

## Objetivos

En esta quincena aprenderás a:

- Comprender la importancia que ha tenido la Astronomía en el desarrollo de la Ciencia
- Comprender el enfrentamiento histórico entre libertad de investigación y dogmatismo.
- Conocer el Principio de Gravitación Universal.
- Explicar con este principio fenómenos como las mareas o el movimiento de los satélites y aplicarlo al cálculo de la masa de los astros.
- Entender la relación entre las propiedades de un astro y el peso de un cuerpo en su superficie.
- Comprender la estructura fundamental del Universo tal como la entendemos hoy en día.
- Valorar los avances científicos en la conquista del espacio

### Antes de empezar

1. La revolución de la Astronomía .... pág. 94  
El Universo de los antiguos  
El cielo de Ptolomeo  
La hipótesis de Copérnico  
Galileo confirma a Copérnico
2. La gravitación universal ..... pág. 97  
Las leyes de Kepler  
El principio de gravitación universal  
La aportación de Cavendish
3. Principio de gravitación ..... pág. 103  
Variación de la intensidad de la gravedad  
La masa de los astros  
Movimiento de los satélites  
Explicación de las mareas
4. Concepto actual del Universo ..... pág. 109  
El Sistema Solar  
Otras estrellas  
Galaxias  
El origen del Universo

### Ejercicios para practicar

Para saber más

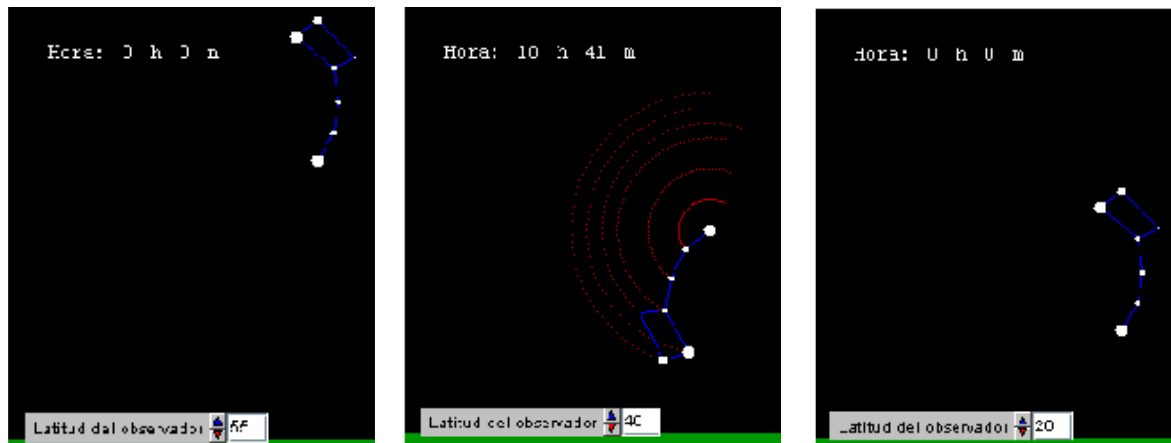
Resumen

Autoevaluación

Actividades para enviar al tutor



## Antes de empezar



### Investiga

Desde la más remota antigüedad el hombre ha sabido sacar utilidad a la observación del cielo. Las escenas celestes sobre este texto están extraídas de la simulación por ordenador y nos pueden ahorrar mucho trabajo de observación del cielo real, de forma que podemos llegar a las mismas conclusiones que nuestros antepasados rápidamente.

Después de examinarlas, trata de responderte las preguntas siguientes:

- ¿Cómo se mueven las estrellas a lo largo de la noche?
- ¿Por qué hay una que no parece moverse?
- ¿Qué interés tendrá esta estrella para nosotros?
- ¿Por qué las estrellas se ven en posición diferente desde diferentes latitudes?

Para responder a estas preguntas trata de "olvidar" lo que ya sabes por ser un estudiante del siglo XXI. Trata de partir de cero e imaginar qué consecuencias se pueden sacar de estas observaciones. De esta forma estarás en condiciones de comprender cómo veían el cielo nuestros antecesores y valorar su esfuerzo.

## 1. La revolución de la Astronomía

### El Universo de los antiguos

Los primeros astros que atrajeron la atención de nuestros ancestros fueron el Sol y la Luna. Por eso el día solar y el mes lunar (tiempo entre dos lunas llenas) son las unidades de tiempo empleadas en primer lugar por pueblos de cualquier parte del mundo.

Las estrellas fijas y su movimiento nocturno atrajeron después la atención de los hombres. De ellas aprendieron cómo navegar orientándose por la estrella más cercana al centro del movimiento celeste.

Hagamos constar que la Polar no ha sido siempre la misma estrella: hace unos 3000 años, para los egipcios la Estrella Polar era Thuban, de la constelación del Dragón.

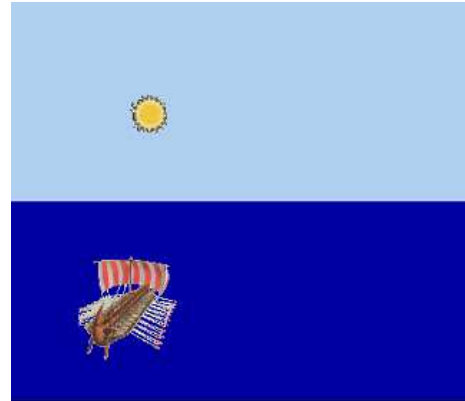
Además observaron que las estrellas cambiaban de posición si viajábamos a lejanas tierras. Sus observaciones de la navegación como se explica a la derecha, les llevaron finalmente a una conclusión clara:

La Tierra era una esfera, rodeada de otra esfera de estrellas girando a su alrededor.

### La importancia del zodiaco

Además del movimiento diario de la esfera de las estrellas fijas, nuestros antepasados observaron cómo el Sol cambiaba su posición diaria entre los astros. Su camino, llamado **Eclíptica**, atravesaba las conocidas constelaciones del Zodiaco. Aunque de origen babilónico, su división actual en doce constelaciones procede de los griegos. En la imagen adjunta podemos comprobar cómo se mueve el Sol por el Zodiaco a lo largo del año.

El calendario anual de 12 meses, usado ya por los egipcios; pero mejorado por Julio César, inventor del año bisiesto, es una consecuencia lógica de la observación del movimiento del Sol.



Los fenicios, grandes navegantes de la antigüedad, ya comprendían muy bien la esfericidad de la Tierra. Cuando sus barcos se alejaban, primero desaparecía el casco y finalmente la vela.



El Sol en verano, atravesando la constelación de Leo

# Astronomía y gravitación universal

## El cielo de Ptolomeo

Aunque los planetas se movían por la eclíptica, lo hacían de una forma irregular. El sabio alejandrino Claudio Ptolomeo explicó este movimiento como podemos ver en el modelo adjunto.

- Los planetas se mueven en círculos perfectos llamados **epiciclos**.
- El centro de los epiciclos sigue un círculo perfecto alrededor de la Tierra, llamado **deferente**.
- El centro de la deferente no coincide con la posición de la Tierra.
- Existe un punto, el **ecuante**, respecto al que el planeta se mueve siempre a la misma velocidad.

En el modelo notamos su obsesión por los círculos perfectos. Es la consecuencia lógica de las ideas sobre el Universo del filósofo griego Aristóteles, anterior a Ptolomeo y gran autoridad en el pensamiento filosófico del mundo grecolatino:

- El mundo **supralunar**, el de los astros, es perfecto y todos los movimientos son circulares.

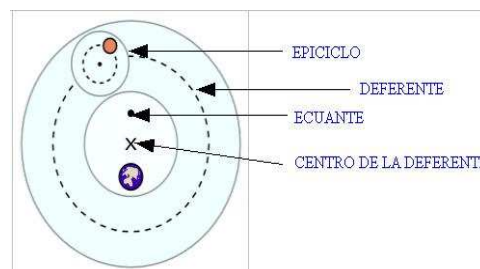
- El mundo **sublunar**, el habitado por los hombres, es imperfecto y todos los objetos se disponen en él según su mayor o menor peso.

La filosofía del Universo de Aristóteles y la astronomía de Ptolomeo dominaron el pensamiento humano hasta el Renacimiento.

## La hipótesis de Copérnico

Aunque no el primero en pensarlo (ya lo había hecho Aristarco, sin aceptación en la Grecia clásica), fue Nicolás Copérnico, en el siglo XVI, el que desarrolló una alternativa heliocéntrica al sistema de Ptolomeo.

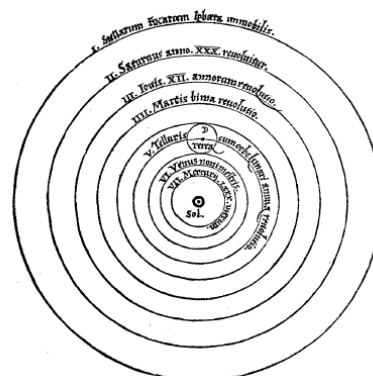
1. El Sol está inmóvil en el centro de las estrellas fijas, que no poseen ningún movimiento.
2. La Tierra y los demás planetas giran en órbitas circulares respecto al Sol.
3. La Tierra tiene además un movimiento de rotación diurno alrededor de su eje.
4. La Luna gira alrededor de la Tierra.



En esta imagen se aprecia la complejidad del modelo de Ptolomeo. Vemos cómo hacen falta varios círculos para describir el movimiento de los planetas. En realidad, cada movimiento curvilíneo se puede describir como una composición de movimientos circulares, aunque en muchos casos es más sencillo no realizar esta descomposición.

A Ptolomeo no le preocupaba si su modelo se ajustaba realmente al Cosmos real, lo que le interesaba era poder predecir con exactitud la posición de los planetas, lo que logró con un margen de precisión muy grande para su época.

En este aspecto, su modelo era tan correcto que permaneció indiscutible por 1500 años.



El dibujo superior, procedente de la obra de Copérnico "De revolutionibus orbium coelestium" ilustra sus ideas.

# Astronomía y gravitación universal

Con el modelo copernicano, los movimientos planetarios se explicaban con mayor facilidad; pero la idea de un sistema heliocéntrico, en una época en que comenzaba la reforma protestante, era muy polémica.

En ciertos pasajes bíblicos se afirma la inmovilidad de la Tierra. Si la Tierra se movía alrededor del Sol, se ponía en cuestión esos pasajes. Eso era bordear la herejía.

