

EL PAPEL DEL RAZONAMIENTO ANALÓGICO EN LA CONSTRUCCIÓN HISTÓRICA DE LA NOCIÓN DE FUERZA GRAVITATORIA Y DEL MODELO DE SISTEMA SOLAR (SEGUNDA PARTE)

José María Oliva Martínez
Centro de Profesorado de Cádiz
E-mail: jmoliva@cepcadiz.com

RESUMEN

Este trabajo es la continuación de otro anterior (Oliva, 2004), ambos dedicados al estudio de la importancia del pensamiento analógico en la construcción histórica de la noción de fuerza gravitatoria y del modelo de Sistema Solar. En aquella ocasión analizamos dicho papel durante el período comprendido desde las antiguas civilizaciones hasta llegar a la revolución copernicana con científicos como Copérnico, Gilbert, Kepler o el propio Galileo. En esta segunda parte, se continúa con algunos de los razonamientos analógicos proporcionados desde la vertiente mecanicista, capitaneada por Descartes y desde la tradición subsiguiente que se desarrolló en línea con la utilización del método de la analogía como criterio argumentativo (Huyghens, Hooke, Bernoulli, etc.). Dedicamos asimismo un capítulo aparte a la figura de Newton, quien continúa con dicha tradición en su intento de explicar la naturaleza de la gravitación. Finalmente se procede, a modo de síntesis, a realizar una clasificación de distintos tipos de razonamientos analógicos aportados en el desarrollo histórico en torno a estos temas, estudiando el papel científico y divulgativo de cada uno.

Palabras claves: *analogías, fuerza gravitatoria, historia de la ciencia, razonamiento analógico, sistema solar.*

INTRODUCCIÓN

En un artículo anterior (Oliva, 2004) se ha analizado el papel del razonamiento analógico en la construcción histórica de la noción de fuerza gravitatoria y del modelo del Sistema Solar, empezando por las civilizaciones más antiguas, incluida la Griega, hasta llegar a las aportaciones de científicos como Copérnico, Gilbert, Kepler o el propio Galileo, en los albores de la revolución copernicana.

Como se pudo comprobar en el mencionado trabajo, los precursores del pensamiento analógico los encontramos en el pensamiento antropomófico y animista, en el que se proyectan comportamientos y principios de funcionamiento de los seres vivos, incluido el hombre, sobre el mundo inanimado. En este contexto, las leyes naturales se sustituyen por deseos y tendencias finalistas o por la intervención continua de la divinidad como motor causal de los sucesos.

Más adelante, durante los primeros pasos de la revolución copernicana se empieza a apreciar un lenta, pero progresiva, evolución hacia paralelismos que dejan de tomar como referentes la divinidad y los deseos y comportamientos humanos, para pasar a análogos centrados en situaciones físicas consideradas semejantes o equivalentes. El ser humano pierde su peso y protagonismo en este escenario, desplazándose el interés hacia la unificación de fenómenos o campos experienciales aparentemente distintos, empezándose a labrar la hipótesis de la analogía de las leyes terrestres y celestes y, con ella, la visión mecanicista que se desarrollaría más tarde con Descartes.

El caso más emblemático estudiado que ilustra este cambio de enfoque, lo tenemos en la analogía de la gravedad con la luz y el magnetismo (Gilbert, Kepler, etc.), analogía que, como veremos, aparecerá también en épocas posteriores aunque con un estatus distinto y con una finalidad diferente.

En el presente trabajo se discuten algunos de los razonamientos analógicos formulados con posterioridad a partir de la segunda mitad del siglo XVII hasta llegar a la síntesis newtoniana. Profundizaremos, por una parte, en la analogía entre la gravedad y el magnetismo, postulada también por autores posteriores a la época de Kepler, y abordaremos, por otra, el papel de esta forma de razonar y argumentar en el desarrollo de las tesis mecanicistas y en el devenir de la síntesis newtoniana.

INFLUENCIA DEL PENSAMIENTO ANALÓGICO EN LA VISIÓN MECANICISTA DEL UNIVERSO

Como todos sabemos, Copérnico, Kepler y Galileo fueron los precursores de la idea de universalidad de las leyes que rigen el comportamiento dinámico de los cuerpos, dando los primeros pasos en la línea de asimilar las leyes y propiedades de la mecánica terrestre y la de los cielos. Copérnico y Galileo llevaron a cabo esta unificación aplicando a la Tierra el concepto tradicional de los movimientos celestes circulares naturales. Kepler aplicó a los cielos el antiguo concepto del movimiento gobernado por la acción de una fuerza a la que atribuía un carácter magnético.

Posteriormente, René Descartes fue aún más lejos y dio el paso definitivo al reducir las leyes del movimiento general del universo a las leyes del movimiento de los cuerpos terrestres. En general, él defendía la necesidad de explicar lo desconocido en términos de lo conocido, y de ahí su propuesta de interpretar todos los fenómenos naturales en términos mecánicos debido a la familiaridad que ya se disponía en aquella época de los fenómenos e ingenios mecánicos (Mason, 1990).

Descartes suponía que la naturaleza se encuentra gobernada completamente por leyes, en contra de la creencia dominante durante la edad media de considerar que Dios participaba día a día en el funcionamiento del universo rigiendo los acontecimientos terrestres. Mason (1990) comenta que el origen de la expresión "leyes de la naturaleza" era frecuente en el mundo antiguo y fue rescatada en la época de Descartes por analogía con las leyes promulgadas por el gobierno civil durante las monarquías absolutas de los siglos XVI y XVII, en consonancia con la idea judeo-cristiana de Dios como legislador. Para él, hablar de las leyes de la naturaleza

era lo mismo que hablar de los principios de la mecánica, constituyendo el punto de partida de la corriente mecanicista que dominaría la física en siglos venideros. Incluso, llegó a reducir las funciones animales a acciones mecánicas (Cohen, 1989).

Descartes fue el primero en considerar que el movimiento natural se produce en línea recta y no en círculo como pensaba Galileo. De ahí la necesidad de explicar el movimiento de los planetas que, según él, eran continuamente desviados de su trayectoria rectilínea por una causa externa. Con objeto de explicar esta clase de movimientos recurrió al símil que proporcionaban los vórtices o torbellinos de fluidos cuyas propiedades ya se conocían bastante bien en su época gracias a los trabajos de Leonardo da Vinci (Truesdell, 1975). Así, por ejemplo, Leonardo sabía ya que la velocidad del fluido aumenta de afuera a dentro de un vórtice:

"En todo líquido, el movimiento en espiral, o mejor aún, el movimiento rotatorio es tanto más rápido cuanto más se acerca al centro de su revolución"

(citado por Truesdell, 1975, p. 83).

Por ello, no debe de extrañar que Descartes viera en ello una explicación a las leyes empíricas de Kepler que establecían una relación directa entre el tamaño de la órbita de los planetas y el período de traslación alrededor del Sol. Tampoco que tomara de ahí el patrón lógico para su teoría de los torbellinos o vórtices del Sistema Solar. Según su teoría, el Sol constituye el centro de un vórtice de materia etérea cuyo movimiento arrastra a los planetas a su alrededor (figura 1). Los choques corpusculares del éter contra los planetas provocarían una acción central dirigida hacia el Sol que equilibraría exactamente la tendencia centrífuga del giro. Según él, si en un vórtice se eliminaran todas las partículas menos una, ésta saldría en línea recta abandonando el vórtice por la tangente. Si no lo hace es porque las constantes colisiones con las partículas del vórtice que se encuentran fuera de éste lo empujan continuamente hacia el centro del mismo. De modo semejante, los planetas giran alrededor del centro del vórtice en órbitas casi circulares a causa de una serie de choques similares contra los corpúsculos de éter (Khun, 1985).

Cada planeta constituía a su vez el centro de otro vórtice más pequeño cuya parte más periférica era capaz de arrastrar a los satélites del planeta. Como señala Hull (1981), además de resultar ingeniosa y sugerente, esta comparación explicaba satisfactoriamente por qué todos los planetas se mueven en el mismo sentido alrededor del Sol, y por qué lo hacen más deprisa los que se encuentran más cerca de él.

