

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
(1867-2017)

## Elementos de Astrofísica y Las Estrellas

Por: Gonzalo Duque-Escobar

Manizales, abril 20 de 2020.

<http://www.bdigital.unal.edu.co/1700>

Imagen OAM y el Sabio Caldas. Por Carolina  
Calderón Franco <http://oam.manizales.unal.edu.co>



# Presentación

- Las siguientes notas, soportadas en dos capítulos de la Guía Astronómica (1), titulados Elementos de Astrofísica y Las Estrellas, contienen una revisión general, de carácter cualitativo y divulgativo, con temas afines organizados en tres apartes: el primero, sobre el universo de los átomos y la física de partículas; el segundo, sobre variables estelares y la evolución estelar, y el tercero, sobre cosmología y la astrofísica de las estrellas.
- El documento, está dirigido a alumnos del Contexto de Astronomía, de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, un curso general, no especializado, sin prerrequisitos y que no hace parte de una secuencia.

• 1- Ver: [Guía Astronómica](#). Duque-Escobar, Gonzalo. Universidad Nacional de Colombia 2017.



Imagen: Observatorio Astronómico de Manizales AOM, Universidad Nacional de Colombia, en: <http://oam.manizales.unal.edu.co>

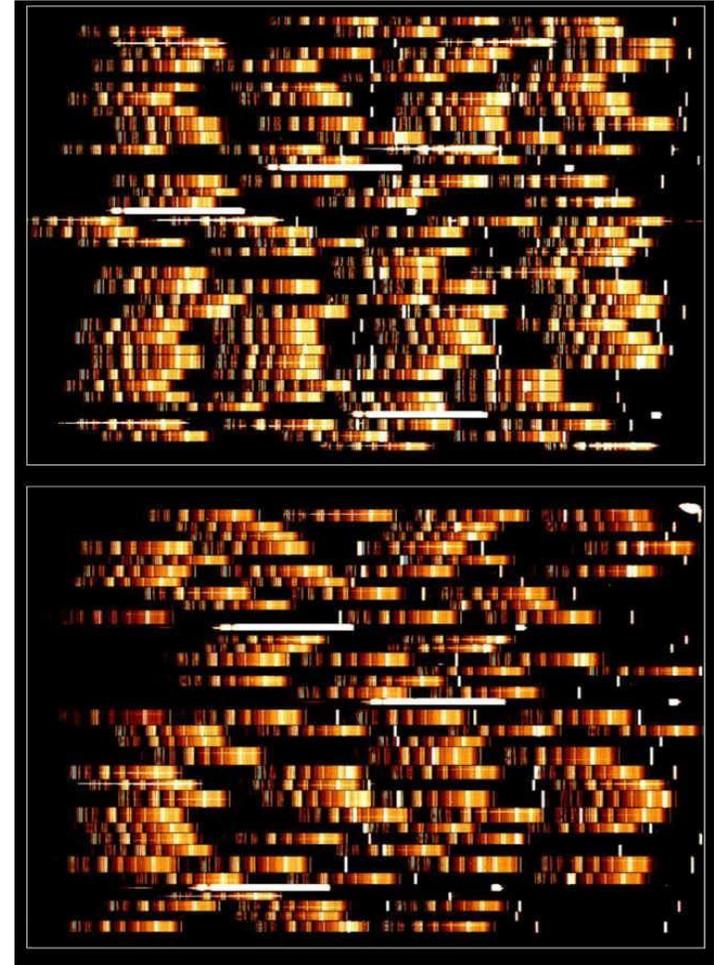


# GUÍA ASTRONÓMICA

## GUÍA Nº 8

<http://www.bdigital.unal.edu.co/1700>

### ELEMENTOS DE ASTROFISICA



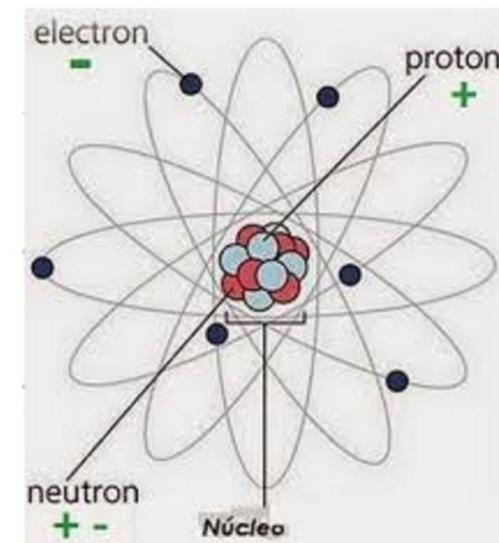
Espectros de galaxias lejanas. European Southern Observatory, ESO.





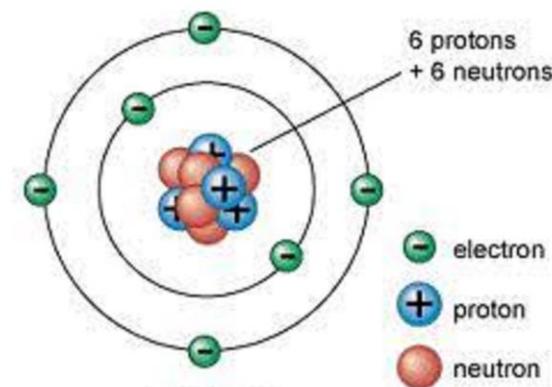
# El átomo

- **Dalton** (1766-1844), a principios del siglo XIX propuso como bloque elemental de la materia los átomos. A principios del siglo XX, **Rutherford** (1871-1937), descubre que el átomo posee electrones en torno a un núcleo, atados por fuerzas electromagnéticas. (1)
  - Por el **Principio de Incertidumbre**, si queremos la posición y velocidad de un electrón, para verlo, se hace necesario chocarlo con un fotón, modificando así su posición y velocidad; esto dada la imposibilidad de determinar un par de magnitudes físicas observables y complementarias, según dicho principio (2).
  - Para investigar el núcleo se construyen los **aceleradores de protones** y las colisiones ponen en evidencia partículas elementales, que a mediados de los 60 se dan a conocer. Ellas tienen propiedades como masa, spin y estabilidad.
  - La **Unidad de Bohr** es el radio del primer orbital del átomo de hidrógeno, igual a  $0.53 \text{ \AA}$ . Mientras un átomo promedio, mide  $2 \text{ \AA} = 2 \times 10^{-10} \text{ m}$ , los núcleos atómicos, con sólo unos  $10^{-15} \text{ m}$  de diámetro, son 10 000 a 100 000 a veces más pequeños que el átomo, y contienen más del 99 % de su masa. (3)
- 
- 1- Breve historia de la química: Introducción a las ideas y conceptos de la química. Isaac Asimov, (2014). Alianza Editorial. Madrid.
  - 2- La construcción de la era atómica. Alwyn Mckay. Biblioteca Científica Salvat 1986
  - 3- Izquierda y Derecha en el Cosmos. Martin Gardner. Biblioteca Científica Salvat 1986.



El átomo y sus partes

<http://bioquimicab173cuquita.blogspot.com/>



Átomo de Carbono

Blog Química

<http://quimicardenasv.blogspot.com/>



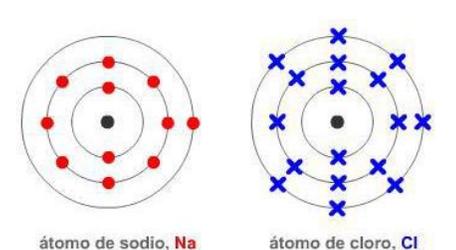
# Estructuras atómicas

- En el **átomo normal** el número de electrones y protones es igual. Un ion es un átomo desequilibrado por la vía de los electrones; si es de carga positiva recibe el nombre de catión, pero si ella es negativa, será anión.
- Un isótopo es una forma alterna de elementos y se produce desequilibrando un átomo por la vía de los neutrones. En el hidrógeno no hay neutrones; en los átomos de elementos livianos, el número de neutrones y protones es igual; en los pesados el número de neutrones supera al de protones. El  $U_{238}$ , isótopo del uranio que es el elemento 92 y cuyo número másico es 238, tiene 92 protones y 146 neutrones (1).
- En estado natural, conocemos 92 clases de elementos (del hidrógeno al uranio), los demás son artificiales; solamente dos elementos son líquidos (bromo y mercurio). Los compuestos son combinaciones de átomos de elementos, y la molécula es la unidad más pequeña de un compuesto. (2)

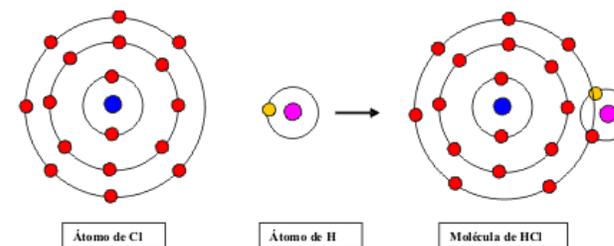
1- [Física y Química 1º Bachillerato](#). Río, Enrique Andrés del; Yuste Muñoz, Miguel Ángel; Rodríguez Cardona, Ángel; Pozas Magariños, Antonio. McGraw-Hill Interamericana de España, 2015.

2- Dios y la nueva física. Paul Davies. Biblioteca Científica Salvat 1986.

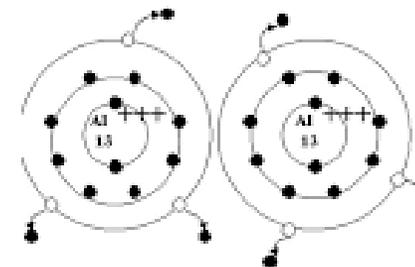
- ENLACE IÓNICO: Enlace entre un elemento metálico y otro no metálico. NaCl



- ENLACE COVALENTE: Los electrones se comparten: HCl



- ENLACE METÁLICO: Entre elementos químicos metálicos. AlAl





# Constantes fundamentales

- El número de constantes universales verdaderamente fundamentales que conocemos es, en realidad, muy pequeño.
- Para considerar la materia a gran escala, **el parámetro fundamental es la temperatura**, porque ella determina que los cuerpos sean sólidos, líquidos o gaseosos. Si la temperatura de una molécula es  $T$ , su energía térmica media será aproximadamente  $KT$ , donde  $K = \text{Constante de Boltzmann}$  ( $1.381 \times 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kgs}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ), **y  $T = \text{temperatura absoluta}$**  (y por lo tanto referida al cero absoluto). La constante  $K$ , relaciona temperatura absoluta y energía (1).
- Además, con el descubrimiento de los materiales aislantes topológicos, predichos en los años 70, se conocen otros dos estados de la materia: los superconductores y los superfluidos.
- **La superconductividad** es la capacidad intrínseca de ciertos materiales, para conducir la electricidad sin resistencia ni pérdidas en determinadas condiciones. Esto ocurre a bajas temperaturas y en materiales muy finos, como el grafeno.
- **El superfluido** es un estado de la materia caracterizado por la ausencia total de viscosidad, al fluir en un circuito cerrado interminablemente sin fricción. Su estudio es llamado hidrodinámica cuántica. (2)

1. [https://es.wikipedia.org/wiki/Constante\\_de\\_Boltzmann](https://es.wikipedia.org/wiki/Constante_de_Boltzmann)

2. [Kamerlingh Onnes, la superconductividad, la superfluidez y el universo de las bajas temperaturas.](#) Justo R. Pérez (2000) In: La Ciencia en el Siglo XX. Universidad de La Laguna. 38205 La Laguna. Tenerife. España.

- Cuadro adjunto: Wagoner & Goldsmith. Horizontes Cósmicos, Labor, 1985.

Nombre	Símbolo	Valor (Unidades SI)
Carga del protón	e	$1,60 \times 10^{-19}$
Constante de Planck	h	$6,63 \times 10^{-34}$
Constante gravitatoria de Newton	G	$6,67 \times 10^{-11}$
Velocidad de la luz	C	$3 \times 10^8$
Masa en reposo del protón	$M_p$	$1,67 \times 10^{-27}$
Masa en reposo del electrón	$M_e$	$9,11 \times 10^{-31}$
Constante de la fuerza débil	$G_w$	$1,43 \times 10^{-62}$
Constante de la fuerza fuerte	$G_s$	15
Constante de Hubble	H	$2 \times 10^{-18}$
Constante cosmológica	A	$<10^{-53}$
Relación cósmica fotón/protón	S	$10^9$
Permisividad del vacío	$\epsilon$	$8,85 \times 10^{-12}$
Constante de Boltzmann	K	$1,38 \times 10^{-23}$



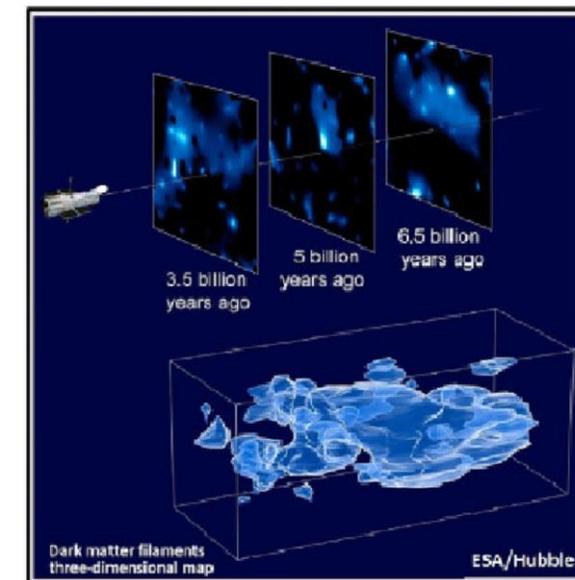
# La Masa, el Spin , la Estabilidad

- La expresión  $E=mc^2$  ([1](#)), dice que Masa y Energía, también pueden ser intercambiables; por eso en los procesos de creación de masa a partir de energía, se pueden generar partículas.
  - Las masas se miden en **Giga-electronvoltios** (GeV), unidad correspondiente a  $10^9$  eV, donde un eV es la energía necesaria para mover un electrón a través de un voltio. La **masa del protón** es algo inferior a un GeV. Tal unidad también sirve para medir energía.
  - **El spín** es una propiedad física de las partículas elementales, por el cual tienen un momento angular intrínseco de valor fijo; es **una propiedad análoga a la rotación de la Tierra** sobre su eje. A nivel cuántico, esa rotación no tiene un período tan libre como el de los planetas.
- 1- [What is the experimental basis of Special Relativity?](#). Tom Roberts and Siegmur Schleich (2007).
- **La estabilidad** tiene pocas excepciones en las partículas elementales. Al final **casi todas se desintegran** dando lugar a otras partículas más ligeras. Por ejemplo, un neutrón libre desaparecerá tarde o temprano para dar origen a un protón, un electrón y una partícula sin masa llamada neutrino.
  - En física de partículas, también se habla de la **antimateria**: la ciencia supone que en el origen del universo existían materia y antimateria en iguales proporciones; no obstante hoy observamos que **aparentemente el Universo sólo esta hecho de materia**.
  - **Las partículas pueden clasificarse** por el spin, por los productos de desintegración o por la interacción. ([2](#))
- 2- [Estabilidad de la Materia Extraña y Posibles Estrellas de Quarks](#). Ricardo González Felipe, Aurora Pérez Martínez, Milva Orsaria, Ernesto López Fune. (2008) FÍSICA para todos / FÍSICA no mundo.

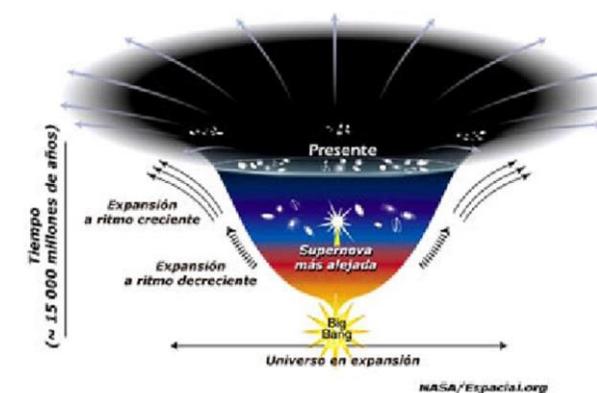


# Materia oscura y Energía oscura

- Y respecto a **la materia y energía oscura**, hoy no solo se estima que el universo se constituye en un 73 % de energía oscura y de un 23 % de materia másica oscura, **contra un 4 % de materia bariónica** o en forma de átomos. Sino también que existe una energía que hace que la expansión del Universo se esté acelerando (1).
- La hipotética existencia de una **materia oscura** que no emite radiación alguna, que no vemos pero que si advertimos sus efectos gravitacionales sobre la luz y las galaxias, fue inferida de la rotación anómala de las estrellas dentro de la galaxia, ya que si **en el Sistema Solar la velocidad de rotación planetaria decrece conforme aumenta la distancia al Sol** como centro de masa, en las galaxias dicha velocidad se mantiene: es decir, **en las galaxias el espacio no aparece más deformado** al interior que en la periferia, por lo menos en igual proporción que en el sistema solar. Esto da origen la hipótesis de la **materia oscura** diseminada de forma no uniforme y a gran escala, así no la veamos.
- Incluso, desde principios del 2000, se propone la existencia de una **energía oscura**, que al ejercer una presión uniforme y negativa en el espacio-tiempo similar a la de la constante cosmológica, explicaría la actual **expansión acelerada del universo** ocasionada por una fuerza gravitacional repulsiva. Dicha **energía oscura** participaría con el 73% en el balance energético del universo. (2)
- **De conocerse esa materia oscura** que se rastrea, tanto en laboratorios desde el espacio como en complejos subterráneos, la astronomía podría dar origen a **una revolución comparable a la de Copérnico**. (3)
- 1- [Cosmología moderna, materia oscura y energía oscura](#). Angel M. Uranga. (2016). Instituto de Física Teórica UAM/CSIC. Madrid, España.
- 2- [Materia y energía oscuras, ¿que son?](#) G.A. Caldera-Cabral y L.A. Urena-López. Instituto de Física, U. de Guanajuato, México.
- 3- [El misterioso lado oscuro del universo](#). Duque Escobar, Gonzalo (2017) [Objeto de aprendizaje - Teaching Resource]



Materia oscura en el Universo, diseminada e inferida indirectamente. ESA-Hubble.



El Universo en lugar de expandirse desaceleradamente después del Big Bang, se está acelerando. Nasa/Espacial.org



# Partículas elementales

**Leptones:** Son el electrón y los mesones muón y del tau, con sus correspondientes neutrinos: electrónico, muónico y del tau. (Cuadro: color verde)

Todos tienen spin  $\frac{1}{2}$  tomando como unidad la **Constante h de Planck**. En las tres primeras la carga es -1 y en los neutrinos es 0, tomando como base la carga del protón. Las masas son en su orden:  $e = 0.511$ ;  $\mu = 105.7$ ;  $\tau = 1780$ ;  $V_e < 10^{-5}$ ;  $V_\mu < 0.65$ ;  $V_\tau < 250$ , tomando los valores en MeV.