Por eso, su libro "Sobre las revoluciones de los orbes celestes" fue publicada por un discípulo sólo a la muerte de Copérnico, y con un prólogo, añadido por el discípulo, que explicaba que se trataba sólo de una hipótesis matemática. Es decir, la teoría heliocéntrica sería un truco geométrico para saber dónde están los astros en un momento dado, pero no se pretendía que correspondiera a la realidad física.

A pesar de tales precauciones, esta obra acabó en el índice de libros prohibidos.

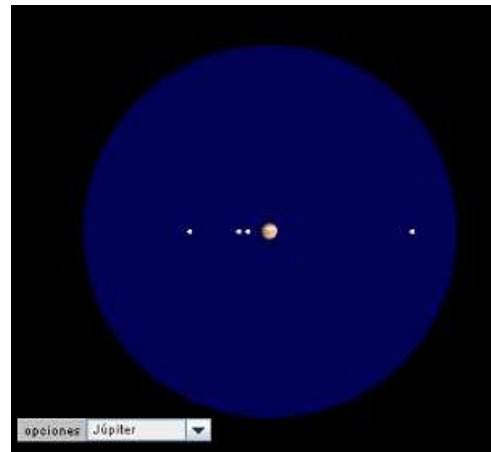
## Galileo confirma a Copérnico

Aunque Lippershey es el reconocido inventor del telescopio, Galileo Galilei fue el primero en emplearlo para la Astronomía (hacia 1610). En la escena de la derecha se muestra Júpiter y sus satélites como los veía Galileo. Las observaciones con su telescopio le llevaron a las conclusiones siguientes:

1. Al observar el cielo nocturno vio muchas más estrellas que a simple vista. Comprendió que había estrellas que no podíamos ver a simple vista porque estaban demasiado lejos. **Las estrellas están a diferentes distancias, no unidas a una superficie esférica como suponían los pensadores antiguos.**
2. La Luna presentaba montañas, valles y cráteres como la Tierra. **Era un planeta similar al nuestro, no el astro "perfecto" que imaginaba Aristóteles**
3. Venus presentaba fases como la Luna y cambiaba de tamaño. **Evidentemente Venus giraba alrededor del Sol, no de la Tierra.**
4. Júpiter presentaba 4 satélites que giraban a su alrededor. **Era la prueba notoria de que la Tierra no era el centro de todos los giros celestes.**

La explicación más simple y suficiente de un fenómeno es la más probable (idea conocida como "Navaja de Occam")

A veces resulta difícil que este principio se imponga a los prejuicios establecidos: No sólo la teoría heliocéntrica encontró serias dificultades para ser aceptada: en su momento la teoría de la evolución encontró parecidos obstáculos. Ya en el siglo XX, muchos físicos se opusieron durante décadas a la teoría de la Relatividad porque les parecía que contradecía su "sentido común", concepto en el que se suelen esconder muchos prejuicios.



Ahora ya había pruebas objetivas de la tesis heliocéntrica. Sin embargo las circunstancias políticas y religiosas no había cambiado; tras muchos avatares fue condenado por el Santo Oficio, obligado a abjurar de su verdad.

No obstante, a partir de la fecha de su condena, todos los científicos posteriores **sabían** que el sistema heliocéntrico era el correcto

## 2. La gravitación universal

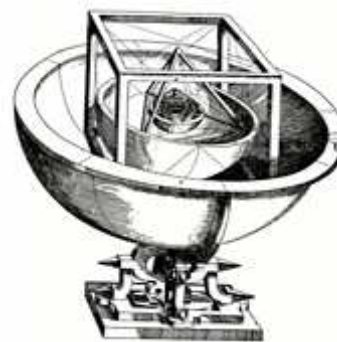
### Las leyes de Kepler

Contemporáneo de Galileo, Johannes Kepler también adoptó el modelo heliocéntrico. Al ser luterano y vivir fuera del alcance del Vaticano, pudo desarrollar libremente su investigación. Su hipótesis de partida era que los planetas orbitaban al Sol sobre círculos trazados en esferas perfectas, circunscritas a los poliedros regulares (tetraedro, hexaedro...). Como base de su trabajo tenía los muy precisos datos de observación de Tycho Brahe, el último geocentrista.

Estos datos no casaban con su hipótesis de partida. Tras muchos esfuerzos, su espíritu científico le llevó a aceptar su error inicial:

**Las órbitas de los planetas eran elípticas, no circulares.**

Finalmente estableció las leyes del movimiento planetario:



En la imagen superior se ilustra el modelo inicial de Kepler.

En su modelo Kepler parte de una esfera exterior, que representa la órbita de Saturno dentro de la cual va inscribiendo sucesivamente: un cubo, la esfera de Júpiter, un tetraedro, la esfera de Marte, un dodecaedro, la esfera de la Tierra, un octaedro y finalmente la esfera de Mercurio.

	<p>1ª Ley</p> <p>Los planetas giran en órbitas elípticas, ocupando el Sol uno de los focos de la elipse.</p>
	<p>2ª Ley:</p> <p>Los vectores de posición de los planetas barren áreas iguales en tiempos iguales.</p>
$\frac{T_1^2}{a_1^3} = \frac{T_2^2}{a_2^3} = \text{constante}$	<p>3ª Ley:</p> <p>Los cuadrados de los periodos orbitales de los planetas son proporcionales al cubo de los semiejes mayores de sus órbitas.</p>

La idea de Kepler, en la que el mundo real estaría representando figuras ideales, muy de acuerdo con la filosofía de Platón, parte simplemente del hecho de que vemos cinco planetas en el cielo (mercurio, Venus, Marte Júpiter y Saturno; cantidad que coinciden con el número de poliedros regulares. Esa coincidencia, fruto de que a simple vista no vemos Urano o Neptuno, le parecía que no podía ser casual.

Su teoría era elegante y bella; pero Kepler **nos demostró que no debemos encariñarnos demasiado con nuestras propias ideas si no podemos demostrarlas.**

Se puede considerar un mérito añadido a la memoria de este científico su capacidad para asumir sus propios errores y establecer la primacía de la observación experimental como criterio de la verdad de una hipótesis.

## EJERCICIOS RESUELTOS

- Mercurio tiene una velocidad de 60 km/s cuando pasa por el perihelio a 46 millones de kilómetros del Sol. Debemos calcular:
  - Velocidad en el afelio, a 70 millones de kilómetros del Sol.
  - Semieje mayor de su órbita.

Solución: a) Según la 2ª ley de Kepler:  $V_{\text{perihelio}} \cdot D_{\text{perihelio}} = V_{\text{afelio}} \cdot D_{\text{afelio}}$

Sustituyendo los datos:  $60 \cdot 46 = V_{\text{afelio}} \cdot 70 \rightarrow V_{\text{afelio}} = 60 \cdot 46 / 70 = 32,43 \text{ km/s}$

Nota: No es preciso el cambio de unidades porque los factores de cambio serían los mismos a cada lado de la igualdad.

b) El semieje mayor será la semisuma de la distancia en el perihelio y en el afelio:

$$a = \frac{D_{\text{perihelio}} + D_{\text{afelio}}}{2} = \frac{46 + 70}{2} = 58 \text{ millones de km}$$

- El semieje mayor de la órbita de Marte es de 225 millones de km y su periodo es de 1,9 años. Sabiendo que la órbita de Júpiter es casi circular, ¿cuánto valdrá su radio si el periodo es de 11,9 años?

Solución: El semieje mayor de una órbita circular es su radio, así que aplicando

La 3ª ley de Kepler:  $\frac{am^3}{Tm^2} = \frac{aj^3}{Tj^2}$  donde los datos "m" son los de Marte y los "j"

los de Júpiter:  $\frac{225^3}{1,9^2} = \frac{aj^3}{11,9^2}$  y despejando **aj = 764,50 millones de km**

- Un satélite geostacionario (siempre sobre el mismo punto del planeta) está a 36000 km sobre la superficie de la Tierra. ¿Qué periodo tiene otro situado a 3600 km de altura? Radio aproximado de la Tierra: 6400 km.

Solución: Suponemos que los dos satélites siguen órbitas circulares de radios:

$R_1 = 36.000 + 6400 = 42400 \text{ km}$   $r_2 = 3600 + 6400 = 10.000 \text{ km}$ . Además el periodo del satélite geostacionario es de 24 horas, para estar siempre sobre el mismo punto de la Tierra. Aplicando como antes la 3ª ley de Kepler

$$\frac{42400^3}{24^2} = \frac{10000^3}{T_2^2} \text{ y despejando } T_2 = 2,75 \text{ horas}$$



## El principio de gravitación universal

La leyenda dice que Newton descubrió el principio de gravitación universal reflexionando después de ver caer una manzana. La realidad es que Newton estudió concienzudamente los trabajos de Galileo sobre la caída de los cuerpos y de Copérnico y Kepler sobre el movimiento planetario antes de extraer sus propias conclusiones.

### ¿Qué tomó de Galileo?:

Galileo había estudiado la caída de los cuerpos tal como se estudia a la derecha.

Según los principios de la Dinámica que el mismo Newton había introducido, siempre que un cuerpo posee una aceleración, el cuerpo está sufriendo una fuerza en la misma dirección y sentido.

**Es decir que, todos los cuerpos experimentaban una fuerza hacia la Tierra, la fuerza que llamamos peso, dirigida hacia el centro terrestre Resulta lógico pensar que es la Tierra la que ejerce esta fuerza.**

Esta fuerza dependería de la masa del cuerpo y, según el principio de acción y reacción, cada cuerpo atraerá a su vez a la Tierra con la misma cantidad de fuerza con la que él es atraído.

¿Qué tomó de Copérnico? Copérnico había establecido el modelo heliocéntrico que Galileo había demostrado. Los planetas giran alrededor del Sol en órbitas elípticas, muchas veces casi circulares.

Esencialmente es un movimiento similar al de la honda de la derecha. Para que este movimiento se produzca hace falta una fuerza centrípeta:

$$F = \frac{m \cdot v^2}{R}$$
 donde  $m$  es la masa del objeto,  $v$  es su velocidad y  $R$  el radio de la Trayectoria.