Pero quizás la contribución más importante que realiza Descartes es la de fortalecer las bases de la unificación de las leyes terrestres y celestes que ya habían intuido Copérnico, Kepler y Galileo. Este hecho, como veremos después, constituyó una aportación definitiva para la analogía entre la física terrestre y la celeste que culminó con la utilización de experiencias físicas en el laboratorio terrestre para entender los fenómenos celestes. Así, por ejemplo, mediante los mismos vórtices con los que Descartes explicaba el movimiento planetario, interpretó también la gravedad terrestre y el fenómeno de caída de los cuerpos. Se sabía en aquella época que en un vórtice o torbellino la materia ligera se ve arrastrada hacia los bordes exteriores, y que la materia pesada es atraída hacia el centro. De ahí que los objetos pesados

cayesen hacia la Tierra y que el fuego o los gases se elevaran hacia arriba (Mason, 1990). Los cuerpos libres son empujados hacia la Tierra por los impactos procedentes de los corpúsculos de aire del vórtice terrestre (Khun, 1985).

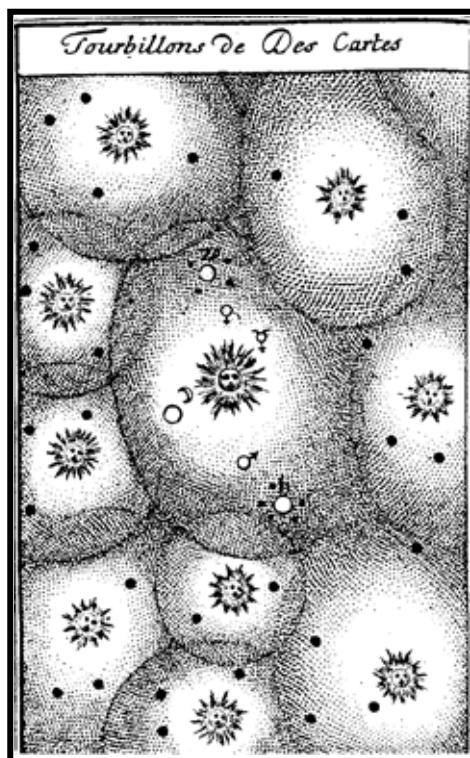


Figura 1.- Concepción del Universo como sistema de Torbellinos, según Descartes.

Como afirma Hull (1981), la debilidad más importante de la tesis de Descartes del movimiento planetario descansaba sobre la imposibilidad de comprobar matemáticamente el símil de partida, dado que los problemas sobre movimiento de fluidos superaban las posibilidades matemáticas del siglo XVII. Se podía prever mediante este símil que los planetas más cercanos al Sol se moverían más velozmente que los lejanos, pero era imposible postular a partir de ahí alguna relación precisa entre las distancias al centro y los tiempos de revolución. Más aún, poco más tarde, Newton, en el libro segundo de los *Principia*, llega a invalidar tal hipótesis al demostrar matemáticamente que el sistema de vórtices viola la ley kepleriana de las áreas (Cohen, 1989). A pesar de ello y durante un largo tiempo después, muchos científicos siguieron apegados a la idea de vórtice lo que da una prueba del poderoso influjo que ejerció Descartes en su época y posteriormente.

La imagen que aportaba Descartes resultaba enormemente intuitiva, en contraposición con la teoría de Newton que eludía pronunciarse por alguna razón intuitiva que hiciera evidente su interpretación del movimiento planetario mediante la idea de fuerza de la gravedad. Más adelante profundizaremos algo más en las ideas de Newton al respecto. Antes de pasar a ello, y como complemento de las tesis mecanicistas de Descartes, veamos cómo caló en la época el método de análisis de la realidad celeste

a través de experimentos, análogos y simulaciones extraídos de los fenómenos terrestres.

EL EMPLEO DE MODELOS ANALÓGICOS COMO MÉTODO DE ESTUDIO DE LAS FUERZAS CENTRALES

Siguiendo las tesis mecanicistas, poco a poco empezaron a emerger comparaciones y paralelismos entre tópicos procedentes de una fenomenología distinta, llegándose a emplear las similitudes encontradas como método de trabajo para inferir propiedades de un sistema a partir del otro.

Un precedente temprano en esta línea lo encontramos en Galileo, quien intentó confirmar la hipótesis, ya comentada, de que las velocidades adquiridas por un cuerpo que baja por planos de diferentes inclinaciones son iguales si las alturas de los planos son idénticas. Para ello realizó un experimento en el cual el movimiento de un péndulo, que para él era análogo al comportamiento de la bola en el plano inclinado, se veía alterado al chocar la cuerda con un clavo (Losee, 1987; citado por Solaz y Sanjosé, 1992). De esta forma, pudo comprobar que la masa pendular alcanzaba siempre la misma altura con independencia de la posición en la que se situaba el clavo y de si éste estaba o no presente. Así mismo, parece ser que esta analogía le sirvió para reconocer que los tiempos de caída de los graves son independientes de sus pesos.

Más tarde Newton, en la proposición XLIV de su libro segundo, establecía explícitamente un paralelismo entre el movimiento del péndulo, que había sido estudiado por Christian Huyghens, y el de una porción de agua que bascula entre dos ramas de un sistema formado por dos vasos comunicantes:

"Si el agua asciende y desciende alternativamente por los tubos alzados de un canal de tubería, y se construye un péndulo cuya longitud entre el punto de suspensión y el centro de oscilación sea igual a la mitad de la longitud del agua que hay en el canal, afirmo que el agua ascenderá y descenderá tantas veces como oscile el péndulo"

(Newton, 1687; p. 431).

Con posterioridad, Daniel Bernoulli (1700-1782) consideró una analogía parecida descubriendo que el flujo de agua que pasa por un orificio se parece al mecanismo de funcionamiento del péndulo. El argumento utilizado ha sido descrito por Khun (1975) y a partir de él consiguió determinar la velocidad de salida del fluido por el orificio.

Otro ejemplo de avance científico a través de experimentos o argumentos analógicos lo encontramos en el estudio de la fuerza centrípeta y de la fuerza centrífuga. El concepto de fuerza centrífuga es anterior al de fuerza centrípeta. El primero de estos conceptos se remonta a la antigua Grecia (Casadella y Miró, 1997), mientras el segundo parece que surge con Descartes, como oposición necesaria para compensar el efecto de la tendencia centrífuga, "posibilitando así un giro estable" (Casadella y Bibiloni, 1985). Como es evidente, el interés suscitado en aquella época por el movimiento curvilíneo estribaba en poder comprender el movimiento planetario a partir de sus causas (Casadella y Bibiloni, 1985).

El punto de vista de Descartes y de Huyghens era que la fuerza centrífuga (término acuñado por este último) originada por el movimiento curvilíneo de los planetas, los alejaría del centro a menos que algo los retuvieran con alguna fuerza. Huyghens se ayudó del péndulo para determinar el valor de la fuerza centrífuga (Solaz y Sanjosé, 1992; Mason, 1990), y de esta forma evaluó que la acción centrípeta debería ser directamente proporcional al cuadrado de la velocidad e inversamente proporcional al radio de la órbita (Casadella y Bibiloni, 1985). No obstante, Huyghens no consiguió darse cuenta de que esta fuerza era suministrada por la gravitación del Sol, sin duda debido a su adhesión a las opiniones de Descartes (Mason, 1990). Huyghens incluso llegó a realizar un experimento simulando el movimiento planetario mediante un remolino de agua. Descubrió que los guijarros eran arrastrados al centro del recipiente lo que para él supuso la validación de la explicación del movimiento planetario según las tesis cartesianas (Mason, 1990).

