

El cielo estrellado en una noche despejada es un espectáculo al que poca gente puede dejar de prestar atención; multitud de estrellas, unas más brillantes, otras menos, algunas casi imperceptibles a simple vista, se agrupan formando figuras más o menos regulares que conocemos con el nombre de constelaciones: Osa Mayor, Osa Menor, Orión, Cisne, Auriga... En ese cielo destacan también unos objetos mucho mayores que las estrellas y bastante más brillantes, los planetas. Venus y Júpiter son especialmente llamativos por su brillo y Marte destaca por su luz rojiza.

Si observáramos las estrellas durante cierto tiempo, no tardaríamos en descubrir una serie de movimientos:

- Los cuerpos celestes salen por el este y se ponen por el oeste.
- Todas las constelaciones parecen girar alrededor de una estrella, no excesivamente brillante, que se encuentra situada en la Osa Menor: la estrella Polar.
- El movimiento de los planetas es mucho más complicado, se mueven en relación al fondo de estrellas siguiendo una trayectoria bastante extraña (ver figura) que consiste en una especie de bucles (de ahí su denominación, **planeta**, que en griego significa "errante")



Trayectoria de Marte (2007)

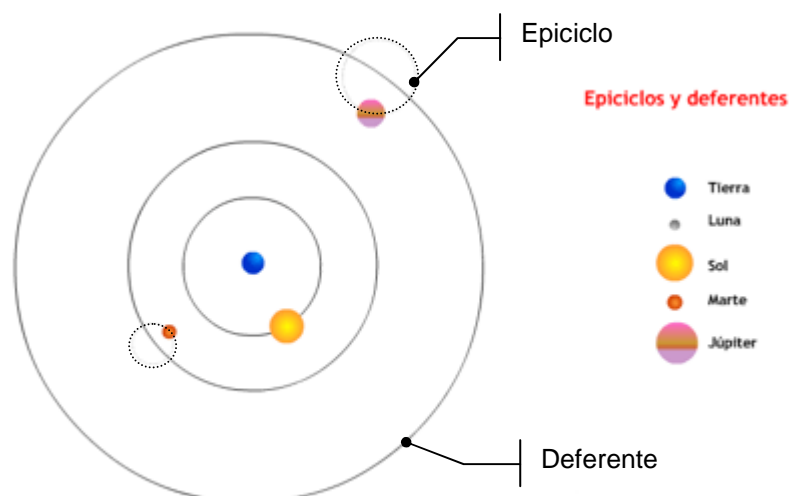
La trayectoria del planeta describe un bucle. El movimiento de avance se va haciendo cada vez más lento hasta que prácticamente se detiene (21-11) y a partir de ahí comienza a desplazarse en sentido contrario (movimiento retrógrado), acelerando primero, frenando después, hasta que recupera la trayectoria inicial.

Como es lógico todo esto trató de ser explicado dando lugar a las primeras teorías cosmológicas.

Platón (428 - 347 a.C.) fue el primero en proponer, por razones fundamentalmente estéticas, que los cuerpos celestes deberían moverse siguiendo órbitas circulares con movimiento uniforme, ya que este tipo de movimiento se consideraba perfecto ("sin principio ni final").

Claudio Ptolomeo (85- 165), perfeccionó el modelo de **universo geocéntrico** que habían propuesto **Eudoxo** (390-337 a. C) y **Aristóteles** (384-322 a.C). Según este modelo la Tierra se encontraba en el centro del Universo y el Sol y los planetas giraban alrededor situados en esferas transparentes. Para explicar el movimiento de los planetas el modelo incorporaba esferas más pequeñas en rotación, llamadas **epiciclos**, unidas a la esfera mayor, **deferente**.

En la esfera más exterior estaban situadas las estrellas. Ajustando el tamaño de las esferas y las velocidades de rotación se lograba una descripción de las órbitas planetarias muy aproximada a la realidad.



