

# INTRODUCCIÓN A LA ASTROFÍSICA



*Imágenes extraídas de Wikimedia, bajo licencia Creative Commons  
Textos, Gráficos 2D y Tablas: Jon Álvarez*

# **INTRODUCCIÓN A LA ASTROFÍSICA - ÍNDICE**

## **1- INTRODUCCIÓN**

## **2- UN POCO DE HISTORIA**

## **3- TEORÍAS FÍSICAS IMPLICADAS**

- 31: Teoría del campo gravitacional**
- 31: Teoría del campo electromagnético**
- 32: Teoría de la Mecánica Cuántica**
- 33: Teoría de la Relatividad**

## **4- FENÓMENOS Y SU MEDICIÓN**

### **41- ESPACIO Y TIEMPO.**

### **42- EL MOVIMIENTO DE LOS ASTROS.**

- Traslación
- Rotación
- Precesión
- Nutación
- Bamboleo
- Velocidad orbital
- Velocidad angular
- Período orbital

### **43- MASA Y GRAVEDAD**

- Unidad astronómica de masa
- Masa reducida
- Parámetro gravitacional
- Bamboleo del centro de masas
- Dilatación del espacio-tiempo
- Ondas gravitacionales
- Límites de masas
- Fuerzas de marea

### **44- CAMPO MAGNÉTICO.**

### **45- LA LUZ.**

- Espectros
- Fotometría

## **5- ESTRELLAS**

### **51- CLASIFICACIÓN ESTELAR**

### **52- CASOS ESPECIALES**

- Estrellas binarias visuales
- Estrellas dobles fotométricas
- Estrellas dobles espectroscópicas
- Enanas blancas
- Estrellas masivas
- Estrellas de neutrones
- Púlsares
- Enanas marrones
- Estrellas variables
- Estrellas T-Tauri
- Agujeros negros

## **6- GALAXIAS**

### **61- CLASIFICACIÓN DE LAS GALAXIAS**

- Elípticas
- Espirales
- Lenticulares
- Irregulares
- Peculiares

### **62- MATERIA OSCURA**

### **63- GALAXIAS ACTIVAS**

### **64- LA VÍA LÁCTEA**

### **65- COLISIONES ESTELARES**

### **66- EL NACIMIENTO DE LAS ESTRELLAS**

### **67- EL CAMPO MAGNÉTICO**

## **7- COSMOLOGÍA.**

### **71- MODELO COSMOLÓGICO ACTUAL**

### **72- ACTUALIDAD COSMOLÓGICA**

## 1- INTRODUCCIÓN

La Astrofísica es la ciencia que estudia los astros, desde el punto de vista de la física. Por tanto, está ligada a la Astronomía (estudio visual de los astros) y a la Física (estudio de las leyes del Universo). Podemos decir que es una rama específica de la física, cuyas leyes, fórmulas y magnitudes, se emplean para describir las propiedades y el comportamiento de los cuerpos estelares.

Históricamente, la astrofísica era independiente de la astronomía, si bien, ambas ciencias se fundieron en una sola cuando famosos matemáticos y físicos descubrieron la forma de relacionar ambas disciplinas, de forma que hoy en día es inconcebible estudiar con rigor las estrellas o las galaxias sin el apoyo de las leyes físicas que las gobiernan. Junto a la astrofísica y la astronomía, discurre paralelamente la cosmología, que es el estudio completo del origen o la historia del Universo en su conjunto, de forma que ninguna de estas tres ciencias tiene sentido sin las demás.

## 2- UN POCO DE HISTORIA

Los registros históricos más antiguos de los que se tiene constancia acerca del interés del ser humano en estudiar los astros, datan incluso del neolítico, cuando se estudiaba la configuración del firmamento y las estrellas, en ocasiones con fines exclusivamente religiosos, como se puede comprobar en los monumentos de Stonehenge, el disco de Nebra, o las pirámides precolombinas. En todos los casos, ya quedaba patente el interés del ser humano por descubrir los secretos de las estrellas, sus posiciones y movimientos.



Destacaron también otros grandes filósofos de la antigüedad, como Aristóteles, con su teoría geocéntrica, Erastotenes, con el diseño de uno de los primeros astrolabios (la esfera armilar) y multitud de eruditos de todos los continentes.

No fue hasta la edad media que los filósofos comenzaron a mezclar las simples observaciones, con estudios geométricos más precisos, destacando sabios de la talla de Nicolás Copérnico, Galileo, Kepler, etc., si bien, ninguno de ellos contaba aún con los necesarios conocimientos físicos para, no sólo describir lo que veían, sino comprenderlo, predecirlo y analizarlo, lo que empezó a suceder cuando el gran Isaac Newton escribió sus "principios matemáticos de filosofía natural" y postuló las Leyes de la gravitación Universal, estableciendo las bases de la mecánica clásica.

A principios del S. XIX, las leyes de Newton pudieron ser complementadas con los primeros estudios del comportamiento de la luz, cuando J. von Fraunhofer analizó el espectro de la luz solar, descubriendo que ciertas características de los astros pueden ser analizadas y estudiadas bajo el amparo de las propiedades del espectro, momento en el que nace la astrofísica moderna.

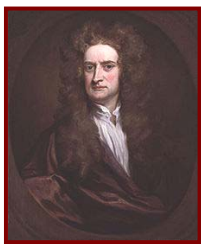


### 3- TEORÍAS FÍSICAS IMPLICADAS

Ya que la astrofísica discurre irremisiblemente paralela a los avances de la física y las matemáticas, sus fundamentos también se adaptan a los nuevos descubrimientos y teorías físicas, en orden cronológico a dichos avances. Así, el universo de los astros ha sido explicado al menos de cuatro maneras diferentes con el transcurso de los años, de acuerdo a las siguientes teorías:

- 1- La teoría de la mecánica clásica y el campo gravitacional, bajo los estudios de Newton
- 2- La teoría del campo electromagnético, tras los descubrimientos de Maxwell
- 3- La teoría de la mecánica cuántica, introducida por Max Planck
- 4- La teoría de la relatividad general, postulada por Albert Einstein

#### 31: Teoría del campo gravitacional



Los primeros estudios científicos sobre las propiedades de los astros, se basan en los conocimientos que introdujeron Isaac Newton y otros científicos de la época. Según dichos estudios, los astros obedecían a las Leyes postuladas por el matemático inglés, de acuerdo a las características de los campos gravitacionales, cuya interacción con otras fuerzas y fenómenos determinaban el movimiento y la física de los cuerpos celestes. La primera consecuencia podría ser la de considerar los movimientos de un sistema solar como si de un "sistema inercial" se tratara, donde las fuerzas cumplen las leyes de Newton. No obstante fue Johannes Kepler quien, basado en las observaciones del danés Tycho Brahe, formuló las primeras leyes del movimiento de los astros.

Estas Leyes convencieron a Newton de que, de alguna manera, los astros ejercían sobre los demás cuerpos, algún tipo de fuerza de atracción y que dicha fuerza influía en el movimiento de los mismos, tras lo que conformó finalmente su teoría del campo gravitatorio, hallando la fórmula que deduce la fuerza de atracción entre dos astros, dependiendo de sus masas, la distancia que las separa y una constante gravitacional calculada posteriormente por Henry Cavendish

The diagram shows two circles representing masses. The larger circle on the left is orange and labeled 'M'. The smaller circle on the right is blue and labeled 'm'. A double-headed arrow between them is labeled 'r'. Below the circles, the formula for gravitational force is given as  $F = G \frac{M \times m}{r^2}$ .

El hallazgo de esta función, permitió confirmar las leyes de Kepler y extrapolar lo observado al resto de los planetas hasta entonces conocidos.

### 31: Teoría del campo electromagnético

A pesar de su genialidad, la teoría gravitacional de Newton parecía dejar sin explicación algunos fenómenos astrofísicos bien observados. A comienzos del S.XIX ya se formulaban teorías más o menos originales sobre la naturaleza de ciertos fenómenos físicos como la luz, la electricidad o el magnetismo. Sin poder evitarlo, dichos descubrimientos acabaron afectando a la astrofísica cuando J.C. Maxwell unificó dichos avances en su teoría del campo electromagnético, al percatarse de que todos esos fenómenos guardaban relación entre sí.



Los avances de Maxwell permitieron ahondar en la astrofísica, al aplicar en dicha ciencia las propiedades de las ondas, la luz, etc, de forma que las propiedades de los astros ya no dependían tan sólo de fuerzas reales o ficticias estudiadas por Newton, como la propia gravedad, la inercia, el momento angular, etc, sino que ahora debían tenerse en cuenta los fenómenos electromagnéticos. Y efectivamente, fue Maxwell quien se percató de la relación existente entre la fuerza de la gravedad, la fuerza de atracción magnética y la propia luz, al comprobar, en primer lugar, la similitud entre sus respectivas fórmulas y finalmente, el sorprendente resultado de dividir la constante gravitacional entre la constante magnética, cuyo resultado era otra constante elevada al cuadrado: la propia velocidad de la luz.