En contraposición a esta tesis, Newton dedicaría parte de su esfuerzo a criticar los vórtices cartesianos. Por ejemplo, dedica la sección IX de su libro segundo a analizar el movimiento circular de los fluidos llegando en el escolio de la proposición LIII, teorema XLI, a demostrar la incompatibilidad de esos vórtices con el movimiento planetario. Newton demuestra la incompatibilidad entre ambos sistemas apoyándose en la paradoja que surge entre las leyes de Kepler y las predicciones a partir del movimiento de los vórtices. En efecto, según las leyes de Kepler los planetas se mueven con mayor velocidad cuanto más próximos se encuentran al Sol en su órbita, mientras que en un vórtice las velocidades seguirían una relación inversa. En este caso, la analogía entre el movimiento celeste y el de los torbellinos de fluido se utiliza en un sentido inverso para demostrar su incompatibilidad, empleando un razonamiento semejante al de reducción al absurdo (figura 2):

"Por tanto, es evidente que los planetas no son transportados en vórtices corpóreos. En efecto [...] los planetas que se mueven alrededor del Sol giran en elipses, con el Sol como foco común, y describen áreas proporcionales a los tiempos con radios trazados hasta el Sol. Pero las partes de un vórtice jamás pueden girar con semejante movimiento [...] Y de acuerdo con las leyes de la astronomía, el cuerpo que gira en la órbita BE se moverá más lentamente en su afelio B y más velozmente en su perihelio E, mientras que, de acuerdo con las leyes de la mecánica, la materia del vórtice debería moverse más velozmente en el espacio estrecho entre A y C que en el espacio ancho entre D y F, es decir, más velozmente en el afelio que en el perihelio"

(Newton, 1687; p. 455).

Dicho de otro modo, mientras en un vórtice la velocidad del fluido aumenta allá donde se juntan las líneas de corriente, según las leyes de Kepler los planetas se mueven más lentamente en los puntos donde las órbitas se aproximan al coincidir con zonas de una mayor distancia al Sol.

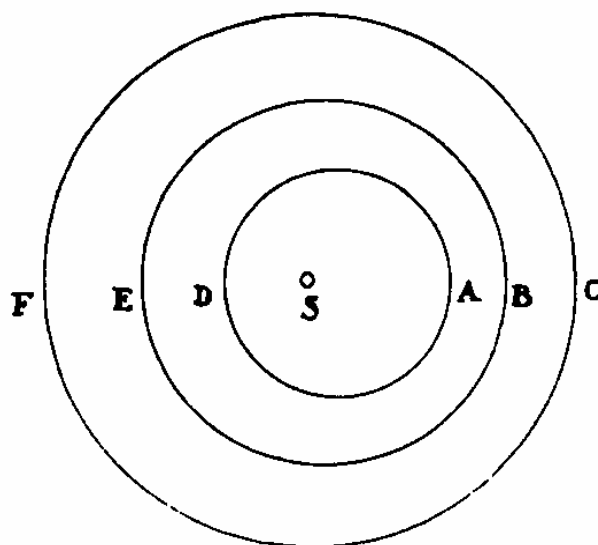


Figura 2.- Representación en *Principia* de las órbitas planetarias del Sistema Solar.

Por su parte, Robert Hooke intentó justificar el movimiento planetario siguiendo también el paralelismo sugerido por Descartes entre los movimientos celestes y terrestres. Su método de trabajo, no obstante, fue distinto al empleado por Huyghens. Hooke entendía que debería existir algún principio de atracción entre el Sol y los planetas que desviara a éstos constantemente de su movimiento inercial que debería ser rectilíneo. Supuso que esta acción central debería ser suficiente para justificar la órbita cerrada de los planetas, ya sea siguiendo un contorno circular o en forma de elipse. Sin embargo, Hooke no supo demostrar su intuición porque desconocía cómo relacionar matemáticamente la intensidad de una fuerza con la desviación que produce. A pesar de ello, Hooke consiguió dar a su idea una forma concreta y aceptable a través de un modelo analógico consistente en lo que hoy llamamos un péndulo cónico. Cualquier impulso inicial en una dirección diferente a la radial origina una trayectoria plana circular o elíptica similar a la órbita de un planeta. La fuerza central que actuaba sobre el péndulo, resultado de la composición del peso y de la tensión de la cuerda, no conseguía hacerlo llevar al centro. Así, pues, una fuerza central única había podido producir en el laboratorio terrestre trayectorias análogas a las órbitas planetarias (Khun, 1985; Solaz y Sanjosé, 1992).

El método empleado por Hooke fue también utilizado por Newton (Bernal, 1975; Solaz y Sanjosé, 1992). Mediante experimentos con péndulos oscilantes, Newton determinó que el peso de un cuerpo, como fuerza externa que actúa sobre ella originada por la gravedad, es directamente proporcional a su masa, como cantidad de materia. Más tarde estudió también el péndulo cónico, empleando al parecer los propios datos numéricos publicados por Galileo en sus *Discursos sobre dos nuevas ciencias*, y partir de sus cálculos infirió la teoría de la gravitación universal (Bernal, 1975).

Puede verse la enorme importancia que tuvo el péndulo como analogía a la hora de estudiar la gravitación (Solaz y Sanjosé, 1992). Para Hooke y para Newton el

movimiento planetario era análogo al movimiento del péndulo cónico, y la gravedad sería semejante a la componente radial de la tensión de la cuerda.

Por otra parte, Newton no se resistió a realizar determinados experimentos mecánicos para verificar sus ideas sobre la naturaleza del movimiento de los cuerpos, en general, y de los cuerpos celestes en particular. Concretamente, realizó uno para contrastar la existencia del movimiento absoluto, aunque no se sabe si lo llevó a la práctica real o mentalmente como ocurría con algunos de los experimentos de Galileo. El experimento consistía en un cubo lleno de agua colgado de una cuerda retorcida, en el que se observa que cuanto más rápido se hace el movimiento rotación del cubo más se aleja el agua del centro inclinándose la superficie que asciende por las paredes. El hecho de que tal efecto de inclinación de la superficie fuese nulo al principio, cuando el agua gira lentamente y el cubo lo hace de forma rápida, y más aún cuando el cubo y el agua giran en sincronía, sugirió a Newton la posibilidad de afirmar que sólo un movimiento circular absoluto produciría un alejamiento del eje o, en el caso específico del cubo, una ascensión del líquido por las paredes de su recipiente.

Volviendo un poco atrás, encontramos otra línea diferente para el estudio experimental de la gravedad, esta vez a través de otro tipo de fenómeno considerado análogo como es el caso de la fuerza magnética, semejanza que, como ya se vio en otro lugar (Oliva, 2004), fue introducida por Kepler. Borelli (1608-1679) siguió la misma línea de interpretación del movimiento planetario emprendida por Kepler, aunque con algunos matices que anuncian ya algunos de los cambios importantes que se habrían de producir en el futuro. Para empezar, Borelli seguía creyendo en la existencia del *anima motrix* que empujaba a los planetas en su órbita, si bien no queda muy claro si para él su papel consistía en mantener o en variar la velocidad del movimiento (Khun, 1985). De cualquier manera, lo que sí parece asegurado es que su idea de inercia era bastante más evolucionada que la de Kepler y, además fue capaz de reconocer la necesidad de una fuerza atractiva dirigida hacia el Sol para explicar una trayectoria cerrada como la de éstos. Sin esta fuerza central dirigida hacia el Sol, los planetas se desplazarían en dirección tangencial, abandonando su órbita de forma definitiva.