De todos, el electrón es estable, las partículas  $\mu$  y  $\tau$  no son estables y los neutrinos  $V_e$ ,  $V_\mu$ ,  $V_\tau$ , parecen ser estables. ¿Si ha imaginado Ud la importancia de los electrones?... Sonido, Color, Resistencia...

**Quarks:** Se necesitan tres para formar un protón o un neutrón. Ellos son: u (arriba), d (abajo), c (encantado), s (extraño), t (cima), b (fondo). Los seis, tienen spin  $\frac{1}{2}$ . Ver cargas y masas en el cuadro.

Los quarks, junto con los leptones (electrones, muones, tauones) y los neutrinos, son los **constituyentes fundamentales de la materia visible** y son las partículas más pequeñas que el hombre ha logrado identificar. (Cuadro: color lila)

**Los bosones:** son el fotón, el gravitón, los gluones y las partículas W y Z. (Cuadro: color azul). Si a los quarks y leptones se les llama **fermiones** por tener spin  $\frac{1}{2}$ , los bosones tienen spin "no fragmentario", así: fotón = 1; W = 1; Z = 1; gluón (8 tipos) = 1; gravitón = 2.

Ver: [El modelo estándar de la física de partículas](#). José Cobián (2018) Comisión Técnica de la Sociedad Nuclear Española.

Ver: La radiactividad artificial. P. Radvanyi/M. bordry. Biblioteca Científica Salvat 1986.

Ver: [Teoría de perturbaciones cosmológicas en la era de radiación](#). Vija Suarez, Oscar Javier (2017). Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá.

Las tres generaciones de la Materia (Fermiones)

	I	II	III	
masa →	3 MeV	1.24 GeV	172.5 GeV	0
carga →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nombre →	up	charm	top	photon
Quarks	6 MeV	95 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	down	strange	bottom	gluon
Leptones	<2 eV	<0.19 MeV	<18.2 MeV	90.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	electron neutrino	muon neutrino	tau neutrino	Z <sup>0</sup> fuerza débil
Leptones	0.511 MeV	106 MeV	1.78 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	$\pm 1$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	electron	muon	tau	W <sup>±</sup> fuerza débil

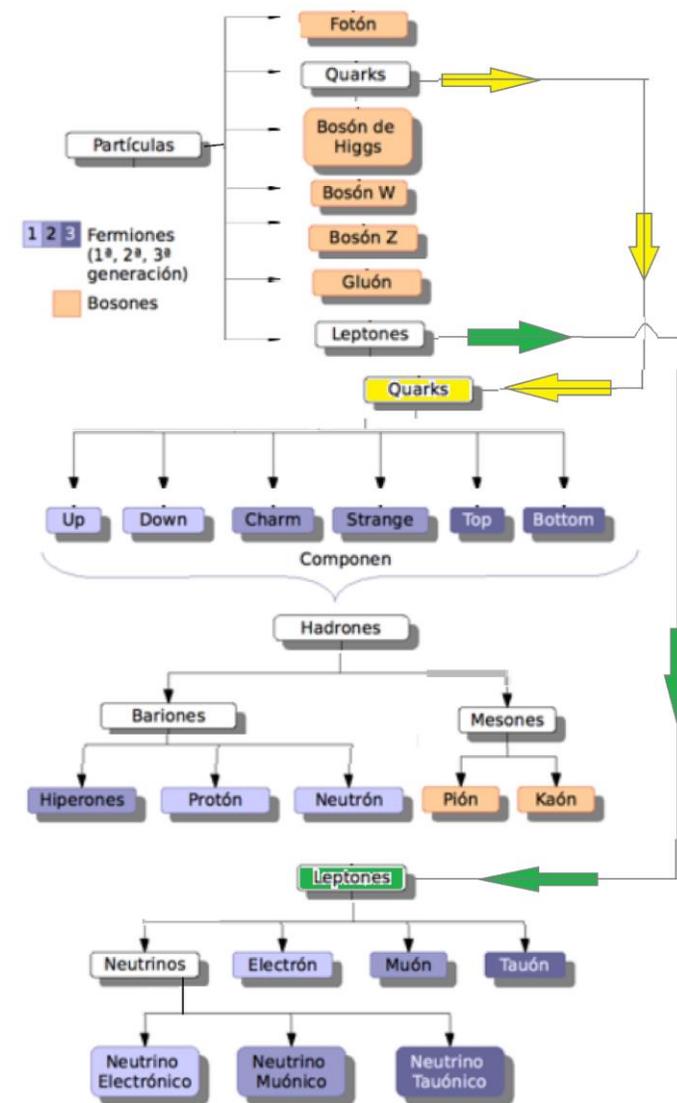
Bosons (Fuerzas)

Imagen: Partículas del modelo estándar, en <https://es.wikipedia.org/wiki/Fermi%C3%B3n>



# Bosones, Leptones y Quarks

- En la física, las 12 partículas elementales ya señaladas y las cuatro interacciones fundamentales, son los elementos básicos a partir de los cuales se constituye y estructura el universo.
- Los quarks constituyen los **hadrones** agrupándose en tríos; los ocho hadrones son el protón, el neutrón, sigma neutro, sigma positivo, sigma negativo, Xi neutro, Xi negativo, y Lambda.
- Los **bariones** están formados por **tres quarks**; de ellos sólo **son estables el neutrón y el protón**; existe otro gran número de bariones, aunque todos inestables.
- Los **mesones** se constituyen por **un quark y un antiquark**. De los mesones tenemos el Pion (+), el Pion (-), el Kaon neutro, el Kaon (+), el Antikaon neutro.
- El **intercambio de bosones** virtuales entre dos fermiones produce las **cuatro fuerzas** de la naturaleza: Electromagnetismo, Gravedad, Interacción nuclear fuerte e Interacción nuclear débil.
- Ver: [¿Cuál es el origen de la masa?](#) Miguel Ángel Pérez Angón (2005). Revista Ciencia N°56- Enero-Marzo 2005.
- Ver: [Esas maravillosas partículas.](#) Pedro Gómez-Esteban (2007). Madrid, España. Blog El Tamiz.
- Ver: De los átomos a los quarks. James S. Trefil. Biblioteca Científica Salvat 1986.
- Ver: [El bosón de Higgs.](#) Duque Escobar, Gonzalo (2012) La Patria.
- Ver: [Introducción a la Física de Partículas: El Modelo Estándar.](#) Luis Roberto Flores Castillo. 2016. Chinese University of Hong Kong. Program CERN



Partículas Subatómicas del Modelo Estándar  
Diagrama en <https://eltamiz.com/> (adaptado)

Mapa de partículas, en <https://eltamiz.com>  
(Adaptado)



# Las Fuerzas Fundamentales

• **Las fuerzas de la gravedad y del electromagnetismo** son de alcance infinito. Contrariamente, las fuerzas de interacción fuerte y la débil, son de **alcance reducido**; la primera es la responsable de mantener unidos los protones en el núcleo, y la segunda de gobernar la desintegración de los elementos radioactivos. El orden de intensidades de las fuerzas, es:

$$F_{\text{Nuc. F}} > F_{\text{E-Mag}} > F_{\text{Nuc. D}} > F_{\text{Grav}}$$

Mientras la **Teoría de la Gran Unificación TGU** busca unificar tres fuerzas fundamentales: la fuerza nuclear débil, fuerza nuclear fuerte y la fuerza electromagnética, y excluye la fuerza de gravedad, la **Teoría del Todo (TOE)** consideraría integrar o unificar las cuatro interacciones fundamentales.

Al igual que la materia, el espacio y el tiempo surgen a partir del Big Bang, que es el punto inicial del universo; también las fuerzas fundamentales se originan a partir de ese momento inicial llamado la Gran Explosión cuyo inicio se remontaría a unos 13.800 millones de años.

No obstante, sobre la edad del Universo, aunque existe un consenso que le asigna 13,7 mil millones de años, existen otras posibilidades no agotadas, como lo son las que valoran las consecuencias de la energía oscura, las evidencias observacionales del Hubble, y la existencia de estrellas que podrían tener 12 mil millones de años.

• Ver: El Universo de Stephen Hawking. John Boslough. Biblioteca Científica Salvat 1986.

• Ver: La evolución de la física. Albert Einstein y Leopold Infeld. Biblioteca Científica Salvat 1986.

• Ver: La Cuarta Dimensión. Rudy Rucker. Biblioteca Científica Salvat 1986.

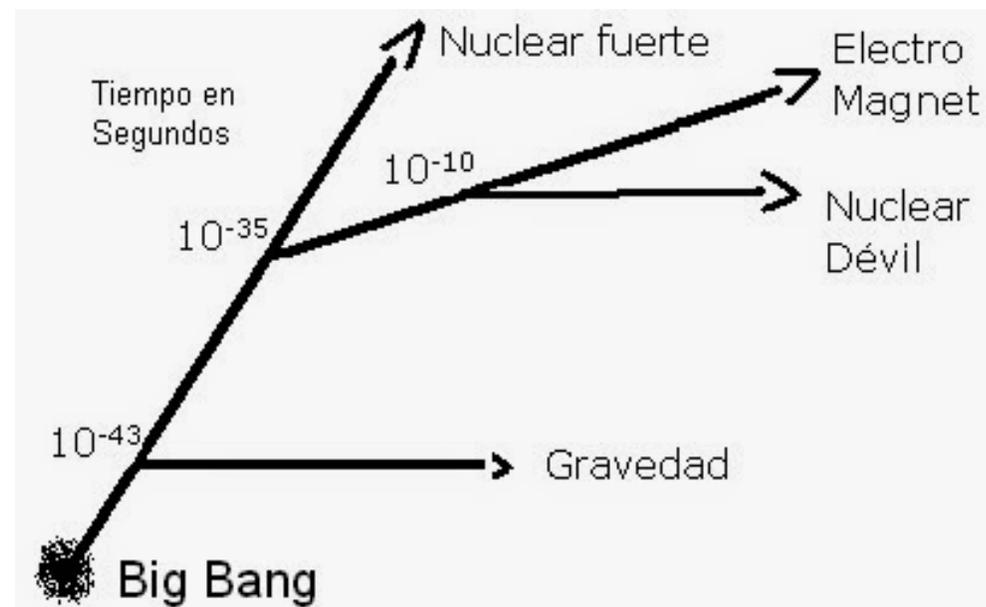


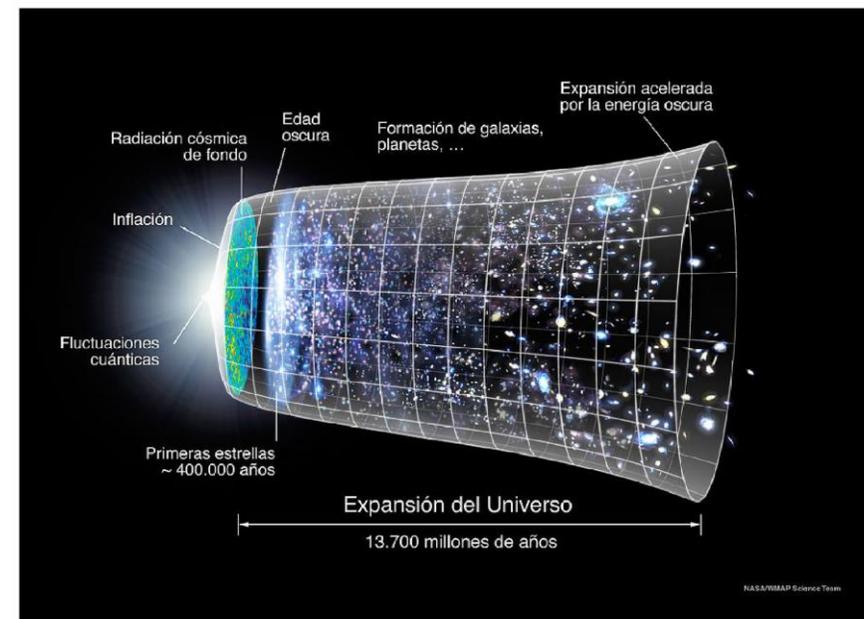
Imagen: Del Big Bang a las primeras eras en la historia temprana del Universo. Fuente, Guía Astronómica.

**¿Cuándo aparecen las fuerzas?** En la época de Planck el período entre cero y  $10^{-43}$  segundos las cuatro fuerzas fundamentales están unificadas y no existen partículas elementales. Luego, aparece la gravedad a los  $10^{-43}$  seg de ocurrido el Big Bang, continúa la nuclear fuerte que aparece a los  $10^{-35}$  seg y finalmente las dos restante, electromagnética y nuclear débil, se separan a los  $10^{-10}$  seg. Ver: [Cronología del Big Bang](#), en Wikipedia.

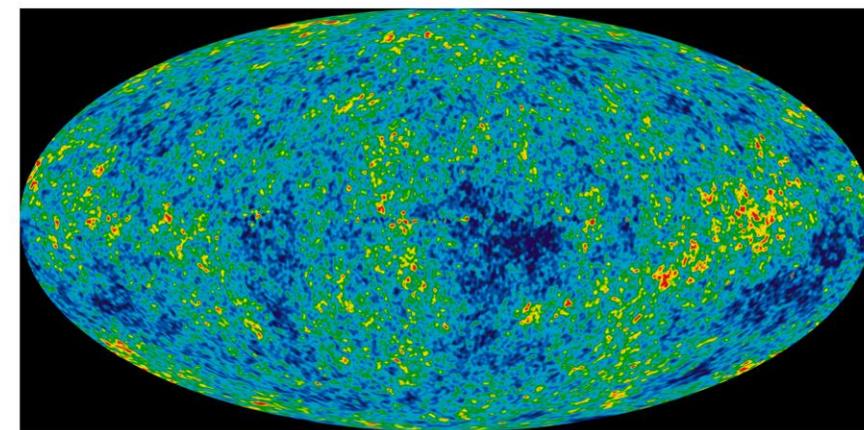


# A partir del Big Bang

- Los eventos iniciales de acuerdo con la teoría del Big Bang, en función del tiempo cosmológico son: .1- La gran explosión ocurrida hace unos 13,8 mil millones de años. Continúan tres fases: la del Universo muy primigenio, la del Universo primigenio y la de formación de estructuras.
- El Universo muy primigenio, en la primera fase, fue la fracción de segundo en la cual las partículas tenían una energía tal alta que sólo es posible reproducirse en un acelerador de partículas. Sobresalen allí la época de Planck: antes de a  $10^{-43}$  seg seguida de la Época de la Gran Unificación desde  $10^{-43}$  hasta  $10^{-36}$  seg, y por último, la inflación cósmica de  $10^{-36}$  a  $10^{-33}$  seg.
- Luego, ya durante el Universo primigenio que es la segunda fase, según la física de alta energía, se forman los primeros protones, neutrones y electrones, luego los núcleos y finalmente los átomos. Con la formación de hidrógeno neutro, surge el conocido fondo cósmico de microondas. Sobresales aquí La Época Electro débil:  $10^{-12}$  seg; la Ruptura de la Supersimetría según la cual el U. tiene que romperse a una energía por debajo de 1 TeV; la Época del Hadrón:  $10^{-6}$  -  $10^{-2}$  seg, la Nucleosíntesis: 1 seg - 3 minutos; la Dominación de la materia: 70.000 años; la Recombinación cuando el universo se despeja: 300.000 años; y por último las Épocas oscuras donde muy pocos átomos son ionizados.
- Finalmente, llega la tercera fase, o de la formación de las estructuras, cuando la materia empieza a agregarse y aparecen las primeras estrellas y cuásares, y por último las galaxias, las agrupaciones galácticas y los supercúmulos.
- El futuro del Universo no se conoce con certeza.
- Ver: [Cronología del Big Bang](https://es.wikipedia.org/wiki/Big_Bang). Wikipedia.org. Anexo.
- Ver: El momento de la creación. Biblioteca Científica Salvat 1986.



Evolución del universo desde el Big Bang. NASA, Ryan Kaldari. Adaptado al Esp. por Luis Fernández García (2015) [https://es.wikipedia.org/wiki/Big\\_Bang](https://es.wikipedia.org/wiki/Big_Bang)



Mapa de altas isotropías de la radiación de fondo de microondas obtenida por el satélite WMAP. Nasa 2003. [https://es.wikipedia.org/wiki/Big\\_Bang](https://es.wikipedia.org/wiki/Big_Bang)



# Nanotecnología

- La nanotecnología, **ciencia y técnica de manipular la materia a escala atómica y molecular**, permite la solución, desde problemas médicos o biológicos, de electrónica y generación energética o comunicaciones y seguridad, hasta la producción de materiales con propiedades especiales a escala industrial. La nanotecnología **surgió gracias al microscopio de efecto túnel** (Suiza 1980).
- Los avances de la tecnología han llegado a campos insospechados revolucionado el siglo XX, con la nanociencia y nanotecnología, que permiten **crear estructuras funcionales gracias al control de los átomos y las moléculas de manera individual**, lo que hace que las nanopartículas sean interesantes, y que la tecnología se pueda aplicar en diferentes campos como la **medicina, el medioambiente, y la electrónica**, entre otros.
- Hoy a nivel mundial, se reportan diez aplicaciones:

Ver: [La revolución nanotecnológica](#). Duque-Escobar, Gonzalo 82020. U.N. de Colombia.

Ver: [Desarrollo y revoluciones tecnológicas](#). Duque Escobar, Gonzalo (2017) Documento de trabajo. La Patria, Manizales

- 1- Nanobots administradores de fármacos, que sanan heridas y sustituyen la **quimioterapia** sin efectos secundarios.
- 2- Nanosensores para medir presión sanguínea y respiración, **nivel de glucosa y colesterol**, y anomalías cardíacas; o sensores de silicio y oro para detectar tumores.
- 3- Gel transparente resistente a radiación ultravioleta, para **piel artificial** sin inflamaciones o irritación cutánea.
- 4- Nanomaterial de silicio negro que **destruye bacterias** y esporas bacterianas.
- 5- **Baterías de carga ultrarrápida** con aminoácidos, que aguantan miles de ciclos.
- 6- **Nanobaterías** de óxido de litio del tamaño de un grano de arena, con carga y vida útil comparable a una batería normal.
- 7- Películas plásticas y **envases de sílice polimérico** resistentes al calor, que preservan alimentos impidiendo el flujo de humedad, dióxido de carbono y oxígeno.
- 8- **Filtros para potabilización de agua**, mediante hojas con recubrimiento de plata que atrapan el 99,9% de las bacterias.
- 9- Pantallas holográficas que **reproducen imágenes en tres dimensiones** con sensación del tacto y sin necesidad de gafas.
- 10- Producción de **lentes de contacto de realidad aumentada**, que combinan la visión real con contenidos virtuales a nivel de la retina.