Ptolomeo escribió en el 145 (d.C) un tratado de astronomía que tituló **Sintaxis** o **Tratado Matemático** en el que explicaba pormenorizadamente su modelo y la forma de predecir las posiciones de los planetas, el Sol y la Luna. También incorporaba numerosas tablas con datos necesarios para los cálculos. El libro tuvo una gran difusión entre los astrónomos (¡durante catorce siglos!) hasta el punto de que los árabes le dieron el sobrenombre de ("*Al Magesti*", el más grande). El tratado de Ptolomeo pasó a la historia de la astronomía con el nombre de **El Almagesto**.

Hay que decir que el modelo matemático de Ptolomeo permitía determinar las posiciones de los planetas con errores de 2' (dos minutos de arco). Los métodos observacionales de la época no permitían fijar las posiciones de los planetas con errores menores de 10' (diez minutos de arco).

Según la física medieval (que tenía en Aristóteles su máximo referente) el universo aparecía claramente dividido en dos zonas:

- **El mundo sublunar**, situado por debajo de la esfera de la Luna (aquí está situada la Tierra) formado por cuatro elementos (**Tierra, Agua, Aire y Fuego**) y en el que la tierra y el agua tienden a caer, mientras que el fuego y el aire tienden a ascender. **Es un mundo cambiante e imperfecto**.
- Por encima de la esfera lunar se extendía otro mundo **eterno, perfecto e inmutable** formado por un quinto elemento: la **quinta esencia o éter** (que significa eterno). El éter era el constituyente de los objetos celestes los cuales, en consecuencia, ni cambian ni comparten la tendencia al movimiento vertical de los cuerpos terrestres.

El modelo geocéntrico contaba con el beneplácito de la Iglesia Católica, ya que una lectura literal de la Biblia confirmaba que el Sol giraba en torno a la Tierra:

... y dijo en presencia de ellos: **Sol no te muevas de encima de Gabaón**; ni tú, Luna, de encima del valle de Agalón.

Y paráronse el Sol y la Luna hasta que el pueblo del Señor se hubo vengado de sus enemigos.

Paróse, pues el Sol en medio de cielo, y **detuvo su carrera** sin ponerse por espacio de un día.

No hubo antes ni después día tan largo obedeciendo el Señor a la voz de un hombre, y peleando por Israel.

(Josué 10, 12-15)

Una consecuencia del modelo geocéntrico era que el universo debería de tener un tamaño finito y no muy grande. La esfera de las estrellas rota una vez al día. Si su radio es muy grande implicaría que su velocidad de rotación debería ser inconcebiblemente alta. El tamaño del universo se estimó en unos 80 000 000 de km (radio de la esfera de las estrellas)

El modelo geocéntrico de Aristóteles y Ptolomeo perduró hasta el s. XVI, aunque **Aristarco de Samos** (310-230 a.C) había propuesto un modelo heliocéntrico (con poco éxito) del que se tiene noticia a través de los escritos de Arquímedes (287-212 a.C). Arquímedes había calculado que el universo de Aristarco tendría un tamaño de 10^{13} km (un año luz).

De Copérnico a Newton



Nicolás Copérnico
(1473-1543)

Nicolás Copérnico (1473-1543) propuso su teoría heliocéntrica en la que el Sol era el centro del Universo y todos los planetas (incluida la Tierra) giraban en torno suyo describiendo órbitas circulares. A pesar de todos los esfuerzos realizados (entre las correcciones Copérnico suponía que el centro del Universo no se hallaba localizado exactamente en el Sol, sino en un punto un poco alejado de éste) el modelo tampoco daba los resultados apetecidos.

La descripción propuesta por Copérnico **fue publicada en 1543**, unos meses después de su muerte, en un libro titulado **De Revolutionibus Orbium Coelestium** y aunque en el prefacio se decía que la revelación divina era la única fuente de verdad, y que los tratados astronómicos sólo pretendían “salvar los fenómenos”, las autoridades religiosas de la época rápidamente vieron en sus páginas afirmaciones potencialmente heréticas. La

Iglesia Católica colocó a *De Revolutionibus* en su índice de libros prohibidos; Calvino comentaba: “¿Quién se aventurará a poner la autoridad de Copérnico por encima de la del Espíritu Santo? y Lutero sentenciaba: “... este loco quiere alterar toda la astronomía, pero la Sagrada Escritura nos dice que Josué ordenó detenerse al Sol y no a la Tierra” (ver más arriba).

