

SEMINARIO DE EDP

“ISAAC NEWTON”

ALUMNOS: Francisco Rivas García
Francisco Nogueras Lara
CURSO 2º A

Índice

TEMAS	Páginas
• Introducción: Un premio de 40 chelines.	3-4
• Isaac Newton y su contexto político y cultural.	5-6
• Infancia de Newton. Primeros años de juventud.	6-9
• El Trinity.	9-11
• Annus mirabilis.	12-20
• El manzano de Newton.	20-21
• El profesor de la cátedra Lucasiana.	21-25
• El rechazo de los modernos.	22-27
• Sistemas del mundo anteriores a Newton.	27-28
• Principia mathematica.	28-57
I. La antesala: De motu corporum in gyrum.	28-29
II. Estilo Newtoniano.	29-30
III. Una obra genial, pero mal escrita.	30
IV. Libro Primero: Del movimiento de los cuerpo.	30-40
V. Libro II de los Principia.	41-49
VI. Éxito y tradición de la Mecánica prenewtoniana.	49-51
VII. Un retazo de la obra de los Bernoulli.	51-53
VIII. Las leyes de la mecánica de Euler.	53-55
IX. La Méchanique analytique.	55
X. Sobre el sistema del mundo.	55-57
• Los últimos años.	57
• El funeral.	58
• Bibliografía.	60

INTRODUCCIÓN: Un Premio de 40 Chelines

Londres, 1683. Sentados en una taberna discutiendo alegremente mientras cenaban, se encontraban: Christopher Wren, astrónomo que más tarde sería arquitecto, Robert Hooke, el primero en describir una célula y realizar amplios estudios acerca de la elasticidad, y Edmund Halley, un científico que hizo de todo menos descubrir el cometa con su nombre (en realidad lo vio pasar y lo relacionó con el cometa que otros habían visto previamente, pero nunca llegó a oírlo como Halley).



Sir Christopher Wren



Robert Hooke



Edmund Halley

La conversación que mantenían cobraba interés en tanto que se preguntaban por el origen del movimiento de los planetas. Incapaces de alcanzar la solución, Wren se comprometió a premiar con un libro valorado en 40 chelines (la mitad del sueldo mensual de un mercader rico) a quien de entre Hooke y Halley fuera capaz de encontrar la solución.

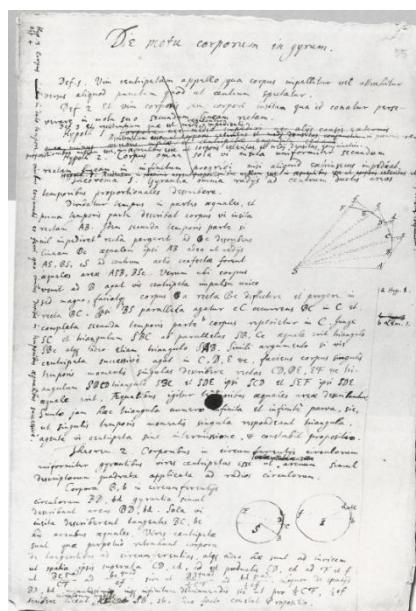
Meses después, Halley, superado ante la incapacidad de resolver el problema, se decidió a visitar a un personaje un tanto peculiar: Isaac Newton. Titular de la cátedra Lucasiana de Matemáticas, nunca hizo mucho para ser conocido; más bien era una persona aislada de la sociedad que vivía recluido en el Trinity college alimentando los fogones de su laboratorio de alquimia. Como "filósofo natural" no era muy reconocido, ya que en su única aparición pública había defendido que la luz blanca resultaba de la composición de los colores del arcoíris, teoría muy extravagante para el conocimiento de la época. Por otro lado, era considerado un excelente

matemático, y de él se decía que poseía un método para resolver los más intrincados problemas relacionados con curvas. Este último motivo fue el que decidió a Halley a arriesgarse a viajar a Cambridge para encontrarse con Newton.

Halley no las tenía todas consigo, ya que Newton era especialmente conocido por su rigor moral y, sin embargo Halley fue tachado por el obispo y filósofo George Berkeley como un "matemático sin fe". Además, para empeorar su situación a ojos de Newton, se rumoreaba que en su viaje a Santa Elena para catalogar el cielo austral había dejado embarazada a la esposa de un compañero de viaje.

