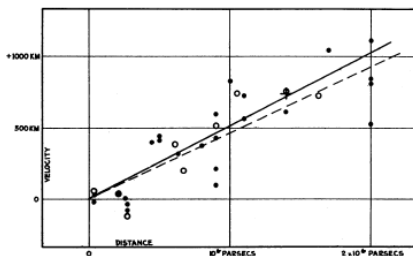


FIGURE 1

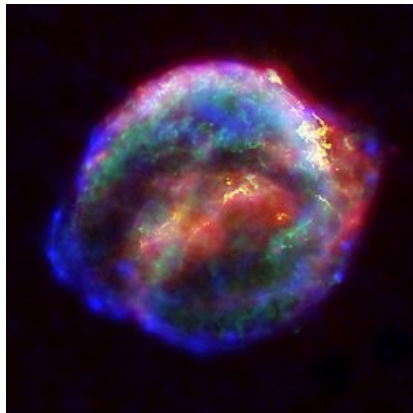
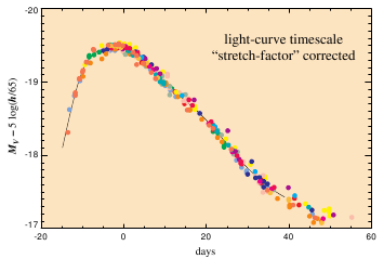
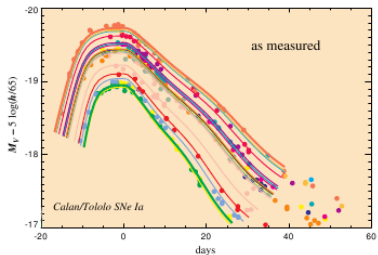
Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

$$v = H_0 d, \quad H_0 \simeq 500 \frac{\text{km}}{\text{s Mpc}}.$$

$$H_0^{-1} \simeq 2 \times 10^9 \text{ años.}$$

# Expansión de Universo

## Supernovas SNIa.



[NASA]



# Edwin Hubble



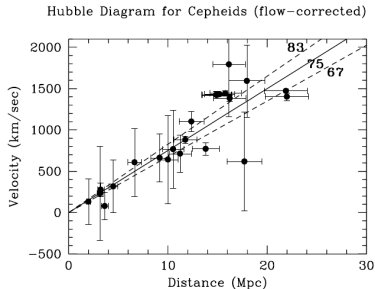
[AIP]

# Hubble Space Telescope (NASA)



[NASA]

# Expansión de Universo (VI)



[NASA]

Sonda Planck (ESA):

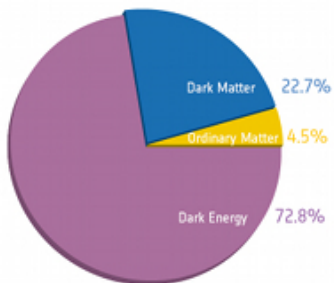
$$v = H_0 d, \quad H_0 \simeq 67.5 \frac{\text{Km}}{\text{s Mpc}}.$$

$$H_0^{-1} \simeq 14.5 \times 10^9 \text{ años.}$$

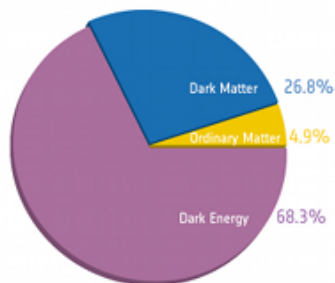
Edad del Universo: 13788 millones de años.