De esta manera, la ciencia de la astrofísica ya no se basaba casi exclusivamente en las propiedades de la gravedad, como en tiempos de Newton, sino que ahora debía tenerse en cuenta también la repercusión de los fenómenos electromagnéticos.

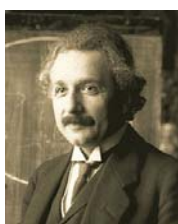
### 32: Teoría de la Mecánica Cuántica



Las "normas" de la mecánica clásica de Newton y las recién incorporadas de Maxwell, a pesar de su genialidad, no pudieron durante mucho tiempo, explicar diversos fenómenos observados con los nuevos instrumentos de medición empírica, como por ejemplo, las resultantes de calcular la radiación térmica de ciertos objetos. Fue el físico alemán Max Planck quien resolvió muchos de dichos cálculos utilizando "trucos matemáticos" que, a la postre, supondrían el nacimiento de una nueva teoría física: la mecánica cuántica.

Nuevamente, el universo astrofísico tuvo que adaptarse a los recientes descubrimientos que descifraban el comportamiento de la materia y la energía, desde la óptica de la mecánica cuántica.

### 33: Teoría de la relatividad



Finalmente, la mecánica cuántica dio paso, de manera irremisible, a los nuevos ajustes propuestos por el genio alemán Albert Einstein, cuando dedujo nuevos e inquietantes fenómenos que implicaban tanto a la materia, como al espacio y el tiempo. Aún hoy en día, gran parte de sus teorías se están terminando de demostrar, mediante avanzados experimentos.

## 4- FENÓMENOS Y SU MEDICIÓN

### 41- Espacio y tiempo

En astrofísica, la medición del espacio y el tiempo resulta primordial como base de referencia para hacer cálculos de importancia. De hecho, ambas magnitudes están estrechamente ligadas desde la implantación del "año luz", como dimensión espacial. En 1976 se determinó un sistema internacional de constantes astronómicas (IAU) como marco de referencia común. Estas son algunas magnitudes de uso común en astrofísica:

MEDICION	MAGNITUD	DEFINICIÓN	Abrev.	VALOR
TIEMPO	SEGUNDO	Duración basada en cierto tiempo atómico	s	1 s
	DÍA	duración media de un día terrestre	D	86.400 s.
DISTANCIA	UNIDAD ASTRONÓMICA	Distancia media de la Tierra al Sol	UA	149.597.870 km
	AÑO LUZ	Distancia que recorre la luz en un año terrestre	ly	$9,46728 \times 10^{12}$ km
	PARSEC	Distancia en la que el paralaje de un astro ocupa 1 segundo de arco	pc	3,2616 ly

La ciencia que estudia la ubicación de los astros en el firmamento y todo lo relacionado con distancias y posiciones, se denomina Astronomía de posición o Astrometría. En astronomía moderna, una vez resueltos los problemas que en la antigüedad planteaban los "tamaños", el dato más interesante es el de la distancia existente entre los cuerpos astrales.

Para calcular distancias, se utiliza entre otros sistemas, el paralaje, técnica de geometría aplicada que consiste en calcular proporciones partiendo de distancias ya conocidas, similar a una triangulación. Se aprovecha la diferencia de posición del observador en la Tierra a lo largo de medio año, consiguiendo así dos puntos de vista situados a 2 UA de distancia, desde los cuales se pueden observar dos posiciones subjetivas de un objeto lejano, lo que nos permitirá finalmente calcular distancias aproximadas (Ver Gráficos 1 y 2).

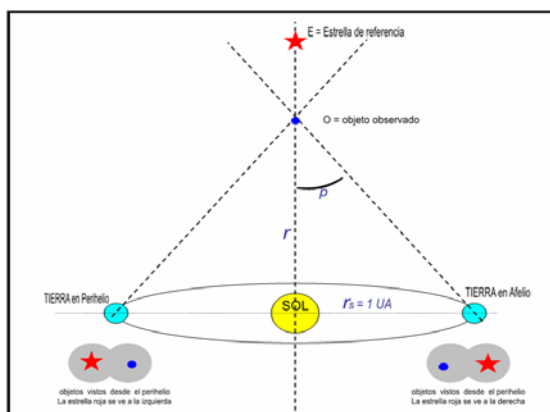


Gráfico 01

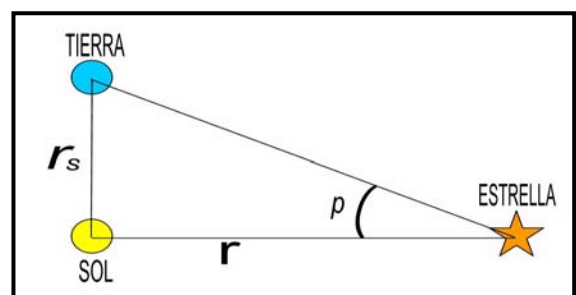


Gráfico 02

Para la triangulación (ver Gráfico 2) se utiliza el ángulo Tierra/Estrella/Sol, llamado "paralaje" (" $p$ "), siendo " $r_s$ " la distancia Sol/Tierra y " $r$ ", la distancia a calcular. Dado que " $r_s$ " es mucho menor que " $r$ ", el ángulo " $p$ " (en radianes) es muy pequeño, por lo que su tangente es casi igual a él, con lo que la fórmula es similar a  $p = r_s/r$  donde conocemos que " $r_s$ " es 1 UA. Este método permite calcular distancias inferiores a 100 parsecs.

Para calcular distancias mayores, también puede usarse el método de las "cefeidas", estrellas muy brillantes cuyos períodos de oscilación de sus radios son bien conocidos, así como la relación que guardan entre su período, color y su luminosidad, aplicándose la fórmula:

$$M_v = C_1 + C_2 \lg P + C_3 (B-V)$$

Siendo  $M_v$  = luminosidad absoluta en "v",  $P$  = período y  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$ , constantes conocidas.

Finalmente, otros métodos utilizados son "la relación Tully-Fisher", que correlaciona la luminosidad absoluta con la anchura en 21 cm del espectro de radio de una galaxia espiral, bajo la fórmula  $M = C_1 \lg (W/\sin i) + C_2$ , así como la Ley de Hubble, que calcula la distancia relacionándola con la velocidad a la que se aleja una galaxia.

## 42- El movimiento de los Astros

El movimiento de los astros está determinado fundamentalmente por el efecto de la gravedad y la inercia, ambos descritos en la mecánica clásica.

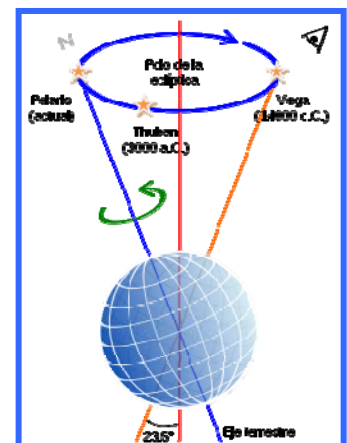
- La inercia resulta más patente en el espacio que en la propia Tierra, por la ausencia casi total de rozamiento y atmósferas (los cuerpos astrales no están inmersos en un flujo con propiedades de viscosidad que deban tenerse en cuenta).
- La gravedad ejerce su influencia a una distancia casi infinita.

De esta forma, caben destacar los siguientes conceptos:

**TRASLACIÓN:** Desplazamiento de un astro en la órbita gravitacional de otro. Por ejemplo, la Tierra realiza un movimiento de traslación alrededor del Sol, en una trayectoria elíptica de unos 930 millones de km. Al punto de la elipse donde la Tierra se encuentra más alejada del Sol se le conoce como "afelio", y al más cercano "perihelio".

**ROTACIÓN:** Giro de un cuerpo astral sobre sí mismo. La Tierra gira sobre sí misma en 23 horas, 56 min., 4 s. Si algunas partes del cuerpo giran a diferentes velocidades angulares por ser un objeto poco sólido, como una estrella, discos de polvo, planetas gaseosos, etc, su rotación resulta del tipo "Rotación Diferencial". Cuando el período de rotación coincide con el de traslación (como ocurre con la Luna alrededor de la Tierra), recibe el nombre de "Rotación Síncrona".

**PRECESIÓN:** Oscilación del eje de rotación de un astro como consecuencia del momento de fuerza del giro sobre sí





mismo. En la Tierra, el período de precesión es algo menor de 26.000 años (período conocido como "año platónico")

**NUTACIÓN:** Oscilación de la altura media de un astro en relación a su plano de traslación, como consecuencia de la precesión. En la Tierra, la nutación media corresponde a una oscilación de unos 9 segundos de arco cada 18,6 años.