Por otro lado, si Newton se dignaba a recibirla y conocía la solución del problema, ¿por qué habría de dársela?

La visita resultó muy productiva para Halley, ya que no sólo fue bien atendido por Newton, sino que enseguida éste le comunicó que el problema no le era extraño y que, para sorpresa de Halley, tenía la solución. No obstante, no pudo entregarle sus apuntes al respecto debido al gran desorden que acumulaba entre sus escritos. Por tanto acordaron que cuando Newton los encontrara se los haría llegar para que Halley pudiera estudiarlos. Más tarde Edward Paget (buen matemático y miembro del Trinity College) se los haría llegar.



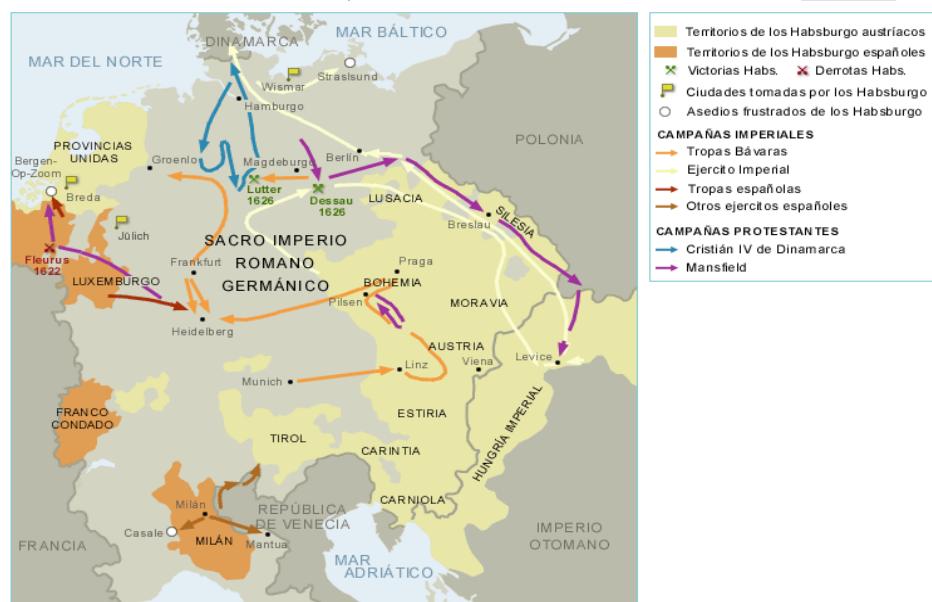
Facsímil de la respuesta de Newton

ISAAC NEWTON Y SU CONTEXTO POLÍTICO Y CULTURAL

El panorama político en que se enmarca la vida de Newton constituye uno de los períodos más convulsos de la historia europea. En sus primeros años de vida, mientras en el continente finalizaba la Guerra de los Treinta años entre católicos y protestantes (1618-1642), en Gran Bretaña no había hecho más que empezar la primera de tres Guerras civiles casi consecutivas que serían de una importancia trascendental para el progreso de la sociedad del siglo XVII. En 1642 los defensores del Parlamentarismo se levantaron en armas en contra de una dinastía, los Estuardo, que habían pretendido limitar el ya de por sí escaso poder de las cámaras parlamentarias.

La Guerra de los Treinta Años, 1618-1629

[imprimir](#)



Pronto alcanza el poder el puritano Oliver Cromwell, quien tras el ajusticiamiento del rey Carlos I, comienza una dictadura controvertida en la que centra el poder en su persona. En este periodo proliferan sectas católicas de marcado carácter calvinista y se produce la depuración de los católicos escoceses e irlandeses.

Con la muerte de Cromwell, se produce la Restauración de los Estuardo, hecho que provocará un nuevo levantamiento armado.

Oliver Cromwell

Finalmente y tras un belicoso proceso que comprendió etapas "democráticas" y monárquicas, se consiguió establecer una monarquía de poder limitado en la persona de Guillermo de Orange. Este hecho pasó a la historia bajo el nombre de "Revolución Gloriosa".

