# 3

# Las dimensiones del cosmos

**Guillermo Sánchez (http://diarium.usal.es/guillermo)**

Última actualización: 2013-06-05

### 3.0. Sobre la elaboración es este artículo.

Todos los cálculos realizados para elaborar este artículo están realizados con el programa *Mathematica* , sin embargo Ud no los verá. A veces observará que algún texto aparece en inglés esto es debido a que se muestra directamente el resultado de la salida del programa. Si está interesado en el uso de este programa en cálculos astrónomicos y otros muchos campos puede visitar: http://diarium.usal.es/guillermo/mathematica/ .

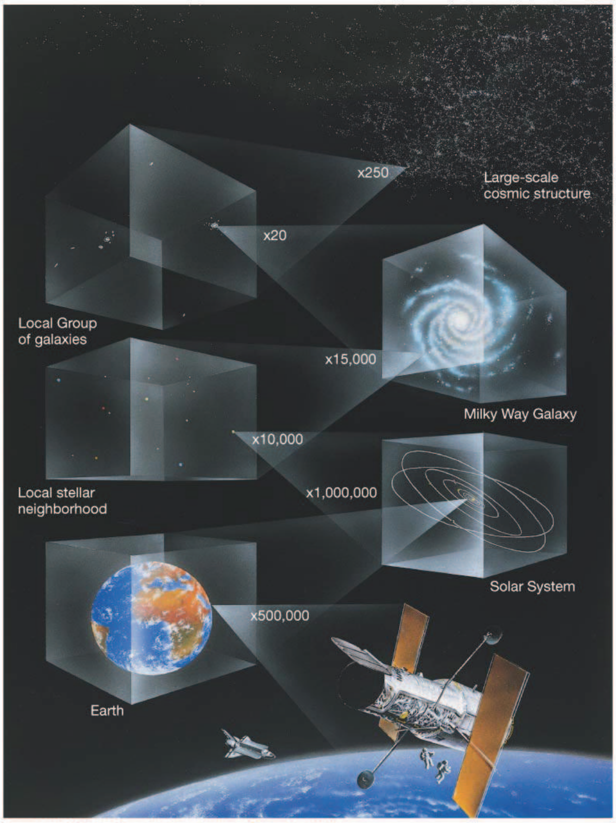
## 3.1. El cosmos

A lo largo de la Historia probablemente todas las culturas han mirado al cielo y se han hecho preguntas sobre lo que veían normalmente las respondieron creando mitos y leyendas. Fueron los griegos los que empezaron a vislumbrar una concepción racional del Cosmos. Pensaban que el Universo era un conjunto de esperas concéntricas rotatorias con la Tierra en el centro. Aristóteles (384 -322 a.C.) distinguía dos regiones en el cosmos: Una región, que abarcaba desde la Tierra hasta la Luna, constituida por los cuatro elementos de Empédocles (tierra, agua, aire y el fuego) y otra región, la que se extendía más allá de la Luna, estaba formada por los astros que describían movimientos circulares constituidos por un quinto elemento que denominó *quinta essencia.* Esta región estaba inmersa en una sustancia etérea (el éter) que tenía un límite espacial. Para Aristóteles el vacío no tenía sentido. Creía en un universo infinito en el tiempo y limitado en el espacio. Esta descripción del cosmos sería el paradigma dominante en Occidente durante casi dos mil quinientos años. En oposición al modelo de Aristóteles estaba el Aristarco de Samos (c. 310-230 a.C.) que proponía un sistema heliocéntrico en el que el Sol permanecía inmóvil en el centro del Universo y las estrellas estaban fijas en una esfera exterior concéntrica con el Sol. La Luna giraba alrededor de la Tierra. Los planetas, incluida la Tierra, giraban en torno al Sol. Al parecer a esta idea había llegado por el tamaño y distancias relativas de los principales astros que el mismo midió. Concluyó que el Sol tenía un volumen unas 300 veces mayor que la Tierra y esta a su vez 30 veces mayor que la Luna, le pareció natural colocar al cuerpo de mayor tamaño en el centro. Aunque estos valores de tamaño eran erróneos el método era básicamente correcto. Sin embargo el modelo de Aristarco sucumbió por la extraordinaria influencia del pensamiento aristotélico.

La astronomía griega alcanzó su cenit con Claudio Ptolomeo (II d.C.) y la publicación de su *Mathematiké Syntaxis*, que a través de los árabes nos llegaría con el nombre de Almagesto (El más grande), y su obra posterior Las Hipótesis de los Planetas. En estas introdujo un tratamiento matemático de los movimientos astronómicos que conseguía explicar con un buen acuerdo con las observaciones el movimiento del Sol, la Luna y de los planetas entonces conocidos que como sabemos eran cinco: Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno (El siguiente planeta, Urano, no sería descubierto hasta 1781, casi dos siglos después de la invención del telescopio). Su método permitía predecir con bastante precisión los eclipses de Luna. Ptolomeo aunque colocó a la Tierra un lugar central era consciente que no era el objeto mayor del universo. El mayor, según sus cálculos, era el Sol con 5,5 veces el tamaño de la Tierra, seguido de Júpiter (4,4 veces) y Saturno (4,3 veces). A Mercurio le asignaba un tamaño considerablemente menor al terrestre (0,04). El modelo de Ptolomeo fue el dominante por más de 1300 años hasta que fue sustituido por el modelo heliocéntrico de Copérnico. Aunque Aristarco ya había propuesto un modelo heliocéntrico como el copernicano peor no tenía capacidad predictiva de este sobre el movimiento de los planetas y eclipses.

Hasta que Galileo construyó su propio telescopio (1609) y lo dirigió al cielo el hombre solo había podido contemplar el Universo a través de sus ojos, sin otra ayuda. A simple vista, como vimos en el capítulo 1, solo podemos observar en el mejor de los casos 3000 o 4000 estrellas, la Luna, cuatro planetas, y esporádicamente algún cometa. Con el desarrollo del telescopio el número de estrellas observables se fue incrementando extraordinariamente, se observaron nuevos planetas en nuestro sistema solar. El propio Galileo comprobó que Júpiter tenía sus lunas, hoy sabemos que casi todos los planetas del sistema solar tienen satélites, incluso varias decenas. Las mejoras de los telescopio permitió ir detectando nuevos tipos de objetos astronómicos, como las nebulosas que hoy las clasificamos en dos tipos: Unas que son los restos de una estrella que explota (supernova) y la formada por nubes de gas gigantescas donde el gas y el polvo al contraerse por la acción de la gravedad da origen a nuevas estrellas. Hasta 1920 se pensaba que había otro tipo de nebulosas (las galaxias) que se creían que formaban parte de nuestra propia galaxia la Vía Láctea. Fue Hubble (en cuyo honor se puso el mismo nombre al famoso telescopio espacial) quien se dio cuenta que realmente nosotros estamos inmersos en una galaxia (la Vía Láctea) rodeado de innumerables galaxias, muchas de ellas mayores que la nuestra (como nuestra vecina Andrómeda).

- La figura muestra la concepción actual del Universo: Las estrellas, como el Sol, forman parta de una galaxia (en nuestro caso la Vía Láctea). Las galaxias se agrupan formando cúmulos galácticos que se alejan unos de los otros. También sabemos que la distribución de estos cúmulos galácticos no es homogénea sino que se concentran en una especie de gigantesca red dejando enormes espacios oscuros de millones de años luz.