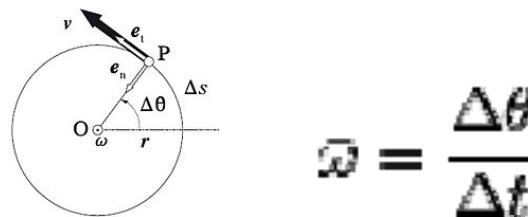
**BAMBOLEO:** Es una ligera oscilación del eje del astro que puede añadir algunos grados de inclinación a la precesión. En la Tierra, dicho bamboleo recibe el nombre de "Bamboleo de Chandler", el cuál añade unos 9 segundos de arco cada 433 días, y cuyas causas reales se desconocen.

Otras magnitudes y efectos relacionados con el movimiento y la velocidad:

**VELOCIDAD ORBITAL ( $v_{orb}$ ):** Velocidad a la que un cuerpo realiza su movimiento de traslación. Si la órbita fuera un círculo, su fórmula sería,

$v_{orb} = \sqrt{\frac{GM}{r}}$	siendo "G" la constante gravitacional, "M", la masa del objeto atrayente (el Sol) y "r" el radio de la órbita
---------------------------------	---

**VELOCIDAD ANGULAR ( $\omega$ ):** Velocidad a la que rota un cuerpo sobre sí mismo, medido en ángulos por unidad de tiempo.



**PERÍODO ORBITAL:** Tiempo que tarda un cuerpo en recorrer la órbita alrededor de otro.

### 43- Masa y Gravedad

La masa de las estrellas determina gran parte de las propiedades de las mismas debido a que la gravedad es, tal vez, la fuerza más influyente en el Universo. La gravedad interviene en todos los movimientos de los astros, en la luminosidad de las estrellas, en la configuración de estas e incluso, en su propia naturaleza. Por ejemplo, el mecanismo de una estrella consiste en una lucha constante entre la gravedad que la comprime y las reacciones nucleares de su interior que la expanden. Incluso puede que la gravedad sea tan influyente como para curvar o deformar el propio espacio/tiempo, concepto fundamental en la formación del Universo.

Según la teoría de la relatividad de Einstein, la Gravedad no es más que una fuerza ficticia (similar a la fuerza centrífuga), esto es, que tiene la apariencia de ser real porque sus efectos son similares a una fuerza real, pero que en cierto modo sólo es la consecuencia de una "deformación" del espacio-tiempo. Sea como sea, esta

fuerza ficticia puede ser medida con bastante precisión, hasta el punto de determinar con exactitud sus efectos.

He aquí algunos conceptos, magnitudes y propiedades de los astros, que dependen de la masa y la gravedad:

**UNIDAD ASTRONÓMICA DE MASA:** Es una medida de masa proporcional a la Masa del Sol, usada habitualmente para comparar las masas de otras estrellas. Masa del Sol=  $M_0 = 1,98892 \times 10^{30}$  kg.

**MASA REDUCIDA:** Es la relación existente entre las masas de dos astros, equivalente al producto de ambas masas, dividido entre la suma de las dos. Se utiliza para resolver problemas derivados del movimiento de dos cuerpo que orbitan entre sí, simplificando los cálculos como si se tratara de un solo cuerpo que orbita alrededor del baricentro:

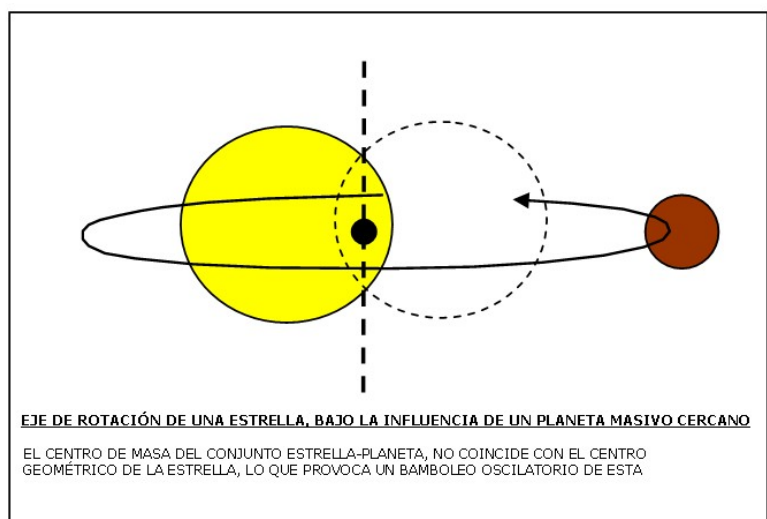
$$M_{red} = \frac{M_1 \times M_2}{M_1 + M_2}$$

**PARÁMETRO GRAVITACIONAL:** Es el producto de la constante gravitacional, por la masa de un objeto. Se utiliza para relacionar el período orbital de un cuerpo y el radio de la órbita, bajo la fórmula simplificada de

$$\text{Parámetro Gravitacional} = P_g = G \times M = 4 \pi^2 r^3 / T^2$$

donde  $G = \text{Cte. Gravitacional}$ ,  $M = \text{Masa}$ ,  $r = \text{Radio Orbital}$ ,  $T = \text{Período Orbital}$

**BAMBOLEO DEL CENTRO DE MASAS:** En 1995 se descubrió por primera vez un planeta extrasolar (Eridani B) midiendo las variaciones en la oscilación de una estrella, debidas a la influencia de una masa cercana que orbita a su alrededor. Cuando, en las inmediaciones de una estrella, orbita algún planeta masivo, la fuerza gravitacional de este influye tanto en su astro, que es capaz de variar el centro de masas del conjunto astro-planeta. Dicha oscilación puede medirse con gran precisión desde la Tierra, hasta calcular la masa del planeta y su distancia a la estrella, aún sin ser visto.



**DILATACIÓN DEL ESPACIO TIEMPO:** Es un efecto teórico postulado por Albert Einstein cuyas consecuencias aún a día de hoy se están experimentando y demostrando. En relatividad general, se calcula que el tiempo propio medido cerca de la superficie de un cuerpo de gran masa difiere del que podría calcularse a cierta distancia, como consecuencia de considerar que la dimensión espacio-temporal se ve deformada por la presencia de una masa grande: Si la gravedad deforma el espacio, también deforma el tiempo. Fue confirmado con una precisión bastante elevada en 1964 mediante el experimento de los físicos Pound y Rebka.

**ONDAS GRAVITACIONALES:** Fenómeno teórico consistente en las oscilaciones ondulatorias del espacio-tiempo, como consecuencia de la influencia de un campo gravitacional. Se supone que la fuerza gravitacional se trasmite a la misma velocidad que la luz (Experimento de O. Laudani), lo que refuerza la hipótesis de que la gravedad se comporta como una onda.

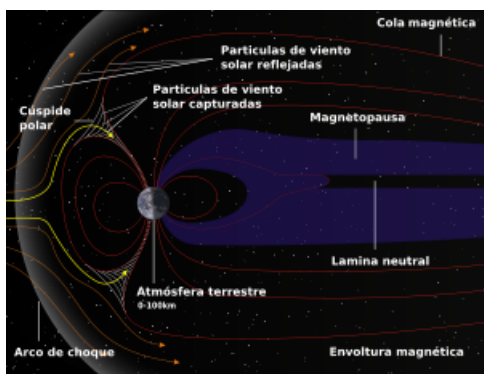
**LÍMITES DE MASAS:** Son medidas de masas de cuerpos celestes que marcan la diferencia entre determinados comportamientos, como por ejemplo, el límite de Chandrasekhar, que determina la masa máxima que puede tener una estrella fría estable, superada la cuál, colapsará para convertirse en una estrella de neutrones o un agujero negro, o el límite de Tolman-Oppenheimer-Volkoff, similar al límite de Chandrasekhar, pero para una estrella enana blanca. Por su parte, el Límite de Roche determina la distancia máxima a la que un cuerpo se debe acercar a otro de mayor masa, para que su fuerza de cohesión gravitacional no sea superada por la fuerza de marea del cuerpo más masivo.

**FUERZAS DE MAREA:** Consecuencia de las variaciones de un campo gravitatorio debidas a diferencias en una órbita. Suelen provocar variación tanto en atmósferas, como en mares (mareas terrestres), e incluso en materia sólida. Con frecuencia se observan cuerpos cuya temperatura interna resulta muy elevada, no por la presencia de un núcleo caliente, sino por efecto de la energía derivada de las fuerzas de marea, como se supone que sucede en Encélado, uno de los satélites de Saturno.