Gracias al mayor grado de libertad obtenido con las reformas conseguidas por el Parlamento, se crea el marco perfecto para poder llevar a cabo las ideas ilustradas que tienen su fundamento en dos grandes pensadores ingleses: John Locke e Isaac Newton, padre del método científico. Así, se impone la razón como herramienta fundamental para la comprensión del mundo; hecho que permitirá notables avances científicos.

INFANCIA DE NEWTON. PRIMEROS AÑOS DE JUVENTUD

Fue prematuro, había nacido en Woolsthorpe el 25 de Diciembre de 1642, año en que Galileo Galilei moría. En esa época en Inglaterra era un milagro que un niño prematuro no muriera días después de su nacimiento, pero con el cuidado de su madre, Hannah Ayscough, el muchacho se adaptó y sobrevivió.



Casa natal de Newton

Poco antes del nacimiento de Isaac, su padre (del mismo nombre) moría dejando una incierta situación económica en la familia. Así, aunque la granja donde vivían constaba de unos cien acres de tierra, la casa se hallaba en mal estado y los ingresos no eran suficientes para repararla. No obstante durante este periodo, Hannah recibió ayuda de unos parientes clérigos para poder sacar adelante a su hijo.

Cuando Newton contaba con tres años, su madre volvió a casarse con el reverendo Barnabas Smith, viejo y acaudalado propietario de la casa rectoral de North Witham, que consiguió convencerla con una cuantiosa dote que aseguraría el futuro de su hijo y de la granja. Partió dejando al joven Isaac a cargo de su abuela hasta la muerte de su padrastro en 1653.

Este hecho es crucial en el desarrollo de Newton que se verá envuelto en sentimientos encontrados, que pueden ser una de las causas de su carácter complicado. No obstante, le permitirá disfrutar de la estabilidad económica que le ayudará a comenzar sus estudios en Cambridge más adelante.

En el regreso, su madre vino acompañada de un hijo de un año y de dos hijas algo mayores cuya presencia no sabemos hasta dónde pudo afectar al pequeño Isaac.

Fue un poco retraído de niño, pero poseía una tremenda curiosidad por las cuestiones naturales y aptitud para la mecánica. En sus primeros años no mostraba mayor señal de brillantez, parecía un chico como cualquier otro. Así, durante su periodo escolar, Newton se preocupaba más de ayudar a su madre a la administración de sus bienes que del rendimiento académico.

En 1655, es enviado a la "Free Grammar School of King Edward VI" en Gratham, donde tendrá como profesor a Henry Stokes. Allí es donde entra en contacto por primera vez con Henry More, filósofo natural de la región, que influirá posteriormente en la concepción newtoniana del espacio y con el que coincidirá en Cambridge.

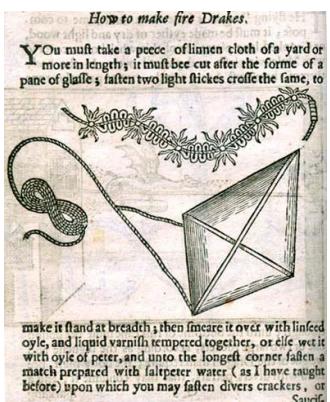
Durante este periodo se hallaba alojado en la casa del boticario Mr. Clark, cuya esposa era amiga de la madre de Newton. Los tres hijos que la esposa de Clark había tenido en un matrimonio anterior entrarán en contacto con Newton, si bien la relación más interesante es la de hija menor, Miss Storey, que será la encargada de dar la única nota humana sobre Newton que se conoce en su primera biografía llevada a cabo por un amigo de Isaac, William Stukeley.

La joven muchacha fue la única amiga del joven Isaac en aquellos tiempos y posiblemente fue la única mujer de su vida. Sintió por ella un gran afecto y, sin que se sepa mucho más, esta fue quizá la historia de un romántico enamoramiento.