Siguiendo el camino iniciado por Kepler, Borelli identificó esta fuerza con el magnetismo e incluso llegó a intentar demostrar sus ideas haciendo uso de modelos mecánicos a escala con imanes. Según Borelli, era necesaria también esta fuerza que se ocuparía de desviar constantemente al planeta de su trayectoria rectilínea atrayéndolo hacia el Sol. El modelo diseñado a escala consistía de un brazo giratorio que desplazaba un tapón sobre un cuenco (figura 3). Cuando el cuenco gira a gran velocidad, el tapón tiende a alejarse del centro por el efecto centrífugo describiendo una espiral que se abre hacia los bordes del cuenco. Mientras tanto, cuando el brazo gira lentamente el tapón describe una espiral que lo arrastra hacia el centro porque la acción centrífuga no logra compensar la atracción magnética generada por sendos imanes colocados en el tapón y en el centro de la trayectoria de giro. A una velocidad intermedia, cuyo valor dependería de la distancia al centro, las dos tendencias se equilibran encontrando una órbita estable. La excentricidad de la trayectoria es explicada por Borelli aludiendo a un curioso mecanismo de descompensación y

compensación alternante de estos efectos, debido a que la velocidad inicial del tapón es ligeramente inferior a la que teóricamente corresponde al radio inicial de giro de su órbita. Para Borelli, esto explicaba el predominio alternativo de uno y otro efecto, modificándose así el valor de la velocidad y del radio de giro que se adapta al de una elipse (Khun, 1985). Borelli expuso su modelo en 1666, que fue el mismo año en el que Robert Hooke logró demostrar el paralelismo entre los movimientos celestes y terrestres.

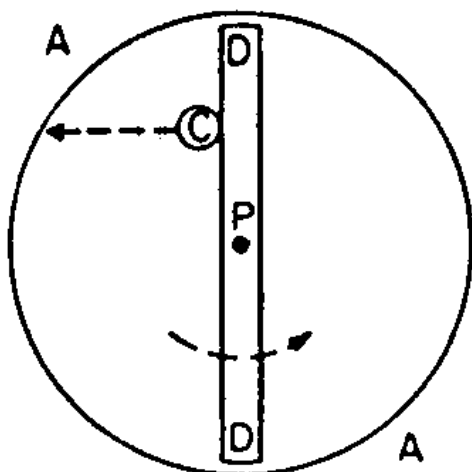


Figura 3.- Modelo mecánico de Borelli para explicar la trayectoria de los planetas.

Hooke y Newton también se valieron de los imanes para esclarecer su noción de gravedad. Hooke, por ejemplo, parece ser que se inclinaba hacia la opinión de Gilbert de que la gravedad era de tipo semejante al magnetismo y, puesto que Gilbert había demostrado que la fuerza magnética entre imanes variaba con la distancia entre ellos, Hooke pensó que algo semejante debería ocurrir con la fuerza gravitatoria (Mason, 1990). Por su parte, Newton empleó el magnetismo también como símil, pero esta vez sólo con un valor instrumental. Se sirvió de él como elemento de confirmación de su hipótesis de que la fuerza gravitatoria

debe de ser proporcional a la masa de los cuerpos que se atraen, de forma semejante a cómo la fuerza entre imanes depende del tamaño de éstos.

Pero la importancia del razonamiento análogo en la obra de Newton no es algo accidental y anecdótico, como se podría desprender de este ejemplo y de algún otro mencionado con anterioridad. Por el contrario, el razonamiento por analogía jugó un papel clave en el proceso de generalización inductiva que condujo a la síntesis newtoniana y en sus intentos de esclarecer –la mayor parte de veces sin éxito– la naturaleza de las fuerzas gravitatorias, como vamos a ver a continuación.

EL RAZONAMIENTO ANÁLOGICO EN LA SÍNTESIS NEWTONIANA

Un primer paso en la síntesis newtoniana lo encontramos en el reconocimiento explícito de la similitud entre el peso de los cuerpos y la atracción terrestre que origina su caída libre. Pero más importante aún que éste, fue la unificación de las causas que originan esos dos fenómenos y los movimientos planetarios.

Durante la segunda mitad del siglo XVII comienza a ser general la opinión de que, para describir una órbita cerrada alrededor del Sol, un planeta debe ser continuamente arrastrado hacia éste mediante algún mecanismo, transformando así su movimiento inercial rectilíneo en una curva. Guiados por la idea cartesiana según la

cual el mecanismo que rige la caída terrestre y la celeste es el mismo, a partir de aquí cada autor adoptó sus propios presupuestos a la hora de explicar el origen de esa "caída".

Ya hemos indicado que Descartes y Huyghens, por ejemplo, creían que los planetas eran empujados hacia el Sol por los choques corpusculares de los torbellinos. Mientras tanto Hooke y Newton prefirieron explicar el fenómeno a partir de atracciones mutuas e intrínsecas a los cuerpos. Éstos últimos -probablemente jamás sabremos cuál de los dos fue el primero en concebir la idea (Khun, 1985)- sugirieron que la fuerza que atraía a los planetas hacia el Sol era la misma que la que ejercía la Tierra hacia la Luna, y que ambas serían semejantes de la atracción gravitacional causante del peso de los cuerpos y de su caída al ser dejados en libertad. Siguiendo esta línea de argumentos, Newton da al movimiento Lunar el mismo tratamiento que daría para explicar el movimiento de los proyectiles terrestres (Oliva y Acevedo, 2004). Parece ser que el conocido ejemplo de la manzana constituye más una leyenda que una realidad en la línea argumental que llevó a Newton a su síntesis gravitacional. No obstante, basta leer alguna de las obras de sus seguidores, como Leonhard Euler (1768), para comprender que, al menos, esta anécdota jugó un papel importante a la hora de divulgar dicha idea entre el público de la época.

Por otro lado, también el movimiento de proyectiles jugó un papel importante como puente entre la caída de los cuerpos y el movimiento orbital de los astros (Oliva y Acevedo, 2004). Robert Hooke fue el que, según parece, creó el precedente de relacionar el estudio del tiro parabólico de proyectiles de Galileo con el movimiento de los planetas, considerando análogos ambos tipos de movimientos (Casadella y Bibiloni, 1985; Oliva y Acevedo, 2004). En efecto, Hooke trasladó el método de análisis por descomposición de movimientos utilizado por Galileo para el movimiento de proyectiles, considerando el movimiento planetario el resultado de la composición de dos movimientos: uno a lo largo de la tangente a la trayectoria regido por la ley de inercia y otro que tira al planeta hacia el Sol apartándolo continuamente de la tangente. Newton adoptó también este método de análisis (Casadella y Bibiloni, 1985; Mason 1990). Así, en su Sistema del Mundo, Newton escribe:

"De los movimientos de los proyectiles se comprende que los planetas puedan ser retenidos en órbitas ciertas mediante fuerzas centrípetas. Una piedra lanzada, sometida a la acción de la gravedad, se desvía de la trayectoria rectilínea y, describiendo una curva en el aire, cae al fin al suelo; si se lanzase con mayor velocidad, llegará más lejos. Aumentando la velocidad, podría lograrse que describiera un arco de una milla, dos, cinco, cien, mil; y por fin, al ir más allá de los límites de la Tierra, que no cayese ya en el suelo"

(Newton, 1727; p.49).

Este mismo argumento es utilizado años más tarde también por Euler (1768), el cual, en tono metafórico, llega a describir a una bala de cañón como una pequeña Luna, desarrollando también la conocida anécdota de la caída de la manzana.

El primer intento de síntesis llevado a cabo por Newton fracasó cuando quiso explicar el movimiento orbital de la Luna en términos de una caída constante respecto a la trayectoria rectilínea, debida a la acción gravitatoria ejercida por la Tierra. Este primer

intento condujo al fracaso debido entre otras razones a que Newton no conocía bien el tamaño de la Tierra (Escohotado, 1987). El dato de la fuerza que parecía actuar sobre la Luna resultaba sensiblemente superior a la prevista en sus cálculos, y de ahí que Newton creyera en la necesidad de completarla admitiendo la existencia de un vórtice cartesiano adicional (Escohotado, 1987; Solís, 1991). Tiempo después, y una vez estimada convenientemente la masa de la Tierra, en la proposición IV, teorema IV, del tercer libro de los *Principia*, Newton logró por fin realizar con éxito dicho cálculo sin otra consideración que la fuerza gravitatoria como causa del movimiento lunar.