# GUÍA ASTRONÓMICA

## GUÍA Nº 9 A

<http://www.bdigital.unal.edu.co/1700>

### LAS ESTRELLAS: Diagrama HR

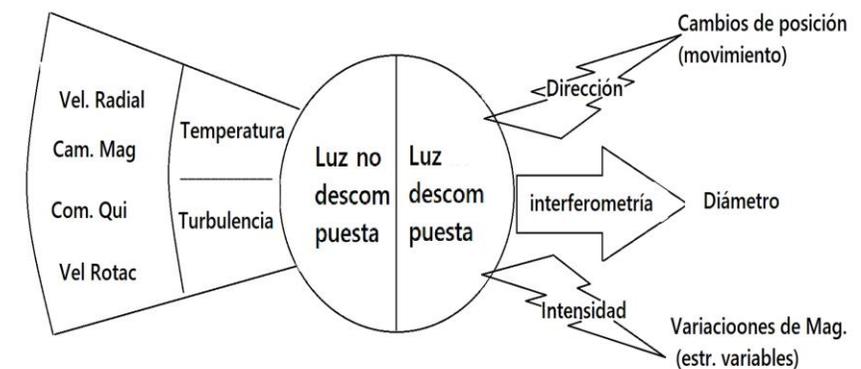
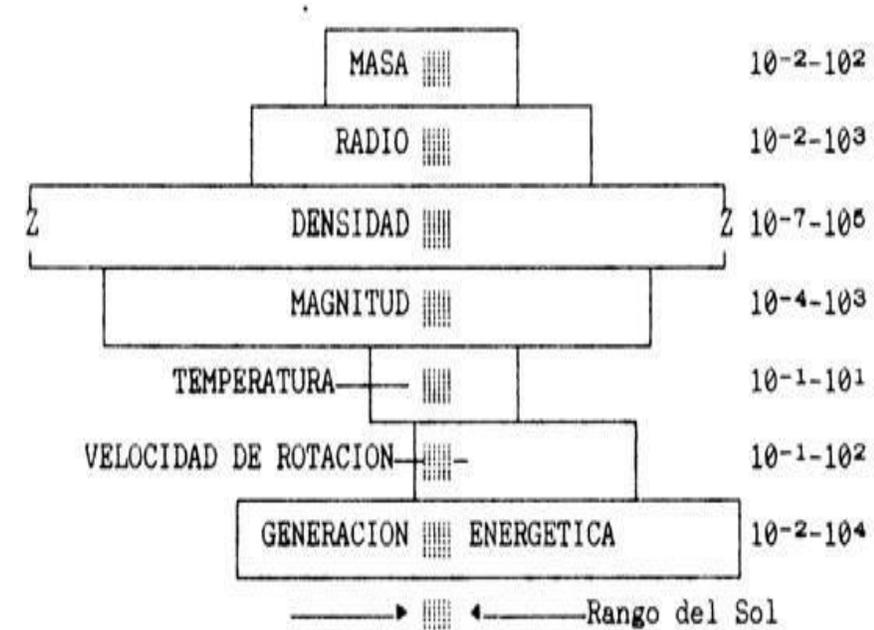


M-80, cúmulo globular a 28 mil al, en Scorpius. Imagen de M80 tomada por el Hubble. NASA/ESA/ STScI. [www.nasa.gov](http://www.nasa.gov)



# Variables Estelares

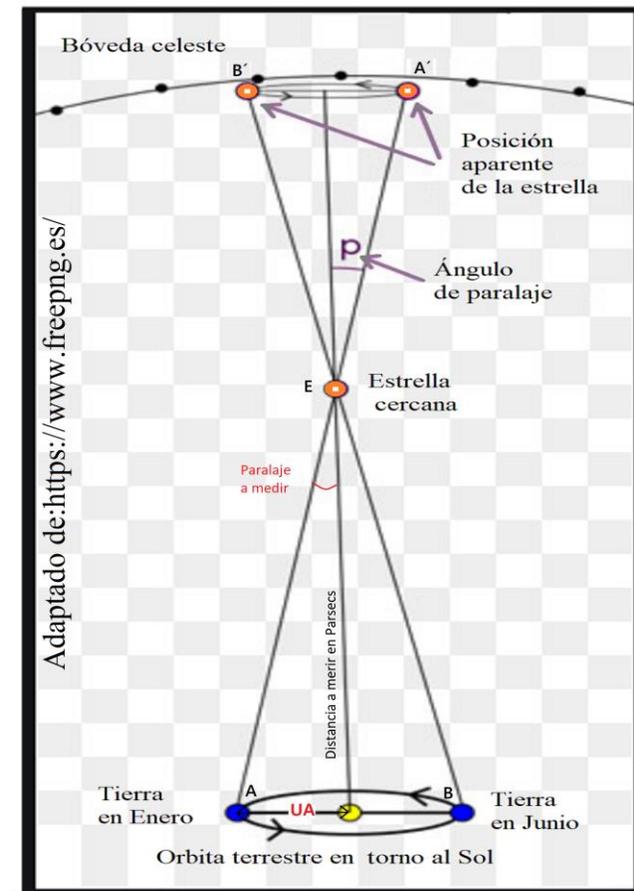
- Son muchas las variables físicas que pueden conseguirse a **través del análisis espectral y de la medición de algunas propiedades estelares**, como Masa, Radio, Brillo, Temperatura, Energía radiante, Composición y movimientos estelares, incluso la distancia por métodos geodésicos.
- En la Imagen Der. Arriba: vemos los **Rangos de las variables estelares**, mostrando el dominio de variación de las magnitudes de estado de las estrellas en comparación con el valor correspondiente para el Sol. En la Imagen de abajo, vemos el **Análisis de la luz** de una estrella, mostrando, a la Izq., que con **luz no descompuesta** se evalúan velocidad radial y angular, composición, y campo magnético; y a la Der., que con la **luz descompuesta** espectrográficamente, se pueden conocer los movimientos, el tamaño y la inestabilidad estelar.
- **La interferometría** es una técnicas que combina la luz captada por el telescopio o radiotelescopio para obtener una imagen de mayor resolución aplicando el principio de superposición. El **funcionamiento de un interferómetro** se basa en la división de un haz coherente de luz en dos haces, para que recorran caminos diferentes y luego converjan nuevamente en un punto.
- **Magnitud estelar**, califica el brillo de las estrellas: antes a las mas brillantes o de primer orden se les denominaba como de primera magnitud, y las de menos brillo como estrellas de segundo y tercer orden. Posteriormente, el parámetro se matematizo, poniendo valores numéricos, incluyendo valores negativos para astros como el Sol (Mag. menos 26), y diferenciando entre M. absoluta para calificar los brillos que tendrían las estrellas si estuviera a una distancia de 10 pársecs, quedando la Mag. aparente para el brillo visual. El ojo aprecia hasta Mag. 6; y por cada grado el número de estrellas cambia 2.5 veces.





# Distancia a las estrellas

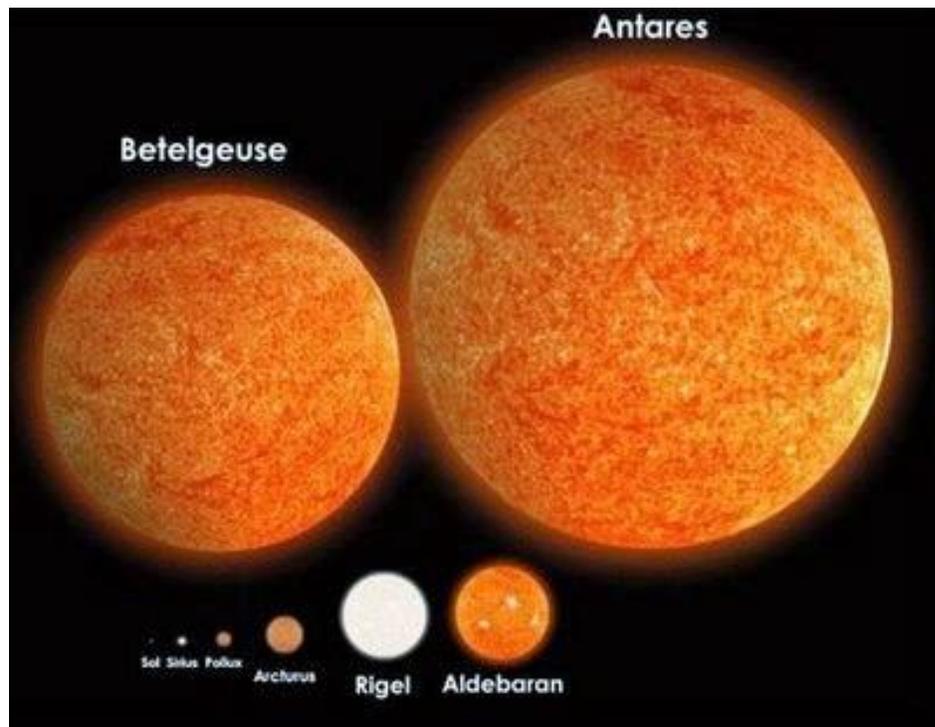
- Para conocer la distancia a las estrellas cercanas, aplicamos **métodos de triangulación**, como la medida de la paralaje estelar, donde se utiliza el diámetro de la órbita terrestre como base de observación. El método tiene alcance **hasta 100 parsecs**. La estrella Polar por ubicarse a unos 300 al, está en esa frontera.
  - En la imagen, para resolver el **Triángulo ABE**, se necesitan 3 elementos los ángulos en A y B y el diámetro orbital, dado que se requiere el ángulo en E, que es la diferencia entre A+B y 180%. Dado que AB mide 2 unidades astronómicas (UA), con lo anterior se calcula la distancia entre el Sol y la Estrella observada E.
  - Las distancias a las estrellas se miden en años luz al, en unidades astronómicas UA y en Parsecs.. ¿qué es un parsec?: si **la mitad del arco** de la bóveda celeste **A'B'** entre las **posiciones aparentes del astro**, o sea la paralaje, valiera **un segundo de arco**, la distancia equivalente a **3,26 años luz (al)** se denomina **Parsec**.
  - Dado que medir la paralaje tiene corto alcance, **para medir más lejos**, se usan los cúmulos estelares y las galaxias con estrellas variables pulsantes periódicas, como faros del universo; es el caso de las **Estrella Cefeidas**, cuyo período de oscilación en el brillo se relaciona con la **magnitud absoluta**, con lo cual al contrastarla con la **magnitud aparente** permite valorar la distancia aplicando la **Ley del inverso del cuadrado de la distancia**, según Kepler (1604).
  - Este método sirvió para determinar la distancia a la galaxia Andrómeda, que inicialmente se estimó en un millón de años luz y que, posteriormente, cuando se advierte una **diferencia entre cefeidas de la población I y de la población II**, se corrige la distancia errada: el valor correcto es 2,5 millones de años luz (al).
  - Ver: ASTROFÍSICA ESTELAR. Astrometría: Movimientos propios. Pascual D. Diago Nebot. VIU.
  - Ver: [Bessel y el primer paralaje estelar](#). José Maza Sancho 2016. UNIVERSIDAD DE CHILE.
  - Ver: [Cosmología Observacional: Medidas de distancias extragalácticas](#). Beatriz Ruiz Granados .
- Asignatura: Cosmología. Curso: 2008-2009. U de Granada



Paralaje Estelar - Guía astronómica. Adaptado de La Paralaje estelar, en: [www.freepng.es](http://www.freepng.es)



# Estrellas Notables



El Sol, que por su tamaño es superado en la imagen y en su orden por gigantes como Sirio, Polux, Arcturus, Rigel y Aldebarán, también palidece frente a las supergigantes rojas como Antares y Betelgeuse. Faltan más, entre las conocidas. Imagen en:

<http://verestrellas.blogspot.com/>

Ver: Cien Mil Millones de Soles. Rudolf Kippenhahn. Biblioteca Científica Salvat 1986.

Estrellas más brillantes. Fuente: <https://es.wikipedia.org/>

	<a href="#">Magnitud V</a>	<a href="#">Denominación de Bayer</a>	Nombre propio	Distancia ( <a href="#">años luz</a> )
1	-1,47	$\alpha$ Canis Majoris	<a href="#">Sirio</a>	8,6
2	-0.72	$\alpha$ Carinae	<a href="#">Canopus</a>	310
3	-0.27	$\alpha_1$ Centauri	<a href="#">Rigel Kentaurus A</a>	4.4
4	-0.04 <i>var</i>	$\alpha$ Bootis	<a href="#">Arturo</a>	37
5	0.03	$\alpha$ Lyrae	<a href="#">Vega</a>	25
6	0.12	$\beta$ Orionis	<a href="#">Rigel</a>	770
7	0.34	$\alpha$ Canis Minoris	<a href="#">Procyon</a>	11
8	0.50	$\alpha$ Eridani	<a href="#">Achernar</a>	140
9	0.58 <i>var</i>	$\alpha$ Orionis	<a href="#">Betelgeuse</a>	630
10	0.60	$\beta$ Centauri	<a href="#">Hadar o Agena</a>	530

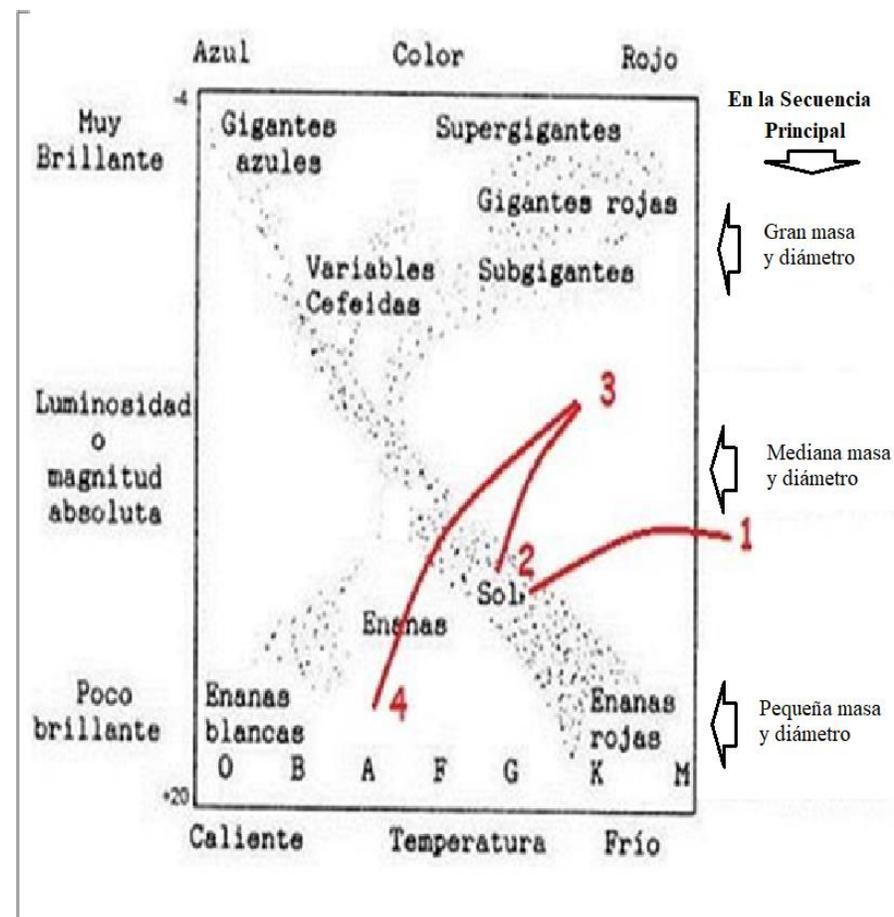
Estrellas más cercanas. Fuente: <https://es.wikipedia.org/>

#	Designación		Clase estelar	<a href="#">Paralaje (arcsec)</a>	<a href="#">Distancia años luz</a>
	Sistema	Estrella			
2	<a href="#">Alfa Centauri</a>	<a href="#">Próxima Centauri</a>	M5.5Ve	0.768 9(0 3)''	4.2420(16)
		<a href="#">Alfa Centauri A</a>	G2V	0.747 2(1 2)''	4.3649(69)
		<a href="#">Alfa Centauri B</a>	K0V		
3	<a href="#">Estrella de Barnard</a>		M4.0Ve	0.547 0(1 0)''	5.9629(110)
4	<a href="#">Luhman 16</a>	Luhman 16A	$L8\pm 1^7$	0.495 (5) <sup>8</sup>	6.59(7)
		Luhman 16B	$T1\pm 2^7$		
5	<a href="#">WISE 0855-0714</a>		$\underline{Y}$	-	7.2(6)
6	<a href="#">Wolf 359</a> (CN Leonis)		M6.0V	0.419 1(2 1)''	7.7823(390)
7	<a href="#">Lalande 21185</a> (BD+36°2147)		M2.0V	0.393 4(0 7)''	8.2903(148)
8	<a href="#">Sirio</a>	Sirio A ( $\alpha$ Canis Majoris)	$A1V$	0.380 0(1 3)''	8.5826(290)
		Sirio B	$DA2$		
9	<a href="#">Luyten 726-8</a>	UV Ceti (L 726-8 B)	M5.5Ve	0.373 7(2 7)''	8.7278(631)
		BL Ceti (L 726-8 A)	M6.0Ve		
10	<a href="#">Ross 154</a> (V1216 Sagittarii)		M3.5Ve	0.336 9(1 8)''	9.6811(512)



# Diagrama Hertzsprung-Russell

- Los tipos de estrellas pueden caracterizarse por la temperatura (aproximadamente su color) y la cantidad de luz o brillo que emiten (magnitud absoluta). El **Diagrama H-R**, es un plano cartesiano al cual llevamos las estrellas, según ese par de coordenadas: la **temperatura superficial** en el eje horizontal y el **brillo real** en el vertical. La diagonal poblada de estrellas, que se denomina **Secuencia Principal**, separa dos regiones: la de **Gigantes Rojas** y la de **Enanas Blancas**.
- En el diagrama, vemos las cuatro etapas de **la evolución solar**. En 1, es una **Protoestrella** (caliente o brillante), pero en 2 el Sol se convierte en **Estrella** llegando a la Secuencia Principal; luego, al agotarse el Hidrógeno abandonará la Secuencia Principal para transformarse en **Gigante Roja** (3). Luego, al perder su envoltura y con ella algo de masa, para finalmente convertirse en **Enana Blanca** (4), cambia de lugar en el Diagrama HR. Finalmente se apagará quedando una masa estelar densa negra e inerte. Nota, las estrellas masivas, en la fase de gigante roja cuando forman hierro se destruyen en forma de supernovas, quedando como estrellas neutrónicas o agujeros negros.
- El Diagrama HR, también permite estimar la masa y tamaño, e incluso la vida o duración de una estrella**, pero solo para las de **la secuencia principal** y no para otras. Esto es, cuando la estrella inicia su vida, es porque se enciende su horno termonuclear y lo hace ubicándose en la diagonal principal, región que **concentra el 90% de las estrellas**, y cuya densidad de estrellas que se hace mayor en la parte inferior, anuncia cómo las estrellas de mucha masa duran poco.
- En la Secuencia Principal la densidad de estrellas cambia y también la temperatura del horno termonuclear en cada una.** Dado que la temperatura en el núcleo es mas alta en las estrella de gran masa, **las mas masivas, a pesar de contar con más combustible, mueren más temprano que las estrellas de poca masa.**
- Ver: [Cien Mil Millones de Soles](#). Rudolf Kippenhahn. Biblioteca Científica Salvat 1986.
- Ver: [Actividades didácticas en astronomía estelar](#). Pico Arévalo, Julián Alberto (2016) Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá.