## 44 – Campo Magnético

El Campo Magnético es una región del espacio donde se producen fenómenos magnéticos (fuerzas de atracción-repulsión magnética), estrechamente ligados a cargas eléctricas en movimiento (Leyes de Maxwell). La intensidad de dichos campos, depende fundamentalmente de la cantidad de cargas en movimiento y su velocidad. Gran parte de los cuerpos celestes disponen de un campo magnético más o menos medible (En el sistema solar, se da este fenómeno en el Sol, Mercurio, la Tierra, Júpiter, Saturno, Urano, Neptuno y algunos satélites).



El Campo Magnético es importante para la Astrofísica, porque de su existencia se derivan otros fenómenos de interés. La región próxima a un astro donde actúa la fuerza de un Campo Magnético, se llama Magnetosfera y viene a ser como un escudo protector que puede desviar gran parte de las partículas energéticas que provienen del espacio (viento solar, radiaciones, etc...). También es responsable de las manchas solares, las auroras, e incluso de fenómenos

galácticos menos conocidos como la dinámica y la evolución global de las galaxias. Se supone que es producido por el movimiento diferencial de núcleos con alta concentración de metales ferromagnéticos y/o intensas corrientes convectivas de plasma. Puede, incluso, que no sólo los astros, sino también las galaxias, los cúmulos e incluso el mismo Universo, dispongan de un campo magnético que podría ser determinado por medio del estudio de radiaciones de fondo.

La intensidad de estos campos en una estrella, puede ser medido mediante el efecto Zeeman, por medio de espectropolarímetros.

## 45 – La Luz

La luz es el fenómeno que más información aporta acerca del Universo, por lo que se establece un concepto físico conocido como "Luminosidad" para determinar la intensidad lumínica radiada por un astro, con cuya información se pueden determinar otras magnitudes de interés, como distancia de una estrella, temperatura de superficie, etc. En Astrofísica, interesan sobretodo 3 particularidades de la luz: Luminosidad (L), Flujo (f) e Intensidad (I)

La Luminosidad (L) es la cantidad de energía lumínica radiada por cada segundo y se define el concepto de "Flujo" (q), como la energía radiada por segundo y por centímetro cuadrado de superficie (conociéndose el Radio R del astro), quedando ambos conceptos relacionados con la expresión:

$$L = 4 \pi R^2 q$$

Obviamente, esta es la radiación que sale del astro, cuyo valor es inmensamente superior a la radiación de dicho astro que llega a la Tierra. La parte del flujo que, partiendo del astro, llega a la Tierra, se define como "Flujo en la Tierra" (f), que es la energía radiante que llega a nuestro planeta, por cada centímetro cuadrado y segundo. La relación entre ambos flujos, de acuerdo a la distancia entre el astro y la Tierra (r), guarda la siguiente proporción:

$$R^2 q = r^2 f$$

Y finalmente, en el caso de emisiones de luz no puntuales, resulta de interés el concepto de "Intensidad" (I), que es la energía radiante emitida por una región del astro, que puede ser observada desde la Tierra con un ángulo sólido de un segundo de arco al cuadrado, que se recibe en un centímetro cuadrado y en un segundo. Sumando la luz de todo lo observable, se obtiene el flujo total "f" que llega a la Tierra, bajo la relación

$$f = \int_s I dS$$

## **ESPECTROS**

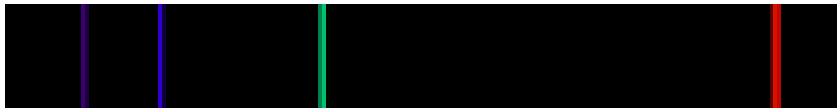
El análisis del espectro de la luz (espectroscopía) dio sus primeros pasos con Isaac Newton, William Wollaston, Fraunhofer y otros científicos. Partió con el descubrimiento de un fenómeno físico muy curioso: cuando la luz incidía sobre un prisma, su color blanco se descomponía en bandas bien definidas de múltiples colores (como el arco iris). Observando dichas bandas de colores con un microscopio, podían apreciarse de manera intercalada, varias líneas oscuras (líneas espectrales). Curiosamente, la disposición de dichas líneas oscuras dependía siempre del material del que estaba compuesta la fuente emisora de luz, o de su

temperatura, de forma que si la luz observada, provenía por ejemplo, de un hierro incandescente, el dibujo del espectro de dicha luz era siempre el mismo, pero diferente de otras fuentes distintas. Franhofer confeccionó en 1817 la primera tabla de elementos derivada de la configuración del espectro de la luz solar según la longitud de onda. Actualmente, la espectroscopía es la única herramienta que se dispone para determinar la composición de la materia estelar.

El fondo de tonalidades continuas "arco iris" del espectro, se denomina "Espectro continuo". Las líneas espectrales se producen como consecuencia de una interacción cuántica entre los átomos o moléculas de la fuente y los fotones. Cuando hay un exceso de fotones, se producen "líneas de emisión", y si hay carencia de fotones, se producen "líneas de absorción".



Espectro continuo



Líneas de emisión



Líneas de absorción

El flujo recibido en la Tierra, por unidad de frecuencia ( $f_v$ ), recibe el nombre de "espectro de la fuente". Sumando el flujo recibido en todas las frecuencias, obtenemos el flujo total, cuyo valor es

$$f = \int_0^{\infty} f_v dv$$

## FOTOMETRÍA

Es la rama de la Astronomía que mide el brillo aparente de los astros. Fue propuesto por primera vez en el S.II A.C. por Hiparco, quien definió cinco "magnitudes" ( $m$ ), que han ido ampliándose a lo largo de los siglos. Los astros más brillantes (como el Sol o Sirio), tienen una magnitud negativa (" $m$ " del Sol = -25.6 ,, " $m$ " de Sirio = -1.5), en tanto que los más débiles, tienen una magnitud positiva (Estrella Polar = +2.12 ,, Plutón = +13.6). Durante años, a la Estrella Vega se le adjudicaba una magnitud de 1.

La magnitud viene definida por una fórmula donde  $f$ = flujo recibido en la Tierra y  $f_0$  es una constante que define el "cero" de la escala:

$$m = -2.5 \lg \frac{f}{f_0}$$

Esta magnitud marca la luminosidad de un determinado astro, que puede ser mayor o menor en función del propio brillo del cuerpo, o de la distancia a la que se encuentra. Para que la distancia no influya en la magnitud, se utiliza la magnitud absoluta "M", definida como la magnitud que tendría un objeto si fuera situado a una distancia de 10 pc . Su fórmula sería:

$$M = -2.5 \lg \frac{fr^2}{f_0 10^2} = m-5 (\lg r-1)$$

En esta fórmula, "r" es la distancia en pársecs, conocida la cuál, se puede determinad "M", y viceversa.

Se suelen utilizar diversos sistemas de filtros fotométricos, que amplían la información que puede desprenderse de las observaciones, siendo el más extendido el sistema UBV (extendido actualmente a los infrarrojos). La diferencia de las distintas magnitudes en determinados filtros, recibe el nombre de "índices de color", dato de gran interés porque el color suele estar directamente relacionado con la temperatura de la estrella y porque, salvo los defectos que ocasiona la atmósfera de la Tierra, el índice de color no depende de la distancia.

FILTRO	COLOR	RANGO
U	Ultravioleta	300 – 400 nm
B	Azul	360 – 550 nm
V	Visible	480 – 680 nm
R	Rojo	530 – 950 nm
I	Infrarrojo	700 – 1200 nm

Algunos conceptos relacionados:

- Luminosidad: es la potencia (cantidad de energía por unidad de tiempo) emitida en todas direcciones por un cuerpo celeste. La Luminosidad del Sol es aproximadamente de  $3.827 \times 10^{26}$  W.
- Albedo: es el porcentaje de radiación que una superficie refleja respecto a la radiación que recibe. El albedo medio de la Tierra es del 37-39% de la radiación que proviene del Sol.
- Efecto Doppler y Ley de Hubble (Corrimiento de líneas espectrales hacia un determinado color y relación de dichos corrimientos, en función de la distancia del astro y una constante)
- Extinción y enrojecimiento: Parte de la luz que proviene de una estrella, se pierde o absorbe en el espacio, porque este no es completamente transparente (existe gas, polvo cósmico, etc...). Influye también la propia atmósfera de la Tierra quien, a su vez, modifica el color de la fuente. Se representa la extinción en magnitudes por unidad de distancia según la diferencia:

$$m-M=5 \log r-5 + ar = 5 \log r-5+A$$

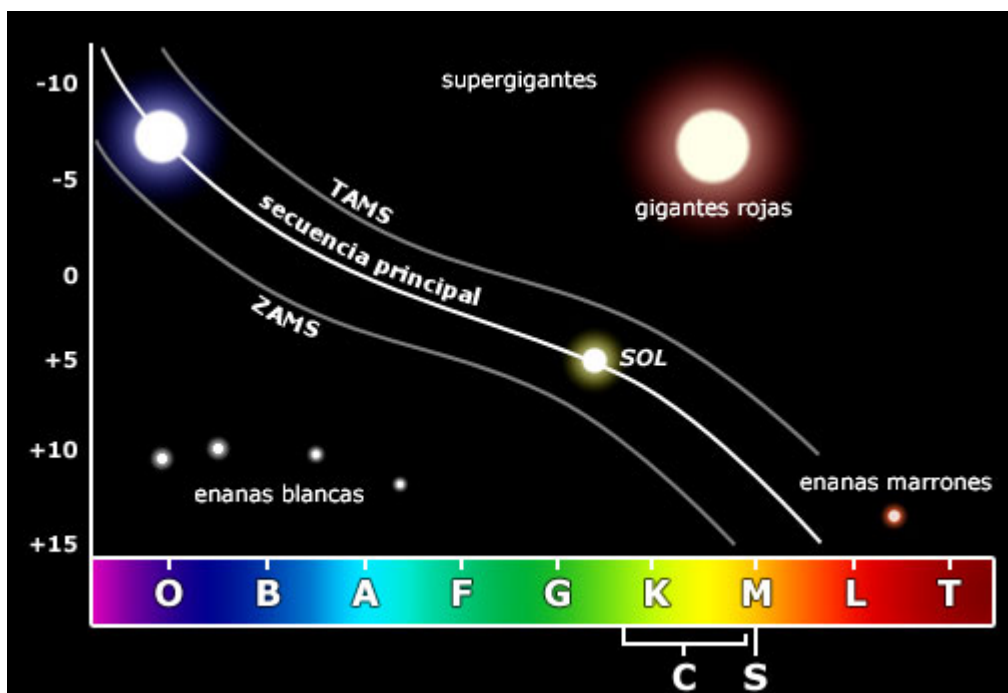
## 51- Clasificación Estelar

El estudio de las estrellas ha formado parte de la astronomía desde sus inicios. Aparte de ubicarlas en el firmamento, resultó interesante para los astrónomos, el hecho de poder clasificarlas, de igual forma que la taxonomía hacía con los animales. Los primeros intentos de clasificación estelar, se dieron con Hiparco, en el S II a.c., quien utilizó el brillo como medida. En la actualidad el sistema más común es el conocido como "sistema Harvard", que clasifica las estrellas según sus tipos espectrales, así como posteriores ampliaciones.

Esta clasificación de siete tipos (O, B, A, F, G, K, M), permite agrupar las estrellas según su temperatura superficial, su radio y su luminosidad y puede completarse con otros 10 subgrupos cada uno (del 0 al 9):

Tipo	Temperatura (K)	Color	Masa	Radio	Luminosidad
O	30.000 - 60.000	Azul	60	15	1.400.000
B	10.000 - 30.000	Azul-Blanco	18	7	20.000
A	7.500 - 10.000	Blanco	3,2	2,5	80
F	6.000 - 7.500	Amarillo-Blanco	1,7	1,3	6
G	5.000 - 6.000	Amarillo	1,1	1,1	1,2
K	3.500 - 5.000	Naranja	0,8	0,9	0,4
M	2.000 - 3.500	Rojo	0,3	0,4	0,04

Confeccionando una tabla en función de esta clasificación (Diagrama de Hertzsprung-Russell), se puede observar que la mayoría de las estrellas se encuentran en una posición conocida como "secuencia principal".



Otra variante clasificatoria conocida como sistema Yerkes (MKK) complementa la clasificación de las estrellas en función de su luminosidad, basándose en las líneas espectrales sensibles a la gravedad (relacionada con la luminosidad)

Clase	Descripción
<b>O</b>	Hipergigante
<b>Ia</b>	Supergigante muy luminosa
<b>Ib</b>	Supergigante de menor brillo
<b>II</b>	Gigante luminosa
<b>III</b>	Gigantes
<b>IV</b>	Sub-gigante
<b>V</b>	Enana de la secuencia principal
<b>VI</b>	Subenana (poco utilizada)
<b>VII</b>	Enana blanca (poco utilizada)

**Tipos O y I: Supergigantes:** Son estrellas extremadamente masivas y luminosas, que se encuentran generalmente en sus últimos momentos de existencia, como Canopus (F0 Ib), Betelgeuse (M2 Ib) o Antares (M1 Ib)

**Tipo II: Gigantes luminosas:** Algo menores que las del grupo anterior, pero que brillan unas 1000 veces más que el Sol. Por ejemplo Adara (B2 II), Sargas (F1 II) o Kraz (G5 II).

**Tipo III: Gigantes normales:** Unas 100 veces más luminosas que el Sol. La mayoría son amarillas (G), naranjas (K) o rojas (M), como Arturo (K2 III), Agena (B1 III) o Aldebarán (K5 III).

**Tipo IV: Sub-Gigantes:** Aún algo más masivas y luminosas que el Sol, pero mucho más pequeñas que las verdaderas gigantes, como Acrux (B0,5 IV), Shaula (B1,5 IV) o Miaplacidus (A2 IV).

**Tipo V: Enanas:** Algo menores que las anteriores, consumen hidrógeno de manera normal y se ubican en medio de la "secuencia principal", como el Sol (G2 V), Sirio (A0 V) o Alfa Centauro (G2 V).

**Tipo VI: Sub-Enanas:** Grupo poco utilizado, formado por estrellas con una masa demasiado pequeña como para que comience en ellas la fusión (menos de 0,8 masas solares) como las enanas marrones, o las aún más débiles enanas negras.

**Tipo VII: Enanas Blancas:** Grupo también poco utilizado, con una masa cercana a las 0,6 masas solares, como consecuencia de la etapa final de una estrella que al nacer tuvo menos de 8 masas solares.



## 52- Casos especiales

### Estrellas binarias visuales

Es una pareja de estrellas que giran en un mismo plano, en torno a un centro común de gravedad. Se llaman "visuales", porque el plano donde se mueven es casi perpendicular a la posición de la Tierra, con lo que las órbitas de ambas estrellas pueden verse claramente. Las estrellas binarias o dobles, resultan de interés para la astrofísica, porque gracias a las leyes de Kepler, su interacción gravitacional permite calcular sus masas con bastante exactitud. Esto es posible gracias a que ambas estrellas giran en torno a un centro de masas común y conociendo los semiejes de sus respectivas órbitas, se puede calcular la masa de cada estrella aplicando la fórmula:

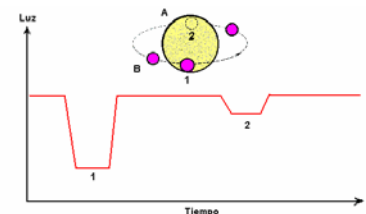


$$M_1 = \frac{4 \pi^2}{G} \frac{A^2 A_2}{r^2}$$

*Donde  $M_1$  es la masa de la estrella "1",  $G$  es la constante gravitacional,  $A^2$  es la suma de los dos semiejes mayores de las órbitas de ambas estrella ( $A = A_1 + A_2$ ), elevado al cuadrado,  $A_2$  es el semieje mayor de la estrella "2" y " $r$ " es la distancia al observador.*

### Estrellas dobles fotométricas

En este caso, la pareja de estrellas discurren por un plano paralelo al del observador, con lo que en ocasiones, una de las estrellas eclipsa a la otra. Entre el momento del comienzo de un eclipse y su finalización, la curva de luz tiene una forma muy particular conocida como tipo "Algol". El hecho de encontrar una curva de luz de este tipo, implica que el astro observado no es una estrella simple, sino una pareja cuyo plano de traslación es paralelo a la Tierra.



### Estrellas dobles espectroscópicas

En este tipo de parejas, sólo podemos observar una de las estrellas, si bien, se sabe que son dos por los desdoblamientos y desplazamientos Doppler de sus líneas espectrales. Se utilizan sistemas similares a este en el descubrimiento de planetas masivos extrasolares. Efectivamente, algunos planetas de gran masa influyen en su estrella de tal forma, que desplazan el centro común de masas lo bastante como para que, a pesar de no poder ver el planeta por la extrema luminosidad de su estrella, se pueda inferir su masa, distancia o posición.