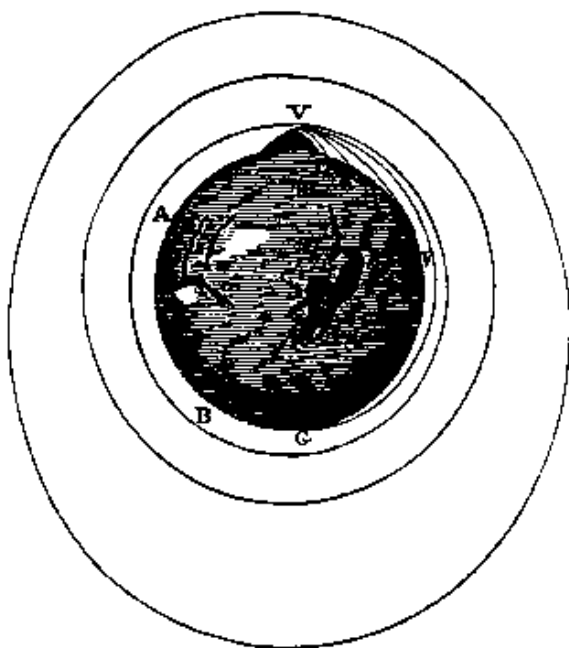


Figura 4.- El movimiento de proyectiles ilustra una situación puente entre uno y otro movimiento (Newton, 1727).

los planetas y la de un planeta con sus satélites. Este proceso de generalización por inducción y analogía queda patente en las palabras de Laplace cien años más tarde en su *Mécanique céleste*:

"... el Sol y los planetas que tienen satélites están dotados de una fuerza de atracción que se extiende infinitamente en todas direcciones, decreciendo en forma inversamente proporcional al cuadrado de la distancia [...] la analogía me lleva a inferir que generalmente existe una fuerza similar en todos los planetas y cometas [...] la gravedad observada en la Tierra es sólo un caso particular de una ley general que se extiende por todo el Universo".

(citado por Cohen, 1989; p.159)

Un problema más complejo era explicar la naturaleza de la fuerza gravitatoria. Es en este terreno en el que Newton tuvo que soportar las mayores objeciones a su obra, ya que si bien llegó a demostrar que los movimientos celestes y el de caída libre tienen la misma causa, no llegó a explicar cuál es el origen de la misma. Al contrario de lo que ocurría con las tesis de Descartes, las ideas de Newton carecían de una razón o causa que encajase dentro de la intuición para explicar el movimiento planetario. *Principia* fue alabado por su perfección matemática y criticado por su falta de claridad física al

no dar una explicación mecánica de la gravedad (Hull, 1981; Solís, 1991). No obstante, a pesar de su declaración abierta de no pretender entrar en causas naturales de la gravitación, Newton no logró resistirse a la idea de formular algunas hipótesis explicativas para la misma, sin duda movido por la necesidad de escapar a las críticas de sus adversarios. Al igual que sus contemporáneos, Newton dio muestras de creer que llegaría algún día en el que se encontraría alguna causa material que explicase la aparente acción a distancia implícita en su ley de la gravitación.

Parece ser que Newton utilizó diversas analogías para apoyar sus hipótesis y comprender el origen de tales fuerzas. Por ejemplo, en el libro primero de los *Principia* se llega a emplear el símil con las fuerzas magnéticas para justificar la dependencia de esta fuerza de la masa de los cuerpos, si bien la demostración matemática la buscó por otro camino basándose directamente en el segundo principio de la dinámica y en el hecho conocido de que las aceleraciones que producen tales fuerzas son independientes de la masa de los cuerpos sobre los que actúa:

"Estas proposiciones nos conducen a la analogía entre fuerza centrípeta y cuerpos centrales [...] Es razonable suponer que las fuerzas dependan de la naturaleza y cantidad de tales cuerpos, como acontece en el magnetismo".

(Newton, 1687, p. 238)

También se apoyó en esta analogía para ilustrar la interacción mutua entre los planetas a través del tercer principio en *El Sistema del Mundo*:

"El hierro atrae al imán igual que el imán al hierro, pues todo hierro en contacto con un imán atrae también a otro hierro [...] De modo similar hay que concebir entre dos planetas la operación simple que surge de la naturaleza cooperante de ambos...".

(Newton, 1727; pp. 66-67).

Finalmente, Newton, primero, y más tarde Euler, utilizaron esta misma analogía para explicar su noción de atracción o fuerza a distancia, concepto difícilmente asimilable en aquella época, dominada todavía por las bases mecanicistas introducidas por Descartes. A continuación recogemos un fragmento de uno de los trabajos de Euler:

"Esta fuerza [se refiere a la gravitación] es, totalmente invisible, de modo que no vemos nada que actúe sobre los cuerpos y los impulse hacia la Tierra [...] Observamos un fenómeno semejante en el imán, hacia el cual son impelidos el hierro y el acero sin que podamos ver la causa que los impulsa [...] Del mismo modo podrá, pues, decirse también que la Tierra atrae hacia sí a todo los cuerpos que están a su alrededor, incluso a grandes distancias"

(Euler, 1768; p.78)

No obstante, tanto Newton como Euler se desmarcaron abiertamente de cualquier explicación causal en esta analogía admitiendo que ambos fenómenos obedecen a causas distintas, como queda patente claramente en el siguiente fragmento:

"El poder de la gravedad es de naturaleza diferente a la del poder magnético, pues la atracción magnética no es como la materia atraída. Algunos cuerpos son más atraídos por el imán, otros menos, la mayor parte de los cuerpos en absoluto. El

poder magnético de un cuerpo puede aumentar o disminuir, y es a veces mucho más fuerte, en relación con la cantidad de materia, que el poder de la gravedad, y al apartarse el cuerpo del imán no decrece como el cuadrado de la distancia, sino casi como el cubo de la distancia, como he podido comprobar aproximadamente mediante toscas observaciones"

(Newton, 1687; p. 480).

Durante un tiempo, Newton renunció a cualquier explicación de tipo mecanicista para la gravedad, aunque volvería a retomar la idea años más tarde. Por ejemplo, en su libro *Óptica* (Newton, 1637) utiliza la idea del éter como medio en el que se propaga el calor en el vacío, abriendo así el camino para una posible explicación de las interacciones gravitatorias siguiendo una analogía con la explicación del calor radiante (Holton y Brush, 1988).

Otro intento más ambicioso, que también puede encontrarse en *Óptica*, fue el que realizó para intentar integrar la gravedad con otros fenómenos conocidos de la época como los fenómenos de propagación de la luz (Solís, 1991). La base de esta idea estaba en admitir la existencia de un éter muy raro y sutil, capaz de penetrar los poros de la materia. Este éter no estaría repartido de una forma homogénea en el espacio, sino que existiría un gradiente de densidad creciente hacia las infinidades de los espacios vacíos, y decreciente a medida que nos aproximamos a los cuerpos. De esta forma, la atracción gravitatoria podría explicarse a partir de una especie de efecto de succión debida a este gradiente de densidades existente en torno al Sol y los planetas (Solís, 1991).

En realidad, parece que este mecanismo lo tenía ya Newton en mente doce años antes de publicar los *Principia*, a tenor de la carta que envió al entonces presidente de la Royal Society, H. Oldenburg, de la cual recoge un fragmento importante Escohotado (1987) en el prólogo de su traducción de los *Principia*. Newton se apoya en la idea de un éter sutil para explicar la atracción gravitatoria terrestre a través de un mecanismo de empuje análogo al que producen las corrientes de aire:

"Quizá todo el marco de la naturaleza no sea sino diversas contexturas de ciertos espíritus o vapores etéreos, condensados por así decir por precipitación, tal como los vapores se condensan en agua y las exhalaciones en sustancias más densas [...] De este modo puede ser causada la atracción gravitatoria por la condensación continua de algún espíritu etéreo semejante, no del cuerpo principal de éter flemático sino de algo difundido a través de ello muy fina y sutilmente, quizá de una naturaleza untuosa, gomosa, tenaz y elástica [...] Pues si semejante espíritu etéreo puede condensarse en cuerpos que fermentan o arden, o coagularse de otro modo en los poros de la tierra y del agua como alguna especie de materia húmeda activa para los usos continuos de la naturaleza (adhiriéndose a esos poros tal como los vapores se condensan en los lados del recipiente), el vasto cuerpo de la tierra [...] puede continuamente condensar una cantidad suficiente de este espíritu como para hacerlo descender desde arriba con gran celeridad para su suministro; en cuyo descenso puede arrastrar consigo los cuerpos atravesados por él con fuerza proporcional a las superficies de todas las partes sobre las que actúa"

(citado por Escohotado en el prólogo de su traducción de los *Principia*, 1987; p. 68).