El universo copernicano estimaba que la esfera de las estrellas debería estar a una distancia mínima de la Tierra mucho mayor que la considerada por Ptolomeo (unas 400 000 veces mayor). El tamaño del universo se hacía ahora indefinido y, como admitía el mismo Copérnico, su tamaño podía ser infinito.



De Revolutionibus (1543)

Años más tarde (el 11 de noviembre de 1572) **Tycho Brahe (1546-1601)**, un astrónomo danés, miraba despreocupadamente al cielo durante el paseo que acostumbraba a dar después de cenar. En la constelación de Casiopea vio algo inesperado:

“Sorprendido, como desconcertado y estupefacto, permanecí quieto durante un tiempo con los ojos intensamente fijos en ella y observé que esa estrella estaba situada cerca de las estrellas que la Antigüedad atribuía a Casiopea. Cuando me convencí de que ninguna estrella de esa clase había brillado nunca antes, caí en tal perplejidad, por lo increíble del suceso, que empecé a dudar de mis propios ojos.”



Tycho contemplaba la aparición de una nueva estrella en la constelación de Casiopea (era lo que ahora llamamos una supernova). Lo asombroso, lo que motivaba la estupefacción del astrónomo, es que la nueva estrella estaba situada en la región del universo que la física aristotélica (aún vigente) consideraba eterna e inmutable.

Pocos años después, en 1577, un brillante cometa apareció en los cielos. Aristóteles consideraba que los cometas eran fenómenos que tenían lugar en la atmósfera terrestre, en el mundo sublunar, cambiante e imperfecto. Tycho midió con cuidado la distancia a la que el cometa se encontraba y llegó a la conclusión de que su órbita se situaba mucho más allá de la de la Luna. Para Aristóteles en las regiones situadas más allá de la Luna no podía haber cambios.

Tycho Brahe no era un astrónomo aficionado, poseía una considerable fortuna personal y en su Dinamarca natal, y con el apoyo del rey danés, montó en la isla de Hven un fantástico observatorio astronómico que bautizó con el nombre de **Uraniborg** ("Castillo de Urania", musa de la Astronomía) en el que disponía de un equipo de más de cuarenta astrónomos y los más refinados aparatos de observación de la época. Con ellos conseguía precisiones de hasta 1' (un minuto de arco).



Arriba: Uraniborg
Abajo izda: Tycho. Abajo dcha: interior Uraniborg

Tycho consideraba que la única manera de poder decidir entre el modelo de Copérnico y el de Ptolomeo era aumentando la precisión de los datos astronómicos.

A partir del análisis de la gran cantidad de datos acumulados para las posiciones de las estrellas y los planetas, elaboró un modelo propio, de compromiso, en el que aunque el Sol giraba alrededor de la Tierra los demás planetas lo hacían alrededor del Sol.

Diversos acontecimientos hicieron que Tycho Brahe perdiera el apoyo del rey danés, pasando a ser protegido de Rodolfo II, Emperador del Sacro Imperio Romano-Germánico, que lo nombra matemático imperial y pone a su disposición el castillo de Benatek, cerca de Praga, para que monte un observatorio similar a Uraniborg

En febrero de 1600 Tycho recibe en el castillo de Benatek a un joven matemático y astrónomo, llamado **Johannes Kepler**, que en 1596 había publicado un libro titulado **Mysterium**

Cosmographicum en el que afirmaba que había descubierto la estructura básica del Universo, el patrón geométrico a partir del cual se había concebido el cosmos, y en el que se planteaba una pregunta capital:

¿Cuál es la relación existente entre las velocidades de los planetas en su giro alrededor del Sol y el tamaño (radio) de su órbita?