### Enanas Blancas

Las Enanas Blancas son un caso muy particular, que a veces presentan contrariedades muy curiosas. En realidad se trata de estrellas más o menos normales, de una masa inferior a 10 soles, cuyo Hidrógeno ha terminado de consumirse. Al haber desaparecido el combustible, la presión de las reacciones nucleares disminuye de tal manera, que la estrella se ve incapaz de soportar un colapso gravitatorio. Cuando esto sucede, la estrella se comprime sobre sí misma,

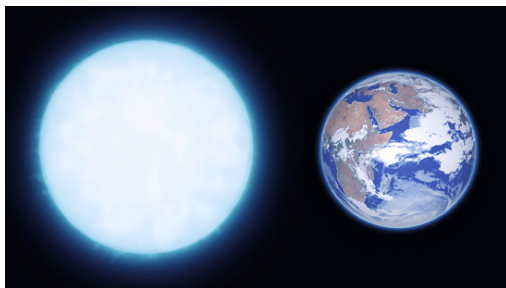
reduciendo bruscamente su volumen y por tanto, aumentando su densidad (Presión de Fermi). En dicho instante, los electrones se acercan tanto entre sí que colapsan hasta un límite máximo que ya no pueden superar por causa del Principio de Exclusión de Pauli, alcanzando lo que se conoce como "estrella degenerada de electrones" (= enana blanca). Un sistema de electrones ha alcanzado un estado "degenerado", cuando los electrones que componen la estrella se aproximan entre sí a menor distancia que la longitud de onda de De Broglie, calculable con la expresión:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{kTm_e2\pi}}$$

Donde " $\lambda$ " es la Long. de Onda de De Broglie, " $m_e$ " es la masa del electrón y " $T$ " es la temperatura del fluido (la estrella)

Con frecuencia, las enanas blancas rozan el límite del comportamiento relativista. Curiosamente, cuanto más masa posea una estrella de este tipo, más se reduce su tamaño, como puede comprobarse en la fórmula que relaciona la Masa de la estrella con su radio:

$$M = \left(\frac{2}{\pi}\right)^2 \left(\frac{K}{G}\right)^3 R^{-3}$$



Es decir, que si la masa de la estrella aumenta, su volumen decrece. Superado el límite de la máxima presión en el corazón de las enanas blancas, los electrones alcanzan tal nivel energético, que su velocidad se equipara al de la velocidad de la luz, momento en el que aparece una estrella enana blanca relativista. En dichas estrellas, y después de relacionar debidamente sus parámetros, se

comprueba que para calcular la masa no resulta necesario conocer el volumen (el radio de la estrella), lo que concluye que la masa de una estrella enana blanca relativista, no depende de su tamaño y, por tanto, es una constante. Concretamente, equivale a 0.23 veces la masa del Sol (masa de Chandrasekhar). Si acrecentamos la materia de este tipo de estrellas, ya dejan de ser "enanas blancas relativistas", transformándose en estrellas de neutrones (si los  $e^-$  se unen a los  $p^+$  para formar  $n^0$ ) o desprendiéndose de la materia sobrante, eyectándola al espacio.

### Estrellas masivas

Existen también límites de masa superiores para estrellas masivas, debido al equilibrio hidrostático al que deben someterse. Un exceso de masa produce a su vez, un exceso de luminosidad que provoca una fuerza radiativa hacia el exterior de la estrella. Dicha fuerza se opone a la gravedad del conjunto y, por tanto, puede existir un límite que si es superado, se traduzca en la "evaporación" de la propia estrella, por exceso de radiación (Límite de Eddington). Así pues, la más grande de las estrellas ve ambas fuerzas igualadas en equilibrio, de forma que:

$$\frac{GM\rho}{R^2} = \frac{Kq\rho}{c}$$

## Estrellas de neutrones

Normalmente, cuando una estrella enana blanca llega al límite de Chandrasekhar, puede terminar colapsándose hasta formar una estrella de neutrones, es decir, que está compuesta sobretodo de dichas partículas. El límite de masa es aproximadamente de  $2M_{\odot}$  (Oppenheimer-Volkov) y la densidad, del orden de  $10^{15} \text{ gcm}^{-3}$ . Se suelen asociar a los púlsares (estrellas que emiten un "pulso" cíclico debido a una rápida rotación)

## Púlsares

Son estrellas de neutrones con una rotación muy rápida. Su radiación suele generar dos haces perpendiculares a cada uno de los polos, que se dirigen alternativamente hacia nuestro planeta, por lo que desde aquí percibimos un pulso



## Enanas marrones

Son astros de muy poca masa (aproximadamente  $0.07 M_{\odot}$ , incapaces de iniciar una fusión nuclear (estrellas fallidas), porque el mecanismo de Kelvin queda interrumpido antes de alcanzar la secuencia principal, estimado en  $10^7 \text{ K}$  en su interior.

## Estrellas variables

Son estrellas que muestran marcadas variaciones en su luminosidad. Hay dos tipos: Variables binarias (cuya variación de luminosidad se debe a que hay algún otro astro que eclipsa periódicamente su luminosidad) y Cefeidas variables, cuyo tamaño y luminosidad varía realmente (Delta Cefeo).

## Estrellas T-Tauri

Son estrellas muy jóvenes, incipientes, de unos pocos miles o millones de años, de un tamaño y masa parecido al del Sol (de cien mil años a diez millones de años de edad) con masas similares a la de nuestro Sol, quien pudo haber comenzado su historia como una estrella tipo T-Tauri.

## Agujeros negros

Un agujero negro suele ser el resultado de la muerte de una estrella supermasiva, donde una enorme concentración de masa se colapsa bajo su propia gravedad, hasta tal punto, que la estrella en sí se convierte en una zona del espacio-tiempo donde apenas tiene sentido la mecánica Newtoniana. Dicha región es tan densa y singular, que la velocidad de escape termina por igualarse a la velocidad de la luz, por lo que ya no existe partícula capaz de escapar de su gravitación (ni siquiera la luz). Su límite puede expresarse como el "radio de Schwarzschild", cuya expresión es:



$$R_{Sch} = \frac{2 G M}{c^2}$$

## 6- GALAXIAS

Las Galaxias son acumulaciones de estrellas, bajo la influencia de sus respectivos campos gravitatorios. Existen algunas acumulaciones estelares que no reciben el nombre de "Galaxias", como los "Cúmulos Globulares", de forma esférica bastante regular, o los "Cúmulos abiertos", de distribución informe. Otras acumulaciones de estrellas, como las constelaciones, no tienen interés para la astrofísica, por tratarse de meras asociaciones aleatorias. Las galaxias no sólo disponen de estrellas, sino que están también formadas de otros elementos, como la materia oscura, gas, polvo, etc.

Con frecuencia, las galaxias parecen formar parte de estructuras aún mayores llamadas cúmulos de galaxias, las cuáles a su vez, pueden formar parte de agrupaciones mayores conocidas como supercúmulos. Por ejemplo, nuestra galaxia forma parte de un pequeño cúmulo de galaxias conocido como "Grupo Local", de apenas unas 20 galaxias, en tanto que hay otras como el cúmulo de "Coma", que contiene unas 10.000 galaxias.

### 61- Clasificación de Galaxias

Según la clasificación de Hubble, hay 5 tipos de Galaxias: Espirales, Elípticas, Lenticulares, Irregulares y Peculiares.

#### Elípticas



Tienen forma de elipsoide, y se representan con la abreviatura  $E_q$ , siendo  $q = 10(1 - b/a)$ , donde "a" y "b" son los semiejes.

#### Espirales



Se caracterizan por presentar varios brazos espirales. Se denotan con la letra S, seguida de las letras  $a$ ,  $ab$ ,  $b$ ,  $bc$  y  $c$ , según la separación de sus brazos del cuerpo. Los brazos de las espirales son concentraciones mayores de estrellas o de su luminosidad.

#### Lenticulares



Tienen una forma intermedia entre las elípticas y las espirales. Carecen de brazos, pero suelen disponer de un disco central, y se denotan con las letras SO.

## Irregulares



Se denotan con las letras Irr y no tienen forma definida.

## Peculiares



Tienen formas definidas, pero diferentes de las mencionadas hasta aquí, y suelen ser el producto de la interacción de más de una galaxia

## 62- Materia Oscura

Estudiando la curva de rotación de una galaxia espiral, se suele llegar a la conclusión de que la masa de una galaxia es significativamente mayor que la suma de las masas de todas sus estrellas. De hecho, es normal calcular que la masa del conjunto supera en 10 veces la suma de las partes. Esta enorme diferencia se achaca a la existencia de una materia oscura, formada tal vez por partículas que no emiten luz, aglomeradas alrededor de las galaxias en una región denominada Halo y cuyo tamaño total también es 10 veces más grande que la galaxia en su conjunto. En mecánica clásica, se utiliza el Teorema de Virial para relacionar la energía cinética promedio de un sistema, con la energía potencial media. Cuando ambos conceptos alcanzan un equilibrio, se suele decir que el sistema está "virializado".