La fuerza que actuaba sobre los planetas y que les atraía hacia el Sol debía ser producida por el mismo Sol. Una vez más, aplicando el principio de acción y reacción, esta fuerza debería tener una correspondencia recíproca: **cada planeta debe también atraer al Sol.**



Destaquemos que en el caso que nos ocupa no hay cuerda que transmita la fuerza. **La interacción entre planetas y Sol se produce a través del vacío, sin intermediarios.**

La manzana experimenta una aceleración  $g$  similar en cualquier latitud y longitud que nos encontremos. Esta aceleración apunta siempre hacia el centro de la Tierra. Aunque Galileo no podía determinarlo, hoy en día sabemos.



El movimiento de una piedra en una honda es similar al movimiento planetario. Una fuerza central, obliga al objeto a seguir una trayectoria circular.

En el caso de los planetas, la "mano" que empuja la honda es claramente el Sol. La diferencia fundamental es que no hay intermediario, no hay cuerda que transmita la fuerza. Cuando nos encontramos con fuerzas capaces de actuar a distancia, se dice que estamos en un "campo de fuerzas". En este aspecto Newton iba a romper también un viejo prejuicio, pues los pensadores anteriores jamás habían pensado en una acción a distancia.

# Astronomía y gravitación universal

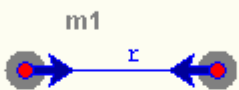
## ¿Qué tomó de Kepler?

De las leyes de Kepler, Newton dedujo las condiciones matemáticas que debía cumplir la fuerza gravitatoria. De las dos primeras leyes keplerianas se deduce, como se demostrará en cursos superiores de Física, que sobre los planetas actúa una fuerza central, es decir una fuerza dirigida siempre hacia un mismo punto: el Sol.

La tercera ley establecía una relación concreta entre los periodos y los semiejes mayores de las órbitas que la fuerza gravitatoria debía cumplir

## Y, finalmente, esta es la síntesis de Newton:

**PRINCIPIO DE GRAVITACIÓN UNIVERSAL**  
m1= masa cuerpo 1  
m2=masa cuerpo 2  
r = distancia



**Dos cuerpos se atraen con una fuerza proporcional a sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos.**

$$F = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

G es una constante de proporcionalidad llamada "Constante de gravitación universal"

Con su principio de gravitación universal Newton había encontrado **una ley igual para todos los cuerpos del Universo.**

La barrera entre cielos y Tierra estaba rota. Podíamos suponer que todos los cuerpos del Universo estaban sujetos a las mismas leyes físicas.

Como pronto veremos, el principio de gravitación universal nos permitía llegar a conocer características de los cuerpos celestes que nunca antes el hombre había pensado llegar a conocer. Así, hemos llegado a conocer la masa de planetas, soles y galaxias, a determinar su velocidad y tamaño, a calcular el peso de los cuerpos en su superficie.

## **Observemos como la nueva fuerza cumple la 3ª ley de Kepler:**

Supongamos que  $m_1$  es la masa del Sol,  $m_2$  la de un planeta y  $r$  es la distancia entre ellos. Admitiremos que, de forma aproximada, la trayectoria del planeta es circular. La fuerza centrípeta que actúa sobre el planeta es la gravitatoria, así que:

$G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} = \frac{m_2 \cdot v^2}{r}$  donde  $v$  es la velocidad del planeta:

$v = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{T}$  siendo  $T$  el periodo de la órbita. Reemplazando este valor en la expresión anterior, simplificando y agrupando  $r$  y  $T$  en el mismo lado de la ecuación:

$\frac{r^3}{T^2} = \frac{G \cdot m_1}{4 \pi^2}$  El segundo término de esta ecuación es una constante. Así deducimos que el valor del cubo del radio entre el cuadrado del periodo es una constante.

Las órbitas planetarias no son circulares sino algo elípticas. Cambiando el radio por el semieje mayor de la elipse, obtenemos literalmente la tercera ley de Kepler. Observamos también como la constante depende de la masa solar, de forma que para cada astro habrá una constante diferente entre semiejes y periodos orbitales, dependiendo de la masa del astro central.

## EJERCICIOS RESUELTOS

1. La Luna tiene aproximadamente 1/80 de la masa terrestre, mientras que el Sol es aproximadamente 330.000 veces más masivo que nuestro planeta. Por otro lado, la Luna está a unos 380.000 km de la Tierra y el Sol a 150 millones de km. Comparemos la fuerza que estos dos astros ejercen sobre nuestro planeta.

Solución: Llamaremos  $M$  a la masa de la Tierra, de forma que la del Sol será: 330.000  $M$  y la de la Luna 1/80  $M$ . La distancia entre Tierra y Sol se podrá expresar como  $1,5 \cdot 10^8$  km y entre Tierra y Luna:  $3,8 \cdot 10^5$  km.

Según el principio de gravitación, la fuerza del sol sobre la tierra será:

$$F_{sol} = G \cdot \frac{330.000M \cdot M}{2,25 \cdot 10^{16}} \text{ y la de la Luna: } F_{luna} = G \cdot \frac{1/80 \cdot M \cdot M}{14,44 \cdot 10^{10}} \text{ dividiendo ambas}$$

expresiones y simplificando obtenemos:

$$\frac{F_{sol}}{F_{luna}} = 173,01$$

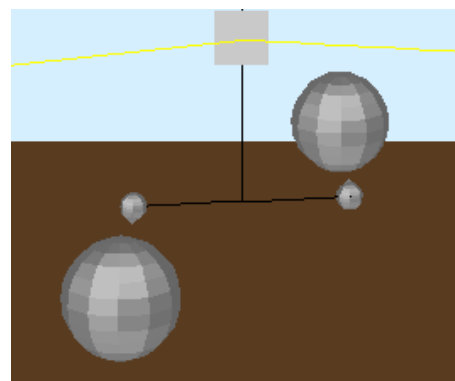
## La aportación de Cavendish

¿Por qué no se percibe la fuerza de gravitación entre cuerpos pequeños? La respuesta está en la pequeñez de la constante  $G$ .

Cavendish logró medirla mediante el dispositivo de la escena adjunta: dos grandes esferas de plomo atraen a dos pequeñas con muy poca fuerza, pero sí la suficiente para torcer el hilo del que están suspendidas. De este modo un espejo cambia ligeramente la posición de un rayo de luz sobre una pantalla. Así Cavendish pudo medir la fuerza entre las esferas de plomo y calcular  $G$ .

La constante de gravitación universal es muy pequeña:  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$

Su significado físico es la fuerza con que se atraen dos cuerpos de 1 kg de masa situados a 1 m de distancia. Observemos que esta fuerza es tan pequeña que no existe dinamómetro capaz de medirla directamente. El trabajo de Cavendish logró una gran precisión para las posibilidades técnicas del siglo XVII; aunque su experiencia se ha realizado con mejores instalaciones y más precisión, su valor sigue siendo esencialmente correcto.

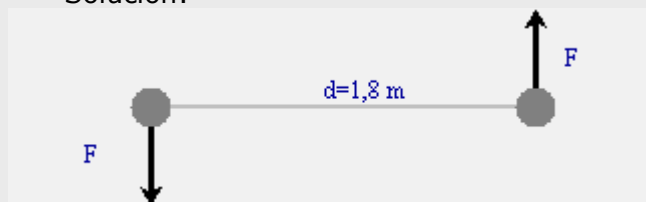


Representación esquemática del aparato de Cavendish. Si se situaba una pantalla a varios metros de distancia, la acción del par de fuerzas era capaz de desviar unos milímetros el punto luminoso sobre la pantalla.

## EJERCICIOS RESUELTOS

1. En la experiencia de Cavendish, dos esferas de 150 kg atraían a dos esferas de 0,75 kg, unidas por una varilla de 1,8 m suspendida de un hilo de 0,0003 N·m de módulo de torsión. Si cada par esfera grande - esfera chica está separado 0,5 m y dando por conocido el valor de G, ¿que ángulo girará la varilla?

Solución:



Las fuerzas de las esferas grandes sobre las pequeñas crean un par de fuerzas sobre la varilla.

El significado del módulo de torsión es que el par de fuerzas  $F \cdot d$  es igual al módulo de torsión por el ángulo que gira la varilla en radianes.

El valor de cada fuerza es:  $F = 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{150 \cdot 0,75}{0,25} = 3 \cdot 10^{-8} \text{ N}$

Como  $F \cdot d = M_{\text{torsión}} \cdot \text{ángulo}$

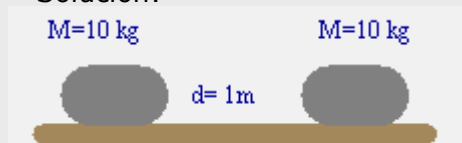
$\text{ángulo} = \frac{3 \cdot 10^{-8} \cdot 1,8}{0,0003} = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ radianes}$ . Recordando que  $\pi$  radianes son  $180^\circ$ , este

ángulo será de:

$$\text{ángulo} = \frac{1,8 \cdot 10^{-4} \cdot 180}{3,14} = 0,0103^\circ$$

2. Dos bloques de 10 kg situados a 1 m de distancia, reposan sobre una superficie de coeficiente de rozamiento  $\mu=0,1$ . Compara el valor máximo de la fuerza de rozamiento con la fuerza gravitatoria entre ambos cuerpos

Solución:



La máxima fuerza de rozamiento vale:  $F_r = \mu \cdot m \cdot g = 9,8 \text{ N}$

La fuerza gravitatoria entre los dos cuerpos es:  $F_g = 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{10 \cdot 10}{1} = 6,67 \cdot 10^{-9} \text{ N}$

Para comparar estas fuerzas, nos basta dividir una por la otra:

$$\frac{F_r}{F_g} = 1,45 \cdot 10^9$$

Según esto, el valor máximo de la fuerza de rozamiento es mal de mil millones de veces superior a la fuerza Gravitatoria.

Este hecho nos puede hacer comprender por qué, para que la fuerza de la gravedad sea claramente perceptible, alguno de los cuerpos implicados debe poseer una masa de rango planetario.