Las dimensiones de las galaxias es de miles de años-luz, y la separación entre galaxias es de millones de años-luz. El Universo que contemplamos no es como es ahora sino como era cuando la luz salió de los objetos que observamos y sus distancias pueden ser tan enormes que su luz puede haber salido hace miles de millones de años cuando aún ni la Tierra ni el Sol existían (Las galaxias más lejanas que se han observado emitieron su luz hace 10 mil millones de años, el doble que la edad del sistema solar), puede que observemos galaxias que ya ni existan. Cuando miramos el Universo estamos haciendo un viaje en el espacio y en el tiempo.

Pero para poder llegar a estas conclusiones ha sido necesario medir el Cosmos, a eso nos vamos a referir en este capítulo. Nos referiremos solo al cosmos de lo muy grande. Igual de cosmos es lo muy pequeño: células, moleculas, atómos, y las marticulas elementales, pero eso será otra historia.

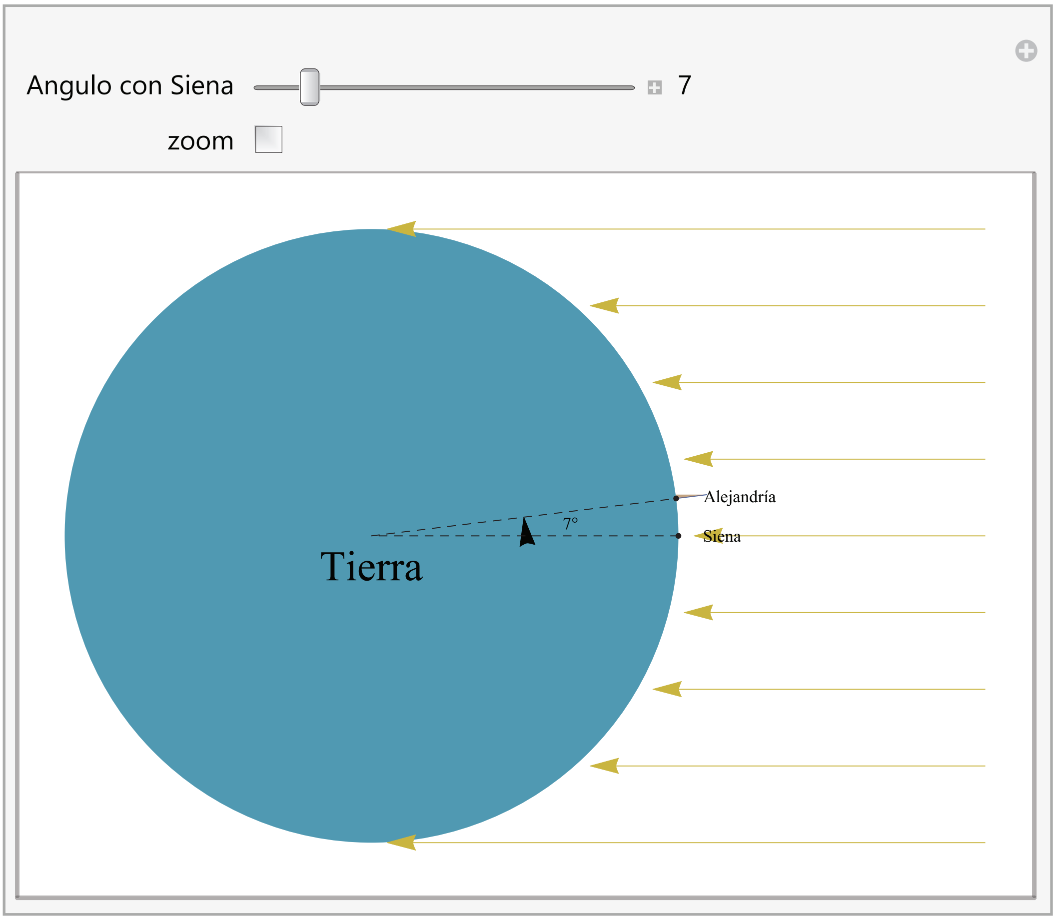
## 3.2. El tamaño de la Tierra

La medida de las distancias en el Universo es uno de los problemas fundamentales de la Astronomía. Probablemente la primera medida de un astro fue la de nuestra propia Tierra, pero antes había que darse cuenta que la Tierra era una esfera.

Se cree que fue en la escuela de Pitágoras, personaje enigmático que no dejó nada escrito, donde por primera vez, en torno a 430 a.C., surgió la idea de que la Tierra era una esfera, basado probablemente en dos observaciones: a) Los marinos habían comprobado que ciertas constelaciones, como la Osa Mayor, para un mismo día y hora aparecen más altas en el horizonte en Egipto que en Grecia (aunque hay otras formas geométricas que explicarían este hecho, la esfera era la manera más simple de hacerlo), b) La forma de ocultarse la Luna en los eclipses de Luna era fácilmente explicable si se suponía que era la sombra proyectada por una esfera -La Tierra- sobre la Luna.

Una vez que se tuvo claro que la Tierra era esférica, lo siguiente era medir sus dimensiones. Fue Eratóstenes, que llegó a ser director de la Biblioteca de Alejandría, el primero en medir el tamaño de la Tierra. El método que empleo es legendario y bien conocido por los aficionados a la Astronomía, pero merece la pena recordarlo. Empezó por medir la distancia entre Alejandría y Siena (la actual Asuán), que estaban situadas aproximadamente en el mismo meridiano (realmente difieren en 3º). Supuso que el Sol estaba lo suficientemente distante para que sus rayos al incidir en la Tierra lo hiciesen de forma paralela. Sabía que el día del solsticio de verano en Siena la luz alumbraba el fondo de los pozos de esta ciudad al medio día, cuando el sol estaba en el zenit. Eso significaba que en ese momento los rayos del Sol incidían perpendicularmente a la superficie terrestre en Siena mientras que en el mismo instante en Alejandría formaban un ángulo de aproximadamente 1/50 la longitud de una circunferencia (lo pudo deducir por la proyección de las sombras). A partir de una sencilla relación trigonométrica dedujo que la distancia de Alejandría a Siena era 1/50 el tamaño de la circunferencia terrestre. Como esta distancia era 5000 estadios la circunferencia terrestre tendría 250000 estadios. No hay acuerdo sobre la equivalencia del estadio. Según la referencia que se tome su valor oscila entre 185 m y 157,2 m que da un tamaño que difiere entre el 17% y el 1% del tamaño real, en cualquier caso una extraordinaria aproximación. [Si utilizamos como distancia Siena Alejandría 925 km y como 7/360 $\approx$ 0.02, dividiendo 925 km entre 0.02 obtuvo como longitud del meridiano terrestre que pasa aproximadamente por ambas ciudades y de ahí la circunferencia de la Tierra 46250 km que difiere en poco (para la época) del valor actual que es próximo a 40000 km.]. Cristóbal Colón en 1492 supuso un tamaño considerablemente, menor argumento utilizado por los asesores de Isabel la Católica, que conocían la estimación de Eratóstenes, para desaconsejar su viaje. Él persistió en su error y acabo por descubrir América.

- Debajo se representa una animación con el método utilizado por Eratóstenes para medir la circunferencia de la Tierra. En la animación puede moverse el ángulo de una ciudad respecto a Siena y ver como varia la sombra. Utilizando el zoom puede verse con detalle.