Como vemos el lenguaje que utiliza Newton está pletórico de metáforas y analogías. Además del mecanismo análogo que utiliza para explicar el fenómeno de la gravitación equiparándolo a una especie de corriente de sustancia etérea, su discurso está lleno de paralelismos aclaratorios como ocurre, por ejemplo, cuando compara la condensación del éter a la condensación del agua, cuando atribuye a ese éter propiedades untuosas o gomosas, o cuando compara a la Tierra y al éter con un recipiente sobre cuya superficie se condensan vapores.

Años más tarde, en una carta enviada a Robert Boyle afina más en su explicación, si bien admite que se trata de meras conjeturas. Emplea para ello un mecanismo similar basado en la dinámica de torbellinos que se generan alrededor de un cuerpo situado en el interior de un fluido debido a un gradiente de presión:

"En cuanto a la causa de la gravedad, supondré que el éter consiste en partes que difieren unas de otras por infinitos grados de sutileza; que en los poros de los cuerpos hay menos éter denso ... que en las regiones del aire; y que el éter aún más denso en el aire afecta a las regiones superiores de la tierra, y el éter más fino en la tierra a las regiones inferiores del aire, de tal manera que desde la parte más alta del aire hasta la superficie de la tierra, y nuevamente desde la superficie de la tierra hasta su centro, el éter es insensiblemente más y más sutil. Imagine ahora cualquier cuerpo suspendido en el aire, o yaciendo sobre la tierra; siendo por la hipótesis más denso el éter de los poros que se encuentran en las partes superiores del cuerpo que en las inferiores, y siendo ese éter más denso menos apto para insertarse en tales poros que el éter más sutil situado debajo, se esforzará por salir y dejar paso al éter más sutil situado debajo, cosa imposible salvo que los cuerpos desciendan y le hagan lugar donde ir".

(citado por Escohotado en el prólogo de su traducción de los *Principia*, 1987; p. 69).

A menor escala, y mediante un mecanismo análogo, logró explicar la desviación de la luz en la transición entre medios de distinta densidad. De esta forma interpretó el cambio de velocidad y de dirección de la luz de un medio a otro de un modo semejante a como se interpretaría el cambio de velocidad y de dirección que sufre la trayectoria de un objeto que encuentra en su camino la acción gravitatoria de un astro. Se trataba, pues, de una explicación puramente mecánica articulada por un éter universal en la que los fenómenos obedecen a impulsos propiamente dichos, sin rastro de acciones a distancia (Escohotado, 1987). El problema de este modelo explicativo estaba, entre otras cosas, en el carácter esencialmente cualitativo de sus ideas, lo que impedía realizar predicciones precisas y fiables que fueran susceptibles de una comprobación empírica (Solís, 1991). Más tarde, debido a la escasa aceptación de sus explicaciones, Newton abandonó el éter para interpretar los fenómenos como atracciones y repulsiones entre partículas materiales, apoyándose en las nociones sobre las simpatías y antipatías químicas que como se sabe pueden considerarse un precedente importante de la noción de afinidad química.

A pesar de sus intentos fallidos y del escaso grado de aceptación que en su época tuvieron sus explicaciones de los distintos fenómenos, Newton crea un precedente importante al intentar explicar diversos fenómenos aparentemente muy distintos a través de una teoría única que los integrara. Por otra parte, también el éter siguió

jugando entre sus sucesores un papel importante a la hora de explicar cómo se transmitía en el espacio el calor radiante, la luz y la propia gravedad, si bien aquí cada autor aportó sus propias explicaciones ya que ninguna de ellas llegó a ser del todo satisfactoria. El principal problema estribaba en atribuir a este éter las propiedades de un cuerpo elástico al objeto de poder transmitir estos fenómenos y, a la vez, de tener que ser lo suficientemente sutil como para no ofrecer resistencia al movimiento de los planetas. Lord Kelvin, quien afirmaba abiertamente que no podía comprender una cosa a menos que pudiese tener un modelo de ella, sugirió un éter que no era un fluido simple sino un fluido retorcido en todos sus puntos en diminutos anillos o torbellinos en estructuras análogas a los anillos de humo (Hull, 1981). Creía que un éter de estas características permitiría transmitir las vibraciones de propagación de los correspondientes fenómenos posibilitando a la vez el paso sin resistencia de los cuerpos sólidos (Hull, 1981).

Para terminar, cabe comentar que la teoría de la gravitación, una vez que fue aceptada, se utilizó como análoga para el desarrollo teórico de otras partes de la Física, dando una continuidad a la tradición mecanicista. De esta forma, diversos investigadores dentro del dominio de la electricidad, como Cavendish, Priestley o Coulomb, buscaron una teoría análoga a la gravitación, bajo la clara influencia del mecanicismo newtoniano (Taton, 1988; Furió y Guisasola, 1997). De hecho, esta analogía llegó a resultar bastante sugerente en aquella época, y sirvió como fuente de hipótesis en algunos experimentos como el de Coulomb destinado a evaluar la magnitud de las fuerzas electrostáticas a través de su balanza de torsión (Bernal, 1975). Curiosamente, el razonamiento analógico operaría posteriormente en sentido inverso, de manera que la comprobación de la naturaleza análoga de la gravitación y la electricidad, con una ley similar en la que aparecían fuerzas inversamente proporcionales al cuadrado de la distancia, sirvió a Henry Cavendish cien años más tarde de la publicación de los *Principia* para realizar un experimento análogo al de Coulomb para determinar el valor de la densidad de la Tierra.

SÍNTESIS FINAL

A lo largo de este trabajo, junto a otro anterior ya citado (Oliva, 2004), hemos analizado la importancia del razonamiento analógico en el desarrollo de la mecánica, especialmente en el estudio de la naturaleza y origen de las fuerzas gravitatorias y en el modelo de sistema solar. Haciendo una rápida recopilación de algunos de los análogos con los que se ha llegado a comparar la gravitación a la hora de hacerse una idea de su naturaleza y de cómo funciona, encontramos: la luz, el magnetismo, el comportamiento de fluidos, el movimiento pendular, el empuje etéreo o la electricidad.

Por otra parte, si se realiza un análisis transversal de las diversas analogías utilizadas por pensadores y científicos a lo largo de la historia, es fácil distinguir hasta cuatro grandes tipos o bloques (figura 5). A continuación describiremos con más detalle las características de cada bloque y las conexiones existentes entre ellos.