## 3. Consecuencias del principio de gravitación

### Variación de la intensidad de la gravedad

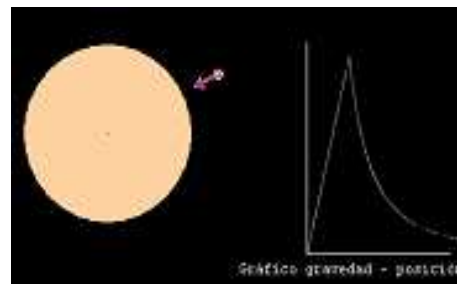
En la quincena 3, dedicada a las fuerzas, aprendimos que el peso de un cuerpo es  $P = m \cdot g$  donde  $m$  es la masa del cuerpo y  $g$  es la intensidad de la gravedad, es decir la fuerza con que la Tierra atrae a un kilogramo de masa. En caída libre en el vacío esta intensidad es idéntica a la aceleración del movimiento. Para Galileo, que estudiaba caídas a pequeñas alturas,  $g$  es una constante

Si en la expresión de la fuerza que un cuerpo de masa  $M$  ejerce sobre otro de masa  $m$ , calculamos la fuerza por unidad de masa, obtenemos:

Si en la expresión de la fuerza que un cuerpo de masa  $M$  ejerce sobre otro de masa  $m$ , calculamos la fuerza por unidad de masa, obtenemos:

$$g = \frac{F}{m} = \frac{G \cdot \frac{M \cdot m}{r^2}}{m} = G \cdot \frac{M}{r^2}$$

Donde vemos que  $g$  ya no es una constante, sino que depende de la distancia al centro del planeta. A pequeñas alturas sobre la superficie esta variación resulta imperceptible, por lo que es lógico que Galileo no la notara. Como ilustramos en la imagen de la derecha, la realidad es un poco más compleja.



En esta escena vemos como varía la intensidad de la gravedad con la distancia al centro de un planeta. El valor máximo corresponde a la superficie del planeta. En el centro del planeta es nula, como lo será también a infinita distancia del planeta

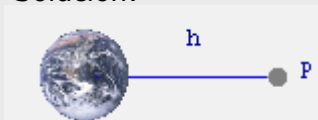
La variación entre la superficie del planeta y el infinito viene dada por la expresión que se demuestra en el texto adjunto.

La variación de la gravedad dentro del planeta no se puede justificar con nuestros conocimientos actuales. Bástenos saber que fue el matemático-físico Gauss quien hizo posible conocer cómo varía la gravedad en el interior de la Tierra.

### EJERCICIOS RESUELTOS

1. Sabiendo que el radio de la Tierra es de unos 6400 km y que la gravedad superficial es de 9,8 N/kg, debemos calcular a qué altura sobre la superficie la gravedad será  $g'=9$  N/kg

Solución:



La gravedad en la superficie es:  $g = G \cdot \frac{M}{R^2}$  siendo  $M$  la masa

de la Tierra y  $R$  su radio. Del mismo modo, a la altura  $h$ :  $g' = G \cdot \frac{M}{(R+h)^2}$  Dividiendo

ambas expresiones, simplificando y reemplazando valores, obtenemos:

$$\frac{9}{9,8} = \frac{6400^2}{(6400+h)^2} \text{ Despejando la altura } h \text{ llegamos a } h=278,38 \text{ km}$$

Como vemos, hace falta ascender a cientos de kilómetros para que el descenso de la intensidad de la gravedad empiece a ser apreciable. No es extraño que Galileo no lo percibiera.

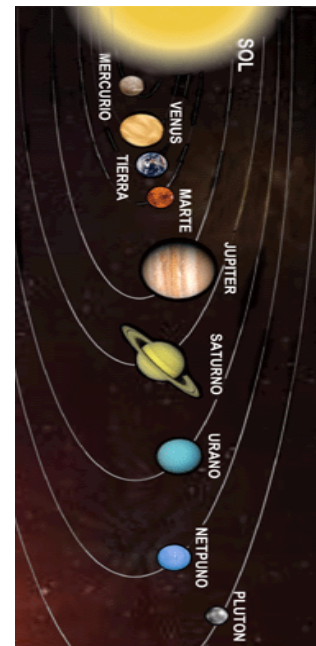
# Astronomía y gravitación universal

## La masa de los astros

Las nuevas leyes en la Física no sólo explican hechos observados sino que muchas veces pueden aplicarse para obtener nuevos conocimientos no previstos al principio.

El principio de gravitación, por ejemplo, nos permite calcular la masa de un astro si sabemos los efectos que produce sobre otro.

Por ejemplo, podemos calcular la masa de un planeta sabiendo la intensidad de la gravedad en la superficie y su radio:



Para determinar la masa de un planeta nos bastan:

**El radio del planeta en Km:**  **El peso de 1 kg de masa en su superficie en N (valor de g):**

Como la intensidad de la gravedad es:

$$g = G \cdot \frac{M}{R^2} \text{ donde } M \text{ es la masa del planeta y } R \text{ es su radio, despejando:}$$

$$M = \frac{g \cdot R^2}{G} = 5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg}$$

Estos datos corresponden a los de nuestro planeta, Tierra.

Hagamos notar que dos planetas con igual radio pero diferente gravedad tendrían masas diferentes y también densidades muy diferentes. En nuestro Sistema solar hay claramente dos tipos de planetas, los rocosos con densidades próximas a la terrestre y los gigantes gaseosos (como Júpiter o Saturno) con densidades próximas a las del agua.

Para conocer la densidad de un planeta no es imprescindible medir la gravedad en su superficie.

También es posible medir la masa de un astro a partir de los datos orbitales del movimiento de un satélite.

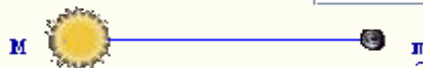
A continuación empleamos este procedimiento para medir la masa de nuestro Sol.

Observemos que la masa obtenida es cientos de miles de veces mayor que la masa de un planeta como la Tierra.

A esto se debe que los planetas que rodean otras estrellas sean tan difíciles de detectar.

Para determinar la masa de un sol partiremos de los datos orbitales de un planeta en una órbita aproximadamente circular:

**Periodo (años):**  **Radio (10<sup>6</sup> km):**



Sobre el planeta la fuerza centrípeta es:  $F_c = \frac{m \cdot v^2}{R}$

Esta fuerza es realmente la de la gravedad así que

$$\frac{m \cdot v^2}{R} = G \cdot \frac{M \cdot m}{R^2} \text{ Y como } v = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{T}$$

$$\text{despejando } M = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot R^3}{G \cdot T^2} = 1,99 \cdot 10^{30} \text{ kg}$$

# Astronomía y gravitación universal

El peso de los cuerpos es diferente según el planeta en que estemos. Las variables importantes son masa y radio del planeta y la masa del cuerpo.



La intensidad de la gravedad es:  $g = G \cdot \frac{M}{R^2}$

donde M es la masa del planeta.

En nuestro caso:  $g = 24,37 \text{ N/kg}$   
El peso será  $P = m \cdot g = 1218,93 \text{ N}$   
O bien en kp:  $124,38 \text{ kp}$

Igualmente, a partir de la masa de un astro podemos definir sus efectos sobre otro. Veamos, por ejemplo, cómo calcular el peso de un cuerpo de 50 kg de masa en un planeta como Júpiter:

De formas similares a los cálculos aquí realizados, se han calculado masas de planetas, estrellas y aún de galaxias.

En los ejercicios siguientes incluso llegaremos a calcular las características de un agujero negro.

## EJERCICIOS RESUELTOS

1. Io es un satélite de Júpiter que gira alrededor del planeta en órbitas casi circulares de 422.000 km de radio con un periodo de 42,5 horas. Determinar la masa de Júpiter.

Solución: Tal como hacíamos al calcular la masa del Sol:  $\frac{m \cdot v^2}{R} = G \cdot \frac{M \cdot m}{R^2}$  donde m es

la masa de Io, M es la de Júpiter, R es el radio de la órbita y v es la velocidad de Io:

$v = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{T}$  siendo T el periodo. De 42,5 horas, es decir:  $T = 42,5 \cdot 3600 = 153000 \text{ s}$ .

Reemplazando datos, simplificando y despejando M:

$$M = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot R^3}{T^2} = 2,85 \cdot 10^{26} \text{ kg}$$

2. El Sol gira alrededor del centro de la galaxia, situado a 30.000 años-luz en unos 200 millones de años. Los científicos han demostrado que ese movimiento depende tan solo de la masa de la galaxia más cercana al centro que el propio Sol. Intentemos calcular esa masa galáctica.

Solución: Cambiemos unidades. 1 año-luz =  $300.000.000 \cdot 365,24 \cdot 3600 = 9,467 \cdot 10^{15} \text{ m}$ , así que el radio de la órbita solar será  $R = 2,84 \cdot 10^{20} \text{ m}$

El periodo del Sol en su movimiento galáctico es

$T = 200.000.000 \cdot 365,24 \cdot 3600 = 6,31 \cdot 10^{15} \text{ s}$

Procediendo como antes, la masa de la galaxia será:  $M = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot R^3}{T^2} = 3,41 \cdot 10^{41} \text{ kg}$

Observemos que esta masa equivale a cientos de miles de millones de soles

# Astronomía y gravitación universal

## Movimiento de los satélites

Cuando lanzamos al cielo un satélite artificial, su comportamiento en órbita es similar al de los planetas respecto al Sol. Con la simulación de la versión para ordenador podemos extraer las siguientes conclusiones.

Para cualquier distancia al centro de un planeta hay una velocidad para cual el satélite tiene una órbita circular. Si en la escena usamos una altura inicial de 500 km podremos comprobar que esa velocidad debe ser de unos 7,6 km/s



Para calcularla:

$$\frac{m \cdot v^2}{R} = G \cdot \frac{M \cdot m}{R^2} \quad \text{simplificando}$$

$$\text{y despejando: } v = \sqrt{G \cdot \frac{M}{R}}$$

Si la velocidad se hace mayor la órbita se hace progresivamente elíptica y se aprecian las dos primeras leyes de Kepler.

Cuando la velocidad se hace excesiva, el satélite se escapa. Esto ocurre cuando la velocidad es igual o mayor que:

$$V_{\text{esc}} = \sqrt{2 \cdot G \cdot \frac{M}{R}} \quad \text{es decir, un 41,4\% más de la}$$

velocidad para darle una órbita circular.

En nuestra escena el satélite situado a una altura de 500 km se escapará si la velocidad es mayor de 10,8 km/s

Es muy posible que hayamos oído hablar de agujeros negros. Ahora ya estaríamos capacitados para indicar qué es un agujero negro: se trata de un cuerpo tan denso que la velocidad de escape de él es mayor que la de la luz, de forma que ni la radiación electromagnética puede escapar de su interior.