Adaptación basada en Enrique Zeleny "Eratosthenes's Measure of the Earth's Circumference" Wolfram Demonstrations Project-

- Del diámetro pueden deducirse otros parámetros de la Tierra. Por ejemplo: la masa ¿Pero cómo se mide? No es complicado, de hecho debe saberlo calcular un alumno de bachiller. Basta con aplicar dos leyes de Newton: la fuerza con la que cae un objeto de masa m sobre la superficie terrestre (F= m g) es igual a la fuerza de atracción gravitatorio entre el cuerpo de masa m y la Tierra de masa M que es $G\,\frac{m\,M}{R^2}$. Por tanto para calcular M lo que tenemos que hacer es despejarla en: m g =$G\,\frac{m\,M}{R^2}$:

$$\left\{M \to \frac{g\,R^2}{G}\right\}$$

- G la constante de atracción Universal cuyo valor (aplicable a todo el Universo, esa fue una de la genialidades de Newton) es:

$$6.67\times 10^{-11}\ m^3/(kg\ s^2)$$

- Como g es la aceleración de la gravedad ( 9.8 $m/s^2$ ) y R el radio de la Tierra ( $1.27\times 10^7/2$ m) obtenemos la masa de la Tierra, en kg

$$M \to 5.97119\times 10^{24}$$

- Conocida la masa M es inmediato calcular la densidad media, en kg/$m^3$ ,que es M/V, siendo V = 4/3 $\pi$ $R^3$

$$5502.14$$

La aproximación esferica es válida para la mayoria de los cálculos, cuando necesitamos una gran precisión tenemos que tener en cuenta que la Tierra es una esfera ligeramente achatada con pequeñas irregularidades (lo que se conoce como esferoide). Se puede ver en la tabla que hay una diferencia de 41 km entre el diámetro ecuatorial y el polar. Es así pues al girar la aceleración centrifuga (efecto de coriolis) es más intensa en el ecuador que en los polos, es decir el ecuador tiende a alejarse del centro de masas de la Tierra. También está el efecto de atracción de la Luna. Además la distribución de la materia que forma la Tierra no es perfectamente homogéneo. Sin embargo en términos relativos la Tierra es una esfera casi perfecta. Es más lisa y próxima a una esfera perfecta que una bola de billar. Incluso la capa de agua que forman los océanos, de profundidad media 4 km, es insignificante (aunque vital) comparada con el diámetro de la Tierra

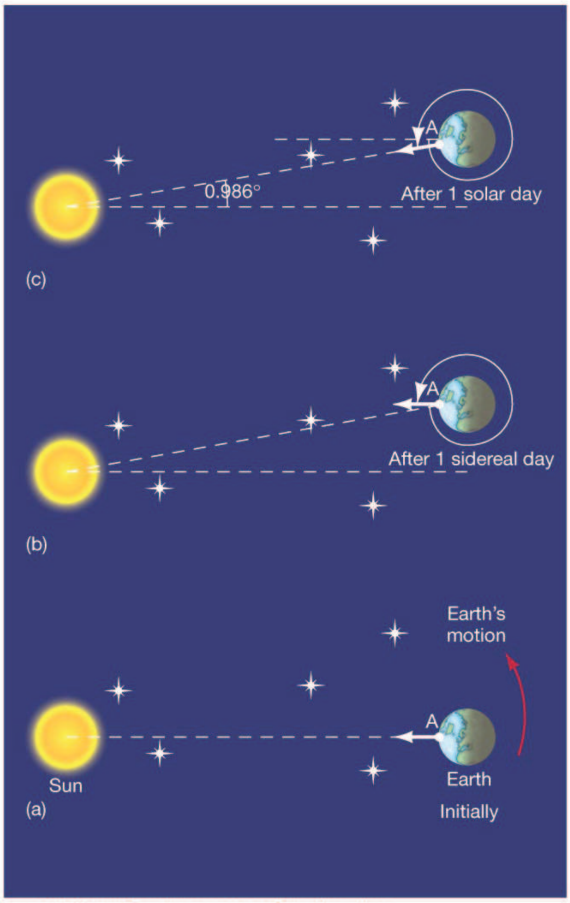
Estos y otros parámetros los mostramos en la tabla siguiente (las pequeñas diferencias es que hemos considerado la Tierra es una esfera perfecta en vez de un esferoide)

| Parámetros terrestres | | |
|---|---|---|
| Density | 5515. | $kg/m^3$ |
| EquatorialDiameter | $1.275628 \times 10^7$ | m |
| PolarDiameter | $1.2714 \times 10^7$ | m |
| EscapeVelocity | $1.118 \times 10^4$ | m/s |
| Gravity | 9.80 | $m/s^2$ |
| Mass | $5.9721986 \times 10^{24}$ | kg |
| Obliquity | 23.45 | ° |
| OrbitPeriod | $3.1558149 \times 10^7$ | s |
| RotationPeriod | 86 164.100 | s |
| SemimajorAxis | $1.49597887 \times 10^{11}$ | m |
| Speed | $2.942 \times 10^4$ | m/s |

La tabla muestra otros parámetros de interés: La velocidad gira en tornos al Sol a casi 30 km/s, la velocidad de escape para salir de la atracción terrestre es 11,18 km/s. El semieje mayor se refiere a el de la elipse que forma la Tierra al girar entornos al Sol, corresponde a la distancia de la Tierra al Sol (casi 150 millones de km). Pero hay un parámetro que merece un comentario especial: El periodo orbital.

El período orbital es el tiempo que tarda la vuelta en dar una vuelta sobre sí misma. En la tabla pone que es 86164.1 segundos, pero el diccionario de la RAE en la primera acepción de la palabra día dice: "Tiempo que la Tierra emplea en dar una vuelta alrededor de su eje; equivale a 24 horas". Si se hacen las cuentas 1 día = 24 horas × 60 minutos × 60 segundos = 86400 segundos. ¿A qué se debe la diferencia? La respuesta es simple: La definición de la RAE es errónea.

"Una vuelta alrededor de su eje" equivale a girar 360º pero si estamos en un punto concreto y miramos el reloj cuando el Sol está en el punto más alto sobre el horizonte comprobaremos que tienen que ocurrir 24 horas para que se dé la misma situación, pero en ese tiempo la Tierra habrá dado algo más de una vuelta sobre si misma (véase la figura que sigue). Es así debido a que además del movimiento de rotación de 360º se ha producido un desplazamiento por el movimiento de traslación de: 360º/365.25 días (duración de 1 año solar) = 0.9856º. Por eso creo que sería más preciso definir día como el tiempo que trascurre para que el Sol pase por el cenit en un mismo meridiano dos veces consecutivas. Si queremos ser más precisos debemos decir que la duración de día varia a lo largo del año fundamentalmente por la variación de posición de la Tierra en la órbita de traslación del Sol que es una elipse. Por eso cuando es necesaria mucha precisión en el lenguaje a lo que normalmente llamamos día hemos de referirnos como día solar medio.





Si miramos el cielo nocturno una estrella y esperamos al día siguiente a que la estrella está en la misma posición habrá trascurrido 23 h 56 minutos. Como las estrellas se pueden considerar fijas respecto a la Tierra en ese tiempo la Tierra habrá dado una vuelta completa sobre si misma.

## 3.3. El sistema solar

### La Luna

El astro mas cercano a la Tierra, con mucho, es nuestro satélite la Luna (sin contar los micrometeoritos con nos bombardean continuamente y pequeños asteroides que esporadicamenrte se aproximan a la Tierra más que la Luna durante unas horas). Fue Hiparco de Nicea (II a.C.), al que antes nos hemos referido en el capítulo 1 como descubridor de la precesión de los equinoccios, quien a a partir de la sombra que la Tierra producía en la Luna en los eclipses de Luna estimó, con bastante aproximación, la distancia de la Tierra a la Luna. Con posterioridad se fue mejorando la medida utilizando el método de triangulación que consiste en mirar con un telesopio a la mima hora hacía el centro de la Luna desde dos puntos de la Tierra y medir los ángulos que forman los telescopios respecto a una estrella que se toma como referencia, a partir de ellos por unas sencillas formulas geométricas se cálcula la distancia a la Luna. Es similar al problema escolar que consiste en dado un triangulo formado por los puntos A, B y C, donde se conoce la distancia del lado AB y los angulos AB y BC calcular los lados AB y BC.