El diagrama H-R: herramienta que involucra la magnitud y el color de todas las estrellas, muestra su evolución. A lado y lado de la Secuencia Principal, aparecen las gigantes rojas y las enanas blancas. Dado que esta diagonal es la región mas poblada podríamos decir que en esta región transcurre la mayor parte de la vida de una estrella. Ver: [Guía astronómica](#)



# Zonificación del diagrama HR

- Si en el **Diagrama HR**, la mayoría de las estrellas se sitúa sobre la **secuencia principal**, entonces ¿porqué esa concentración?: gran parte de su vida lo pasa una estrella en esa región del Diagrama HR, donde se inicia transformando el Hidrógeno en Helio: si es una estrella de gran masa, tendrá mayor brillo, también **durará menos** y se ubicará arriba y a la izquierda; si es de masa precaria será una enana roja que podrá **durar mucho** y que se ubicará abajo y a la derecha.
- Es decir, **las estrellas pasan el principio y la mitad de su vida consumiendo hidrógeno**, en la secuencia principal (en la actualidad el Sol se halla en esta situación), con una fase estable en la cual, **la posición** que ocupan sobre dicha diagonal, viene determinada por su masa inicial: arriba se ubican las de gran masa como gigantes azules, y abajo las de masa pequeña como enanas rojas.
- **¿Cómo se transforma el H en He?**: de dos modos; el primer proceso es la **Cadena Protón-Protón** tomando cuatro átomos de H, para obtener uno de He convirtiendo en energía la masa restante; este proceso es importante en estrellas del tamaño del Sol o menores; y la segunda reacción de fusión, es el **Ciclo CNO** en el cual los tres átomos (C, N y O) sirven de catalizadores para convertir 4 H en un He y convertir en energía la masa restante. Esta es la fuente de energía dominante en estrellas masivas.
- Ver: [Evolución de las estrellas](#). John Percy. Publicaciones de NASE. International Astronomical Union, Universidad de Toronto (Canadá)

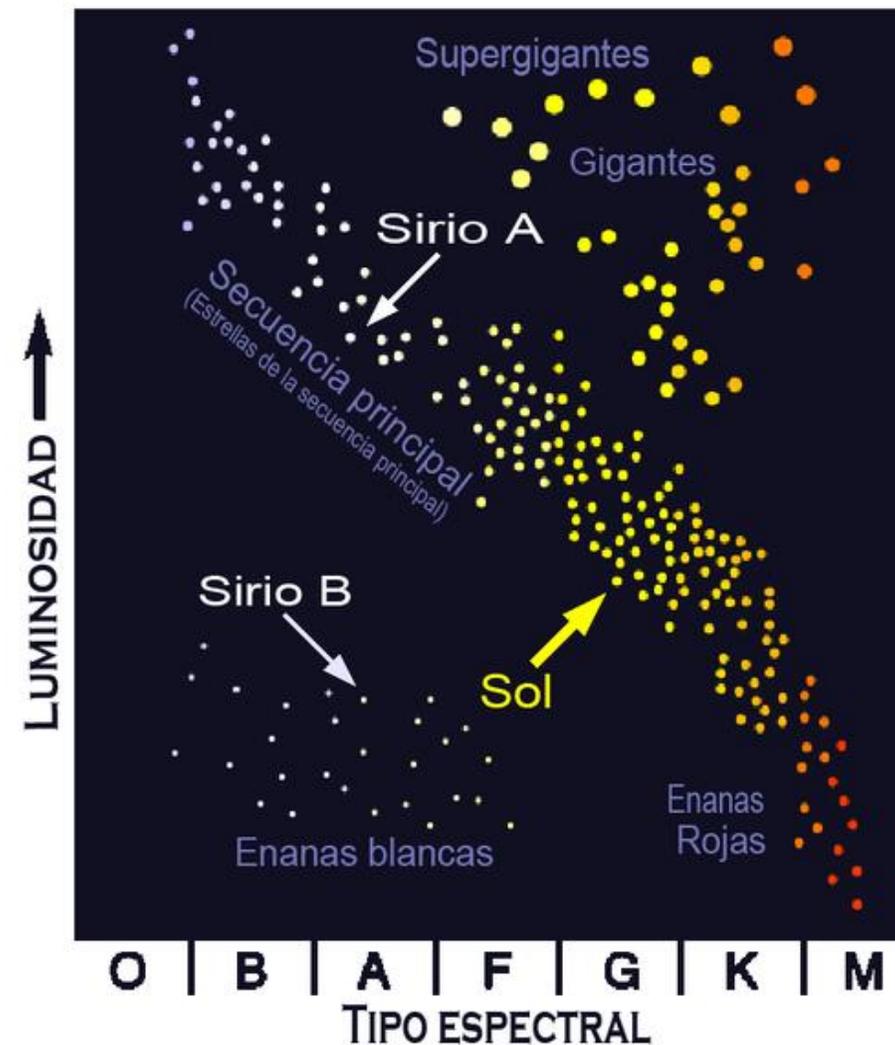


Diagrama H-R - Sirio y Sol. Fuente: <https://es.wikipedia.org/>



# Clases espectrales

- Las estrellas están divididas en **10 clases espectrales**, a cada una de las cuales se le asigna una letra del alfabeto en esta sucesión: O, B, A, F, G, K, M, R, N, S. Veremos desde la O y B hasta la K y M.



Imagen: En Ciencia Masticada: <http://cienciamasticada.blogspot.com/>

- Las **estrellas de gran masa**, con alta temperatura superficial, son de las Clases Espectrales O y B, mas escasas, de color azul a blanco y de poca duración, a pesar de tener mas combustible: esto dada la mayor temperatura alcanzada en su núcleo.
- Las estrellas de poca masa y menor temperatura superficial, son mas abundantes -ya que al arder lentamente duran mucho-: en lo visto, pertenecen a las clases espectrales K y M, y son de color amarillo a rojo.
- Cada Clase espectral tiene **10 subclases**; p.e. desde la A1 hasta la A9. El Sol es de la clase espectral G2.
- Ver: El Universo de Stephen Hawking. John Boslough. Biblioteca Científica Salvat 1986.
- Ver: [Clasificación Espectral Clásica](#). En Ciencia Masticada.

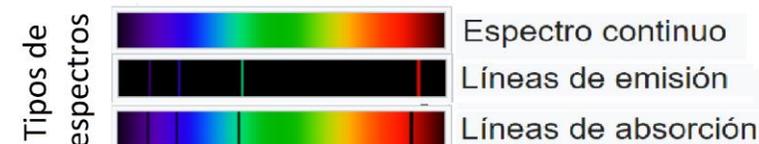
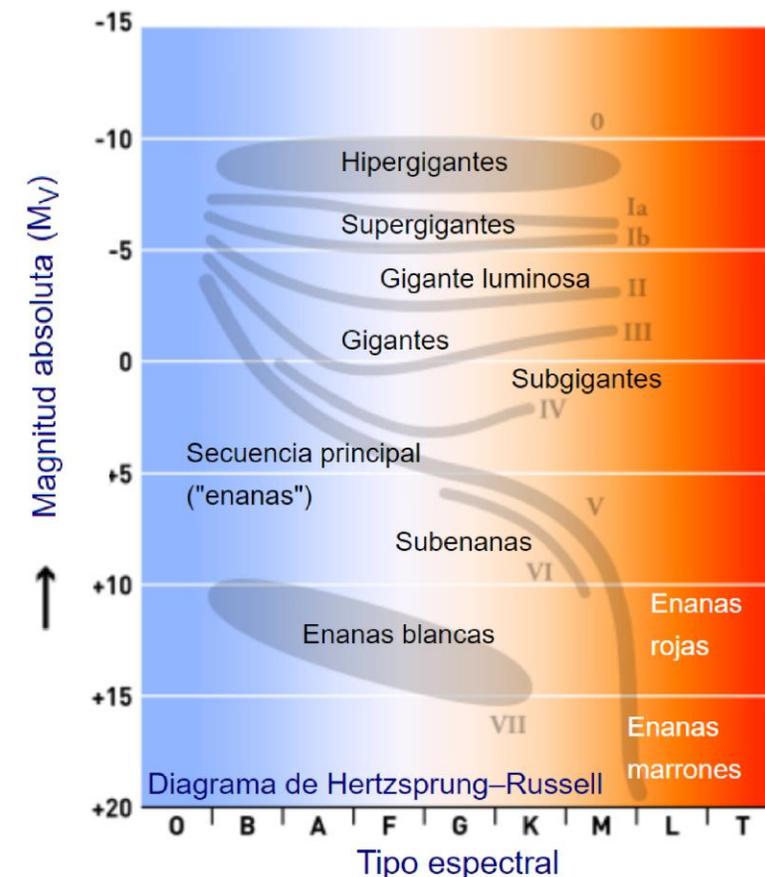
Clase espectral	Temp. Celcius	Índice de Color	Color	% abundancia	Línea espectral dominante
O	50000 a 25000	0 <sup>-</sup> .4	azul	1 %	Helio
B	25000 a 11000	0 <sup>-</sup> .3	azul blanq	3 %	Helio Hidrogeno
A	11000 a 8000	0.0	blanco	2 %	Hidrógeno Calcio
F	8000 a 6000	0 <sup>+</sup> .3	amarillo o blanq	10 %	Calcio Potasio
G	6000 a 4000	+0. 7	amarillo o	16 %	Metales Calcio
K y M	4000 a 2500	+ 1.2 y +1.7	Naranja y rojizo	37 % y 7 %	Metales Oxido de titanio



# Clases de brillos

- En el sistema MK, (de W.W. Morgan, P.C. Keenan y E.), se clasifica la luminosidad asignando los números romanos I, II, III, IV, V, VI y VII, para establecer diferencias fundamentales según las características de las líneas espectrales, observadas en el espectro de absorción de la estrella, ya que estas varían con la densidad de su atmósfera.
- Cuando la energía calorífica estimula un elemento en su fase gaseosa, sus átomos emiten radiación en ciertas frecuencias del visible. Ahora, dependiendo del tipo de gas, la fuente luminosa pueden producir dos tipos de líneas en un espectro: de emisión o de absorción. Si captura una disminución de la intensidad de la luz en la frecuencia del fotón incidente, se observará una línea de absorción. Pero si el detector es capaz de observar el gas y no la fuente de luz, se observarán líneas de emisión.
- La imagen muestra las clases de luminosidad sobre el diagrama H-R, así: las estrellas tipo I incluyen todas las estrellas supergigantes, las que a su vez de subdividen en clases Ia y Ib. Las estrellas tipo II son estrellas gigantes brillantes. El tipo III estrellas gigantes. El tipo IV son estrellas subgigantes. El tipo V son estrellas de la secuencia principal ("enanas"). El tipo VI son estrellas subenanas. El tipo VII son estrellas enanas Blancas.
- Ver: Clasificación estelar, en <https://es.wikipedia.org/>
- Ver: [Espectroscopia estelar sintética, aplicaciones astrofísicas](#). Rojas Acosta, Maria Elizabeth (2015) Maestría thesis, Universidad Nacional.
- Ver: Luz del Confín del Universo. Rudolf Kippenhahn. B.5 Científica Salvat 1986.

Clases de Luminosidad - Sistema MK



<https://es.wikipedia.org/>



# Estrellas Dobles y Poblaciones

• Estrellas **dobles**: son dobles ópticas si estando separadas, sólo coinciden con la visual, y dobles físicas si se mueven alrededor de un centro de gravedad común. Como ejemplo de estrellas **dobles ópticas** tenemos a Alkor y Mizar, en la constelación de la Osa Mayor.

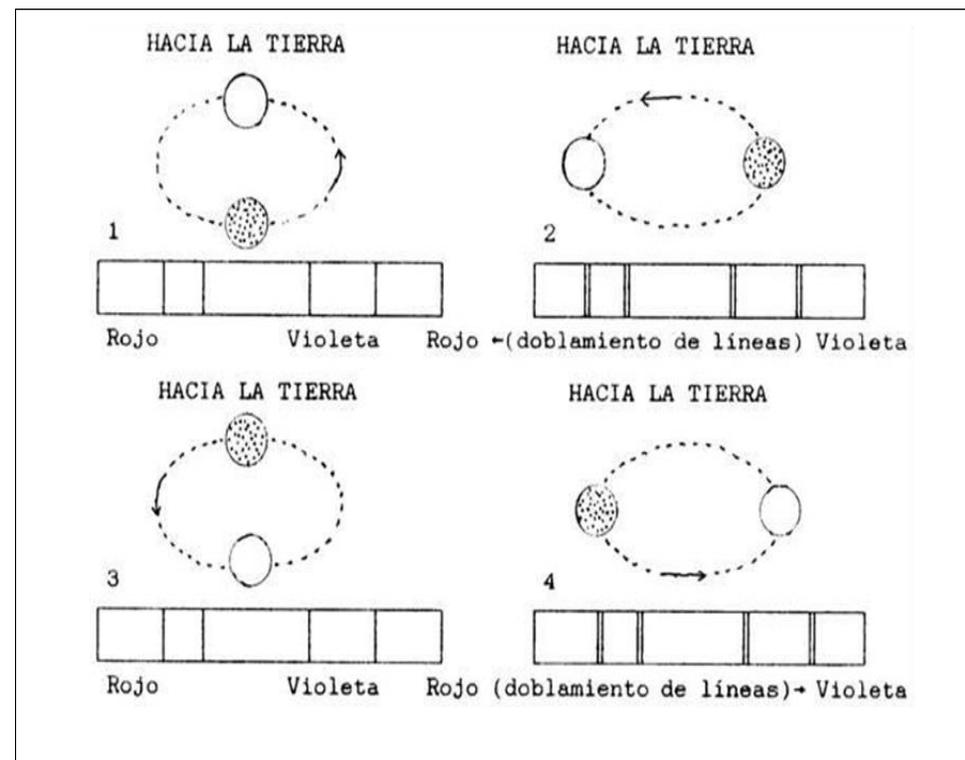
• Las estrellas **dobles físicas**, pueden ser **físicas** ópticas (eclipsantes y no eclipsantes), o también físicas dobles espectroscópicas, según puedan verse ópticamente o sólo reconocerse su carácter con las líneas espectrales (Efecto Doppler), razón por la cual también se les llama **estrellas dobles fotométricas**.

## Poblaciones estelares:

**Las estrellas de la Población I** son de alto contenido metálico, de segunda o tercera generación y tienden a ser luminosas, calientes y jóvenes, y a estar concentradas en los discos de las galaxias y brazos espirales. El Sol, es de la población I.

**Las estrellas de la Población II** son estrellas viejas de bajo contenido metálico, por ser de primera generación, y tienden a encontrarse en los cúmulos globulares y en el núcleo de una galaxia. Se habla de primera generación, ya que no disponen de elementos más pesados formados en los procesos de nucleosíntesis estelar.

- Ver: [Cien Mil Millones de Soles](#). Rudolf Kippenhahn. Biblioteca Científica Salvat 1986.
- Ver: Física Nuclear. Academia Norteamericana de Ciencias. Biblioteca Científica Salvat 1986.



Espectros de un sistema de estrellas dobles espectroscópicas, donde se observan las líneas espectrales sin desdoblamiento en su posición normal 1 y 3, pero con corrimientos al rojo al alejarse respecto a la Tierra en la posición 2, y al violeta cuando se acerca hacia la Tierra en la 4.



# Cúmulos estelares

- Las estrellas de la Vía Láctea, nuestra galaxia, son más heterogéneas que las de cualquier tipo de cúmulo; hay diferencias entre las del **halo galáctico**, que es la estructura heredada de la protogalaxia o galaxia primitiva, y las de sus **brazos espirales** que son la estructura lenticular de la galaxia ya evolucionada.
- Las edades de los cúmulos se diferencian en la estructura del Diagrama HR: el de **M3**, esta más despoblado que el de **las Pléyades**. M3 es un **cúmulo esférico** que se encuentra a unos 33.900 al en Canes Venatici y tiene una magnitud aparente de 6,2. Y Pléyades es un **cúmulo abierto** ubicado a 444 al en la constelación de Tauro, que contiene estrellas del tipo espectral B.
- Las estrellas de un **cúmulo globular** difieren ostensiblemente, por su génesis y cantidad de estrellas, a las de un **cúmulo galáctico**; las primeras son agrupaciones de decenas de miles de estrellas viejas de primera generación, sin polvo ni gas interestelar, y con bajo contenido metálico; mientras las segundas agrupaciones son de cientos de estrellas jóvenes, de segunda generación en medio de nubes de gas y polvo, y con alto contenido metálico.
- Igualmente, mientras los cúmulos globulares – caso M3-, tienen **órbitas excéntricas e inclinadas** respecto al plano galáctico, los galácticos -como Las Pléyades-, se establecen con órbitas poco excéntricas en los **brazos espirales de la galaxia**, tal cual lo hace el Sol en el brazo de Orión y en medio de los brazos de Perseo y Sagitario.

Ver: El universo accidental. Paul Davies. Biblioteca Científica Salvat 1986.

Ver: [El Diagrama H-R del Cúmulo de las Pléyades](#). G. Iafrate., M. Ramella y P. Padovani INAF –Trad.r: Carmen Morales, Miriam Aberasturi y Enrique Solano ) Febrero 2010.Euro Aida. SVO.