En la imagen superior vemos una típica trayectoria de satélite alrededor de la Tierra. Su movimiento se atiene exactamente a las mismas leyes que cumplen los planetas cuando giran en torno al Sol.

Si deseamos saber más sobre satélites, podemos bajar Home Planet

(<http://www.fourmilab.ch/homeplanet/>), programa gratuito que sigue el movimiento de cientos de satélites. Además nos muestra el mapa celeste y su evolución a lo largo del día y del año.

En el apartado "Para saber más" de esta quincena se proponen también interesantes programas para el aprendizaje de la Astronomía.

Es importante que recordemos las llamadas velocidades cósmicas.

$$v_{\text{orb}} = \sqrt{G \cdot \frac{M}{R}} \quad v_{\text{esc}} = \sqrt{2 \cdot G \cdot \frac{M}{R}}$$



## EJERCICIOS RESUELTOS

1. Un satélite de comunicaciones está en órbita circular geostacionaria. Debemos calcular su altura sobre la superficie terrestre, recordando que el radio de la Tierra es unos 6400 km y la masa del planeta es aproximadamente  $6 \cdot 10^{24}$  kg

Solución: El periodo del satélite será de  $T=24 \text{ h} = 24 \text{ h} \cdot 3600 \text{ s/h} = 86400 \text{ s}$

La fuerza centrípeta que actúa es la gravitatoria, es decir:  $\frac{m \cdot v^2}{R} = G \cdot \frac{M_p \cdot m}{R^2}$  donde  $M_p$

es la masa del planeta,  $m$  la del satélite y  $R$  el radio de la órbita. Como  $v = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{T}$  podemos sustituir este valor en la expresión anterior, simplificar y despejar  $R$ :

$R = \sqrt[3]{\frac{G \cdot M_p \cdot T^2}{4 \cdot \pi^2}} = 4,3 \cdot 10^7 \text{ m} = 43.000 \text{ km}$  Restando el radio de la Tierra, obtenemos que la altura del satélite es aproximadamente  $43000 - 6400 = \mathbf{36.600 \text{ km}}$

2. La velocidad de escape de la Tierra es 11,3 km/s ¿Cuál será la velocidad de escape del planeta Júpiter, cuya masa es unas 300 veces la terrestre y un radio 11 veces mayor que el de la Tierra?

Solución: Llamaremos  $M$  a la masa de la Tierra y  $R$  a su radio. De esta forma, los datos de Júpiter serán  $M_j = 300 \cdot M$  y  $R_j = 11 \cdot R$ . Y las respectivas velocidades de escape serán:

$11,3 = \sqrt{2 \cdot \frac{G \cdot M}{R}}$  y  $V_j = \sqrt{2 \cdot \frac{G \cdot 300M}{11R}}$  Dividiendo ambas expresiones y simplificando:

$\frac{V_j}{11,3} = \sqrt{\frac{300}{11}} = 5,22 \rightarrow V_j = 5,22 \cdot 11,3 = \mathbf{59 \text{ km/s}}$

3. Un agujero negro es un cuerpo tan denso que la velocidad de escape es mayor que la de la luz (300.000 km/s). Para estudiarlos es precisa la teoría de la Relatividad; no obstante, calculemos que diámetro tendría desde el punto de vista clásico un agujero negro con la masa de la Tierra ( $6 \cdot 10^{24}$  kg).

Solución: La velocidad de la luz:  $300.000 \text{ km/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ .

Sustituyendo valores en la expresión de la velocidad de escape:  $V_{esc} = \sqrt{2 \cdot \frac{G \cdot M}{R}}$

obtenemos:  $3 \cdot 10^8 = \sqrt{2 \cdot \frac{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 6 \cdot 10^{24}}{R}}$  operando y despejando  $R = 0,0044 \text{ m}$

Por tanto, el diámetro será  $2 \cdot R = 0,0088 \text{ m}$  (algo menos de 1 mm).

**Nota:** Los cálculos relativistas (los correctos para este caso) difieren de los clásicos en un factor 2. No obstante, con el cálculo clásico nos podemos hacer una idea del increíble grado de condensación que debe alcanzar la materia en uno de estos exóticos objetos. También obtenemos una conclusión correcta: el diámetro de un agujero negro está en proporción directa a su masa. Parecen abundar los agujeros negros de unos pocos km de diámetro, con una masa algo superior a la del Sol.

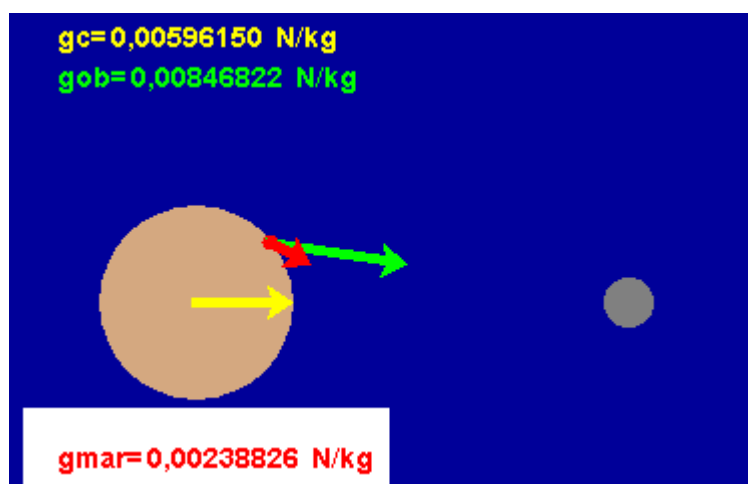
# Astronomía y gravitación universal

## Explicación de las mareas

Todo el mundo sabe que el nivel del mar asciende y desciende periódicamente. Se trata del fenómeno de la marea. En la escena de la derecha se simulan las mareas

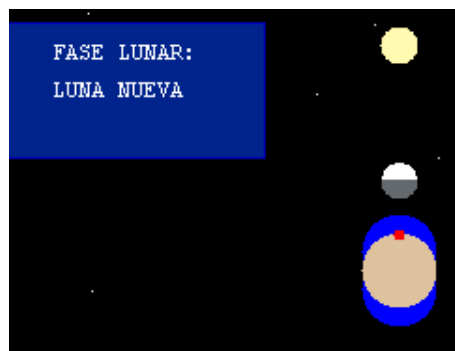
Observando las mareas en un punto de la Tierra podremos justificar estas afirmaciones:

1. Desde un punto de la superficie terrestre observamos normalmente dos pleamares (mareas altas) y dos bajamares cada día.
2. Cuando en un punto hay pleamar la luna está cerca del cenit del observador o en el punto diametralmente opuesto.
3. Las horas de pleamar se van retrasando algo menos de una hora al día debido a los  $12^\circ$  que se traslada la Luna cada día.
4. No todas las pleamares son iguales. Las pleamares mas altas (con mayor coeficiente de marea) se dan cuando la Luna y el Sol están alineados (Luna Llena o Luna Nueva) y las más bajas corresponden a la posición de cuadratura entre Sol, Luna y Tierra (Cuartos Creciente y Menguante).
5. En la marea debe influir la gravedad lunar en mayor grado que la gravedad solar.



En estas observaciones se intuye que la gravedad es responsable del fenómeno. Para comprender de qué forma actúa debemos examinar esta simulación.

La marea que ejerce la Luna sobre la Tierra se debe a la **diferencia entre la gravedad creada por el satélite en la superficie y el centro de nuestro planeta.**



En la escena observamos el Sol, la Luna en fase de luna Nueva y la Tierra con unos abultamientos azules representando la marea alta. El punto rojo representa un observador sobre la superficie de la Tierra. Mientras la Tierra rota, el observador percibe como baja la marea, para alcanzar la marea llena de nuevo a media noche.

A medida que la Luna vaya girando alrededor de la Tierra las mareas altas se desplazan, de forma que cada día la hora de marea alta se retrasa algo menos de una hora. La razón es que, cada día, la Luna da  $1/29$  de vuelta a la Tierra, de forma que la hora de marea se adelantará unos  $24/29$  de hora.



Cuando la Luna está en cuarto, las fuerzas del Sol y la Luna actúan perpendicularmente. Esto se traduce en un menor nivel de la marea alta.

En esta explicación no hemos tenido en cuenta que la Luna tiene una trayectoria elíptica, lo que altera ligeramente las horas y niveles de marea alta.

## 4. Concepto actual del Universo

### El Sistema Solar

Hoy en día nuestros conocimientos del Sistema Solar abarcan muchos más objetos que los que conocía Galileo: descubrimos los planetas Urano y Neptuno, así como el planeta enano Plutón y miles de asteroides de todos los tamaños, la mayor parte de ellos entre las órbitas de Marte y Júpiter o más allá de Neptuno (en la zona llamada cinturón de Kuiper). Todos estos astros muestran gran variación de tamaños, desde el de guijarros hasta más de 100.000 km de diámetro; y de movimientos, con órbitas de menos de 100 días a cientos de años de periodo.



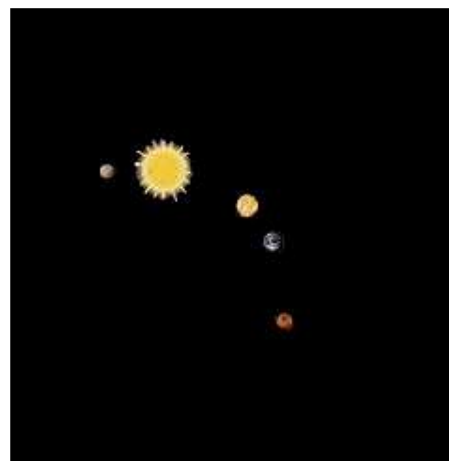
Mención especial, merecen los cometas, residuos de la formación del sistema solar hace 4700 millones de años, formados sobre todo por hielo y polvo. Uno de ellos sirvió para que Halley, al predecir su retorno según las leyes de Newton, confirmara de forma espectacular la teoría gravitatoria.

No debemos pensar que nuestro sistema sea único. Hoy en día se conocen decenas de planetas orbitando otras estrellas.