En la actualidad se conoce la distancia a la Luna con precisión de centímetros utilizando un método la reflexión de láseres en espejos colocados en la Luna por varias misiones espaciales (como el Apolo XI), lo que nos ha permitido saber que se está alejando de la Tierra 3 cm por año. Nos estamos refiriendo de forma genérica a la distancia a la Luna sin embargo esta gira alrededor de la Tierra siguiendo una elipse, por tanto su distancia varía según la posición en órbita.

| Media | Máxima | Mínima |
|---|---|---|
| 384 400 km | 405 700 km | 363 100 km |

- Utilizando los datos anteriores vemos que el tamaño aparente de la luna visto desde la Tierra varía apreciablemente según la Luna se encuentre en el apogeo (más alejado) o perigeo (más próximo): Casi el 25%. Esta es una de las razones por la que a veces vemos la Luna la vemos más grandes que otras. Hay otro factor también importante: Su posición sobre el horizonte: si está próxima al horizonte parece tener mayor tamaño que si está en el cenit, en este caso el efecto es subjetivo. La Luna se presenta de forma grandiosa cuando está en su apogeo sobre el horizonte. Una curiosidad: El tamaña aparente de la Luna es parecido al del Sol (este parece más gran pues brilla más, se trata de una coincidencia

1.24841

La distancia de la Luna a pesar de ser grande podemos imaginarla: equivale a dar 10 vueltas a la Tierra. Cada vuelta a la Tierra en avión sin parar nos llevaría unos dos días, a la misma velocidad tardaríamos 20 días en ir a la Luna.

- Conocida la distancia a la Luna su diámetro se deduce directamente a partir del tamaño de la imagen que forma en el telescopio desde el que la observamos. Con esta información y aplicando las leyes de Newton pueden deducirse otros parámetros, algunos de los cuales se muestran en la tabla siguiente:

| Parámetros lunares | | |
|---|---|---|
| Density | 3344. | $kg/m^3$ |
| Diameter | $3.4750\times10^{6}$ | m |
| Mass | $7.3459\times10^{22}$ | kg |
| OrbitPeriod | $2.3606\times10^{6}$ | s |
| SemimajorAxis | $3.844\times10^{8}$ | m |

- Observe que el periodo orbital es de $2.3606\times10^{6}$ s que equivale a 27.32 días que se conoce como mes sidéreo que es el tiempo que tarda en dar la Luna en completar una órbita alrededor de la Tierra. Sin embargo el mes lunar o mes sinódico (ciclo entre dos lunas llenas) es de 29.54 días. Esta diferencia es debida al movimiento de traslación de la Tierra alrededor del Sol. La Luna se desplaza alrededor de la Tierra en sentido del Este. Como el Sol se mueve 1° por día hacia el Este como consecuencia la Luna atrasa diariamente su salida respecto a la del Sol unos 50 minutos.

Hagamos algunas comparaciones aproximadas entre la Tierra y la Luna:

- El volumen de la Tierra es casi 50 veces mayor que el de la Luna ($\left(1.276\times10^{7}\right)^{3}\big/\left(3.474\times10^{6}\right)^{3}$ = 49.5522)
- Si suponemos que la Tierra tiene el tamaño de un balón de fútbol (22 cm) la Luna sería una pelota de tenis (6 cm) situada a 6.6 metros. Si lo pensamos un poco nos damos cuenta que en términos relativos está bastante mas separada de lo que se representa en los libros en falsa escala.

### El Sol, los planetas y mas allá

El método de triangulación, como el empleado para medir la distancia a la Luna, es también utilizado para estimar la distancia a otros cuerpos del sistema solar. Obviamente los ángulos medidos son sustanciamente más pequeños.

En práctica se aplica una variante del método de triangulación que es conocido como método del paralaje. El paralaje es el desplazamiento (ángulo) aparente de los objetos cuando son vistos desde dos puntos diferentes. El ejemplo más popular consiste en interponer el dedo pulgar entre un objeto y nuestros ojos, al guiñar uno u otro ojo se produce un desplazamiento aparente del objeto. Un efecto similar se produce cuando nos desplazamos en un tren: observamos que los objetos se mueven aparentemente más lentos mientras más alejados están del tren: Los postes que van junto la vía, con el tendido eléctrico que alimenta al tren, pasan a toda velocidad mientras que los objetos del paisaje que se pierden en el horizonte parecen estar estáticos. Este hecho podemos utilizarla para estimar indirectamente la distancia de objetos distantes. Por ejemplo: Consideremos que un tren en línea recta a velocidad aproximadamente constante, vemos un árbol a lo lejos que se mueve lentamente y mucho más lejos observamos la cumbre de una montaña que parece estar estática. Si queremos calcular la distancia al árbol podemos proceder como sigue: Tomamos dos fotos en dos instantes diferentes calculamos el desplazamiento del tren entre las dos tomas (lo deducimos con un reloj y viendo la velocidad que marca la pantalla de información que incluyen muchos trenes), por simplicidad tomamos la primera foto cuando el árbol está perpendicular a la vía alineado con la cumbre distante. Superponemos las dos fotos y en ella vemos que el árbol se ha movido respecto a la cumbre que tomamos como referencia un angulo $\alpha$ (paralaje). Es inmediato calcular d, pues tenemos la distancia de la base b y el angulo $\alpha$. Por tanto: tg $\alpha$ = base/distancia, y de aquí distancia = base/tg $\alpha$

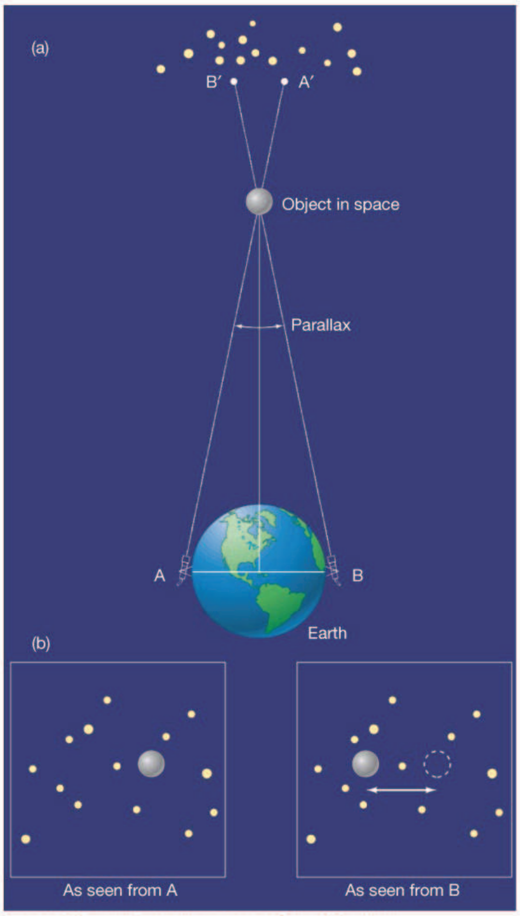
- Aclaración para los no aficionados a la fotografia: Con un objetivo determinado cuando miramos a traves del ocular, o de la pantalla, vemos un campo angular (el angulo entre los dos extremos de imagen) que es conocido (por ejemplo: 120º). Si en una foto vemos el arbol alineado con la cumbre y en la siguiente lo vemos desplazado 1/4 del campo de la camara, deduciremos que el angulo (paralaje) es 120º/4 = 30º. Si suponemos que la base es 200 m, la distancia al arbol será: tg 30º = 200/distancia, por tanto la distancia del arbol a la vía será:

$$\frac{\mathbf{200.\ "m"}}{\mathbf{tan(30\,°)}}$$

```
346.41 m
```

El mismo método puede emplearse para determinar la distancia de un planeta. Podemos tomar dos fotos en un mismo instante centrando el planeta en el ocular desde dos puntos diferentes a la misma hora o tomar dos fotos desde el mismo sitio a horas diferentes. Lo importante es que conozcamos la separación en línea recta entre los dos puntos en los que hemos tomado las fotos o, si las hemos tomado desde el mismo sitio, el desplazamiento producido de nuestro punto de observación por la rotación de la Tierra entre las dos fotos. En definitiva se trata de conocer la base del triángulo y el ángulo que subtiende (paralaje) el planeta respecto de la base formada por los dos puntos de observación.