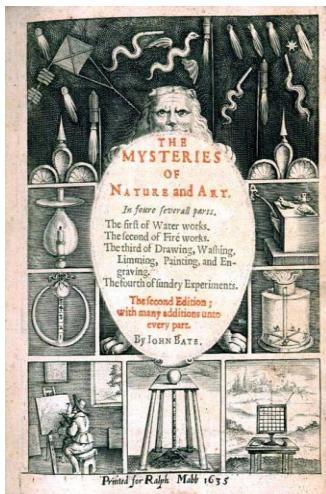
La actitud de Isaac ante los estudios cambió cuando el matón de su clase, que además era uno de los alumnos más aventajados, se encaró con él. Newton, de temperamento fuerte y de carácter complicado, no sólo le propinó una buena paliza, sino que decidió dedicar tiempo a sus estudios para así poder humillar académicamente a su agresor. Sin lugar a dudas este hecho constituirá uno de los principales puntos de inflexión en su carrera, marcando la trayectoria que seguirá en su juventud y que le llevará a convertirse en un renombrado científico de la época.

Así, gracias a su competitividad, pronto consiguió convertirse en el primer alumno de la escuela. Su progresión dejó un rastro tras de sí hasta el punto de que todos los bancos por los que pasó fueron grabados con su nombre.

En su juventud, Newton era conocido en Grantham por sus extraños inventos y por su inclinación a los trabajos mecánicos. Así, mientras los demás niños se dedicaban a jugar, él se encargaba de elaborar complejas maquetas de madera con las herramientas que compraba con el dinero de su asignación.



Cometa descrita en el libro



Los Misterios de la
Naturaleza y el arte
(1618)



Motor de agua

Tras cuatro años y medio de estancia en Grantham, su madre le reclama en Woolsthorpe para que se haga cargo de la granja. Sin embargo, su desinterés por la granja y por todo lo que allí ocurría hizo de Newton un pésimo alumno agrícola. Gracias a la intervención de Henry Stokes y de los parientes clérigos de Hannah, pudo volver a Grantham para preparar su futuro ingreso en la Universidad de Cambridge.

De nuevo en la escuela de Grantham, los estudiosos de la misma se encargaron de preparar a Newton para un dominio del latín y de los clásicos. Sin embargo, entre sus estudios no se encontraban las matemáticas o la filosofía.

En esta nueva etapa de preparación hacia la universidad, las amistades de su madre y de la señora Clark le procuraron una serie de valedores. Entre ellos se destaca en especial Humphrey Babington, Fellow del Trinity y hermano de la señora Clark.

El 5 de Junio de 1661 Newton cruza por primera vez las puertas del Trinity College. Aunque no era absolutamente pobre de fortuna, su situación de ingreso en el Trinity es de subsizar, estudiante pobre que había de servir a los Fellows y estudiantes ricos. Los estatutos del Trinity daban cumplimiento con ello al precepto evangélico de socorrer a los pobres. Sin embargo, al parecer Newton no encontró demasiado duro su cometido, ya que desde un principio estuvo destinado al servicio de Babington, que procuró el cuidado de sus intereses.

EL TRINITY

La Universidad de Cambridge en la que se formó Newton, se constituyó a partir de la unión de 31 colleges (cada uno aún preserva una autonomía significativa dentro de la Universidad). El grado de independencia entre ellos puede evidenciarse a través de sus normativas particulares, como las reglas de admisión y la designación de sus miembros.



Vista aérea Campus de Cambridge

En 1661, la Universidad de Cambridge es una venerable institución con más de 400 años de vida, pero que no atraviesa por su mejor momento. Va a sufrir hostilidades por parte de los nuevos y poderosos realistas que le harán pagar sus simpatías por los puritanos. Además, se produce un desfase entre los currículos oficiales y los manejados por Cambridge, aún impregnados de escolasticismo.



Trinity College

Las enseñanzas universitarias del Trinity eran típicamente escolásticas, con algunos toques renacentistas y basadas en las antiguas disciplinas medievales que comprendían el bachillerato en artes y teología. Así, gramática, retórica, dialéctica, un poco de física y astronomía, algo de matemáticas, música y la lectura de los clásicos constituían las principales materias universitarias. Ante este

programa, el joven Newton sintió poco interés: pese a estudiar latín, griego, lógica y física aristotélica pronto se sumerge en la lectura de Henry More y de Descartes; de Galileo y Hobbes; de Wallis, Gassendi y muchos otros. Tiene a su disposición la Biblioteca de la Universidad y ansía conocimiento. Sus progresos fueron casi siempre en solitario con la excepción de Barrow que le ayudará tras su elección como alumno residente.