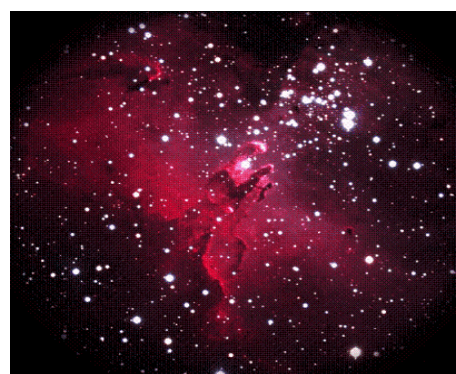
### Otras estrellas



Nuestro Sistema Solar nació hace unos 5000 millones de años en el interior de una nebulosa como la de la fotografía. En las zonas más oscuras de ella, el gas y polvo que contiene, alcanza la densidad suficiente para que la atracción gravitatoria entre sus partículas tienda a unirlos, haciendo posible el nacimiento de nuevos soles, con o sin planetas alrededor. A medida que la masa de la nebulosa se contrae va girando con mayor rapidez. La fuerza centrífuga resultante tiende a darle forma de disco.



En la imagen vemos el Sol y los llamados planetas interiores o rocosos (Mercurio, Venus, Tierra y Marte). Las proporciones entre ellos son correctas, aunque están muy exageradas respecto al tamaño solar y las distancias entre los astros. Si hubiéramos querido incluir los gigantes Júpiter, Saturno y Neptuno en la misma escala, el dibujo debería ser unas veinte veces mayor.



“Los pilares de la Creación”, lugar de nacimiento estelar. En este tipo de objetos se pueden encontrar los discos de formación de estrellas.

# Astronomía y gravitación universal

En la zona central de la nebulosa, donde se acumula casi toda la masa, nace la estrella. En el disco que lo rodea, si no hay circunstancias que lo impidan pueden formarse planetas, asteroides, cometas... incluso, a veces, otras estrellas menores formándose así los sistemas llamados estrellas dobles

Aunque nazcan del mismo modo, las estrellas pueden ser muy diferentes en sus propiedades. Hay ostensibles diferencias de tamaño, temperatura y color.

La masa de la estrella determina su tamaño, color, temperatura y duración.

## Galaxias

En 1924 Edwin Hubble, con ayuda de un telescopio de 250 cm de diámetro, demostró que ciertos objetos brumosos eran en realidad **galaxias**, auténticos universos-ísla de **miles de millones de soles, a los que mantiene unidos la fuerza de gravedad común**. Nuestra propia galaxia es similar a la que destaca en la foto, la galaxia de Andrómeda

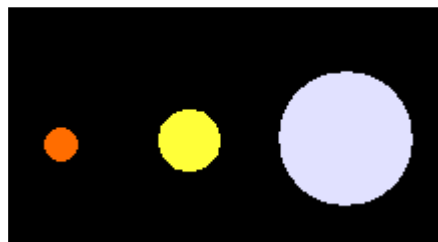
Nuestra galaxia tiene una masa de unos **150.000 millones de soles y un diámetro de más de 100.000 años-luz**

Recordemos que 1 año-luz es la distancia que recorre la luz en un año, aproximadamente 10 billones de km.

Existen muy diferentes tipos de galaxias. Nuestra galaxia y la de Andrómeda son dos galaxias de tipo Sb (espirales de núcleo medio). También hay galaxias de tipo Sa (un gran núcleo) y Sc (de núcleo muy pequeño). Otras galaxias tienen forma elipsoidal.

Algunas galaxias no tienen forma definida y se clasifican como irregulares. La masa total y el estado de movimiento inicial de los gases que dieron origen a una galaxia determinan su forma inicial que puede alterarse posteriormente al interactuar con otras galaxias.

No debemos formarnos una idea estática de las galaxias, no sólo pueden alterar su forma por la interacción cercana de otras; también es posible que una galaxia absorba a otra más pequeña o que dos galaxias similares se fundan en un cuerpo diferente.



En este dibujo se muestran soles de diferentes colores y tamaño. Los astros más masivos tienen una mayor temperatura y su color tiende al azul.



En la foto podemos ver, junto a la galaxia espiral de Andrómeda, dos galaxias elípticas, una casi redonda a la izquierda de Andrómeda (clase E0) y otra a la derecha más oblonga (clase E4). Se trata de galaxias satélites, similares a las que posee nuestra propia galaxia.

Es interesante señalar que Andrómeda se dirige actualmente hacia nuestra propia galaxia, por lo que posiblemente colisionarán dentro de unos miles de millones de años.

## El origen del Universo

En 1928 Hubble comprobó algo asombroso, salvo las galaxias de nuestro grupo local, todas presentan un claro efecto Doppler de desplazamiento al rojo proporcional a la distancia de cada galaxia hasta la nuestra.

Descomponiendo la luz blanca con un prisma o una red de difracción se observa el arco iris. Se ha dispersado la luz según su frecuencia: mayor en el color azul y menor en el rojo.

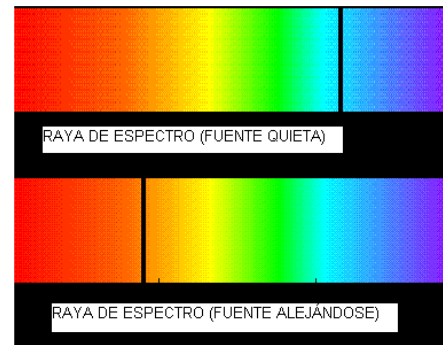
Si dispersamos de esta forma la luz de una estrella o de una galaxia, se observan unas líneas negras en el espectro. Corresponden a la absorción de energía luminosa por sustancias que rodean la fuente luminosa. Estas rayas son características de los diversos elementos y moléculas y nos han permitido identificar los componentes de los astros.

En las galaxias distantes Hubble observó claramente el desplazamiento al rojo que indica que se alejan de nosotros. Más aún, la cuantía del desplazamiento al rojo es aproximadamente proporcional a la distancia a que se encuentra la galaxia, que es tanto como decir que **la velocidad con que se alejan de nosotros es proporcional a esa distancia**.

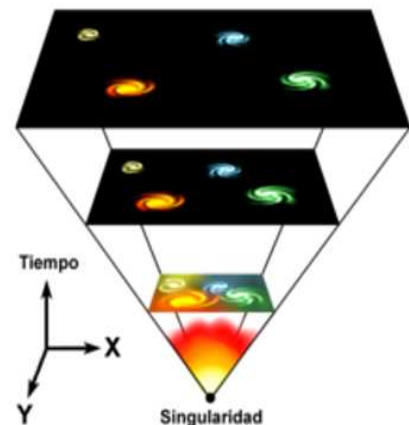
Este fenómeno dio pie a la idea de un Universo en expansión a partir de un estado primitivo de tamaño puntual, densidad infinita y temperatura extremada. El descubrimiento posterior de una radiación de fondo, procedente de esa era inicial y las fotos obtenidas desde satélites espaciales que muestran un Universo más denso, confirman el modelo del Big Bang.

Hoy en día creemos que nuestro Universo nació en una gran explosión hace 13.700 millones de años y parece probable que no se detenga nunca.

En el último decenio los astrofísicos han encontrado huellas de una nueva fuerza fundamental de repulsión entre cuerpos que actuaría a grandes distancias y sería responsable de que la expansión universal se esté acelerando.



En la imagen vemos una raya oscura en el espectro luminoso. Cuando una de estas rayas aparece desplazada respecto a su posición habitual, se debe ordinariamente al efecto Doppler debido al movimiento de la fuente. Si la fuente se aleja de nosotros, la raya espectral se desplaza hacia el rojo.



En este esquema la singularidad indica el punto de densidad infinita y temperatura inimaginable del que pensamos que nació nuestro Universo. En las imágenes superiores se aprecia la expansión del Universo.



## Para practicar

### 1. ¿Qué se sabía del Universo en la antigüedad?

Selecciona las respuestas correctas a cada una de estas preguntas (puede haber más de una correcta en cada caso):

#### 1.1. ¿Qué querían decir cuando hablaban de la esfera de las estrellas fijas?

- a) Que las estrellas se mueven al mismo tiempo que la Tierra, de forma que siempre se encuentran sobre el mismo lugar.
- b) Que las estrellas permanecen siempre quietas, sin ningún movimiento observable.
- c) Que mantienen su posición relativa entre sí pero giran alrededor de la Tierra en algo menos de un día.
- d) Se referían tan solo a que siempre tienen el mismo brillo, no a su movimiento.

#### 1.2. El movimiento de las estrellas durante la noche resultaba importante porque

- a) era una prueba de agudeza visual, ya que apenas se movían en toda la noche.
- b) la estrella más cercana al centro del movimiento permanecía inmóvil marcando el Norte a los navegantes.
- c) las estrellas que se ven cada noche son totalmente diferente de las del día anterior.
- d) varía de velocidad de unos días a otros.

#### 1.3. ¿Tiene el Zodíaco alguna importancia para la Astronomía?

- a) El Zodíaco es un concepto de Astrología, no tiene que ver con la Astronomía.
- b) El Zodíaco es el conjunto de todas las constelaciones del cielo.
- c) Sí, es el conjunto de constelaciones que atraviesa la eclíptica.
- d) Sí, es el conjunto de constelaciones que atraviesan los planetas vistos desde la Tierra.

#### 1.4. ¿Cómo podían apreciar que la Tierra era redonda?

- a) Observando la altura de los astros a diferente latitud.
- b) Viendo a los barcos perderse en el horizonte.
- c) No lo sabían, pensaban que la Tierra era plana.
- d) Navegando alrededor del planeta y volviendo al punto de partida.

#### 1.5. El movimiento de ciertos astros por el Zodíaco era importante porque

- a) el Zodíaco está formado por las estrellas más brillantes.
- b) era una característica común del Sol, la Luna y los cinco planetas visibles a simple vista.
- c) permitía a los navegantes definir la posición Norte.
- d) nos permitía definir el calendario.

## 2. El Universo de Aristóteles y Ptolomeo.

Selecciona las respuestas correctas a cada una de estas preguntas (puede haber más de una en cada caso)

### 2.1. ¿Cuáles de estas afirmaciones podrían ser suscritas por estos dos pensadores?

- a) El mundo sublunar es imperfecto, mientras que el supralunar es perfecto.
- b) El mundo supralunar es imperfecto, mientras que el sublunar es perfecto.
- c) Las órbitas de los planetas son elipses perfectas
- d) Las órbitas de los planetas son circulares

### 2.2. ¿Cuáles de estos conceptos son propios de Ptolomeo?

- a) Epíclidos.
- b) Deferente.
- c) Ecuante.
- d) Antiecuante.
- e) Preferente.
- f) Referente.