- El paralaje lo podemos calcular superponiendo las dos fotos y estimandolo en radianes o grados como se muestra en la gráfica que sigue. Esto es sencillo pues como conocemos el objetivo que hemos utilizado sabemos a los angulos que corresponde la imagen total y vemos que desplazamiento angular a experimentado el planeta respecto a las estrellas fijas.






Conocida las distancias de los planetas y sus orbitas pueden determinarse sus masas midiendo la alteración de las orbitas cuando dos planetas están próximos. En la actualidad se han visitados todos los planetas del sistema solar (el planeta enano Plutón lo será en 2015 cuando la sonda New Horizon pase junto a él) y por ello tenemos medidas muy precisas de distancias, masas, características de sus lunas y mucho más.

- La siguiente tabla compara algunos parámetros de los planetas con los de la Tierra. Lo que se ha hecho es dividir el parámetro del planeta entre el correspondiente de la Tierra (que se muestran en la tabla: Parámetros terrestres). Por ejemplo: El periodo (tiempo de completar una órbita) para la Tierra es 1 año, para Mercurio es 0.3 años y para

Neptuno 164.79 años. Si vemos la densidad nos damos cuenta que Saturno tiene 0.13 la densidad terrestre que es 5.1 g/cm3, es decir la densidad de Saturno es $0.13 \times 5.5 = 0.7$ g/cm$^3$, que es menor que la del agua. De hecho los grandes planetas (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno) son planetas gaseosos (con un pequeño núcleo sólido o plasma) por lo que no tendría sentido aterrizar en ellos. A lo más que podemos aspirar es a un viaje en globo. Lo interesante son las lunas de algunos de estos planetas sobre las que si podríamos aterrizar, como ya se ha hecho sobre Titán, y algunas de ellas es seguro que contienen agua como Europa o la enigmática Encelado con sus gigantescos geiseres.

| | Distancia | Periodo | Velocidad | Diámetro | Masa | Densidad |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Mercurio | 0.39 | 0.24 | 1.95 | 0.38 | 0.06 | 0.98 |
| Venus | 0.72 | 0.62 | 1.2 | 0.95 | 0.82 | 0.95 |
| Marte | 1.52 | 1.88 | 0.85 | 0.53 | 0.11 | 0.71 |
| Jupiter | 5.2 | 11.86 | 0.45 | 10.86 | 317.94 | 0.24 |
| Saturno | 9.54 | 29.45 | 0.32 | 9. | 95.19 | 0.13 |
| Urano | 19.19 | 84.02 | 0.22 | 3.97 | 14.5 | 0.24 |
| Neptuno | 30.07 | 164.79 | 0.19 | 3.86 | 17.21 | 0.32 |

Para medir distancias dentro del sistema solar se suele utilizar la Unidad Astronómica (ua o, en inglés, ua), que equivale 149 597 870 km que es aproximadamente la distancia media de la Tierra al Sol. Los datos de las distancias (al Sol) en la tabla anterior son equivalentes a ua. Por ejemplo: Neptuno está del Sol a 30 ua o lo que es lo mismo está alejado 30 veces más del Sol que la Tierra. Lo sorprendente es que Neptuno no es ni mucho menos el fin del área de influencia del sistema solar. A partir de Neptuno empieza el cinturón de Kuiper (cuyo primer objeto es Plutón pero contiene muchos más planetoides) que se extiende hasta 100 ua. Más lejos está la nube de Oort de la que se sospecha proceden los cometas y que podría llegar hasta 100 000 ua.

Desde los griegos se sabía que el Sol era mucho mayor que la Tierra pero no se obtuvo una buena aproximación de su tamaño y de la distancia a la Tierra hasta que en se empleó una técnica consistente en mirar hacia Venus cuando se interpone entre el Sol y la Tierra (lo que se conoce como tránsito) formante un pequeño eclipse parcial. Se sigue la trayectoria de Venus (se ve como una cuerda de circunferencia) mientras se interpone delante del Sol y se mide el tiempo de tránsito, esto unido a la distancia de Venus a la Tierra permite calcular la distancia del Sol y su tamaño (diámetro). El primer caso en el que se tuvo éxito en emplear esta técnica es en el tránsito de 1769 donde se organizaron famosas expediciones a los Mares del Sur (especialmente a Tahití) que es de donde mejor se observaba. En una de ellas participó el navegante James Cook. En 2012 lo vimos por última vez un tránsito de Venus pero no fue necesario ir a Tahití, yo lo vi desde Juzbado, Salamanca. Ahora se dispone de técnicas muy precisas, algunas de ellas usando satélites.

| **Parámetros solares** | | |
|---|---|---|
| Diameter | $1.391 \times 10^9$ | m |
| Mass | $1.988435 \times 10^{30}$ | kg |
| Density | 1408. | kg/m$^3$ |
| RotationPeriod | $2.164 \times 10^6$ | s |
| EscapeVelocity | $6.1754 \times 10^5$ | m/s |

- Los valores anteriores probablemente no nos digan mucho por eso es interesante compararlos con los de la Tierra. Así lo hacemos en la siguiente tabla. Vemos que el diámetro del Sol es 109 veces el terrestre y su masa más de 330 mil, sin embargo la densidad es menor, el sol no es un cuerpo solido ni gaseoso, está en forma de plasma (realmente es gas ionizado y comprimido, lo más parecido a la Tierra es la lava). Un comentario especial es su rotación, aquí se muestra la rotación a nivel del ecuador, sin embargo el Sol presenta una rotación diferenciada según nos vamos aproximando a los polos.

| Parámetros solares/terrestres | |
|---|---|
| Diameter | 109.2 |
| Mass | 332 948.6 |
| Density | 0.2553 |
| RotationPeriod | 25.11 |
| EscapeVelocity | 55.24 |

- En la tabla siguiente hemos supuesto que el Sol es balón de futbol (22 cm de diámetro) que está en el centro, entonces mostramos las distancias relativas de los planetas en metros y sus diámetros en cm. Por ejemplo: la Tierra sería una bolita de 2 mm (compárese con los 22 cm que representan al sol) situada a 24 m. El planeta más grande Júpiter sería como una pelota de golf dando vueltas en torno a un balón de futbol situado a 123 m el más lejano, Neptuno, sería una bola de algo menos de 1 cm situada a 711 metros. Para hacernos una idea más completa podemos imaginar que el balón es una lámpara redonda de 22 cm (como la que hay en muchos paseos) en medio de la noche sin apenas otra iluminación. No es raro que un objeto de 7.8 mm (Neptuno) situado normalmente a más de 700 m de nosotros sea difícil de ver incluso con telescopio (la distancia de Neptuno casi siempre será mayor a 711) pues esa separación es la mínima que se dará solo cuando la órbita de Neptuno y de la Tierra estén alineadas respecto al Sol lo que ocurre muy pocas veces). Las representaciones que normalmente se hacen del sistema solar en los libros (inevitables) nos hacen perder la perspectiva de los tamaños. Pero todo ello se queda pequeño si lo comparamos con el límite del sistema Solar que como hemos dicho corresponde a la nube de Oort cuyo límite exterior está a 100 000 ua que en nuestra comparación equivale a 2370 km que es como situar un balón de futbol en medio del Atlántico entre la Peninsula Ibérica y EE UU y el limite seria la línea costera.