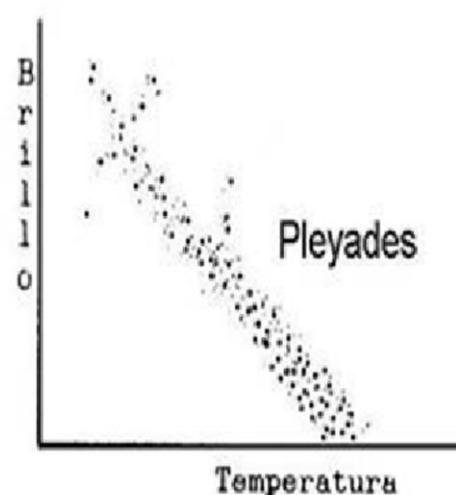
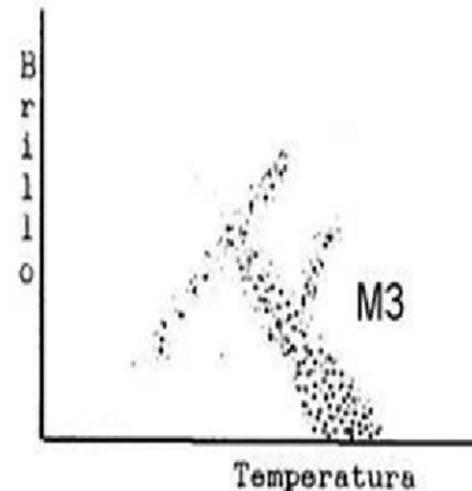
Ver: [Diagramas HR de cumulos estelares](#). Glenn Snyder and Laurence Marschall. Traducción: Eduardo Manuel Alvarez. Contemporary Laboratory Experiences in Astronomy.



M3 en <https://es.wikipedia.org/>



Pleyades en <https://es.wikipedia.org/>



Diagramas HR para M3 y Las Pléyades. Fuente, Cien mil millones de Soles.

El diagrama H-R aplicado a cúmulos estelares: muestra que para sistemas coherentes existe diferencia entre un **cúmulo globular** como M3, y un **cúmulo galáctico** como Pléyades. Fuentes, Wikipedia y Cien mil millones de Soles.



# GUÍA ASTRONÓMICA

## GUÍA Nº 9 B

<http://www.bdigital.unal.edu.co/1700>

### LAS ESTRELLAS: Estrellas variables



Pléyades, cúmulo galáctico a 400 años luz, en Tauro.  
Credit: NASA/ESA/AURA/Caltech. <http://hubblesite.org/>.

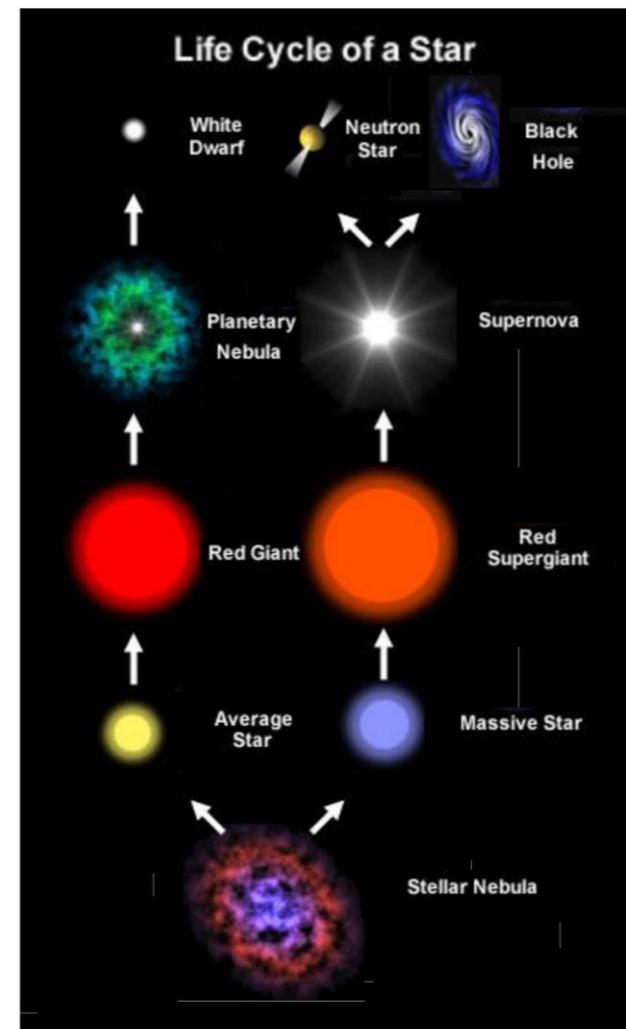




# Síntesis evolutiva de una estrella

- 1- Colapso gravitacional de una nube de gas y polvo, formando primero una **protoestrella cliente** y luego una **protoestrella brillante** con gas ionizado. El incremento de temperatura, se explica por el colapso gravitacional proveyendo **energía de acreción**.
- 2- Nace la estrella cuando se enciende el **horno termonuclear**, y entra a la **Secuencia Principal** para consumir el hidrógeno como su primer combustible.
- 3- Agotado el hidrógeno, el núcleo apagado colapsa incrementado su temperatura, para luego reencenderse generando una onda de choque, tomando un nuevo combustible, dilatando las capas externas para convertirse en **Gigante Roja** y subir al respectivo cuadrante.
- 4- Cada reencendida del horno provocando novas, hace que la estrella pierda masa, formando una nebulosa planetaria caso en el cual, hasta que la estrella ya sin envoltura se transforme en **Enana Blanca** para bajar en el Diagrama HR; pero si es una estrella masiva, explotará en forma de supernova con lo cual se destruye perdiendo masa considerable y no podrá llegar a la fase de enana blanca..
- 5.1-Agotado todo el combustible, cuando la estrella es de masa modesta, después de pasar a la fase de Enana Blanca se apaga y colapsa, quedando una densa **masa estelar negra**, ya que con una  **$M < 1,4$  Masas solares** el colapso se detiene gracias a la **Presión de Degeneración de los Electrones**.
- 5.2 En estrellas masivas, tras la fase de supernova, el colapso cambiara la suerte dependiendo de la masa final del astro, así; si en masas solares  **$2 > M > 1,4$**  será una **estrella Estrella Neutrónica** donde el colapso del astro lo detendrá la presión de degeneración de los Neutrones; o si  **$M > 2$  masas solares**, será un **Agujero Negro**, al superar ambas presiones de materia degenerada, y romperse el espacio-tiempo.

- Ver: Ver: [Cien Mil Millones de Soles](#). Rudolf Kippenhahn. Biblioteca Científica Salvat 1986.
- Ver: El universo desbocado. Paul Davies. Biblioteca Científica Salvat 1986.
- Imagen adjunta: Life Cycle of a Star. NASA In: <https://www.schoolsobservatory.org/>



CICLO DE LAS ESTRELLAS SEGÚN SU MASA

NASA In: <https://www.schoolsobservatory.org/>

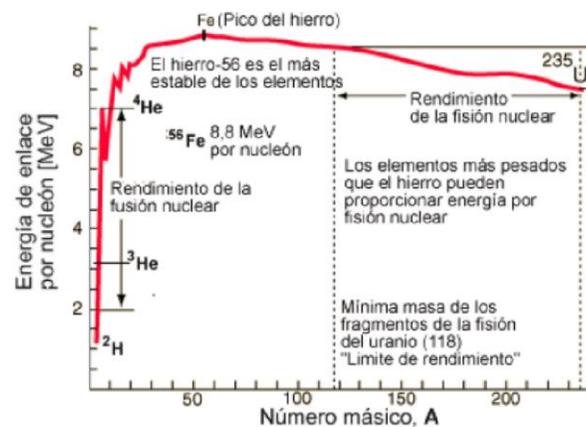


# Nucleosíntesis estelar

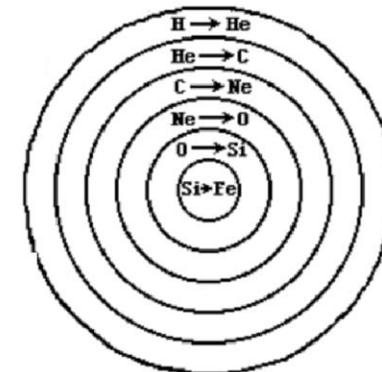
- El curso de la estrella por el diagrama H-R, estará determinado, fundamentalmente por su masa y composición química. **Las cenizas del hidrógeno -que son helio-**, se van concentrando en el núcleo. **Agotado el H, la estrella se hace inestable**, se contrae y calienta por energía de acreción, y **toma el He** como segundo combustible **para producir C por el proceso Triple Alfa**. Simultáneamente la estrella se dilata ganando con su **mayor superficie** el color rojo y cambiando de lugar en el Diagrama HR.

- A medida que el núcleo se siga contrayendo, gracias a la **energía de acreción** la temperatura crece, y el **neón** empieza a interactuar con núcleos de **helio** para formar **magnesio**. **Agotado el helio** utilizable, por el cese de la presión termonuclear colapsa **el núcleo e incrementa su temperatura** a niveles más vertiginosos, permitiendo la **fusión de núcleos aún más pesados**. Si se tratara de estrellas masivas, de ese modo sucesivamente aparecerán núcleos de isótopos de elementos con números másicos múltiples de cuatro, hasta alcanzar el hierro, para fisionarse en He y producir una supernova en cuya onda de choque se forman elementos mas pesados que el hierro. Esto es, en la fase de **gigante roja**, a **mayor masa mayor temperatura** y mayor escala de reacciones hacia los **elementos más pesados** (Ne, Mg, Si, S, Ca, Ti, Va, Cr, Mn, Fe); pero más lejos que el hierro no se puede dar fusión, porque **el hierro absorbe energía estelar fisionándose en He**; con lo cual, el cese súbito de la presión de reacciones hace explotar la estrella en forma de **supernova**.

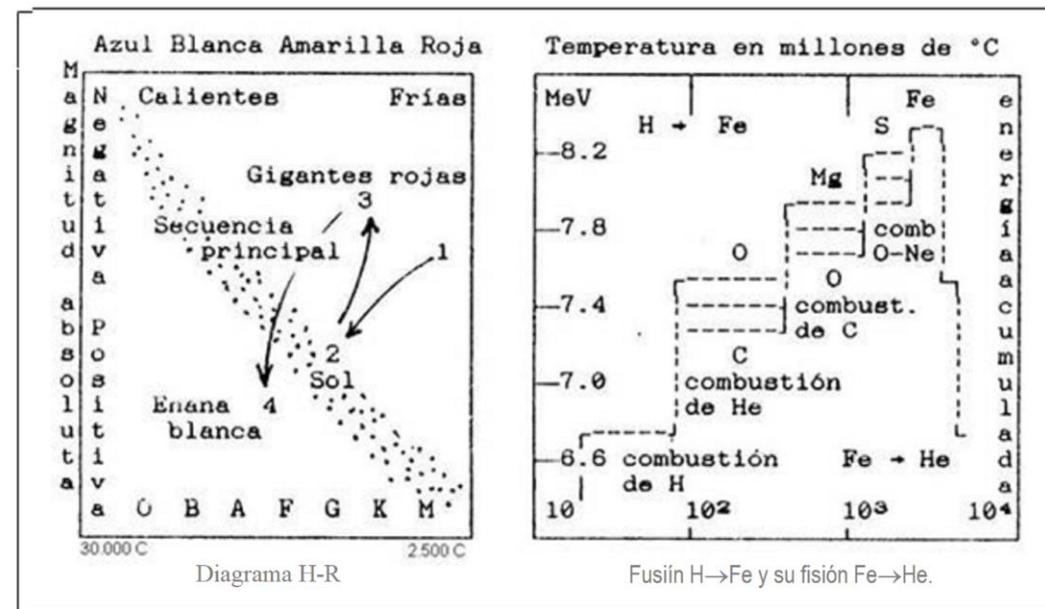
- Ver: [Cien Mil Millones de Soles](#). Rudolf Kippenhahn. Biblioteca Científica Salvat 1986.



Nucleosíntesis estelar <https://wikimedia.org/>



Combustión estelar en una gigante roja <http://bdigital.unaedu.co/57093/>

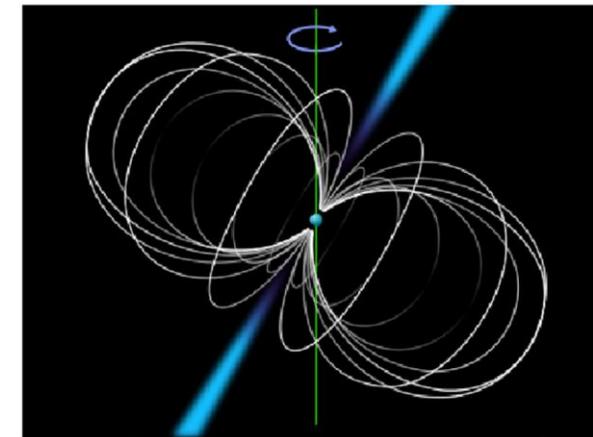


Nucleosíntesis estelar: formación de elementos pesados

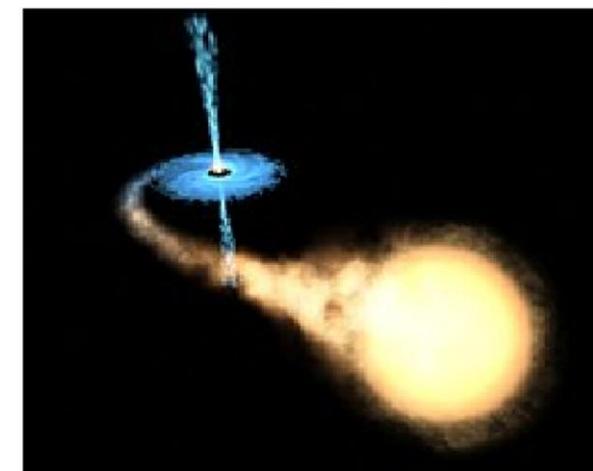


# E. Neutrónicas, Pulsares, Agujeros negros y Emisoras de rayos X

- Una **Estrella de Neutrones** puede explicar no solo una **Estrella con emisión de rayos X**, sino también un **Pulsar**. Cuando materia proveniente de una estrella vecina entra al campo gravitacional de una **estrella neutrónica**, el material que cae sobre ella y el expulsado colisionan y crean una capa esférica que se calienta a temperaturas de entre 200 y 300 millones de grados. Este gas caliente es el que emite la luz de rayos X. La condición para la emisión de rayos X, solo es la temperatura por encima del millón de grados Celsius. Un **Púlsar** es una estrella de neutrones con un intenso campo magnético, que induce la emisión de pulsos de radiación electromagnética a intervalos regulares, asociados a su periodo de rotación, y a la disociación de los ejes magnético y de rotación.
- Las **Estrellas Neutrónicas**, surgen de estrellas de masa final entre 1,4 y 2 masas solares, cuando en la fase de gigante roja, avanzado el proceso de nucleosíntesis, el colapso gravitacional supera la **Presión de Degeneración de los Electrones**, mas no la de los neutrones; los electrones en órbita se acercan tanto al núcleo atómico que acaban fusionándose con los protones.
- Se denomina **Materia Degenerada** a aquella en la cual una fracción importante de la presión proviene del **Principio de Exclusión de Pauli**, que establece que dos fermiones no pueden tener los mismos números cuánticos. Para la degeneración de electrones se requerirá de una **densidad** en torno a los  $10^6 \text{ g/cm}^3$ , y para la degeneración de los neutrones unos  $10^{14} \text{ g/cm}^3$ .
- Los **Agujeros Negros** se forman en un proceso de colapso gravitatorio que se da en una gigante roja con una masa inicial de 10 a 25 masas solares, ya avanzado el proceso de nucleosíntesis, gracias a que la fuerza gravitatoria concentra la masa generando un cataclismo, con lo cual se forma un agujero negro cuando la masa restante supera **2 masas solares**. Un **agujero negro** es un cuerpo tan denso que atrapa su propia luz; y que tiene por radio de acción el **Horizonte de Sucesos**, una hipersuperficie fronteriza imaginaria del espacio-tiempo, y que con su forma esférica lo rodea.
- Ver: [Trayectoria de partículas cerca de un agujero negro cargado inspirado en geometría no-conmutativa](#). Calderón Sánchez, Kenyi Javier (2013) Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá.



Estrella netronica como Pulsar: observe la isociación del eje de totación y el magnético. Wikipedia.org.



Chorro Jet y Emision de rayos X en un agujero negro captando masa aportada por una Gigante Roja . Wikipedia.org. 27



# Estrellas Variables I

Son las estrellas que experimentan una variación en su brillo cuando fluctúan, ya por **causas intrínsecas** si la estrella se expande y se contrae, ya por **causas extrínsecas** como en el caso de las variables eclipsantes. Las primeras, pueden ser estrellas variables Pulsantes, Explosivas y de Otros tipos. A su vez, las Pulsantes son variables intrínsecas que se subdividen en dos subclases: las de Pulsación radial, (RR Lyrae, Cefeidas e Irregulares), y las de Pulsación no radial (como las variables ZZ Ceti).

**Las estrellas de 5 a 7 masas solares, suelen ser inestables**, y esto explica las cefeidas (Ver zona verde en el Diagrama HR).

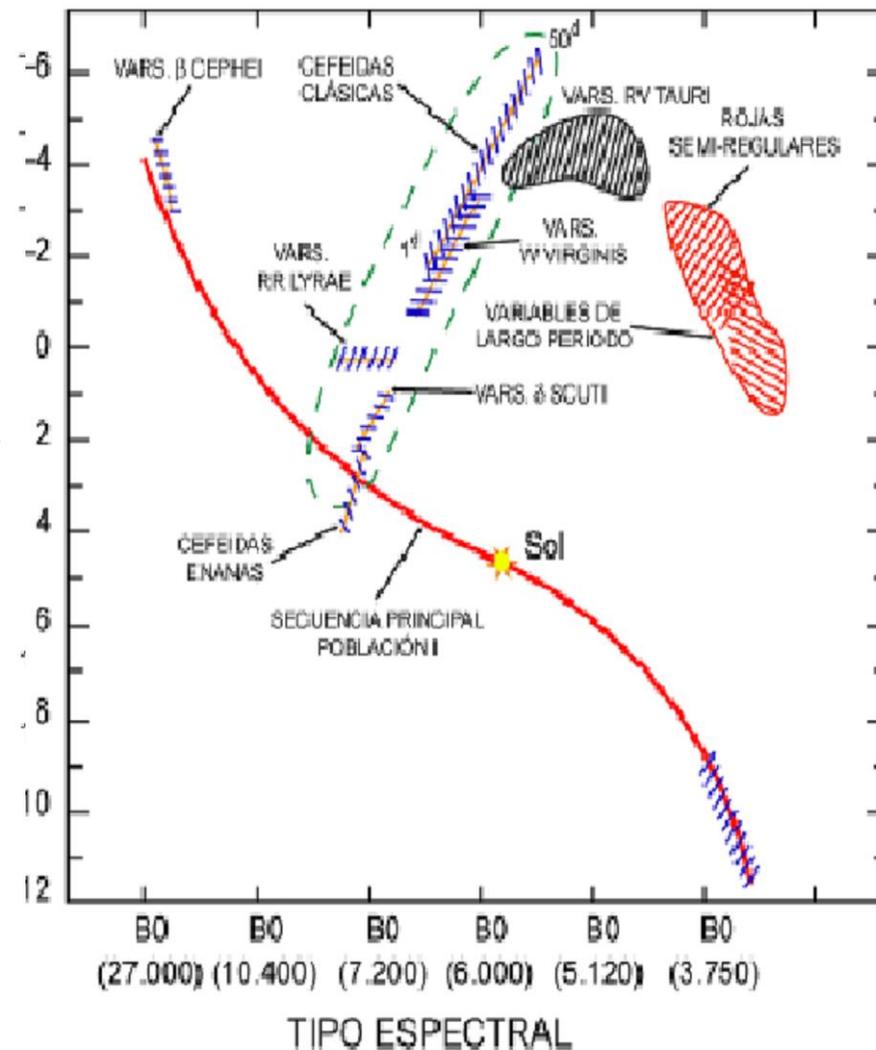
- Entre todas las variables, **sobresalen las Cefeidas** que deben su nombre a  $\delta$  Cephei, y cuyos períodos que van de un día a varias semanas, son proporcionales a su magnitud absoluta, razón por la cual, al contrastar sus Magnitudes absoluta y aparente, sirven de faros para valorar la distancia a cúmulos y galaxias donde se detecten.