### 2.3. ¿Tuvo alguna importancia el modelo de Ptolomeo?

- a) Sí. Aunque era una teoría compleja, predecía correctamente las posiciones planetarias.
- b) No. El modelo estaba tan alejado de la realidad que no podía realizar predicciones correctas.
- c) Sí, porque es el modelo de sistema planetario que seguimos hoy en día.
- d) No, sólo fue un sistema útil para los astrólogos.

3. El año medio de Venus dura 225 días y la distancia media de la Tierra al Sol es de 150 millones de km. Hay que calcular: a) La distancia media de Venus al Sol (órbita casi circular); b) La razón entre las fuerzas gravitatorias del Sol. Datos: constante  $G=6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \text{kg}^{-2}$ ; masa solar:  $2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ ; masa Tierra:  $6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$ .

4. Ganímedes, satélite de Júpiter, gira en una órbita circular de 10.780.000 km. de radio y un periodo de 7,15 días. Si Calixto tiene un periodo orbital un 75% mayor que Ganímedes ¿cuánto valdrá el radio de la órbita de Calixto?

5. El cometa Halley pasa en su perihelio a 85,5 millones de km. del Sol., mientras que el afelio se produce a 5265 millones de km. Si cuando está en el perihelio su velocidad es de 30 km./s, a) ¿cuánto valdrá el semieje mayor de su órbita?; b) ¿qué velocidad tendrá en el afelio?

6. ¿A qué altura sobre la Tierra una persona que tiene 60 kg. de masa pesará únicamente 20 kp? Datos: Radio terrestre: 6400 km.; gravedad superficial: 9,8 N/kg.

7. Calcula el peso en kilopondios sobre la Luna de una persona de 50 kg. de masa. Datos: masa de la Luna:  $7,35 \cdot 10^{22} \text{ kg}$ ; Diámetro lunar: 3500 km.;  $G=6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \text{kg}^{-2}$ .

8. Un astronauta de 80 kg. de masa pesa 50 kp en un planeta de 5.000 km. de radio. ¿Qué masa tiene el planeta?  $G=6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \text{kg}^{-2}$ .

9. Un satélite se mueve en órbita circular a 1000 km. de altura. ¿Cuánto tarda en recorrer su órbita? Datos:  $G=6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \text{kg}^{-2}$ ; radio de la Tierra: 6400 km; gravedad superficial: 9,8 N/kg.

10. Un satélite se mueve en una órbita circular de 10.000 km. de radio y otro tiene una órbita de 10.000 km. de perigeo (punto más próximo a la Tierra) y 20.000 km. de apogeo (punto más distante a la Tierra) ¿Qué relación hay entre los periodos de los dos?

11. La distancia media de la Tierra al Sol es de 150.000.000 km y el periodo es de un año. ¿Cuánto valdrá la velocidad de escape de un satélite para que se escape de la atracción solar desde la órbita terrestre?  $G=6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \text{kg}^{-2}$

# Astronomía y gravitación universal

**12. Naturaleza de las estrellas.** Selecciona las respuestas correctas a cada una de estas preguntas (puede haber más de una respuesta correcta en cada caso):

**12.1. ¿Podríamos afirmar que todas las estrellas son iguales?**

- a) Sí, sólo se diferencian en el brillo aparente según la distancia a que se encuentran.
- b) No, aunque todas tienen la misma temperatura, se diferencian claramente por su tamaño y color.
- c) No, se pueden diferenciar en tamaño, brillo, temperatura y color.
- d) Sí, las diferencias entre ellas son únicamente efectos ópticos debidos a la atmósfera.

**12.2. ¿Existe alguna característica especial que condicione las restantes propiedades estelares?**

- a) La composición química.
- b) La distancia a nuestro planeta.
- c) La masa de la estrella.
- d) La galaxia en que se encuentren.

**12.3. ¿Cómo condiciona la masa de una estrella su temperatura?**

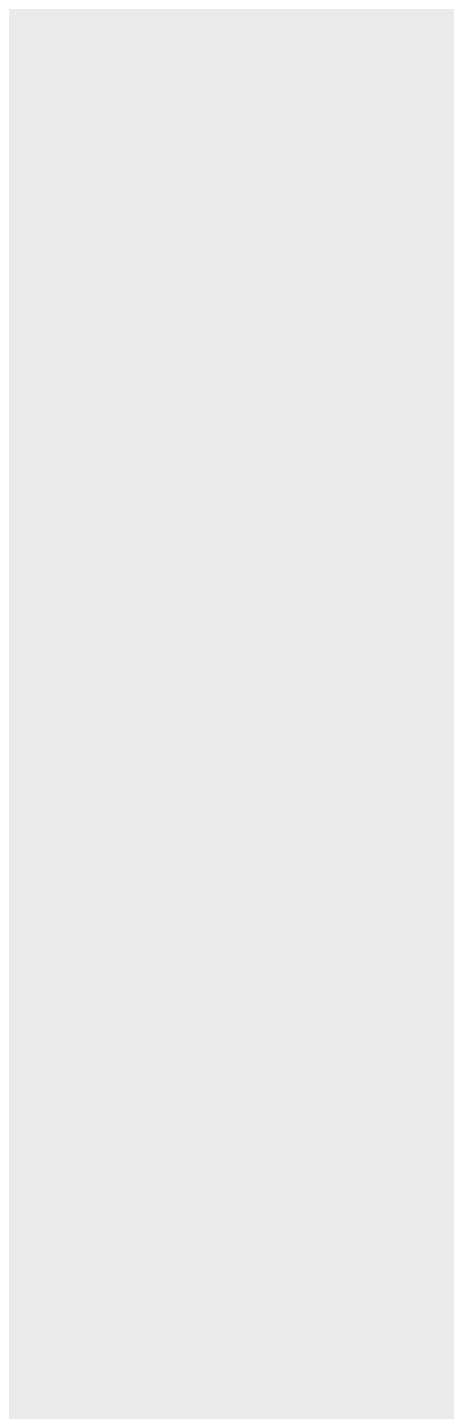
- a) La masa es una propiedad absolutamente independiente de la temperatura, así que no la condiciona en absoluto.
- b) Las estrellas con mayor masa son más difíciles de calentar, por lo que alcanzarán temperaturas menores.
- c) Una mayor masa aumentará la fuerza de gravedad y con ello la velocidad de los átomos lo que eleva la temperatura.
- d) Cuanto mayor es la masa de una estrella, más absorbe la energía de su núcleo y menos temperatura alcanza en la superficie.

**12.4. ¿Hay alguna relación entre masa de una estrella y su duración como astro brillante?**

- a) Sí, las estrellas masivas gastan su energía mucho más rápidamente, así que acaban antes su vida estelar.
- b) Sí, una masa mayor significa una mayor reserva de energía, por lo tanto las estrellas masivas durarán más.
- c) No hay ninguna relación entre masa y duración de una estrella, del mismo modo que tampoco la hay en el caso de las personas.
- d) No puede haber ninguna relación porque todas las estrellas duran lo mismo: son eternas.

**12.5. ¿Cuáles de estas afirmaciones son correctas?**

- a) Las estrellas más rojas pueden brillar mucho más tiempo que las azules.
- b) Las estrellas más azules pueden brillar mucho más tiempo que las rojas.
- c) Las estrellas más calientes presentan un color rojizo.
- d) Las estrellas más calientes presentan un color azulado.





**13. Cuestiones cosmológicas.** Selecciona las respuestas correctas a cada una de estas preguntas (puede haber más de una respuesta correcta en cada caso):

**13.1. Según nuestros conocimientos actuales, ¿tiene sentido hablar de un nacimiento del Universo?**

- a) Sí, aunque no tenemos ninguna noción sobre el momento en que comenzó a existir.
- b) Sí, se le atribuyen 13.700 millones de años.
- c) Sí se le atribuyen 150.000 millones de años.
- d) No, atribuir un origen al Universo es tan absurdo como atribuir un origen al tiempo.

**13.2. ¿Qué pruebas existen de la gran explosión original que dio origen a nuestro Universo?**

- a) El alejamiento de las galaxias descubierto por Hubble.
- b) La radiación de fondo de ondas de radio detectables en todas las direcciones.
- c) El número de estrellas, continuamente en aumento, al nacer constantemente en las galaxias.
- d) Ninguna prueba convincente, se trata sólo de una hipótesis filosófica.

**13.3. ¿En qué consiste el efecto Doppler aplicado al estudio de las galaxias?**

- a) Explica la naturaleza de las galaxias al permitir conocer su contenido.
- b) Explica la desviación al rojo de los espectros de las galaxias como debidos a que se alejan.
- c) Explica la desviación al rojo de los espectros de las galaxias como debidos a que se acercan a nosotros.
- d) Nos lleva a saber que las galaxias se alejan de nosotros con una velocidad proporcional a su distancia.

**13.4. ¿Por qué casi todos los científicos han abandonado la teoría del estado estacionario?**



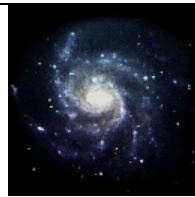

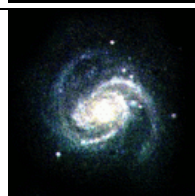
- a) Porque no podía explicar la expansión del Universo.
- b) Las fotos que demuestran que en el pasado las galaxias estaban más próximas.
- c) No es correcto, la teoría del estado estacionario es tan válida como la del Big Bang.
- d) Porque no explica la radiación de fondo, proveniente de la gran explosión.

**13.5. ¿Hay algún límite físico al alcance de nuestros telescopios?**

- a) No, podemos ir construyendo telescopios cada vez más grandes para llegar a mayores distancias.
- b) El alcance está limitado a 13700 millones de años luz.
- c) Si tuviéramos un telescopio de gran alcance, los objetos más próximos tapanían a los más lejanos como en un bosque.

d) No podemos porque la atmósfera siempre limitará el alcance de nuestros telescopios.

**14. Asocia cada galaxia con su tipo:**

	A	1- Sc
	B	2- Sa
	C	3- E0
	D	4- Sb
	E	5- E3



## Para saber más

### Temas complementarios:

El desarrollo del conocimiento cosmológico del hombre es una parte muy importante de nuestro desarrollo científico: No es posible que se pueda estudiar por completo en una quincena.