| | Distancia(m) | Diametro(cm) |
|---|---|---|
| Mercurio | 9 | 0.08 |
| Venus | 17 | 0.19 |
| Tierra | 24 | 0.2 |
| Marte | 36 | 0.11 |
| Jupiter | 123 | 2.19 |
| Saturno | 226 | 1.81 |
| Urano | 454 | 0.8 |
| Neptuno | 711 | 0.78 |

Conocida la distancia al Sol determinar su masa es bastante sencillo (gracias al genial Newton): El Sol debe atraer gravitariamente con la misma fuerza, $F_G$, que la Tierra tiende a salirse de la órbita ,$F_C$.Consideramos que la Tierra órbita alrededor del Sol siguiente una circunferenia (realmente es una elipse pero con una excentricidad muy pequeña por lo que en muchos casos la aproximación a una circunferencia es buena. Sea m la masa de la Tierra ,M la del Sol, R la distancia de la Tierra al Sol y v la velocidad de la Tierra al alrededor del Sol (que es inmediato calcularla a partir de la definición de año).

$$F_C = m\,a = m\,\frac{v}{R^2}\;;\quad F_G = G\,\frac{m\,M}{R^2}$$

Como, $F_G = F_C$, despejamos M:

$$\left\{M \to \frac{R\,v^2}{G}\right\}$$

- Reemplazamos R, v y G por sus valores expresados en el SI son: v=29424 m/s R=149597870000 m (1 ua) , G= $6.67\times 10^{-11}$ $m^3/(kg\,s^2)$ y obtenemos en kg:

  $M \to 1.94179\times 10^{30}$

- Que difiere poco del valor más exacto (en el que se tiene en cuenta que la órbita es una elipse)

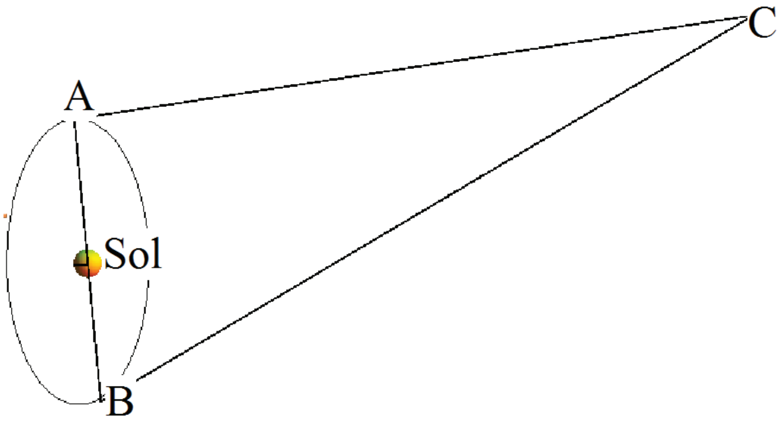
  $1.988435\times 10^{30}$

- Si sumamos al masa de todos los planetas y la dividimos entre la masa del Sol obtenemos todos los planetas juntos tienen una masa de poco más del 0.13% la del Sol, por tanto el Sol es 99.87% de la masa del sistema solar ( la masa de asteroides, cometas y meteoritos es totalmente despreciable).

  0.13420 %

## 3.4. Las estrellas

Para medir la distancia a las estrellas más próximas se emplea el mismo método de triangulación, utilizando el paralaje, que hemos descrito para los planetas con una diferencia: Se toma una foto de la posición de la estrella vista desde un observatorio en una determinada fecha y se vuelve a tomar otra foto de la misma estrella unos 6 meses después y se ve el desplazamiento respecto a las estrellas muy distante. Tendremos un triángulo con base AB conocida formando un ángulo ACB que también es conocido.




Si elegimos los momentos de observación en momentos adecuados tendremos un triangulo rectangulo (no es imprescindible lo hacemos asi pues el cálculo geométrico se simplifica) siendo la base la distancia de la Tierra al Sol, que es 1 unidad astronómica (ua) (puede variar ligeramente de esta cifra según la posición de la Tierra), la altura es la distancia $d$ del Sol a la estrella (las estrellas están tan distantes que tomar el Sol o la Tierra para calcular la distancia es irrelevante) y $p$ el paralaje (angulo formado por el Sol, la Tierra y la estrella), en radianes. Entonces la distancia $d$ podemos calcularla como sigue:

$d = \frac{1\text{ ua}}{\tan p} = \{$como el ángulo es muy pequeño $\tan p \simeq p\} \simeq \frac{1}{p}$ ua. Como los valores de $p$ son muy pequeños se expresan en arcosegundos.

- La distancia correspondiente a $p = 1$ arcosegundo se denomina parsec (pc) que es la unidad más frecuente utilizada en la astronomía profesional que equivale a:

  `3.26156 ly`

- Debajo se muestran las equivalencias de 1 pc en varias unidades:

| | |
|---|---|
| 1 pc | 3.262 ly (light years) |
| | 206 265 au (astronomical units) |
| | $3.086 \times 10^{13}$ km (kilometers) |
| | $3.086 \times 10^{16}$ meters |
| | 19.17 trillion miles |

Como hemos visto si conocemos el paralaje de una estrella su inversa es la distancia en pc, que si queremos pasar a años-luz (ly) sólo hay que multiplicar por 3.26 y para pasar a ua multiplicamos por 206 265.

- La tabla muestran la distancia a las estrellas mas próximas (excluido el Sol):

| Estrella | Proxima∴ Cent∴ auri | RigelKen∴ tauru∴ sA | RigelKen∴ tauru∴ sB | Barnards∴ Star | Wolf359 | Lalande2∴ 1185 | Luyten726 −8A | Luyten726 −8B | Sirius |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Paralaje | 0.771 | 0.742 | 0.742 | 0.549 | 0.418 | 0.392 | 0.381 | 0.381 | 0.379 |
| parsec | 1.30 | 1.35 | 1.35 | 1.82 | 2.39 | 2.55 | 2.62 | 2.62 | 2.64 |
| años−luz | 4.22 | 4.39 | 4.39 | 5.94 | 7.79 | 8.31 | 8.56 | 8.56 | 8.60 |
| ua | $2.68\times10^5$ | $2.78\times10^5$ | $2.78\times10^5$ | $3.76\times10^5$ | $4.93\times10^5$ | $5.26\times10^5$ | $5.41\times10^5$ | $5.41\times10^5$ | $5.44\times10^5$ |

- Si el sol lo suponemos un balón de futbol situado en Barcelona habria que irse 6400 km (aproximadamente la distancia Bardelona- Johannesburgo) para encontrar Proxima Centauri, y eso que es la estrella más próxima. ¡No es extraño que los choques de estrella no sean frecuentes!

El método del paralaje está restringido a las estrellas más próximas debido que su valor es tan pequeño que no es medible, especialmente si utilizamos telescopios en Tierra. El satélite Hipparcos consiguió medir por el método del triangulación alrededor 1 millón de estrellas situadas hasta 150 pc. El satélite Gaia, que será puesto en orbita a final de 2013, y se situará en el denominado punto L2, a 1.5 millones de km, permitirá conocer para 2020 con gran precisión la distancia de miles de millones de estrellas situadas en nuestra galaxia. Su precisión es tal que será capaz de medir el desplazamiento de 1 cabello situado a 1000 km.