- En principio, **existen dos tipos de cefeidas**: las clásicas o cefeidas típicas de población I; y las cefeidas de tipo W Virginis de la población II. Las W Virginis más brillantes y con períodos de 30 a 150 días, se conocen como RV Tauri.

- De otro lado, las variables de tipo **RR Lyrae** son estrellas diferentes a las cefeidas, ya que tienen períodos de 1 a 24 horas, aunque también sirven como faros indicadores de distancias.

- Ver: [Understanding Variable Stars](#). John R. Percy. University of Toronto, Toronto, Ontario, Canada 2007.

- Ver: [La Distancia a M100 determinada por las estrellas Variables Cefeidas](#). Programa de Ejercicios de Astronomía de ESA/ESO.



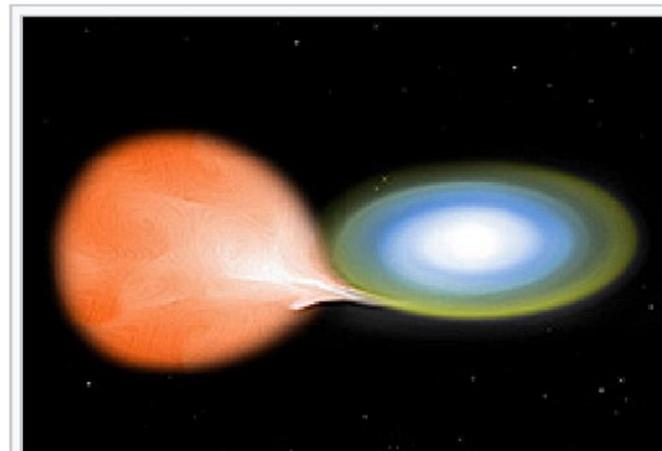
- El Diagrama HR y la ubicación de Estrellas Variables entre ellas, las Cefeida en la zona verde. Fuente: Web de Fran Sevilla <https://www.astrofisicayfisica.com/>



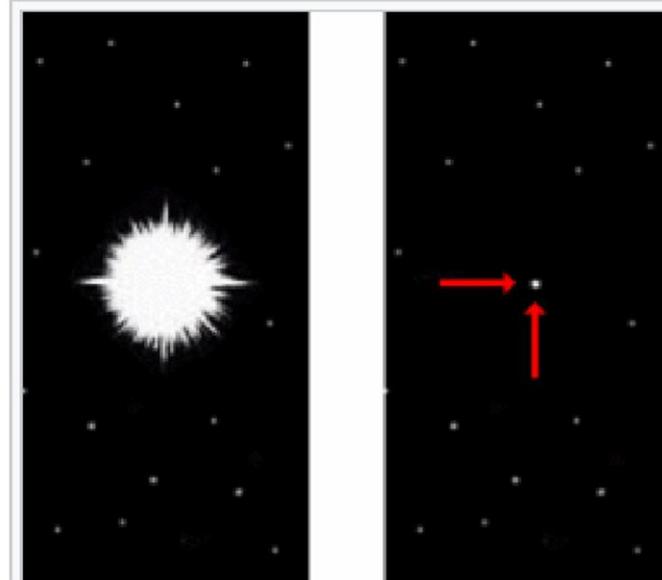
# Estrellas variables II

- **Las explosivas** son las cataclísmicas, caso novas y supernovas; mientras las variables de otro tipo son las estrellas que cambian de brillo o aspecto por razones físicas diversas. En las **Variables de otro tipo**, entran estrellas que experimentan erupciones en sus superficies, como llamaradas o eyecciones de masa.
- **Novas y Supernovas:** mientras las **Novas** son estrellas que aumentan enormemente su brillo de forma súbita, y luego palidecen gradualmente, pero pueden repetir los episodios existiendo durante cierto tiempo, contrariamente las **Supernovas** no: tras el cataclismo se altera o destruye la estrella para transformarse en **estrella neutrónica** o en **agujero negro**.
- **Las novas** son estrellas que explotan cuando se presentan desequilibrios entre la gravedad y el combustible nuclear, lo que suele ocurrir durante el proceso de nucleosíntesis. Las novas contribuyen a la nucleosíntesis de algunos elementos que no se producen igual que en los ciclos habituales, y con mayor razón también lo hacen las supernovas en su colosal paroxismo.
- **Y las supernovas**, pueden ser cataclismos relacionados con procesos rápidos de acreción de masa desde una gigante a una enana blanca compañera, lo que puede suceder en sistemas estelares binarios muy cercanos; o por la fisión de hierro en helio en el proceso de nucleosíntesis, con lo cual al final del ciclo estelar da origen a las estrellas neutrónicas o a los agujeros negros.

- Ver: Astrofísica y Física. Fran Sevilla <https://www.astrofiscayfisica.com/>
- Imagen: Estrellas Novas, en Wikipedia.org



Formación de una nova.



Estrella antes y después de una nova.

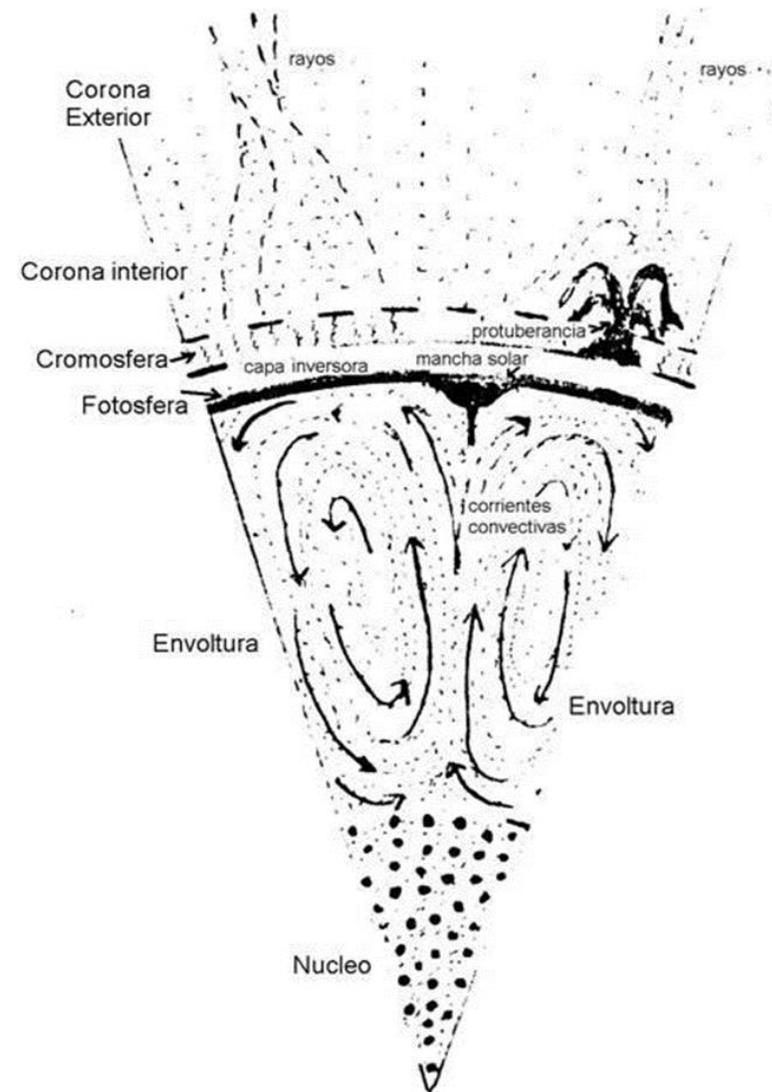


Las Estrellas Novas <https://es.wikipedia.org/>



# Estructura de las Estrellas

- Tomaremos el **Sol** como modelo, una estrella de **Magnitud Absoluta +4.7 (o visual de -26)** y **Clase Espectral G2**, con unos 4.500 millones de años y que podría durar otros 5000 millones.
- **En el núcleo** donde se dan las **reacciones termonucleares** de fusión nuclear, el medio generalmente se encuentra en estado gaseoso y a gran presión; la **temperatura** supera los 10 millones de °C, y la **densidad** los 100g/cc.
- Sigue la **envoltura** con una temperatura exterior de 5500 °C bajo la fotosfera, que aumenta hacia el interior; su **composición química es constante**. A través de la envoltura y entre el núcleo y la fotosfera el calor se transfiere por **radiación, convección y conducción**; además, el **giro no rígido** del astro es más rápido en el interior que en el exterior y en el ecuador que en los polos.
- Por encima, está la **fotosfera**, que es la región visible del Sol y cuya temperatura, de 5680 °C, se hace menor en las **manchas solares** ubicadas sobre la zona de emergencia de las corrientes de convección. Estas parecen ser más frías por el freno de las corrientes magnéticas.
- Continúa la **cromosfera**, una región de estructura espicular que rodea la fotosfera, y que muestra las **protuberancias** que son masas gaseosas a modo de **erupciones**, y las **fulguraciones** constituidas por el **plasma solar**, responsable de las **auroras polares y tormentas magnéticas** sobre la Tierra.
- Ya en el exterior, aparece la **corona** una región más externa que la cromosfera, donde la temperatura se eleva a un millón de °C. Esta se hace **visible en eclipses** y provee el **viento solar**, que se extiende más allá de la Tierra. **El viento solar** está constituido por corrientes de gas más tenues que la corona, fluye con velocidades de cientos de Km/seg, y genera una presión que **modifica la magnetósfera** de la Tierra.
- Ver: [A Study of Photospheric Vector Magnetic Field Changes During Solar Flares](#). Castellanos Durán, Juan Sebastián (2016) Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá.



Estructura Estelar. Base el Sol; Magnitud +4.7  
Clase Espectral G2. En: Guía astronómica



# Magnetismo y actividad solar

- **Magnetismo solar.** Se presume la formación de un campo magnético dentro de la zona convectiva del Sol. Con la **circulación convectiva** del plasma conductor, funcionando **a modo de una dinamo**, se destruye el campo magnético primordial de la estrella y se genera un **campo magnético bipolar**.
- En virtud de la **rotación diferencial** del Sol, al enrollarse el magnetismo formando un **campo toroidal** de cuerdas de flujo que envuelven el Sol, el campo magnético presiona el plasma y produce **eyecciones masivas** a modo de erupciones. Como referente: en el caso de **la Tierra**, las corrientes eléctricas del núcleo exterior, generan un campo magnético que **se amplifica** por las celdas convectivas del manto terrestre, y esto explica nuestro campo magnético.
- El Sol expulsa varios productos de su actividad: la **radiación solar**, las **emisiones de masa** con el **viento solar**, o de masa esporádicas como las **eyecciones de la corona**, aunque también pierde **plasma solar** proveniente de **fulguraciones** y **eyecciones** de masa coronal.
- Para ilustrar los cambios del clima que se han dado en la Tierra, además de las **cinco grandes glaciaciones**, cuyo último evento ocurrió en el Cuaternario, tenemos dos situaciones antagónicas y recientes: primero la **“pequeña glaciación”** asociada a un periodo frío de 300 años ocurrido entre 1550 y 1850, en el que se presentaron tres picos fríos (1650, 1770 y 1850); esta pequeña edad del hielo, acompañada de lluvias, coincidió con un período de baja actividad en las manchas solares; y segundo, **el actual “calentamiento global”** en el que la actividad solar juega, y a cuya celeridad excepcional ocurrida en los últimos 50 años, contribuye la concentración de dióxido de carbono de origen antropogénico en la atmósfera.
- Ver: [Evolution and dynamic properties of photospheric plasma in solar active regions](#). Campos Roza, Jose Iván (2017) Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá.
- Ver: [El entorno espacial terrestre](#). Sergio Dasso. (IAFE y CONICET-UBA) In: Astropartículas y Física Solar – LAGO. Univ. San Francisco de Quito, 20-24 enero, 2014.

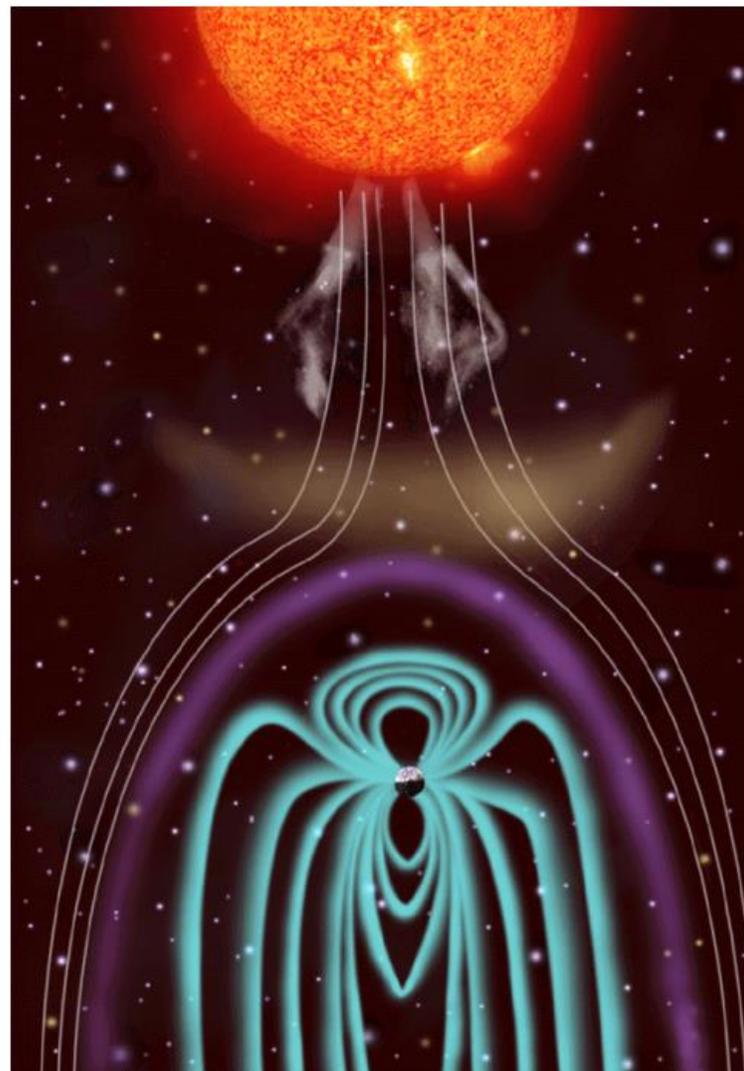


Imagen: Viento solar y Magnetósfera de la Tierra, en:  
<http://sohowww.nascom.nasa.gov>



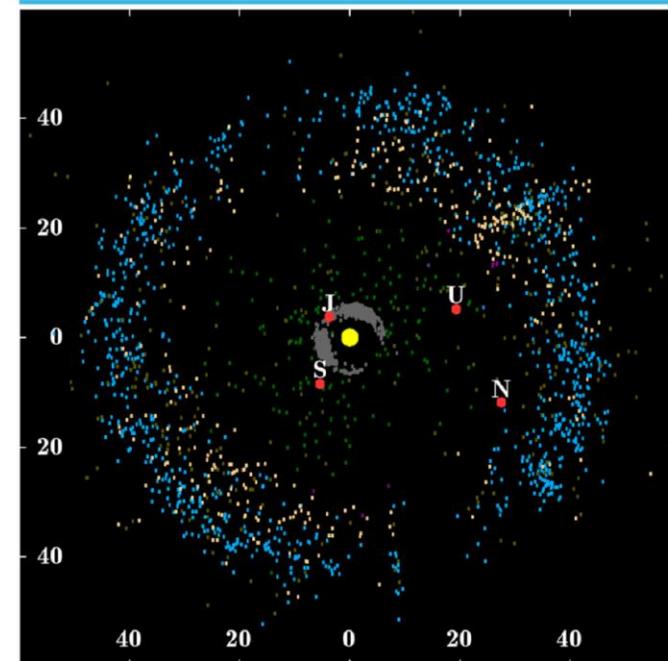
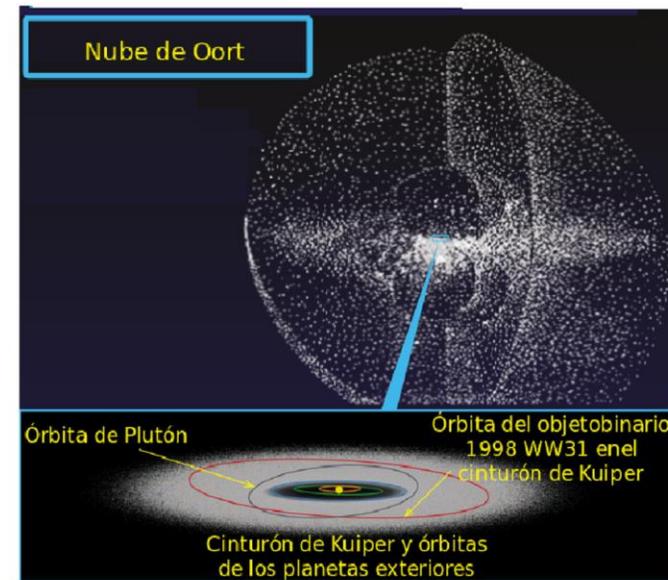
# Cometas y Asteroides

- Los cometas del sistema solar: son cuerpos celestes constituidos por hielo, polvo y rocas, que orbitan alrededor del Sol siguiendo las trayectorias de las curvas cónicas o colisionado si resultan capturados por el Sol o un planeta, y que provienen principalmente de dos lugares, la **Nube de Oort** ubicada entre 50 000 y 100 000 UA del Sol, y el **Cinturón de Kuiper** ubicado entre 30 y 55 UA, más lejos que Neptuno.
- Ambas estructuras son remanente del **disco protoplanetario** del Sol. Mientras los cometas de período largo provienen de la nube de Oort, los de período corto provienen de Kuiper. La Nube de Oort presenta dos regiones diferenciadas: la **nube exterior de forma esférica**, y la interior llamada **nube de Hills en forma de disco**.
- El **Cinturón de Asteroides**, ubicado entre Marte y Júpiter, es un disco del sistema solar con una masa equivalente al 4 % de la masa de la Luna, el cual alberga multitud de objetos rocosos de formas irregulares denominados asteroides, y al **planeta enano Ceres** de 900 km de diámetro, cuya masa es 1/3 de todo el cinturón. Otros cuerpos notables suyos, son Vesta y Pallas.
- Los **asteroides** y sus parientes los **meteoroides**, son fragmentos rocosos que frecuentan nuestro espacio interplanetario; sólo que los primeros al igual que los cometas, son tan grandes como un gran bloque rocoso o una extensa montaña, mientras los segundos que le suceden en tamaño, resultan similares a las arenas, grava y bloques de roca. Unos y otros tienen un origen que puede asociarse a **la génesis del sistema planetario o a procesos catastróficos** como las colisiones que han formado los **cráteres lunares**.
- Finalmente, están las **Estrellas Fugases** que se explican por polvo y arena submeteórica de origen cometario que entra a la atmósfera, cuando la Tierra transita por la ruta de cometas, conforme se va desplazando; las bolas de fuego son causadas por los fragmentos mayores al entrar a la atmósfera de la Tierra, para consumirse sin que logren alcanzar su superficie, tal cual lo hacen los meteoritos.