## 63- Galaxias Activas

Se entiende por "actividad" de una Galaxia, su cantidad de cambios temporales, que con frecuencia suelen ser superiores a las de las estrellas aisladas. Y fundamentalmente, dichos cambios se aprecian más en el núcleo de la galaxia. Suele apreciarse bien en los quásares, también conocidos como QSO (Objetos Quasistelares), algunos de los cuáles pueden emitir una luminosidad mayor que el de una galaxia. Cuando esto es así, resulta que su presión de radiación es muy grande, y por tanto, también su masa, relación que puede expresarse con la fórmula:

$$GM = \frac{kL}{4\pi c}$$

Si equiparamos  $k=1$ , comprobamos que la Masa será del orden de entre  $10^8$  y  $10^{10} M_0$ , que induce a pensar que en su interior debe haber un agujero negro, rodeado así por un disco que gira a su alrededor, denominado "disco de acrecimiento", donde la materia que está a punto de acrecentar el agujero negro, sería la materia

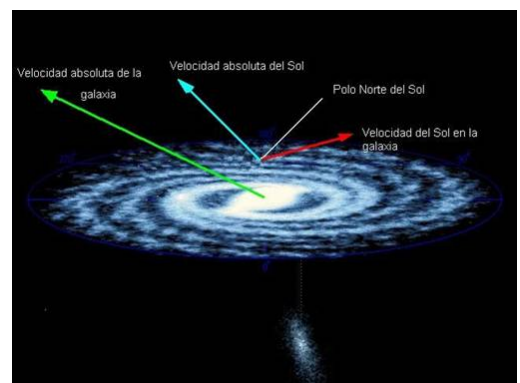
visible. Es posible que todas las galaxias dispongan de un núcleo activo formado a su vez por un agujero negro interior. También destaca la gran actividad de las radiogalaxias, enormes galaxias mucho mayores que las normales en cuyo interior se aprecia una galaxia espiral, de la que parten sendos lóbulos de emisión sincrotrón, así como unos chorros en la dirección del momento angular de la galaxia, que en ocasiones parecen fluir a mayor velocidad que la luz (fuentes superlumínicas)

## 64- La Vía Láctea

Nuestra galaxia nos permite estudiar diversas propiedades de manera diferente a las que apreciamos en otros grupos, precisamente por encontrarnos en su interior. En realidad, la galaxia puede considerarse como un fluido, cuyas partículas disponen de dos tipos de movimientos: el suyo individual comparado con el resto de las partículas y el de todo el conjunto. Cada movimiento de estos presenta una velocidad propia,, siendo  $V_0$  la velocidad media de todo el fluido (es decir, la del conjunto completo de toda la galaxia) y  $V_i$  la velocidad particular de cada una de las estrellas, en relación a sus vecinas. De esta forma, se puede decir que:

$$V_i = V_0 + V_i$$

Tras calcular los respectivos valores correspondientes a nuestro Sol, se puede determinar que este presenta una velocidad de 9 km/s hacia el centro de la galaxia, unos 11 km/s en dirección azimutal y unos 6 km/s hacia el Norte Galáctico.



## 65- Colisiones Estelares

Las colisiones estelares son impactos entre estrellas. No suelen ser muy frecuentes, debido al gran espacio que existe entre ellas y tampoco suelen ser graves, es decir, directas o con un ángulo de incidencia pequeño (del orden de 1 radián de desviación). Se puede inferir un tiempo medio entre colisiones, aplicando cálculos basados en la interacción gravitacional entre estrellas que se aproximan, dentro de un volumen determinado (porción del espacio). Siendo " $n$ " el número de estrellas por unidad de volumen, siendo " $D$ " un "parámetro de impacto" (Distancia de una estrella a la trayectoria de otra), " $V$ " la velocidad típica de una estrella con respecto a otra y " $\theta$ " el ángulo de incidencia de las trayectorias, cuando " $\theta \sim 1$ ", tenemos:

$$D = \frac{4mG}{V^2}$$

Por su parte, siendo " $T$ " el tiempo en el que se produce una colisión y " $n$ " el número de estrellas por unidad de volumen, obtenemos que

$$T = \frac{V^3}{16 \pi m^2 G^2 n}$$

Lo anterior indica la gran improbabilidad de colisiones graves en la vecindad solar, donde  $T$  resulta ser del orden de  $10^{14}$  años.

## 66- El Nacimiento de las Estrellas

Aunque parezca casi vacío, el medio interestelar está plagado de gas. Fundamentalmente abunda el Hidrógeno, tanto en su forma molecular ( $H_2$ ), como en forma de Hidrógenos atómicos neutro (HI) e ionizado (HII). Estas acumulaciones de gas terminan, con el tiempo, condensándose sobre sí mismas hasta formar estrellas. Por ello, a medida que van naciendo nuevas estrellas, la concentración de gas se ve disminuida. Esto provoca que una galaxia tenga cada vez menos gas y por tanto, mayor densidad de metales, mientras que su color se va enrojeciendo.



Los lugares preferentes para la formación de estrellas, son aquéllos con una alta densidad de  $H_2$ , más fríos que los otros tipos de Hidrógeno, y por tanto, más densos. Pero inmediatamente que comienzan a formarse las primeras estrellas en un medio con Hidrógeno frío, la formación de estrellas (fundamentalmente, las primeras gigantes azules) calienta el medio, dando lugar su progresivo calentamiento. La diferencia de concentración de temperaturas en estas

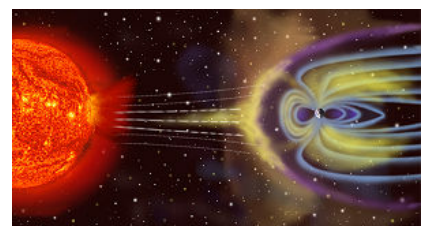
galaxias primigenias, dan lugar a zonas azuladas y rojizas, con espacios intermedios negros. Por lo general, la zona de máxima concentración de gas preestelar suele situarse en torno a un anillo en el interior de la galaxia, pero sobretodo, en los brazos de la espiral por el paso de ondas de mayor densidad. Estas ondas de densidad se ven interferidas por ondas de "Jeans" (inestabilidad de Jeans) y, cuando la atracción gravitacional es superior a la agitación térmica de la nube, esta puede terminar colapsando. Se conoce como "Masa de Jeans" ( $M_j$ ), la cantidad de materia que tiene una nube de gas, cuando la acción gravitatoria iguala a la fuerza de expansión de su agitación térmica interior, que puede calcularse con la siguiente fórmula:

$$M_j = \rho^{-1/2} (kT / mG)^{3/2}$$

De esta forma, las nubes que tengan una masa superior a la de Jeans, colapsarán bajo la acción gravitacional generando estrellas (no necesariamente una sola, pues masas menores que la de Jeans pueden aún colapsar si la densidad de la nube en una determinada región aumenta)

## 67- El Campo Magnético

La influencia del campo magnético generado en una nube de gas no es en absoluto despreciable. Por lo general, suele ser consecuencia del movimiento conductivo del plasma mientras que el movimiento del gas suele estar a su vez, influenciado por el campo magnético. Este fenómeno puede provocar el aumento de la densidad de la nube, aún sin existir variación de



la masa. El campo (B) afecta al movimiento de las partículas cargadas, produciendo sobre ellas una fuerza (F) de Lorentz, definida por la expresión:  $F = q (v/c \times B)$

Las líneas de fuerza del campo magnético parecen estar "ancladas" al movimiento de la nube, cuyos movimientos arrastran dichas líneas de fuerza (fenómeno de congelación del campo magnético). De esta forma, los cambios en el campo magnético afectan al movimiento del gas y viceversa. Este fenómeno puede apreciarse en el Sol, cuando su rotación diferencial genera cambios en la densidad del ecuador, aumentando también su campo magnético, lo que se traduce en un incremento de las erupciones solares, cuyo período suele ser de unos 11 años.

El campo magnético provoca interesantes efectos, tanto en discos de gases como en la superficie de las estrellas. Uno de ellos es la inestabilidad de Parker, donde una pequeña perturbación en la línea de campo, estimula un ligero ascenso del material, el cuál, en vez de caer hacia el centro de la masa por efecto de la gravedad, asciende siguiendo las líneas del campo, con lo que la perturbación acaba liberándose de su "peso" hasta provocar una erupción de materia en dirección vertical. El magnetismo también afecta al colapso de las nubes de gas, en la formación de las estrellas.

Igualmente, resulta de interés la Radiación de Sincrotrón, generada por partículas cargadas como los electrones, con una trayectoria curva a alta velocidad dentro de un campo magnético. Al aumentar su velocidad, se acorta la longitud de onda de la radiación y se observa sobretodo en las explosiones de supernovas y púlsares. Su potencia se calcula con la fórmula de Larmor:

$$P = \frac{q^2 a^2}{6\pi\epsilon_0 c^3}$$

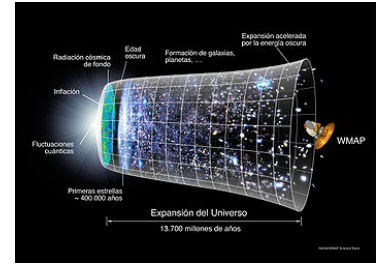
Donde "q" es la carga eléctrica de la partícula, "a" es la aceleración de la partícula, " $\epsilon_0$ " la permitividad eléctrica del vacío y "c" es la velocidad de la luz.