Un gran salto en la medida de las distancias astronómicas se dió cuando Henrietta Swan Leavitt (1868-1921) observó que ciertas estrellas, ahora conocidas como variables cefeidas, presentaban una variación periodica de la luminosidad a partir de la cual se podía estimar su magnitud absoluta.

La relación periodo/luminosidad para las variables cefeidas se ha revisado varias veces desde las primeras mediciones de Henrietta Leavitt. En la actualidad se suele aplicar la siguiente relación:

$$M = -2.78 \log(P) - 1.35$$

donde M es la magnitud absoluta de la estrella (luminosidad de la estrella si se contemplase a 1 pc de distancia) y P es el período medido en días.

Aplicando un criterio similar al que se utilizaría para determinar la distancia de una bombilla de la que conocemos la luz que emite y la que ve el observador, se deduce la siguiente relación entre *M*, la magnitud aparente *m* (magnitud vista desde la Tierra, calculada como la media entre la magnitud máxima y minimo observada) y la distancia D (expresada en pc):

$$m - M = 5 \log(D/10) = 5 \log(D) - 5$$

- De las relaciones anteriores deducimos la siguiente ecuación que permite calcular la distancia a partir del período (**pd**) y la magnitud aparente (**map**) que son los que se pueden medir experimentalmente

$$\{\text{dist} \to 18.6209\, e^{0.460517\,\text{map}}\, \text{pd}^{0.5559999999999999}\}$$

Este método es aplicable para estrellas de nuestra galaxia y con grandes telescopios o telescopios espaciales sirve también para determinar la distancia de galaxias próximas si podemos encontrar en ellas cefeidas distinguibles. La calibración del método de las cefeidas se realiza comparando con el método del paralaje (a aquellas distancias en las que ambos métodos son aplicables).

Ejemplo: En Astroex (http://www.astroex.org) , perteneciente a la ESA/ESO, se pueden encontrar un conjunto de ejercicios básicos de astronomía que utilizan datos reales. En un de ellos se dan los resultados de las medidas realizadas con el telescopio Hubble en varias variables cefeidas situadas en la galaxia M100. En la medida de una de las estrellas se ha obtenido un periodo de 53.5 días y una magnitud aparente media de 24.5. Estrellas de esta magnitud solo son observables con grandes telescopios.

- La magnitud absoluta y la distancia, en pc, es

  $\{-6.15482, \{1.62542 \times 10^7\}\}$

  Equivale a 53 millones de años luz, es decir la luz que nos llegá salio de allí poco despues de la desaparición de los dinosarios. Es uno de los objetos más distantes que se han medido utilizando este método y sin embargo es una galaxia relativamente próxima.

Las estrellas vistas incluso con los mejores telescopios parecen, con muy pocas excepciones, simples puntos de luz cuyo borde es impreciso, por tanto no es posible una medida directa de su tamaño. El tamaño y la masa de una estrellas puede estimarse a partir de su distancia, magnitud aparente y espectro. En sistemas dobles también puede utilizarse las características de sus órbitas para calcular sus masas.

- Debajo se muestran las 10 estrellas mas másicas de nuestra galaxia (naturalmente pueden existir estrellas mas másicas no conocidas). La tabla indica el nombre de la estrella y al lado el número de masas solares. Hasta hace poco se consideraba que no era posible estrellas de masa mayor que Eta Carinae pero se han enconctrado al menos una que la duplica con creces. Estas estrellas supermásicas se cree que acabaran explitando en hipernovas dejando como residuo un agujero negro.

```
{{HIP81305, 43.}, {HIP82783, 43.}, {HIP116018, 44.},
 {HIP9886, 57.}, {HIP97446, 65.}, {Naos, 70.}, {HIP8626, 1.0×10^2},
 {HIP97434, 1.0×10^2}, {EtaCarinae, 1.2×10^2}, {R136a1, 265.}}
```

- La tabla muestra las 50 mayores estrellas comocidas y incluimo su comparación con el diametro del Sol. De ellas hay dos, de tamaño similar, que son facilmente visibles a simple vista: Antares, en la constelación de Scorpio y Betelgeuse, en la de Orión: Tienen un diametro 1500 veces mayor que el Sol. Si suponemos que el Sol es un balon del futbol (22 cm de diametro), alcanzarian un tamaño de un globo gigantesco de 165 m de radio (en la comparación que hemos hecho al principio vemos que si estuviesen situados en el lugar del Sol su tamaño iria más allá de la orbita de Jupiter). Y todavia podemos encontar estrellas de radio 5 veces mayor, en la misma comparación su tamaño incluiria a Urano.

```
{{HIP91373, 1.0×10^3}, {HIP89386, 1.2×10^3}, {HIP10995, 1.2×10^3}, {HIP22261, 1.2×10^3},
 {HIP25945, 1.2×10^3}, {HIP54021, 1.2×10^3}, {HIP6231, 1.2×10^3}, {HIP8025, 1.2×10^3},
 {HIP117887, 1.2×10^3}, {HIP42489, 1.2×10^3}, {HIP49611, 1.2×10^3}, {HIP70290, 1.2×10^3},
 {HIP92787, 1.2×10^3}, {Rasalgethi, 1.2×10^3}, {HIP10489, 1.3×10^3}, {HIP12302, 1.3×10^3},
 {HIP14537, 1.3×10^3}, {HIP104719, 1.4×10^3}, {HIP45924, 1.4×10^3}, {Antares, 1.5×10^3},
 {Betelgeuse, 1.5×10^3}, {HIP10829, 1.7×10^3}, {HIP108317, 1.7×10^3},
 {HIP10904, 1.7×10^3}, {HIP11284, 1.7×10^3}, {HIP117763, 1.7×10^3}, {HIP26718, 1.7×10^3},
 {HIP29425, 1.7×10^3}, {HIP51087, 1.7×10^3}, {HIP52991, 1.7×10^3}, {HIP53300, 1.7×10^3},
 {HIP62918, 1.7×10^3}, {HIP9211, 1.7×10^3}, {HIP29416, 1.7×10^3}, {HIP29450, 1.7×10^3},
 {HIP97446, 1.8×10^3}, {HIP38923, 2.2×10^3}, {HIP52562, 2.2×10^3}, {MuCephei, 2.2×10^3},
 {HIP35793, 2.3×10^3}, {HIP9582, 2.3×10^3}, {HIP13262, 2.5×10^3}, {HIP57057, 2.5×10^3},
 {HIP97434, 2.7×10^3}, {HIP8626, 3.5×10^3}, {HIP101023, 3.6×10^3}, {HIP117078, 3.6×10^3},
 {HIP100404, 4.3×10^3}, {HIP9886, 6.4×10^3}, {HIP116018, 7.9×10^3}}
```

## 3.5. Galaxias, cúmulos y los límites del universo

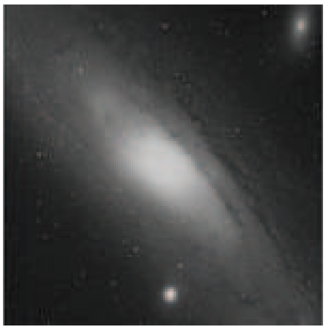
El astrónomo Hubble (en cuyo honor fue bautizado el famoso telescopio) alrededor de 1920 se dió cuenta de que el universo lo forman galaxias (hasta entonces se pensaba que todo el Universo era la Via Lactea) y que estas se separan entre sí. Lo dedujo pues observó que presentaban un desplazamiento al rojo (similar al efector Doppler que se produce en el sonido de dos coches que se alejan) al que mas adelante nos referimos.