Te apuntamos a continuación temas de actualidad relacionados con él y algunas direcciones de Internet donde puedes encontrar información asequible:

- Objetos exóticos: quasars (<http://es.wikipedia.org/wiki/Cuasar>), estrellas de neutrones ([http://es.wikipedia.org/wiki/Estrella\\_de\\_neutrones](http://es.wikipedia.org/wiki/Estrella_de_neutrones)), agujeros negros ([http://es.wikipedia.org/wiki/Agujero\\_negro](http://es.wikipedia.org/wiki/Agujero_negro))
- Nociones de Teoría de la Relatividad ([http://es.wikibooks.org/wiki/Teor%C3%ADa\\_de\\_la\\_Relatividad\\_para\\_Aficionados](http://es.wikibooks.org/wiki/Teor%C3%ADa_de_la_Relatividad_para_Aficionados)) y Mecánica cuántica (<http://es.wikipedia.org/wiki/Cu%C3%A1ntica>)
- Ideas sobre la Cosmología del siglo XX1 ([http://es.wikipedia.org/wiki/Big\\_Bang](http://es.wikipedia.org/wiki/Big_Bang))
- Últimas noticias sobre Astrofísica (<http://agaudi.wordpress.com/category/ciencia/cosmologia/>).
- Especulaciones sobre el fin del Universo ([http://es.wikipedia.org/wiki/Destino\\_%C3%BAltimo\\_del\\_Universo](http://es.wikipedia.org/wiki/Destino_%C3%BAltimo_del_Universo))

Existen también algunas revistas especializadas, escritas en castellano y con buen nivel divulgativo. Citaremos como ejemplos Tribuna de Astronomía y Espacio. Indiquemos también que asociaciones de Astronomía como Albireo, Agrupación astronómica de Madrid o Agrupación Astronómica de Sabadell (entre otras) publican regularmente boletines con noticias astronómicas y astrofísicas.

### Si deseas practicar la Astronomía

La Astronomía es una actividad apasionante con millones de aficionados en el mundo entero. En contra de lo que muchas personas creen, no es una afición necesariamente cara.



Para comenzar es bueno tener una dirección de Internet donde puedas solucionar tus dudas y ver como trabajan otros aficionados: (<http://www.astrored.org/>).



Un programa de software libre capaz de enseñarnos los objetos celestes de forma realista, para el lugar de la Tierra, fecha y hora que le indiquemos (<http://www.stellarium.org/es/>)



## Recuerda lo más importante

### La importancia de la Astronomía

El estudio del cielo fue trascendental para poder medir el tiempo y hacer calendarios fiables, algo trascendental para pueblos agrícolas, y para poder orientarse en los largos viajes de los pueblos exploradores y comerciantes.

### La cumbre de la Astronomía antigua

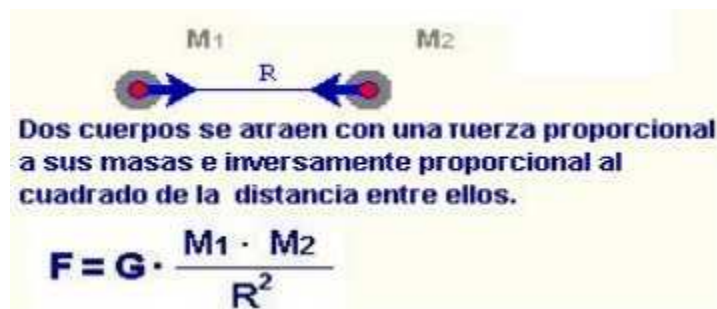
Desde el punto de vista Filosófico, **Aristóteles**, con su mundo perfecto de los astros e imperfecto de los hombres, representa el punto más elaborado de la concepción cosmológica de la antigüedad.

En lo científico, **Ptolomeo**, con sus epiciclos y deferentes fue capaz de predecir con posición el movimiento aparente de los planetas.

En los siglos XVI y XVII, **Copérnico, Galileo, Kepler y Newton** rompen estas concepciones y fundan la Ciencia actual

### La síntesis de Newton

Newton tomó como punto de partida el estudio de la caída de los cuerpos de **Galileo**, la teoría geocéntrica de **Copérnico** y las leyes sobre los movimientos elípticos de los planetas de **Kepler**. Sobre estas bases introdujo su famoso principio de gravitación universal:



Esta ley supuso la ruptura de la barrera entre cielos y Tierra: era un principio válido para todos los cuerpos del Universo. Con ella hemos podido predecir el movimiento de los astros, medir su masa y construir satélites meteorológicos, de comunicaciones o de investigación.

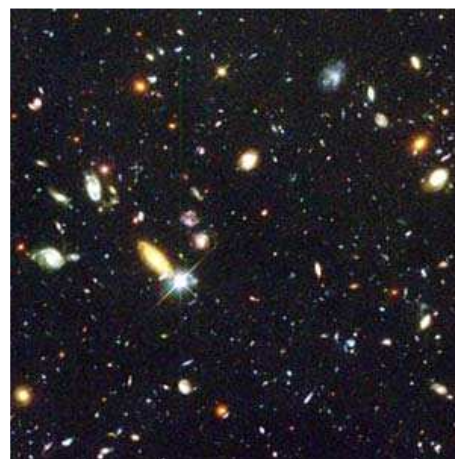


Foto del telescopio espacial Hubble donde aparecen algunas de las más lejanas y viejas galaxias que se conocen

### El Cosmos hoy

Sólo la introducción de nuevas teorías físicas como la mecánica relativista y la cuántica, así como de nuevos y muy poderosos telescopios pudieron permitir a los seres humanos superar en el siglo XX el modelo newtoniano. Así pudimos comprender la realidad de un universo en expansión desde hace 13700 millones de años y con un futuro aún incierto.

## Autoevaluación



1. ¿Cuál de estas afirmaciones es correcta:
  - 1.- La Estrella polar es la más brillante.
  - 2.- La Estrella Polar es la primera que se ve.
  - 3- Tiene una altura que depende de la longitud del observador.
  - 4- Tiene una altura que depende de la latitud del observador.
2. ¿Cuál de estos científicos estableció primero el sistema geocéntrico: 1-Galileo; 2-Kepler; 3-Copérnico; 4-Ptolomeo
3. Newton estableció el principio de gravitación universal:
  - 1-reflexionando después de ver caer una manzana
  - 2- a partir de los trabajos de Galileo, Copérnico y Kepler
  - 3-deduciéndolo de los propios principios de la Dinámica
  - 4-por casualidad como todos los grandes descubrimientos
4. Compara la fuerza con que se atraen dos masas de 5 kg. separadas 13 m. con la que ejercen dos masas de 23 kg. separadas 144 m.
5. El periodo orbital de un cometa es 5 años, mientras que el semieje mayor de su órbita es 132 millones de km. ¿Cuánto vale el periodo de un cometa cuyo semieje orbital mayor es de 209 millones de km.?
6. Un satélite gira en órbitas circulares de 6991 km. de radio ¿Cuánto vale su periodo orbital? Datos:  $G=6,67 \cdot 10^{-11}$ ; masa de la Tierra:  $6 \cdot 10^{24}$  kg.
7. La masa de un planeta es 2,45 veces la terrestre y su radio es 2,05 veces el de la Tierra. ¿Cuántos kilopondios pesará allí un astronauta de 70 kg de masa?
8. Un asteroide pasa a 262 millones de km. del Sol en su afelio y al 10% de esta distancia en el perihelio ¿Si en el perihelio tiene una velocidad de 25 km./s, qué velocidad tendrá en el afelio?
9. Las mareas que se perciben en la Tierra se deben:
  - 1- a la agitación producida por el movimiento terrestre.
  - 2- a la acción de la gravedad lunar sobre la superficie.
  - 3- a la diferencia entre la acción de la gravedad lunar ejercida sobre el centro y un punto de la superficie de la Tierra.
  - 4- a ninguna de las causas anteriores.
10. ¿Cuál de estas causas sugirió que el Universo se expande?:
  - 1- El movimiento de los espectros de las galaxias al rojo.
  - 2- El movimiento de los espectros de las galaxias al azul.
  - 3- El tamaño enorme de las galaxias y su gran velocidad.
  - 4- La investigación sobre las fuerzas intergalácticas.

## Soluciones de los ejercicios para practicar

- 1-C  
2-B  
3-C, B  
4-A, B  
5-B, D
- 1-A, D  
2-A, B, C  
3.-A
- a) 108,64 millones de km.  
b) 48312,59
- 16,55 días
- a) 2675,25 millones de km.  
b) 0,57 km./s
- 4680 km.
- 8,16 kp
- $2,76 \cdot 10^{24}$  kg.
- 6313 s
- 1,84
- 42179,27 m/s
- 1-C  
2-C  
3-C-  
4-A  
5-A, D
- 1-B  
2-A, B  
3-B, D  
4-B, D  
5-B, C
- A→2  
B→3  
C→1  
D→3  
E→4

## Soluciones AUTOEVALUACIÓN

1. Correcta la 4
2. Correcta la 3
3. Correcta la 2
4. 5,79
5. 9,96 años
6. 1,61 horas
7. 40,8 kp
8. 2,50 km./s
9. Correcta la 3
10. Correcta la 1

No olvides enviar las actividades al tutor ►

## ACTIVIDADES DE ESO

Nombre y apellidos del alumno:		Curso: 4º
Quincena nº: 5	Materia: Física y Química	
Fecha:	Profesor de la materia:	

- 1.- Un planeta gira en órbitas circulares de 1000 millones de km de radio alrededor de una estrella. Invierte en ese giro un total de 10 años. Calcula la masa de la estrella.
  
- 2.- Calcula la velocidad de escape en km/s y el radio de la órbita en km para un satélite que gira en órbitas circulares de 12 horas de periodo alrededor de la Tierra.
  
- 3.- Sabiendo que el radio medio de la Tierra es 6371 km y que la gravedad superficial es de 9,8 N/kg, debemos calcular la altura, en km sobre la superficie, a la que la gravedad se reduce a la mitad.
  
- 4.- Apunta el nombre de los descubridores de cada uno de estos hechos:
  - a) Órbitas elípticas de los planetas.
  - b) Valor de la constante de Gravitación Universal.
  - c) Ley de alejamiento de las galaxias.