• Imágenes y fuente:

• Nube de Oort en [https://es.wikipedia.org/wiki/Nube\\_de\\_Oort](https://es.wikipedia.org/wiki/Nube_de_Oort)

• Cinturón de Kuiper en [https://es.wikipedia.org/wiki/Cintur%C3%B3n\\_de\\_Kuiper](https://es.wikipedia.org/wiki/Cintur%C3%B3n_de_Kuiper)



Nube de Oort y Cinturón de Kuiper - Wikipedia.org



# Gracias



Gonzalo Duque-Escobar: Profesor de la Universidad Nacional de Colombia, desde 1976, actual Director del [Observatorio Astronómico de Manizales OAM](http://godues.webs.com) y Coordinador del [Museo Interactivo “Samoga”](http://godues.webs.com), en la Universidad Nacional de Colombia. <http://godues.webs.com>

Documento para el Curso de Contexto en Astronomía del [Observatorio Astronómico de Manizales OAM](http://godues.webs.com) – dependencia de la U.N.-  
Conmemorativo del IYA 2009. UN de Colombia sede Manizales (2009). Ajustado 2019. Imagen: Campus Palogrande de la U.N. en Manizales, con la torre del OAM en el centro de la imagen.



# Bibliografía 1

- [A Study of Photospheric Vector Magnetic Field Changes During Solar Flares](#). Castellanos Durán, Juan Sebastián (2016) , Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá.
- [Actividades didácticas en astronomía estelar](#). Pico Arévalo, Julián Alberto (2016) Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá.
- [Albert Einstein](#). Duque Escobar, Gonzalo (2016) In: Apertura del Contexto en Astronomía, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales
- [Análisis comparativo de los indicadores de rotación estelar en una muestra de estrellas T-Tauri y post T-Tauri](#). Rodríguez Gómez, Jenny Marcela (2012) Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia.
- [Astronomía en la Edad Media y el Renacimiento](#). Claudia Torres Arango. Curso de Contexto en Astronomía. Universidad Nacional de Colombia. Manizales, 2019.
- Astronomía sin Telescopio. ROUSSEAU, PIERRE. Biblioteca de Divulgación Científica "Muy Interesante". Ediciones Orbis 1986.
- [Bessel y el primer paralaje estelar](#). José Maza Sancho 2016. UNIVERSIDAD DE CHILE.
- [Breve historia de la cosmología](#). Astroseti: David Wands , Portsmouth. Traducción de Jesús Canive.
- Breve historia de la química: Introducción a las ideas y conceptos de la química. Isaac Asimov, (2014). Alianza Editorial. Madrid.
- [Capítulos virtuales para la enseñanza de las Ciencias de la Tierra y el Espacio](#). VALLEJO VELÁSQUEZ, Juan Carlos (2015). Maestría Thesis, U. N. de Colombia – Sede Manizales.
- [Cataclysmic Variables](#) Robert Connors Smith. 2007. Contemporary Physics 47(6) · University of Sussex.
- [Cien años del Universo Relativista de Einstein](#). Duque Escobar, Gonzalo (2016). La Patria, Manizales, Colombia.
- [Cien Mil Millones de Soles](#). Rudolf Kippenhahn. Biblioteca Científica Salvat 1986.
- Cien Mil Millones de Soles. Rudolf Kippenhahn. Biblioteca Científica Salvat 1986.
- [Cincuenta años de la llegada del hombre a la Luna](#). Duque Escobar, Gonzalo (2019) [Objeto de aprendizaje - Teaching Resource]
- [Civilizaciones Mesoamericanas – Mayas: Cultura maya](#). AGUIAR, Olga. (2000). In Monografías.
- Cometas Meteoros y Asteroides. GIBILISCO, Stan. Cómo afectan a la tierra. Editorial Mc Graw Hill. Serie de Divulgación Científica. España. 1991.
- [Conceptos y principios básicos de la astronomía observacional](#). González Murillo, Giovanni Francisco (2016). Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá.
- [Contribuciones de Einstein a la teoría cuántica \(1905-1925\)](#). NAVARRO VEGUILLAS, Luis (2000).
- [Cosmología moderna, materia oscura y energía oscura](#). Angel M. Uranga. (2016). Instituto de Física Teórica UAM/CSIC. Madrid, España.
- [Cosmología Observacional: Medidas de distancias extragalácticas](#). Beatriz Ruiz Granados . Asignatura: Cosmología. Curso: 2008-2009. U de Granada.
- [Cosmología: Origen, evolución y destino del Universo](#). HERNÁNDEZ, Pedro J.
- [Cosmological features of primordial magnetic fields](#). Hortua Orjuela, Héctor Javier (2018) Doctorado thesis, Universidad
- [Cronología del Big Bang](#). Wikipedia.org. Anexo.
- [Cuál es el origen de la masa?](#) Miguel Ángel Pérez Angón (2005). Revista Ciencia N°56- Enero-Marzo 2005. [Ecuación de desvío geodésico en la métrica Lemaître Tolman Bondi](#). Orduz, Carlos Andrés (2012) Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia.
- [Ecuación de Friedmann modificada y cosmología sobre una Brane-World](#) / Moreno Sánchez, Alexander (2009) Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia.
- [Efecto de huecos y bordes sobre la medición de lacunaridad y fractalidad en un catálogo de galaxias](#). García-Farieta, Jorge Enrique (2015) Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá.
- Einstein para principiantes SCHWARTS, Joseph & MCGUINNESS, Michael. Era Naciente SRL. BBA. 2001.



# Bibliografía 2

- El amanecer cósmico. Eric Chaisson. Biblioteca Científica Salvat 1986.
- [El bosón de Higgs](#). Duque Escobar, Gonzalo (2012) La Patria.
- [El camino a las estrellas](#). DUQUE ESCOBAR, Gonzalo. (2009) Observatorio Astronómico de Manizales OAM. Universidad Nacional de Colombia.
- [El cielo en las ciencias: enseñanza de la astronomía en la escuela](#). Ortíz Arango, Liana Suhail (2015) Documento de trabajo.
- El Colapso del Universo: la historia de los agujeros negros. ASIMOV, Isaac. Editorial Diana. Méjico. 1987.
- El Cometa Halley. ARIAS DE GREIF, Jorge. Empresa Editorial Universidad Nacional de Colombia. 1986.
- [El comportamiento de Mond en el sistema solar](#). Hernández Calvo, Laura Nataly (2013) Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia.
- [El Diagrama H-R del Cúmulo de las Pléyades](#). G. Iafrate:, M. Ramella y P. Padovani INAF –Trad.r: Carmen Morales, Miriam Aberasturi y Enrique Solano (2010).Euro Aida. SVO.
- [El entorno espacial terrestre](#). Sergio Dasso. (IAFE y CONICET-UBA) In: Astropartículas y Física Solar – LAGO. Univ. San Francisco de Quito, 20-24 enero, 2014.
- [El espacio-tiempo sigue siendo un enigma para la ciencia y la filosofía](#). LORENTE, Miguel. Epistemología y Filosofía de la Ciencia.
- [El misterioso lado oscuro del universo](#). Duque Escobar, Gonzalo (2017) [Objeto de aprendizaje - Teaching Resource]
- [El modelo estándar de la física de partículas](#). José Cobián (2018) Comisión Técnica de la Sociedad Nuclear Española.
- El momento de la creación. Biblioteca Científica Salvat 1986.
- El movimiento de los cuerpos celestes. Portilla Barbosa, José Gregorio (2001) Cap. de: Astronomía para todos. Colombia ISBN: 958-701-104-X Ed: Unibiblos.
- El universo accidental. Paul Davies. Biblioteca Científica Salvat 1986.
- [El Universo acelerado](#). Duque Escobar, Gonzalo (2011) Circular de la Red de Astronomía de Colombia RAC (629).
- El Universo de Stephen Hawking. BOLSLOUGH, JHON. Biblioteca Científica Salvat. 1986.
- El universo desbocado. Paul Davies. Biblioteca Científica Salvat 1986.
- El universo en una cáscara de nuez. HAWKING, Stephen. Editorial Planeta. I.S.B.N. 84-8432-293-9. Barcelona. 2002.
- El Universo I y II. ASIMOV, Isaac. (1971) Alianza Editorial. Madrid, 1991.
- El universo para curiosos. HATHAWAY, Nancy. Editorial crítica. I.S.B.N: 84-7423-770-X. 1196.
- [Cultura y Astronomía](#). Duque-Escobar, Gonzalo. Universidad Nacional de Colombia 2007.
- [Del tamaño de un fotón](#). Villanueva Hernández, Pedro Javier (2009) Documento de trabajo. Universidad Nacional de Colombia.
- [Desarrollo y revoluciones tecnológicas](#). Duque Escobar, Gonzalo (2017) Documento de trabajo. La Patria, Manizales
- [Design and development of a solar radio interferometer of two elements](#). Guevara Gómez, Juan Camilo (2017) Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá.
- [Diagramas HR de cumulos estelares](#). Glenn Snyder and Laurence Marschall.
- Dios y la nueva física. Paul Davies. Biblioteca Científica Salvat 1986.
- El Universo y la Tierra. ARENAS, Róbel; and CALVO, Benjamín; and CASTAÑEDA, Leonardo; and CEPEDA, William; and DE GREIFF, Alexis; and HIGUERA, Armando, and IZQUIERDO. Colombia, Proyectos especiales El Tiempo ISSN: 09588089, 2002 vol: fasc: págs: 8 - 120
- El Universo. COMELLAS, JOSE LUIS. Colección Salvat, Temas Clave. 1985.



# Bibliografía 3

- El Universo: su principio y su fin. Lloyd Motz. Trad. J.A. Planell y J. Rodellar. Muy Interesante. Ed. Bosch 1975.
- [Elementos de astronomía de posición](#). PORTILLA BARBOSA, José Gregorio (2001). Ed: Unibiblos Colombia.
- En busca del gato de Schrodinger. John Gribbin. Biblioteca Científica Salvat 1986.
- [En órbita primer satélite colombiano: El Libertad 1](#). Duque Escobar, Gonzalo (2007) Editorial de la Circular 418 de la Red de Astronomía de Colombia RAC (418).
- [Enfriamiento de estrellas de neutrones a través de la emisión de neutrinos producidos en el proceso Urca directo](#). Álvarez Salazar, Carlos E. (2015). Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia.
- [Esas maravillosas partículas](#). Pedro Gómez-Esteban (2007). Madrid, España. Blog El Tamiz.
- [Escudriñando la galaxia](#). Colombia, Cuestionario De Auto-Reflexión ISSN: 0121-9987, 1999 vol: fasc: págs: 1 – 4. Mario Armando Higuera Garzon, Antonio Uribe, Eduardo Brieua, Universidad Nacional de Colombia. Referencia en El Tiempo.
- [Espectroscopia estelar sintética, aplicaciones astrofísicas](#). Rojas Acosta, Maria Elizabeth (2015) Maestría thesis, Universidad Nacional.
- [Esperanza y acción en La Hora del Planeta](#). Duque Escobar, Gonzalo (2011) Circular 604 de la Red de Astronomía de Colombia RAC (604).
- [Estabilidad de la Materia Extraña y Posibles Estrellas de Quarks](#). Ricardo González Felipe, Aurora Pérez Martínez, Milva Orsaria, Ernesto López Fune. (2008) FÍSICA para todos / FÍSICA no mundo.
- [Estrategia didáctica para la enseñanza de la Astronomía de Posición](#). Acosta Martínez, César Augusto (2019) Trabajo de Grado dentro del marco del proyecto “Sintiendo la Astronomía”. Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá.
- [Estrellas de neutrones y propagación de neutrinos](#). Muñoz Martínez, Luis Fernando (2011) Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia.
- [Estudio de calidad del cielo para observaciones astronómicas en Colombia](#). González Díaz, Danilo (2015) Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia.
- [Estudio de la formación de galaxias enanas esferoidales satélites de la vía láctea mediante la simulación de la colisión de dos galaxias](#). Cubillos Jara, Diana Judith (2013) Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia.
- [Estudio de la pérdida de masa asociada a un viento estelar y su efecto en la rotación de las estrellas jóvenes](#). Cuervo Osses, Ruby Margoth (2012). Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia.
- [Estudio de la relación rotación actividad en estrellas Herbig Ae/Be](#). Avendaño Ramírez, Ronald Jamith (2018) Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá.
- [Estudio de las tasas de acreción para una muestra de estrellas T Tauri clásicas en el óptico](#). Restrepo Gaitán, Oscar Alberto (2012) Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia.
- [Estudio del magnetismo de cuerpos astronómicos](#). Morales Chaparro, Johana Katherine (2015). Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá.
- [Estudio del origen y evolución de la galaxia sagitario mediante simulaciones numéricas de n-cuerpos](#). Martínez Barbosa, Carmen Adriana (2011), Universidad Nacional de Colombia.



# Bibliografía 4

- [Evolución de las estrellas](#). John Percy. Publicaciones de NASE. International Astronomical Union, Universidad de Toronto (Canadá)
- [Evolution and dynamic properties of photospheric plasma in solar active regions](#). Campos Roza, José Iván (2017) Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá.
- [Fiesta de Estrellas en la Tatacoa](#). Ed. Circular RAC 517. Colombia. 1986.
- Física Nuclear. Academia Norteamericana de Ciencias. Biblioteca Científica Salvat 1986
- [Física y Química 1º Bachillerato](#). Río, Enrique Andrés del; Yuste Muñoz, Miguel Ángel; Rodríguez Cardona, Ángel; Pozas Magariños, Antonio. McGraw-Hill Interamericana de España, 2015.
- [Galileo y la nueva astronomía](#). Por Gerald Holton Harvard University. In: "Introducción a los Conceptos y Teorías de las Ciencias Físicas". Rev, Stephen G. Brush University of Maryland. Trad J. J. Aguilar Peris. Editorial Reverté, S.A. 1989.
- Galileo. RESTON, James. Ediciones B. ISBN: 84-406-6697-7. Barcelona. 1996.
- Gas y polvo interestelar. Mario Armando Higuera Garzon (1999) Revista Colombiana de Astronomía, Astrofísica, Cosmología y Ciencias Afines ISSN: 0123-6172 ed: Universidad Nacional de Colombia.
- [Generación de campos magnéticos primordiales / Generation of primordial magnetic fields](#). Hortua Orjuela, Héctor Javier (2011) Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia.
- Génesis. John Gribbin. Biblioteca Científica Salvat 1986.
- [Geociencias y Medio Ambiente](#). Duque-Escobar, Gonzalo (2018). Recopilación temática. U.N. de Colombia Sede Manizales.
- Giordano Bruno. Un Universo infinito. BIRX, James. Revista Universo. Número 37. Página 36 a 41. Barcelona, ISSN: 1135-2876. Mayo de 1998.
- [Guía Astronómica](#). Duque-Escobar, Gonzalo. Universidad Nacional de Colombia 2017.
- [Hipótesis De Los Cuerpos Desacelerados](#). Villanueva Hernández, Pedro Javier (2008). Universidad Nacional De Colombia.
- HISTORIA DE LA ASTRONOMÍA EN MÉJICO. Fondo de Cultura Económica. I.S.B.N.: 968-16- 5769-1. Tercera edición. Méjico. 1995.
- Historia de la Ciencia 1543 a 2001. GRIBBIN, John. (2005). Editorial Crítica. ISBN: 84-8432-607-1. Barcelona.
- Historia del Tiempo. HAWKING, Stephen. Editorial Crítica. Bogotá. 1988. Historia Universal. El Tiempo. I.S.B.N.: 958-95674-7-9. Colombia.
- Horizontes Cósmicos. WAGONER, ROBERT V. y GOLDSMITH, DONAL W. Ed. Labor. 1985.
- [Implicaciones Cosmológicas del Colapso Gravitacional en Teorías de Gravedad Modificada f\(R\)](#) Peralta González, César Daniel (2014). Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia.
- [Inflación y recalentamiento en un modelo inflacionario gobernado por el campo de Higgs del Modelo Estándar Electrodébil](#). Romero Castellanos, Ana Rubiela (2014) Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia.
- [Influencia del efecto Hall en la evolución de campos magnéticos y equilibrios en la corteza de estrellas de neutrones](#). Ramírez Ramírez, Sebastián (2017). Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia.
- [Institucionalidad en el Paisaje Cultural Cafetero PCC](#). Duque Escobar, Gonzalo (2012) In: Taller Estudios del Paisaje, Manizales.