# La Receta de Nuestro Universo



Before Planck



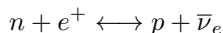
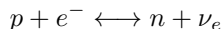
After Planck

[Planck]



# Generación de Helio en el BB (4 primeros minutos)

- $T > 10^{10}$  K. Menos de 1 s después del Big Bang.
  - Sopa de  $p$  y  $n$  en equilibrio térmico (químico) mediante las reacciones:



- En equilibrio (químico)

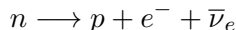
$$\frac{n_n}{n_p} = \exp\left(-\frac{(m_n c^2 - m_p c^2)}{k_B T}\right)$$

$$R = N_A k_B, m_n - m_p \simeq 0.0014 m_p.$$

- $T \lesssim 10^{10}$  K. Los  $n$  y los  $p$  ya no están en equilibrio. El cociente está fijado a  $n_n/n_p \simeq 1/5$  (último valor de equilibrio).

# Generación de Helio en el BB (4 primeros minutos)

- Desintegración  $\beta$  de los neutrones.



- Vida media del neutrón (no ligado!):  $\tau = 889.1$  s.

$$\lambda = \frac{1}{\tau} = 1/(889.1 \text{ s})$$

- el número de neutrones como función del tiempo es:

$$N_n(t) = N_{n,0} e^{-\lambda t}$$

- Imaginemos que tenemos 200 neutrones por cada 1000 protones (proporción 1/5) y los neutrones se empiezan a desintegrar. Por ejemplo, cuando pasen 167 segundos, quedarán:

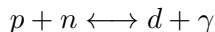
$$200 \times \exp(-167/889) = 166 \text{ neutrones}$$

Los 34 neutrones que faltan se habrán convertido en protones:  $1000+34=1034$  p.

La nueva proporción será  $166/1034 \simeq 1/6$ .

# Generación de Helio en el BB (4 primeros minutos)

- $T \simeq 10^9$  K. 168 s después del BB comienza la nucleosíntesis del Deuterio.



Debido a la desintegración  $\beta$  de los  $n$  durante estos 167 s, la proporción de  $n$  y  $p$  ha caído de  $1/5$  a  $n_n/n_p \simeq 1/6$ .

- Una vez que el Deuterio se empieza a formar, comienza inmediatamente la nucleosíntesis del He.

# Generación de Helio en el BB (4 primeros minutos)

- Todos los neutrones esencialmente acaban en núcleos de He:

$$n_{\text{He}} = \frac{n_n}{2}$$

- La proporción (primordial) en masa de He será ( $m_p \simeq m_n$ ):

$$Y_P(^4\text{He}) = \frac{4m_p n_{\text{He}}}{n_p m_p + n_n m_p} = \frac{2n_n}{n_p + n_n} = \frac{2(n_n/n_p)}{1 + (n_n/n_p)}$$

Por lo tanto, asumiendo  $n_n/n_p \simeq 1/6$ :

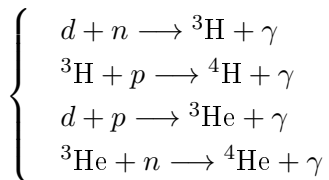
$$Y_P(^4\text{He}) \simeq 29\%$$

- Muy buen acuerdo con los datos observacionales!!

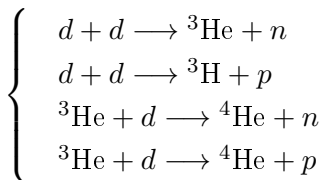
# Nucleosíntesis

Núcleos de isótopos del H: Deuterón ( $d \equiv {}^2\text{H}$ ), Tritón ( ${}^3\text{H}$ ).

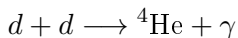
Con emisión de fotones  $\gamma$  (más lento):



Sin emisión de fotones (más rápido):

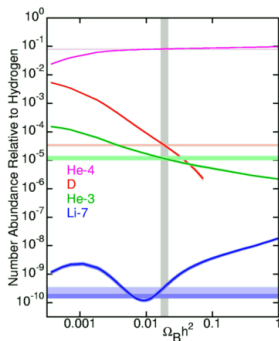


Efecto neto:



# Nucleosíntesis

Durante los tres primeros minutos del Universo se formaron núcleos de H,  $^2\text{H}$ , He y Li.