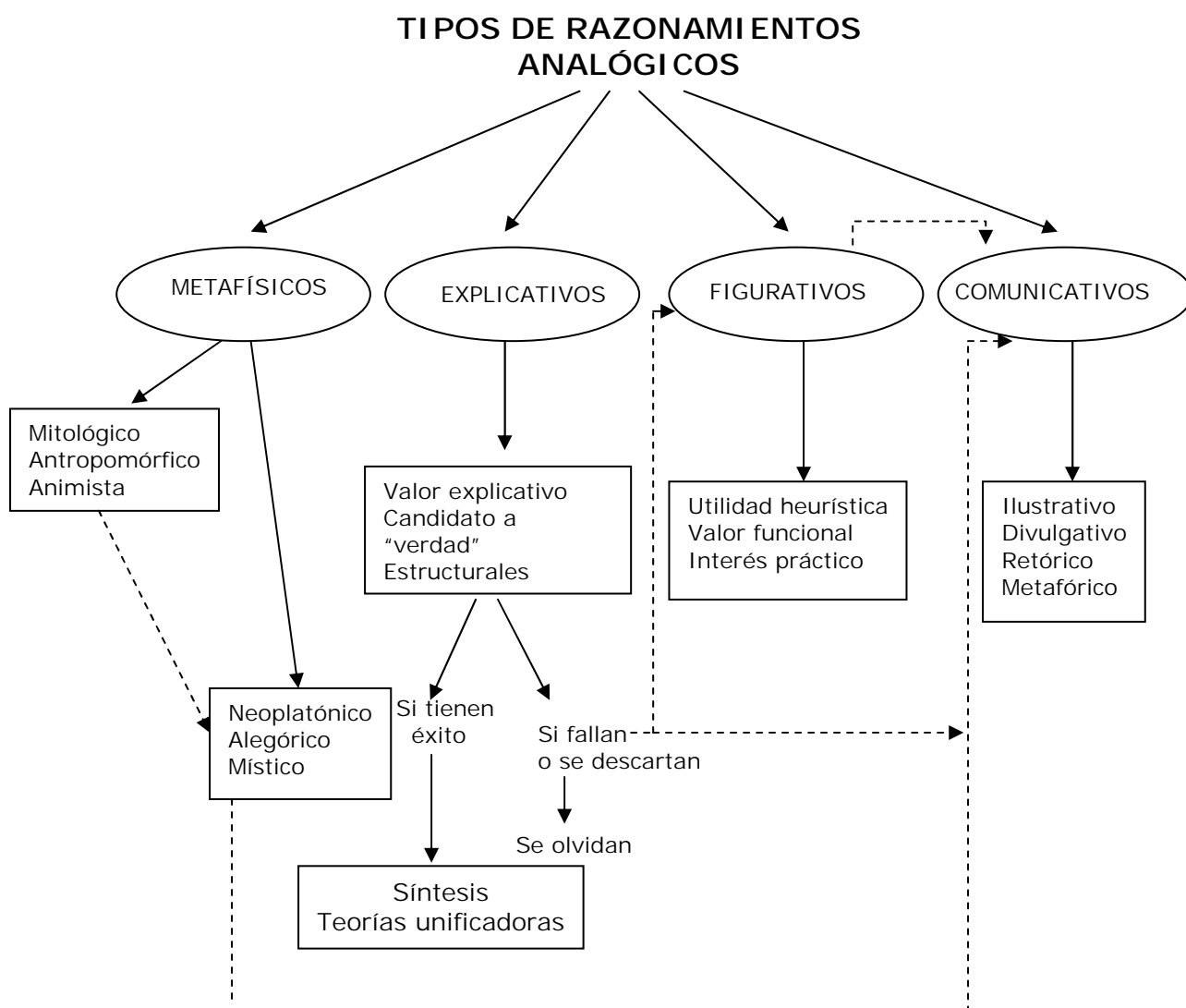


Figura 5.- Distintos tipos de razonamiento analógico en el desarrollo histórico de la mecánica.

Dentro de las analogías de tipo *metafísico* podemos distinguir dos versiones distintas entre las que es posible realizar algunas matizaciones importantes. En la versión fuerte de esta acepción, el razonamiento analógico se caracterizaría por su aproximación al pensamiento mítico, como forma de razonamiento imaginativo de tipo antropomórfico y animista fundamentado en causas sobrenaturales. Podemos incluir aquí el tipo de razonamiento que llevó a los modelos cosmológicos de las primeras civilizaciones incluidos los de la antigua Grecia.

En su acepción más débil, el razonamiento analógico de tipo metafísico vino dominado por una visión neoplatónica del mundo (Oliva, 2004), en la que se mezcla la interpretación de filosófica de Platón con la realidad y con la mística. Este tipo de razonamiento analógico fue frecuente en autores de la talla de Copérnico o Kepler, en los que, tanto en sus teorías como en el lenguaje que utilizaban para expresarlas, eran frecuentes las alegorías y razonamientos de tipo místico.

A partir del siglo XVII –en realidad esta tendencia aparece ya a finales del siglo anterior- se observa una nueva forma de utilizar el razonamiento analógico basada en la comparación de la gravedad con otros fenómenos físicos. En ella se relaciona el funcionamiento del cosmos, en particular del Sistema Solar, con causas y situaciones físicas ajenas a los deseos y comportamientos humanos.

En las analogías de tipo explicativo, el fenómeno análogo se entiende como algo más que un referente que ayuda a entender al fenómeno o evento que se quiere interpretar. Se concibe como un modelo teórico candidato a “verdad” de la realidad física que se desea interpretar en el nuevo fenómeno (Harre, 1972; citado por Brown y Clement, 1989). Ambos fenómenos se relacionan, pues, no solo mediante alguna semejanza formal sino también estructural, compartiendo los mismos principios causales. Los dos fenómenos de la comparación no serían tratados como fenómenos diferentes sino como casos particulares o ejemplos concretos de una misma realidad física.

Esta forma de pensar tiene un importante precedente en el propio Kepler, por ejemplo, cuando trataba de interpretar la dinámica del movimiento planetario a través de las fuerzas magnéticas que ya eran bien conocidas en su época. Según Khun (1975), el razonamiento analógico, como proceso que alienta a visualizar situaciones u objetos desde la misma ley científica, juega un papel esencial en el proceso de generalización del conocimiento. En algunos casos las analogías explicativas parecen consolidarse y afianzarse al cabo de cierto tiempo, conduciendo a un proceso de generalización inductiva y, más tarde, a una síntesis de leyes o fenómenos. Este es el caso, por ejemplo, de la labor llevada a cabo por Newton cuando consideró análogos el movimiento de caída de los cuerpos y el movimiento orbital de la Luna, dando pie a la ley de Gravitación Universal.

En otros casos, la identificación causal que establece la analogía puede fracasar, olvidándose con el paso del tiempo o conservándose como vieja reliquia con un estatus diferente, con un valor funcional o simplemente como instrumento del lenguaje. Las analogías de tipo figurativo se corresponden con lo que habitualmente se llaman analogías en el ámbito educativo, es decir, comparaciones que hacen más asequible la comprensión de un nuevo concepto o fenómeno a partir de otro similar mejor conocido, pero que no pretenden ir más allá de la mera comparación. En estos casos, el objeto y el análogo comparten un modelo también, como en toda analogía (Oliva et al., 2000). No obstante, en este caso el modelo no intenta ser explicativo, en el sentido de que no intenta aportar una misma explicación causal para los dos fenómenos que se comparan, sino que persigue únicamente un interés práctico. En unos casos, la analogía intenta servir únicamente como una herramienta heurística que permite hacer predicciones. En otros casos, la analogía sirve como un soporte representacional para comprender conceptualmente la naturaleza del objeto. Por ejemplo, Newton sigue utilizando el campo magnético como análogo del gravitatorio, pero asumiendo que gravedad y magnetismo responden a fenómenos distintos. Esta acepción del razonamiento analógico tiene su equivalencia en el contexto didáctico en las analogías-artificios, es decir aquéllas que utiliza el profesor con objeto de hacer asequible fenómenos complejos y abstractos.

Finalmente las analogías ilustrativas pueden considerarse semejantes a las anteriores, pero mientras las figurativas tendrían un valor científico, en el sentido de que habrían servido como herramienta creativa del científico, estas otras solo tendrían un valor comunicativo, como instrumento expresivo o divulgativo utilizado por el autor. En ocasiones, éstas provienen de antiguas reminiscencias de las analogías metafísicas, en este caso utilizadas solamente con un valor alegórico y literario. También a veces son las mismas que utilizaron a nivel figurativo los científicos para elaborar sus ideas, con lo cual comparten también el alcance y las imitaciones de esas otras, toda vez que no desean explicar algo sino facilitar la comprensión de ese algo.