# Bibliografía 5

- Instrumentación y Observaciones en Astrofísica de Altas Energías: el Cielo en Rayos X y Gamma. Jorge Mejía Cabeza. INPE. IV Simposio de Astronomía 11 a 16 octubre 2004.
- [Intensa formación estelar en núcleos activos de galaxias, trazada por emisión de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos y análisis del toroide como región en donde toma lugar esta actividad estelar](#) / Higuera Garzón, Mario Armando (2011) Doctorado thesis, Universidad Nacional de Colombia.
- Introducción a la Astronomía. BRIEVA BUSTILLO, EDUARDO. Empresa Editorial Universidad Nacional de Colombia. 1985.
- Introducción a la Ciencia. ASIMOV, Isaac. Plaza & Janes Editores. 1973.
- [Introducción a la Física de Partículas: El Modelo Estándar](#). Luis Roberto Flores Castillo. 2016. Chinese University of Hong Kong. Program CERN
- [Isaac Newton: ciencia y religión en la unidad de su pensamiento](#). Por: John Henry (2007). Universidad de Edimburgo.
- Izquierda y Derecha en el Cosmos. Martin Gardner. Biblioteca Científica Salvat 1986.
- [José María González Benito \(1843-1903\)](#). Tomado de: Guía Astronómica: La astronomía en Colombia: perfil histórico. Fragmento Parte 3.
- [Julio Garavito Armero \(1865-1920\)](#) Duque Escobar, Gonzalo (2007) Tomado de: Guía Astronómica: La astronomía en Colombia: perfil histórico. Fragmento Parte 4.
- [Juno auscultaría en Júpiter origen del Sistema Solar](#). Duque Escobar, Gonzalo (2016). Observatorio Astronómico de Manizales OAM, Manizales, Colombia.
- [Kamerlingh Onnes, la superconductividad, la superfluidez y el universo de las bajas temperaturas](#). Justo R. Pérez (2000) In: La Ciencia en el Siglo XX. Universidad de La Laguna. 38205 La Laguna. Tenerife. España.
- [La astronomía de posición y tiempo](#). Perilla Triana, Wilson Yesid (2012):. Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia.
- [La astronomía en América Precolombina](#). David Fernando Arbeláez Duque. Contexto de Astronomía OAM. U.N. de Colombia.
- [La astronomía en Colombia: perfil histórico](#). Duque Escobar, Gonzalo (2011) In: Curso de Contexto en Astronomía. U.N. de Colombia.
- La astronomía en el país: hacia un despertar esperanzador. PORTILLA BARBOSA, José Gregorio En: Colombia. 1999. Muy Interesante. ISSN: 0122-3577 p.19 - 19 v.164.
- [La Astronomía en la apuesta de Medellín por la Ciencia](#). Gonzalo Duque-Escobar (2009) Circular RAC 504. Colombia.
- [La circunferencia en la observación del cielo](#). Ramírez Torres, Jaime (2012) Maestría thesis, U. Nacional de Colombia.
- [La constante cosmológica: ¿el gran error de Einstein?](#) Juan Manuel Tejeiro Sarmiento (2006) UN Periódico.
- La construcción de la era atómica. Alwyn Mckay. Biblioteca Científica Salvat 1986.
- La creación. Peter W. Atkins. Biblioteca Científica Salvat 1986.
- La Cuarta Dimensión. Rudy Rucker. Biblioteca Científica Salvat 1986.
- [La Distancia a M100 determinada por las estrellas Variables Cefeidas](#). Programa de Ejercicios de Astronomía de ESA/ESO.
- La evolución de la física. Albert Einstein y Leopold Infeld. Biblioteca Científica Salvat 1986.
- La Exploración del espacio. NICOLSON, IAN. Biblioteca Juvenil Bruguera. 1980.
- La Frontera del Infinito. Paul Davies. Biblioteca Científica Salvat 1986.
- [La Luna](#). DUQUE ESCOBAR, Gonzalo. (2009) Observatorio Astronómico de Manizales OAM. U. N. de Colombia.. La creación. Peter W. Atkins. Biblioteca Científica Salvat 1986.
- La radiactividad artificial. P. Radvanyi/M. bordry. Biblioteca Científica Salvat 1986.
- [La región de líneas coronales en galaxias seyfert 1 y seyfert 2](#). Portilla B., José Gregorio (2011). Doctorado thesis, Universidad Nacional de Colombia.
- [La revolución nanotecnológica](#). Duque-Escobar, Gonzalo 82020. U.N. de Colombia.



# Bibliografía 6

- La rotación de la Tierra en la Edad Media. GONZÁLEZ, Vilbazo Kay E. Nicolás de Oresme. Revista Universo. Número 42. Página 30 a 35. Barcelona, ISSN: 1135-2876. Octubre de 1998.
- [La Teoría de la Relatividad](#). Armando Martínez Téllez, (2009).
- [Las Cuatro Estaciones para reflexionar sobre cambio climático](#). Duque Escobar, Gonzalo (2011) Introito para el II Festival de Música Sacra. Interpretación Orquesta Sinfónica de Caldas y Agrupaciones Corales de Manizales. Centro de Convenciones Teatro los Fundadores
- Las Flechas del Tiempo. Richard Morris. Biblioteca Científica Salvat 1986.
- [Lentes gravitacionales de Janis-Newman-Winicour / Gravitational lenses of Janis-Newman-Winicour](#). Chaparro Orozco, Gustavo (2010), Universidad Nacional de Colombia.
- [Leyes de Kepler](#). Por Enzo De Bernardini · Astronomía Sur.
- Library. The Hebrew University of Jerusalem, Israel. Alianza Editorial, S.A. Madrid.
- Los Albores de la Ciencia. GOLDSTEIN, Thomas. Fondo Educativo Interamericano.. México. 1984.
- [Los albores de la civilización](#). Duque Escobar, Gonzalo (2009) In: I Encuentro Internacional de Culturas Andinas, 20 Agosto de 2009, Pasto.
- [Los cuerpos celestes, una aproximación a los lineamientos de astronomía como asignatura](#). Rodríguez Vega, Germán Hernando (2012) Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia.
- [Los seis eclipses del 2020](#). Gonzalo Duque-Escobar. (2020) Observatorio Astronómico de Manizales OAM.
- Los Sonámbulos. I y II. Arthur Koestler. Biblioteca Científica Salvat 1986.
- Luz del Confín del Universo. Rudolf Kippenhahn. Biblioteca Científica Salvat 1986.
- [Manual de Geología para Ingenieros](#). Duque-Escobar, Gonzalo. Universidad Nacional de Colombia 2019.
- [Más allá de las profecías Mayas](#). Duque Escobar, Gonzalo (2011) Circular Red Colombiana de Astronomía RAC (609).
- [Materia y energía oscuras, ¿que son?](#) G.A. Caldera-Cabral y L.A. Urena-López. Instituto de Física, U. de Guanajuato, México,
- [Mecánica estadística de la termodinámica de black shells](#). Rojas Castillo, Wilson Alexander (2018) Doctorado thesis, Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá.
- Mitología germánica ilustrada. BRANSTON, Brian. Título original Gods of the North Vergara Editorial. Barcelona. 1960.
- [Modelamiento de variaciones magnéticas en la superficie solar y su asociación a fuentes sísmicas generadas por flares](#). Alvarado Gómez, Julián David (2012) Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia.
- [Modelo académico administrativo para el Planetario de Manizales](#). Torres Arango, Claudia (2002) Pregrado Thesis, Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales.
- [Modelos Cosmológicos en Teorías de Gravedad Modificada f\(R\) / Cosmological Models in Modified f\(R\) Gravity Theories](#). Guarnizo Trilleras, Alejandro (2011) Maestría thesis, U. Nacional de Colombia.
- Monografía: Panorama de la astronomía moderna. ERNUSCHI, Félix, CODINA, Sayd. Secretaría General de los Estados Americanos. Tercera edición. Washington D.C. 1976.



# Bibliografía 7

- Newton I y II. Gale E. Christianson. Trad. Domingo Santos. Salvat Editores. Barcelona 1987.
- [Newton](#). Duque Escobar, Gonzalo (2020) Manizales, Caldas, Colombia.
- [NOTICIERO SIDERAL. GALILEO GALILEI](#). Edición Conmemorativa del IV Centenario de la publicación de Sidereus Nuncius. Traducción del latín, a partir de la edición de Venecia 1610: Ramón Núñez Centella y José Manuel Sánchez Ron. MUNCYT. La Coruña y Madrid, 2010.
- Nueva Astronomía Recreativa. KOMAROV, V. Editorial MIR. Moscú. 1985. Observar el cielo. LEVY, David H. Editorial Planeta. Barcelona. 1995.
- Obras completas de Francisco José de Caldas, R.I. de la Universidad Nacional de Colombia (1966) Bogotá, <http://www.bdigital.unal.edu.co/79/>
- [Observatorio Astronómico Nacional. Ciencia y Memoria para la Sociedad](#). Badawi, Halim and Roa Triana, Julian and Torres Carreño, Guillermo Andrés and Cortés, Diego and Castell, Edmon (2008) [Exhibición - Show/Exhibition]
- On the Magnetic Field Variations and HXR Emission of the First X-class Flare in the 24th Solar Cycle. Benjamin Calvo M (2011). Bulletin Of The American Astronomical Society.
- [ÓRBITAS EN EL SISTEMA SOLAR: Leyes de Kepler, Cónicas, Movimiento orbital](#). Ana Inés Gómez de Castro. In: Introducción a la astronomía. Taller de Astronomía. Fac. de Ciencias Matemáticas. Universidad Complutense de Madrid.
- [Origen y evolución del concepto de Universo](#). Marín Beltrán, Jorge Humberto (2012) Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia.
- [Otra prueba de la TGR: el agujero negro en M87](#). Duque Escobar, Gonzalo (2019) [Objeto de aprendizaje - Teaching Resource]
- Otros mundos. Paul Davies. Biblioteca Científica Salvat 1986.
- [Parámetros de anisotropía en teoría f\(R\)](#). Sierra Moreno, Juan Sebastián (2016) Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá.
- [Perfil de masa de Abell 370 a partir de sus propiedades como Lente Gravitacional](#). Hurtado Mojica, Roger Anderson (2013) Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia.
- [Perturbaciones cosmológicas en teorías de gravedad escalar-tensor](#). Velásquez Celis, Joel José (2018) Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia - Sede Planetas. ATTANER LÓPEZ, Eduardo. El libro de bolsillo Alianza Editorial. I.S.B.N.: 84-206-0543-3. Madrid. 1991.
- Planetas del Sistema Solar. MÁROV, M. Editorial Mir Moscú. URSS. 1985.
- Practical Astronomy. FATH, EDWARD ARTHUR. Astronomical Series. Mac Graw-Hill. 1932 - 1948.
- [Primer alunizaje en la cara oculta de la Luna](#). Duque Escobar, Gonzalo (2019) Documentación. U.N de Colombia.
- Principios de relatividad general. TEJEIRO SARMIENTO, Juan Manuel (2005), Ed: Unibiblos. Colombia.
- [Problema "ALEPH": planteamiento y solución a un problema topográfico](#). Duque Escobar, Gonzalo (1984). Documento U.N. Manizales, Caldas, Colombia.
- [Problema de los dos cuerpos extendidos en Relatividad General bajo la Aproximación Post-Newtoniana](#). Almonacid Guerrero, William Alexander (2013).. Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia.
- Problemas y ejercicios prácticos de Astronomía. VORONTSOV-VELIAMINOV, B. A. Editorial MIR. Moscú. 1979.
- [Procesos para una Astronomía que le aporte a Colombia](#). Duque Escobar, Gonzalo (2011) Circular de le Red de Astronomía de Colombia RAC (621).
- [Producción de ondas Langmuir en los procesos de interacción fotosfera-cromosfera solar](#). Jiménez Martínez, Fabián Steven (2017) Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá.
- [Propiedades métricas de sistemas rotantes relativistas con simetría axial](#). Torres Suárez, Sergio Andrés (2016). Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá.



# Bibliografía 8

- [Propuesta didáctica para la enseñanza de fenómenos de movimiento en el sistema sol- tierra – luna](#). González Valcárcel, Adriana Paola (2012). Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia.
- [Propuesta didáctica para la enseñanza de la astronomía general en la escuela](#). Baquero Soler, Alvaro (2019). Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá.
- [Propuesta didáctica para la medición de la masa de un agujero negro utilizando imágenes astronómicas y la tercera ley de Kepler](#). Guerrero Peñuela, Germán (2014) Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia.
- Química I. MARTINEZ, Juan de Dios. PIME Editores. Bogotá. 1987.
- [Relatividad de Galileo](#). FERNÁNDEZ, Hugo. Curso de Relatividad Especial UTN de Argentina
- [Relatividad Especial y General](#). GERBER, Willy H. (2005) Instituto de Física. Universidad Austral de Chile. In: Asociación de Astronomía y Astronáutica. Relatividad para niños. El Adelantado de Indiana, Diciembre 2007, nº 7,
- Relatividad para niños. CORRALES RODRIGÁÑEZ, Capi. El Adelantado de Indiana, Diciembre 2007, nº 7, [www.eladelantadodeindiana.co.nr](http://www.eladelantadodeindiana.co.nr)
- [Relativity the special and general theory by Albert Einstein](#). Translated by Robert W. Lawson, D.Sc. F. Inst. P. University of Sheffield. Reston James. Galileo. Ediciones B, S. A. Barcelona. 1996.
- Saturno, tormentas ecuatoriales. SÁNCHEZ LAVEGA, Agustín. En Revista Universo, Astronomía y Astronáutica. No. 30, octubre 1997. Barcelona.
- Secretos del Cosmos. ROMAN, Carlos A. Biblioteca Básica Salvat. 1969.
- [Semblanza del Padre Adolfo Hoyos Ocampo](#). José Germán Hoyos (2008). Academia Caldense de Historia. Manizales.
- [Semillero de astronomía: un acercamiento a la ciencia y la investigación en la I.E Yermo y Parres de la ciudad de Medellín](#). Giraldo Cano, Ana María (2014) Documento de trabajo. Sin Definir, Medellín.
- [Siete lustros de la Sociedad Julio Gravitó](#). Duque Escobar, Gonzalo (2011). Circular RAC (612). Colombia.
- [Significado de un bisiesto y balance del 2016](#). Duque Escobar, Gonzalo (2017) La Patria, Manizales, Colombia.
- [Simulación de colisión de dos galaxias para estudiar la formación de las galaxias enanas esferoidales satélites de la Vía Láctea](#). Bohórquez Pacheco, Omar Alfonso (2016) Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá.
- [Simulaciones numéricas de n-cuerpos de la formación de la galaxia enana sagitario y sus corrientes de marea a partir de un progenitor con forma de disco estelar](#). Camargo Camargo, Yeimy Dallana (2015) Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá.
- [Sinergia y pertinencia en las ciencias básicas](#). Duque Escobar, Gonzalo (2011) Circular RAC 599, Colombia.
- [Sobre la nueva Ley de Ciencia, Tecnología e Innovación](#). Duque Escobar, Gonzalo (Abril 2009) Ed. Circular RAC 510.
- Sobre la teoría especial de la relatividad. TEJEIRO SARMIENTO, Juan Manuel (2005). Ed: Panamericana, Bogotá.
- [Sobre la teoría especial y general de la relatividad](#). EINSTEIN, Albert. The Albert Einstein Archives, Trad: Miguel Paredes Larrucea. The Jewish National & University.
- [Sol, clima y calentamiento global](#). DUQUE ESCOBAR, Gonzalo. (2014) La Patria.
- [Sol, lunas y planetas](#). Claudia Torres Arango. Contexto de Astronomía del OAM. U.N. de Colombia, Sede Manizales.
- Sol, Lunas y Planetas. KEPLER, ERHARD. Biblioteca Científica Salvat. 1986.
- [Sondas a planetas mayores del Sistema Solar](#). Claudia Torres Arango (2017). Observatorio Astronómico de Manizales – OAM.



# Bibliografía 9

- [Stephen Hawking](#). Duque Escobar, Gonzalo (2009) In: Año Internacional de la Astronomía IYA 2009, OAM. Manizales.
- Super-Fuerza. Paul Davis. Fuerza. Biblioteca Científica Salvat 1986.
- [Taller de Astronomía](#). DUQUE ESCOBAR, Gonzalo. (1988) Multitaller de Ciencia y Tecnología. U. N. de Colombia.
- [Teoría de perturbaciones cosmológicas en la era de radiación](#). Vija Suarez, Oscar Javier (2017). Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá.
- [Teoría de perturbaciones cosmológicas en teorías de gravedad modificada f\(R\)](#). Molano Moreno, Daniel Alejandro (2015) Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia-Bogotá.
- Teoría del Todo. BARROW, Jhon D. Biblioteca de Bolsillo Editorial Crítica. 2004. [Termodinámica de Agujeros Negros de Kerr en la Aproximación Euclidiana de Gibbons-Hawking](#). Serna Bedoya, Juan Camilo (2016) Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá.
- [The Life of Albert Einstein](#). HOFREITER, Liz. ETE 100 03. Bradley University. August 29, 2005
- [Thermo Field Dynamics, Boulware and Hartle-Hawking States](#). Muñoz Arboleda, Diego Felipe (2017) Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá.
- [TIMEO](#). Edición de Patricio de Azcárate. In Platón, Obras completas, Tomo 6, Madrid 1872.
- Trad. Eduardo Manuel Álvarez. Contemporary Laboratory Experiences in Astronomy.
- [Tránsito de Mercurio](#). DUQUE ESCOBAR, Gonzalo (2016) [Teaching Resource] U. N. de Colombia, Sede Manizales.
- [Tránsito de Venus del 8/06/2004](#). Duque Escobar, Gonzalo (2004) Documento de trabajo. Red de Astronomía de Colombia RAC, Manizales, Caldas, Colombia.
- [Tránsitos Planetarios. Cálculo distancia Tierra-Sol a partir de imágenes de tránsitos planetas interiores \(Venus o Mercurio\)](#). Miguel Ángel Pío Jiménez; Juan Carlos Casado; Miquel Serra-Ricart; Lorrain Halon; y Luciano Nicastro. ACTIVIDAD 8. Instituto de Astrofísica de Canarias y FECYT; España.
- [Trayectoria de partículas cerca de un agujero negro cargado inspirado en geometría no-conmutativa](#). Calderón Sánchez, Kenyi Javier (2013) Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- [Tycho Brahe](#). José Maza Sancho (2016). Curso EH2801. Departamento de Astronomía. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. UNIVERSIDAD DE CHILE.
- [UMBRA: la Ecorregión Cafetera en los Mundos de Samoga](#). DUQUE ESCOBAR, Gonzalo Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales.
- [Un modelo relativista para sistemas satelitales de navegación global](#). Toledo Cortés, Santiago (2015) Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá.
- Un modelo solar multi-politrópico de exponente radialmente variable. CALVO M, Benjamín (2010). Revista Colombiana de Física ISSN: 0120-2650 Ed: Revista De La Sociedad Colombiana de Física. Colombia.
- [Un único esquema de explicación para las Ciencias Empíricas?](#) Carolina García Sánchez (2016). Disertaciones (5) 2, 28- 38. Fundación Dialnet. Universidad de La Rioja.
- Un universo infinito. BRIX, James. Revista Universo. No. 37, mayo 1998. Página 36 a 41. España. 1998.
- [Una transición de la geometría a la trigonometría, utilizando problemas históricos de la astronomía](#). Caballero Soler, Oscar Orlando (2013) Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia.
- [Understanding Variable Stars](#). John R. Percy. University of Toronto, Toronto, Ontario, Canada 2007.
- Viaje a través del Universo. Ediciones Folio, Time-Life. Tomos 3, 4, 35, 36. Barcelona. 1996. Vida en otros mundos. PUERTA RESTREPO, Germán. Editorial Planeta.
- [Vuelo interplanetario: una manera de implementar la astronomía en la educación](#). Orjuela León, Natalia del Pilar (2012) Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia.
- [What is the experimental basis of Special Relativity?](#). Tom Roberts and Siegmund Schleich (2007).