[UCLA]

$$\eta \equiv \frac{n_B}{n_\gamma} = 6.2 \times 10^{-10}$$

# Temperatura de una estrella

- Sea un gas ideal con  $N$  partículas en un Volumen  $V$

$$pV = nRT$$

- $n = N/N_A$  es el número de moles. Definamos  $R = N_A k_B$  y tengamos en cuenta que  $pV$  tiene dimensiones de energía, entonces podemos estimar que la energía (cinética) de este gas ideal es

$$E_C \sim pV = Nk_B T$$

- Si tenemos una estrella formada por  $N$  protones y  $N$  electrones, su energía (cinética) será

$$E_C \sim 2Nk_B T$$

- Si las  $N$  partículas están esencialmente en reposo, colapsaran debido a la atracción gravitatoria. La energía gravitatoria la podemos estimar como

$$E_G \sim -G_N M^2 / R$$

donde  $M \simeq Nm_p$  es la masa de la estrella y  $R$  su radio.

# Temperatura de una estrella

- Para que la energía cinética de los electrones compense la energía gravitacional

$$E_T = E_C + E_G \geq 0$$

- Y despejando la temperatura (en el caso más desfavorable  $E_T = 0$ , velocidad de escape!)

$$T \sim \frac{G_N M m_p}{k_B R}$$

- Sustituyendo los valores del Sol ( $M = 1.96 \times 10^{30}$  kg,  $R = 6.96 \times 10^8$  m) podemos estimar

$$T \sim 10^7 \text{K}$$

a comparar con la temperatura del centro Sol:  $T \sim 1.5 \times 10^7$  K!!

- ¿Cómo consigue una estrella generar esta temperatura para no colapsar?



# Hans A. Bethe (1906-2005)



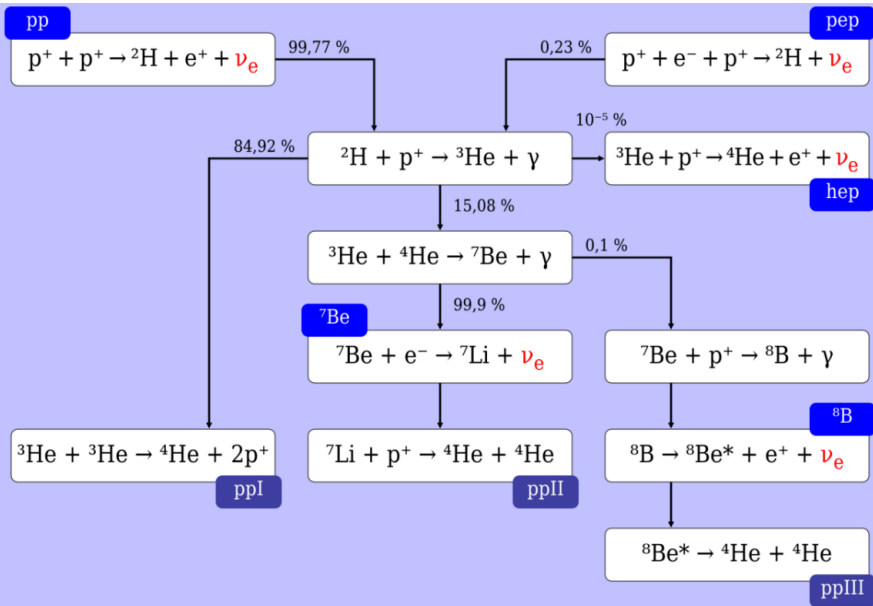
[osti.gov]

Premio Nobel de Física 1967.