Como habrá podido apreciar el lector, esta tipología de razonamientos de tipo analógico no es exclusiva del devenir histórico de este dominio científico sino que tiene también vigencia al hablar del razonamiento analógico de los estudiantes cuando aprenden ciencias dentro y fuera de la escuela. En este sentido diremos que, aun sin pretender defender a ultranza el paralelismo entre la ontogénesis y filogénesis del conocimiento científico, pensamos que la historia de la ciencia puede venir a complementar los fundamentos de la Didáctica de las Ciencias provenientes de otras disciplinas. Por ello, consideramos que el razonamiento analógico puede y debe tener un papel relevante dentro de los procesos de aprendizaje de las Ciencias en los alumnos, no sólo a través de la construcción y uso de analogías funcionales o comunicativas, que suelen ser las más frecuentes dentro del panorama de las analogías que se ofrecen en los textos y en las explicaciones del profesor, sino incluso también a través de analogías explicativas que sirvan para ayudar a los alumnos a relacionar nociones que para ellos están muy distantes pero que, desde el punto de vista científico, tienen una misma explicación.

Por ejemplo, en muchos libros de divulgación científica se utiliza el movimiento de proyectiles como medio de acercamiento de la caída de graves y el movimiento planetario. Desde nuestro punto de vista, la enseñanza formal debería también otorgar un valor a este tipo de puentes analógicos ya que en ello podría estar la clave de los procesos de generalización inductiva que están en la base de muchos de los aprendizajes que han de construir los estudiantes.

Para terminar, conviene comentar que los razonamientos analógicos no siempre han conducido a ideas productivas y potencialmente útiles de cara a la evolución del conocimiento científico en la historia de la Ciencia. No tenemos más que revisar algunos de los argumentos utilizados por Newton para comprender que no siempre el razonamiento analógico actúa en un sentido deseado desde el punto de vista del devenir de futuros acontecimientos.

Del mismo modo, y aplicando esta vez la analogía para hablar del aprendizaje de los estudiantes, es posible que no todo razonamiento analógico llevado a cabo por el alumno conduzca a ideas o nociones deseables desde el punto de vista de su conocimiento escolar. Pero ello no indica sino la conveniencia de que el profesor actúe continuamente regulando el aprendizaje de los alumnos cuando operan a través de los mismos, ya que, en definitiva, constituyen un fenómeno espontáneo propio de la actividad humana que debemos saber canalizar y potenciar. Sólo así podremos educar mentes creativas y productivas para la sociedad del mañana (Oliva y Acevedo, 2004).

REFERENCIAS

- BERNAL, J.D. (1975). *La proyección del hombre. Historia de la Física clásica*. Madrid: Siglo XXI.
- CASADELLA, J. y BIBILONI, L. (1985). La construcción histórica del concepto de fuerza centrípeta en relación con las dificultades de su aprendizaje. *Enseñanza de las Ciencias*, 3(3), pp. 217-224.
- CASADELLA, J. y MIRÓ, C. (1997). La enseñanza de los conceptos de fuerza centrípeta y fuerza centrífuga. Una propuesta inspirada en la historia de la mecánica. *Enseñanza de las Ciencias*, 15(3), pp. 393-399.
- COHEN, I.B. (1989). *Revolución en la Ciencia*. Barcelona: Gedisa.
- CROMBIE, A.C. (1996). *Historia de la Ciencia: De San Agustín A Galileo*. Madrid: Alianza Universidad.
- DREISTADT, R. (1968). An analysis of the use of analogies and metaphors in Science. *Journal of Psychology*, 68, pp. 97-116.
- ESCOHOTADO, A. (1987). *Estudio preliminar y traducción de Philosophiae Naturalis Principia mathematica*. Madrid: Tecnos.
- EULER, L. (1768). Lettres à une princesse d'Allemagne. Traducción española de Ana Rioja: Cartas a una princesa alemana. En *Reflexiones sobre el espacio, la fuerza y la materia*. 1985. Madrid: Alianza Editorial.
- FERRIS, T. (1990). *La aventura del Universo*. Barcelona: Crítica.
- FURIÓ, C. y GUIASOLA, J. (1997). Deficiencias epistemológicas en la enseñanza habitual de los conceptos de campo y potencial eléctrico. *Enseñanza de las Ciencias*, 15(2), pp. 259-271.
- GALILEI, G. (1615). Carta a la señora Cristina de Lorena, Gran Duquesa de Toscana. En P. de la Fuente, X. Granados y F. Reus (Eds.), *Cartas Copernicanas*. Madrid: Alhambra (1986).
- GESTNER, D. (1983). Structure-mapping: A theoretical framework for analogy. *Cognitive Science*, 7, pp. 155-170.
- HARRÉ, R. (1972). *The philosophies of science*. New York: Oxford University Press.
- HARRÉ, R. (1986). *Grandes experimentos científicos*. Barcelona: Labor.
- HOLTON, G. y BRUSH, S.G. (1988). *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*. Barcelona: Reverté.
- HULL, L.W.H. (1981). *Historia y filosofía de la Ciencia*. Barcelona: Ariel.
- KHUN, T. (1975). *La estructura de las revoluciones científicas*. Madrid: Fondo de Cultura Económica.
- KHUN, T. (1985). *La revolución Copernicana*. Barcelona: Ariel.
- KOYRÉ, A. (1990). *Estudios de historia del pensamiento científico*. Madrid: Siglo XXI.
- LAWSON, D.I. y LAWSON, A.E. (1993). Neural principles of memory and neural theory of analogical insight. *Journal of Research in Science Teaching*, 30(10), pp.1327-1348.
- LOSSE, T. (1987) *Introducción histórica a la filosofía de la ciencia*. Madrid: Alianza.
- MASON, S.F. (1990). *Historia de las Ciencias. La revolución científica de los siglos XVI y XVII*. Madrid: Alianza.
- MUSCARI, P.G. (1988). The metaphor in science and in the science classroom. *Science Education*, 72(4), pp. 423-431.

- NEWTON, I. (1687). *Philosophiae Naturalis Principia mathematica*. Trad. Española: Principios matemáticos de Filosofía natural. Antonio Escohotado. E.N. 1997. Madrid: Tecnos.
- NEWTON, I. (1727). *De mundi Systemate Liber Isaacci Newtoni* (Trad. Española: El sistema del mundo. Eloy Rada García. E.N. 1983. Madrid: Alianza Editorial).
- NEWTON, I. (1730). *Opticks*. Trad. Española: Óptica. Carlos Solís 1977. Madrid: Ediciones Alfaguara.
- OLIVA, J.M^a (2004). El papel del razonamiento analógico en la construcción histórica de la noción de fuerza gravitatoria y del modelo del sistema solar (Primera parte). *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 1(1), pp. 30-43. En línea en:
http://www.apac-eureka.org/revista/Volumen1/Numero_1_1/Vol_1_Num_1.htm.
- OLIVA, J.M^a y ACEVEDO, J.A. (2004). Pensamiento analógico y movimiento de proyectiles. Perspectiva histórica e implicaciones para la enseñanza. *Revista Española de Física* (aceptado para su publicación).
- OLIVA, J.M^a, MATEO, J.; BONAT, M. y ARAGÓN, M^a.M. (1997). Las analogías en los textos de Química de Secundaria. *Actas de la 26^a Bienal de la Real Sociedad Española de Química*. Volumen I. Cádiz, pp. 323-324.
- OLIVA, J.M^a; ARAGÓN, M^a.M.; MATEO, J. y BONAT, M. (2000). Análisis de un programa de investigación/acción en torno al uso de analogías en la enseñanza de las ciencias. *Comunicación presentada en los XIX Encuentros sobre la Didáctica de las Ciencias Experimentales*. Madrid.
- SOLAZ, J.J. y SANJOSÉ, V. (1992). El papel del péndulo en la construcción del paradigma Newtoniano. *Enseñanza de las Ciencias*, 10(1), pp. 95-100.
- SOLÍS, C. (1991). *Historia de la Ciencia y de la Técnica. La revolución de la Física en el siglo XVII*. Madrid: Akal.
- TATON, R. (1988). *Historia General de la Ciencia*. Orbis.
- THUILLIER, P. (1988). *De Arquímedes a Einstein. Las caras ocultas de la invención científica, I*. Madrid: Alianza.
- TRUEDELL, C. (1975). *Ensayos de historia de la mecánica*. Madrid: Tecnos.