- El radio de nuestra galaxia, la Via Lactea, es

  16. kpc

La distancia a las galaxias próximas se mide utilizando el método antes desdrito de las variables defeidas. Para distancias intergalacticas se emplea multiplos del parsec: 1 kpc que equivale a 1000 pc y un megaparsec (Mpc) 1 millón de parsec.

- La Galaxia importante más próxima es Andromeda, también conocida como M31,



- Está a una distancia del centro de nuestra galaxia de:

  788.9 kpc

Es decir: la distancia de nuestra galaxia a Andromeda equivale aproximadamente a 25 veces su diametro. Vimos a su vez que la estrella más proxima a nosotros está a 1.3 pc. Habría que recorrer un espacio equivalente a unas 600 000 veces lo que nos sepera de Alfa Centauri para llegar a los confines de Andromeda. ¡Cuanto espacio vacio!

Sorprendentemente ambas galaxias se aproximan (es asi pues pertenecen al mismo cúmulo y en este caso la atracción gravitatoria predomina sobre la expansión del espacio) y dentro de unos 3000 millones de años se iniciará un impacto entre ambas galaxias. Probablemente apenas se produciran choques entre estrellas, si es que hay alguno, sin embargo el efecto gravitatorio preducirá que de ambas galaxias se fundan resultan una nueva Galaxia (¿Lacteandromeda?)

¡Estamos refiriendonos a la galaxia grande más proxima! Hemos observado galaxias cuya luz salió de ellas hace 10000 millones de años , aunque hoy estaran mucho mas allá. Ahora veremos por qué.

Para galaxias distantes el método empleado se basa en medir la luminosidad aparente de las supernovas del tipo Ia. Las galaxias del Tipo Ia se producen en sistemas binarios donde una de las estrellas absorbe masa de la otra hasta que alcanza una masa determinada explotando (supernova) y emitiendo una luminosidad (magnitud absoluta) y un espectro de luz que es similar para todas las supernovas de este tipo. Comparando la magnitud absoluta calculada con la magnitud aparente (observada) puede deducirse la distancia. Piensese como analogía que hace explotar 1 kg de dinamita en la noche a 100 m de distancia, y que percibe la luz procedente de la exploxión tambien de 1 kg de dinamita a una distancia desconocida, a partir de la luminosidad medida en esta segunda explosión por comparación con la luminosidad de la explosión a una distancia conocidad podrá calcular la distancia. En el caso de las supernovas de Tipo Ia el método se ha calibrado a partir de las explosiones en galaxias próximas para la que se conocía la distancia por el método de las cefeidas variables que antes hemos descrito.

Hubble observó que las longitudes de ondas procedente de algunas galaxias, que se esperaban fuesen de longitud $\lambda_e$ realmente se veian con longitud $\lambda_{\text{obs}}$. En consecuencia:presentaban un desplazamiento que podemos expresar como: z = $\frac{\lambda_{\text{obs}}}{\lambda} - 1$. Se dió cuenta que es desplazamiento era proporcional a la distancia de la galaxia observada formulando lo que ahora conocemos como la ley de Hubble como sigue:

$$c\,z = H_0\,D$$

siendo

$z$ (desplazamiento al rojo)= $(\lambda_{\text{ob}} - \lambda_e)/\lambda_e$, siendo $\lambda_{\text{ob}}$ la longitud de onda observada y $\lambda_e$ la longitud de onda emitida; $z$ es por tanto un número adimensional.
$c$ la velocidad de la luz.
$D$ Distancia actual a la galaxia (en Mpc).
$H_0$ Constante de Hubble en el momento de la observación (en el trascurso de nuestra vida, y de nuestra civilización este valor es practicamente constante).

Conocido $z$ puede estimarse $D$ despejandola en la expresión anterior:

$$D = \frac{c\,z}{H_0}$$

- El valor de la constante de Hubble, $H_0$, es: 70 km/s/Mpc (kilomometros por segundo por megaparsec)
- Eso significa que si una galaxia como M100 a la que antes nos hemos referido que está a 16 Mpc es de esperar que se aleje de nuestra galaxia a a 16 Mpc×70 km/s/Mpc:

  $$\frac{1120\ \text{km}}{\text{s}}$$

  Naturalmente para el valor anterior es un valor promedio esperado para galaxias que se encuentren a esa distancia pero en la realidad además de a la fuerza de expansión existen otros factores como la interacción gravitatoria con otras galaxias que modifiquen esa velocidad. Ademas la velocidad anterior está referida al centro de nuestra galaxia, y no a la Tierra.

Para z<<1 (distancias relativamente próximas) se aplica la denominada Ley local de Hubble

$$z = \frac{h\,D}{3000\ (\text{Mpc})}\ \text{con}\ h = 0.7$$

Es conveniente aclarar que la ecuación de Hubble no es en si misma un método de medida de las distancias galácticas. Lo que refleja es la constante de expansión del Universo (el desplazamiento cosmológico se interpreta como una dilatación del espacio). Además para un valor de $z$ elevado hay que aplicar una corrección relativista. Para las galaxias próximas hay otros factores de desplazamiento, adicionales a la expansión del Universo, que influyen en el valor de $z$.

- A falta de una medida basada en Supernovas Tipo Ia (en media solo se producen dos por siglo y galaxia) puede estimarse la distancia de una galaxia a la Via Láctea utilizando z. Para distancias relativamante próximas puede utilizarse la Ley Local de Huble a la que noes hemos referido.Lo aplicamos a la galaxia IC1783 cuyo z es:

```
0.01117
```

$$D = \frac{3000\,z}{h} \text{ con } h = 0.7$$

- Por tanto la distancia en Mpc será:

$$\frac{\mathbf{3000 \times 0.01117}}{\mathbf{0.7}}$$

```
47.8714
```

La expansión del universo fue interpretada por el imaginativo físico Gamow (de la lectura de sus libros en mi niñez me llevó a interesarme por la Física antes de empezar el bachiller), y colaboradores, debida a un Big Bang: todo el universo, masa y espacio, estuvo en un determinado instante agrupado en un punto y explotó, no como una bomba. La explosión originó una expansión del universo que desde entonces persiste, incluso probablemente se esté acelerando.
El límite observable del espacio actual es aquel cuya luz fue emitida hace 13 800 millones de años, que es cuando según los datos del satélite Plank, se produjo el Big Bang. Debido a la expansión ocurrida desde entonces los objetos más lejanos se encontraran a 46 000 millones de años-luz ( 14 100 Mpc) que equivale a casi 1 000 000 de veces la distancia a la galaxia de Andrómeda. Hoy sabemos el Universo no es homogeneo: las galaxias se agrupan en cúmulos formando razimos con enormes espacios vacios de materia ordinaria que pueden llegar a tener 100 Mpc (piense que el diametro nuestra galaxia es menor de 0.04 Mpc). Realmente el Universo es grande, muy grande.

¿Tiene el universo un límite? El Universo se está expandiendo de forma acelerada y por tanto es cada vez mas grandes, hay zonas que se elejan de nosotros a más velocidad que la luz (la teoria especial de la relatividad pone un limite a la velocidad de la luz, de hecho es constante en el vacio, pero la teoria general de la relatividad permite que el espacio se expanda más rapido que la luz), en ese sentido si hay un límite mas lejos del cual no nos llega ni nos llegará ninguna luz. ¿Que hay mas allá de esa distancia? No lo sabemos.

## 3.6. Recursos adicionales

Los siguientes libros son unas introducciones excelentes y actualizadas de Astronomía y Astrofisica editadas por Pearson/Addison Wesley:

Astronomy Today por *Chaisson y McMillan*

An Introduction to Modern Astrophysics por *C. Ostlie*

Simulaciones animadas puden verse en : http://demonstrations.wolfram.com/topic.html?topic=Astronomy