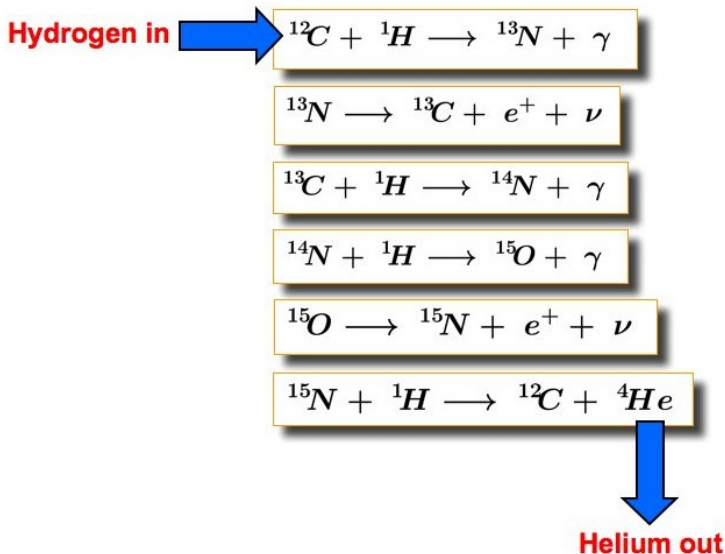
# Hans A. Bethe en la película Oppenheimer



# Ciclo protón-protón



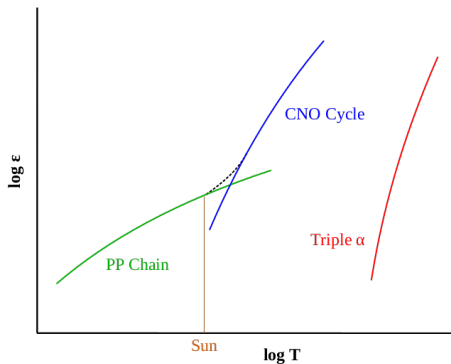
# Ciclo Carbono-Nitrógeno-Oxígeno (CNO)



[SAO Encyclopedia of Astronomy]



# Ciclo protón-protón frente a Carbono-Nitrógeno-Oxígeno (CNO)



[Wiki]

$$T_C \sim 17 \times 10^6 \text{ K.}$$

# REVIEWS OF MODERN PHYSICS

VOLUME 29, NUMBER 4

OCTOBER, 1957

## Synthesis of the Elements in Stars\*

E. MARGARET BURBIDGE, G. R. BURBIDGE, WILLIAM A. FOWLER, AND F. HOYLE

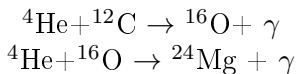
*Kellogg Radiation Laboratory, California Institute of Technology, and  
Mount Wilson and Palomar Observatories, Carnegie Institution of Washington,  
California Institute of Technology, Pasadena, California*

“It is the stars, The stars above us, govern our conditions”;  
(*King Lear*, Act IV, Scene 3)

but perhaps

“The fault, dear Brutus, is not in our stars, But in ourselves,”  
(*Julius Caesar*, Act I, Scene 2)

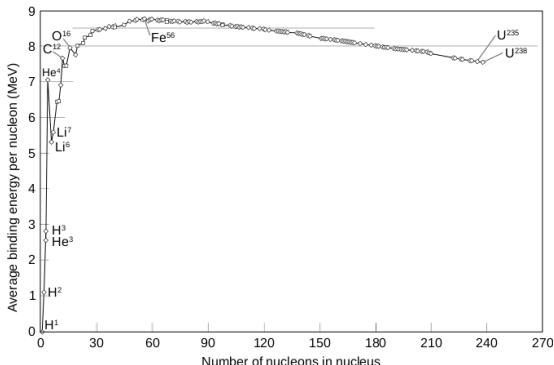
- No hay núcleos estables que se puedan obtener en la colisión de un núcleo de He y un protón o entre dos núcleos de He.
- Pero en las condiciones existentes en un núcleo estelar, se puede producir una colisión “triple” de átomos de He produciendo  $^{12}\text{C}$ .
- Y ya se puede continuar generando los núcleos de la tabla periódica. Por ejemplo:



...

- **Pero** no se puede ir más allá del Hierro.

# Estabilidad Nuclear



[Wiki]

Ejemplo: Fe<sup>56</sup>:  $M = 55.934939 \text{ u}$ .

$1 \text{ u} = 1.66053906660 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ;  $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-13} \text{ J}$ .