Tycho encarga a Kepler la resolución de un problema en el cual todos los astrónomos de la época habían fracasado: la resolución de la órbita de Marte. Kepler asume el reto a la par que asegura que resolverá el problema en ocho días. Contaba para ello con una gran cantidad de datos observacionales muy precisos de las posiciones de los planetas, su gran intuición y un gran dominio de las matemáticas necesarias. Según sus propias palabras:

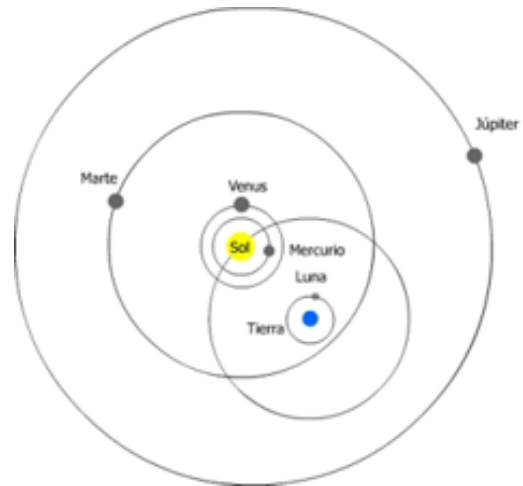
"Tycho posee las mejores observaciones... dispone del mejor material... también tiene colaboradores. Únicamente le falta el arquitecto que pueda poner todo esto en marcha según su propio diseño"

En 1609 se termina de imprimir la que sería la gran obra de Kepler: **Astronomía Nova**. En ella se enuncian las dos primeras leyes del movimiento planetario (1ª y 2ª ley de Kepler. La tercera ley la publicará en 1618) a las que llegó como consecuencia del análisis de la órbita de Marte. El problema que había dicho resolvería en ocho días le había costado ocho largos años.



Primeras páginas de *Astronomía Nova*, la obra capital de Kepler. En ella se enuncia la ley que describe las órbitas planetarias como "elipses" y la llamada "ley de las áreas".

Las leyes del movimiento planetario enunciadas por Kepler (ver apuntes) pueden considerarse como el principio del fin del modelo cosmológico medieval.



Modelo de Tycho Brahe

Los planetas no orbitaban alrededor del Sol con movimiento circular uniforme, sino en elipses, y su velocidad era variable, máxima en el punto más próximo al Sol (perihelio) y mínima en el punto de máximo alejamiento (afelio).

Contemporáneo de Kepler (1571-1630) fue Galileo Galilei (1564 - 1642) quien en 1609 construyó un telescopio con el que se dedicó a observar el cielo nocturno. El resultado era demoledor para el modelo de universo heredado de Aristóteles:



Galileo Galilei
(1564-1642)

- La Luna no era una superficie lisa y pulida, "*hállase cubierta por doquier de ingentes prominencias, profundas oquedades y anfractuosidades*".
- Las estrellas no parecían situarse en la superficie de una esfera, el universo parecía tener una inmensa profundidad, detrás de las estrellas visibles a simple vista aparecían otras "*... en un número diez veces superior al de las ya conocidas*"
- Girando alrededor de Júpiter se observaban con claridad cuatro lunas "*cuatro estrellas errantes*"

Ni todo giraba alrededor de la Tierra, ni los cuerpos celestes estaban formados de una materia distinta a la de nuestro mundo.

Además tanto Tycho (en 1572) como Kepler (en 1604) contemplaron la aparición de sendas supernovas en los cielos que fueron visibles durante meses.

Los cometas que Aristóteles consideraba como fenómenos de la atmósfera terrestre estaban situados mucho más allá de la Luna según probaban las mediciones realizadas.

Los cielos perdían su inmutabilidad. Las evidencias se acumulaban en contra del universo geocéntrico existente hasta entonces.

La Ley de Gravitación Universal enunciada por Isaac Newton en sus *Principia* (1687) establecía que la misma fuerza que mantiene los planetas orbitando alrededor del Sol es la que hace caer la manzana del árbol. Las mismas leyes gobiernan todo el universo. No hay distinción alguna entre el mundo sublunar y el situado más allá de la Luna. La gravedad es la fuerza que mantiene unido a todo el cosmos.



Isaac Newton
(1642-1727)