## 7- COSMOLOGÍA

### 71- Modelo Cosmológico Actual

La Cosmología es la ciencia que estudia la evolución del Universo: su nacimiento y evolución posterior hasta nuestros días y en el futuro. Partiendo de observaciones y cálculos bien definidos, es posible para la ciencia, determinar con bastante exactitud algunos de los principales acontecimientos del Universo. Sin embargo, para aquéllos datos que se desconocen, se plantean hipótesis y teorías con mayor o menor acierto. Se puede decir que los aportes más serios a la ciencia de la Cosmología parten de Albert Einstein con su teoría general de la relatividad, y la posterior introducción de la Constante Cosmológica (modificación de la ecuación del campo gravitatorio para adecuarse al concepto de Universo estático), así como la teoría del principio cosmológico (el Universo es homogéneo e isótropo).



Siguiendo con los avances de la física, se pudo apreciar un fenómeno muy útil para la Cosmología, como era el del corrimiento al rojo del movimiento de las Galaxias, lo que permitió a Edwin Hubble establecer la relación entre dicho corrimiento al rojo y la distancia a la que se encontraban los objetos astronómicos, mediante la fórmula:

$$z = \frac{H_0}{c} r$$

Más tarde, se postuló la posibilidad de un fenómeno conocido como "materia oscura", al comprobar que las fuerzas gravitacionales de las galaxias y demás cuerpos astronómicos resultaban insuficientes para ajustar los cálculos de la materia necesaria. También surgió la idea de la "radiación de fondo de microondas", descubierta en 1965, como "ruido" de fondo de una gran explosión inicial del Universo, hipótesis conocida como "Big Bang", siendo hasta la fecha, la hipótesis más aceptada, y que a día de hoy aún sigue en proceso de comprobación. Esta teoría plantea fundamentalmente los siguientes aspectos:

- El Universo comenzó hace unos 13,7 mil millones de años, estando lleno de una especie de energía muy densa en permanente proceso de microexpansión y micro contracción (cambios de fase).
- Unos  $10^{-35}$  después del tiempo de Plank, un cambio de fase provocó una súbita expansión del Universo (inflación cósmica), de forma exponencial, generándose un plasma de quarks-gluones. La expansión provocó irremediablemente un enfriamiento del Universo, dando origen a la formación de los primeros compuestos materiales, así como la antimateria y demás fenómenos relacionados.
- Unos 300.000 años después, se formaron los primeros átomos con núcleos y electrones, permitiendo que la radiación se liberara de la materia existente hasta entonces y surcando el espacio hasta nuestros días en forma de radiación de fondo de microondas.
- Poco después del estado relativista del Universo, las fuerzas gravitacionales comenzaron a aparecer para formar los primeros astros, galaxias, nebulosas, etc

Actualmente, el universo parece dominado por una fuerza extraña que provoca que el espacio-tiempo se expanda más rápido de lo esperado, conocida como "energía oscura".

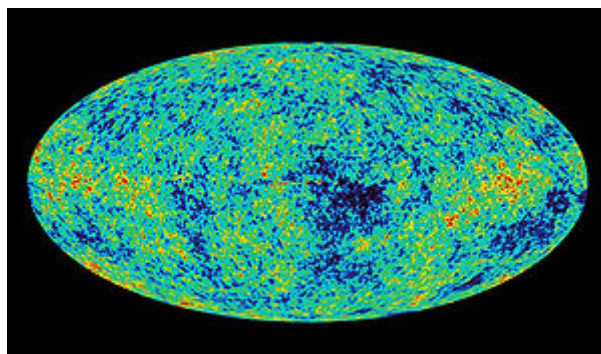
Las principales evidencias de esta teoría cronológica del Universo, son las siguientes:

- 1- La Ley de Hubble, descrita más arriba
- 2- El descubrimiento de la radiación de fondo cósmico
- 3- Cálculos y confirmaciones por satélites espaciales, como el COBE, que en 1990 halló un valor para la temperatura residual de dicho fondo en 2726 K. y midiendo las distancias angulares de las anisotropías, descubrió que el Universo era geoméricamente plano. Más recientemente, la sonda WMAP aportó nueva luz a estas incógnitas.
- 4- Abundancia de elementos ligeros, y proporción entre existencia de Helio e Hidrógeno: los cálculos hallados hasta la fecha, parecen confirmar la teoría del Big Bang, al ser esta la única que permite explicar las proporciones halladas en las observaciones.
- 5- Observaciones astronómicas, que permiten comprobar las diferencias existentes entre galaxias y otras formaciones antiguas (más alejadas en el espacio), con las más cercanas (más nuevas), cuyas formas coinciden con simulaciones específicas.
- 6- Cálculo de modelos físicos, como el modelo Friedmann- Lemaître - Robertson - Walker, confirmaciones termodinámicas, datos radiométricos, etc...

## 72- Actualidad Cosmológica

### **SONDA WMAP**

La sonda WMAP (**W**ilkinson **M**icrowave **A**nisotropy **P**robe), es un satélite espacial, lanzado por la NASA el año 2001, como sucesora de la sonda COBE, que está dotada de radiómetros diferenciales de microondas, cuyo objetivo principal es comprobar las teorías actuales de la formación del Universo, mediante la observación de la radiación de fondo de microondas. En el año 2003, la WMAP facilitó la imagen más completa del Universo conocido obtenida hasta la fecha.



*Imagen del fondo cósmico de microondas, obtenida por la WMAP*

Gracias a esta sonda, se ha conseguido determinar, por ejemplo, la edad del Universo (aprox.  $13,7 \pm 200$  millones de años), su composición (formado por un 73% de energía oscura, un 23% de materia oscura y un 4% de materia ordinaria), que la constante de Hubble es de  $71 \pm 4$  km/s/Mpc, o que el modelo cósmico inflacionario es bastante acertado.

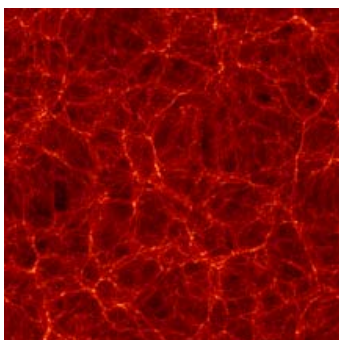
## LA SIMULACIÓN BOLSHOI (MULTIDARK)

El modelo cosmológico estándar actual, aún a pesar de sus lagunas y carencias, parece, de momento, bastante probable. En los últimos años, se ha añadido al método científico una herramienta impensable hace tan solo unas décadas: la computación. No es en realidad una herramienta nueva, ya que la computación no es otra cosa que matemáticas aplicadas a grandísimas velocidades. Pero las conclusiones a las que dicha herramienta conduce, no podrían obtenerse por medio de las matemáticas tradicionales.

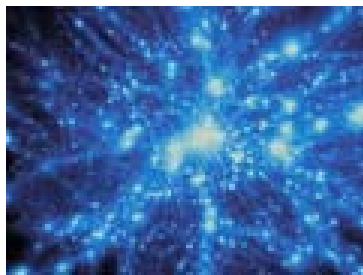
Una de esas aplicaciones es la conocida como "Simulación Bolshoi", un programa informático de enorme complejidad que es ejecutado por una de las computadoras más potentes que existen, el superordenador Pléiades de la NASA, y que ha necesitado más de seis millones de horas de cálculos para cumplir su cometido: determinar las particularidades del Universo primitivo.

La gran simulación parte de datos conocidos hasta la fecha, como la radiación de fondo de microondas, efectos gravitacionales, estudios astronómicos, información de las sondas WMAP, y otros datos obtenidos por sistemas computacionales anteriores, como la simulación "Millenium".

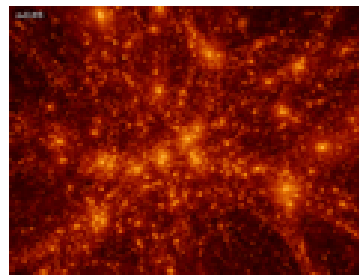
La simulación Bolshoi ha podido establecer interesantes hipótesis sobre la materia oscura y su disposición en el Universo, en forma de "halos", distribución de masa y velocidad de las galaxias, la formación de cuerpos astronómicos, o las propiedades y distribución de agrupaciones de galaxias y cuerpos gigantes (experimento Multidark)



*Filamentos de materia oscura sobre los que se formó la materia estelar*



*Distribución de densidad de gas en una nebulosa galáctica supermasiva*



*Evolución de densidad de la materia oscura*

## **REFLEXIÓN FINAL**

*No sería justo terminar este artículo sin rendir un admirado homenaje a la comunidad de científicos en general, como matemáticos, físicos, astrofísicos, ingenieros, etc, gracias a cuya dedicación, trabajo y rigor, la humanidad se encuentra cada día más cerca del "cielo".*

**FIN**