Tenemos 26 p ( $m_p = 1.007276466621 \text{ u}$ ) y 30 n ( $m_n = 1.0086649160 \text{ u}$ ). El defecto de masa (energía) es

$$Mc^2 - (26m_p c^2 + 30m_n c^2) = -492.2 \text{ MeV}$$

Y el defecto de masas por nucleón es de -8.8 MeV/nucleón.





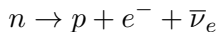
# Y cuando la estrella está compuesta por Hierro, ¿Qué ocurre?

- Cuando se llega al Fe, se bloquean las reacciones termonucleares y la estrella se empieza a enfriar y comienza su colapso gravitacional.
- El segundo freno es la presión de “degeneración cuántica” de los electrones.
- Si  $M < M_{\text{Ch}} \simeq 1.4M_{\odot}$ , los electrones frenan el colapso y el resultado final es una **enana blanca**.

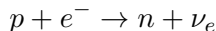


$$M > M_{\text{Ch}}$$

- Si  $M > M_{\text{Ch}}$  la estrella comienza a colapsar.
- Explosión Supernova.
- Decaimiento  $\beta$  usual:



- Decaimiento  $\beta$  **inverso**:



- Todos los protones y electrones se convierten en neutrones.
- El nucleo de la estrella se estabiliza mediante la “presión” de degeneración cuántica” de los neutrones si:

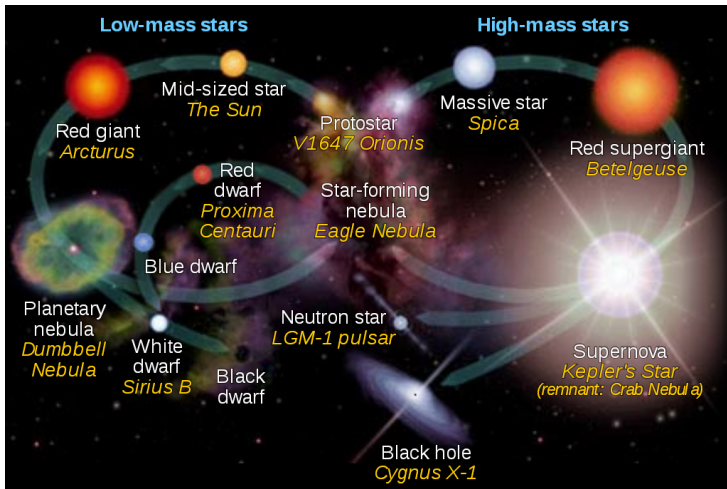
$$M < M_{\text{OV}} = 2.2M_{\odot}$$

- Si  $M > M_{\text{OV}}$  se producirá un Agujero Negro.

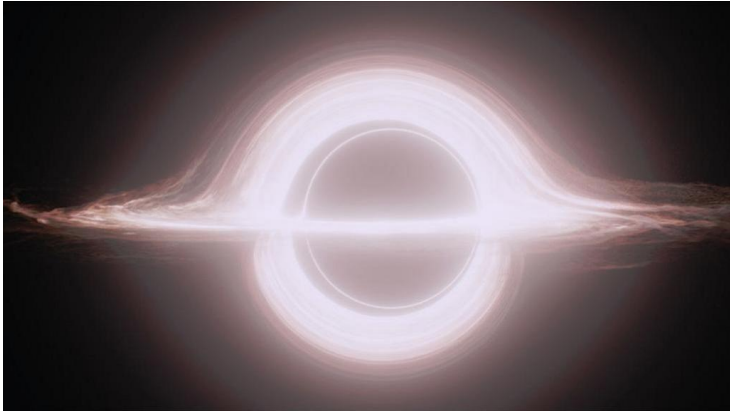
# Landau / Oppenheimer



# Etapas de la evolución Estelar (Resumen)



# Agujero Negro tipo Kerr (Gargantua)



MUCHAS GRACIAS POR  
VUESTRA ATENCIÓN!!