En cuanto a sus relaciones personales, trascurridos siete u ocho meses de su llegada, se encontró con John Wickins con quien compartiría habitación y con quien llegó a entenderse.

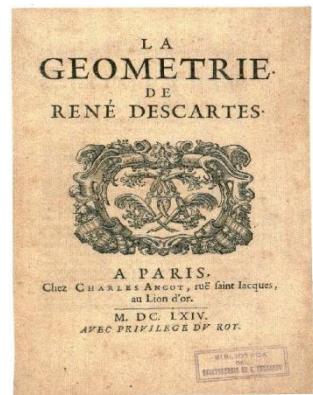
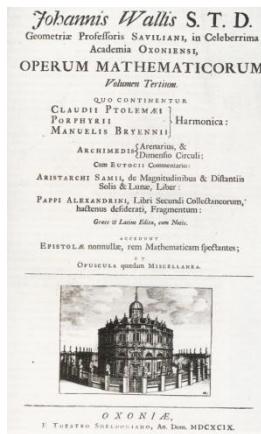
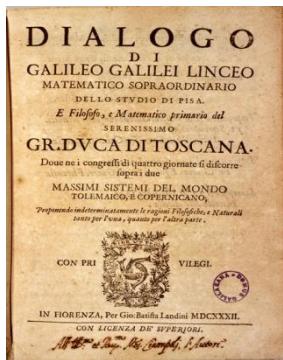
En su formación en el Trinity tuvieron gran repercusión en Newton las ideas cartesianas a las que se acercó a través de Henry More. Estudió "El Discurso del Método", seguido de la "Dióptrica", la "Meteorología" y la "Geometría" que le permitiría extraer dos conclusiones que marcarían su vida:

- Para aspirar a ser un filósofo natural hay que aprender el arte de las matemáticas manipulando con habilidad las técnicas del cálculo. La matemática no es un fin último en sí misma, sino al servicio de la Física y de la Filosofía Natural.

- No hay problema que no se pueda resolver si se actúa con el método adecuado.

Seguirá su formación con el "Diálogo" de Galileo, obra en la que estudiará fascinado el modelo heliocéntrico y confirmará que las matemáticas son, efectivamente, el lenguaje de la naturaleza.

Los libros que le marcaron:



Siguiendo las pautas cartesianas, se convierte en un consumado algebrista, completando su formación con las obras de Vieta y Oughtred. Cabe destacar también la importancia que tuvo para él la "Arithmetica infinitorum" de Wallis con la que se introducirá en el cálculo infinitesimal.

En 1664 cuando hubo de ser examinado por Isaac Barrow de matemáticas dejó el examen en blanco, ya que según descubrió Barrow manejava con soltura la geometría de Descartes sin conocer apenas la de Euclides siendo esta última el contenido del examen. Este hecho estuvo a punto de costarle el puesto de estudiante residente, si bien la ayuda de Babington y el interés que suscitó en Barrow su manejo de la Geometría de Euclides, garantizaron su carrera y el inicio de una relación intelectual con Barrow.

Superado el examen, Newton se asegura la estancia en la Universidad por cuatro años más, el poder aspirar a Fellow e incluso una pequeña paga.

Annus mirabilis

En 1665 desalojan la Universidad ante la plaga de peste que asola, a la ya castigada por las guerras, Inglaterra. Ante esta situación, Newton se traslada al campo regresando a su casa natal de Woolsthorpe. Su periodo de reclusión y alejamiento de la vida universitaria se extiende por dos años y constituye uno de los periodos más importantes de la vida del célebre personaje. Es en estos años, "annus mirabilis", donde tiene lugar la concepción de las teorías que Newton desarrollará durante sus años maduros. El germen de su obra se halla localizado, pues, en estos dos años de soledad dedicados al estudio.

El desarrollo de las teorías newtonianas se encuadra en un tiempo en el que aquellos que se ocupaban de dar respuestas a los enigmas que planteaba la naturaleza se llamaban a sí mismos filósofos naturales. Los dos grandes modelos que estos daban a cerca del movimiento de los planetas tenían dos fundamentos bien distintos: uno daba una explicación sostenida en el magnetismo, la filosofía magnética, y otro la daba desde un punto de vista mecánico, la filosofía mechanicista.

Los defensores de la filosofía magnética se apoyaban en las obras "De magnet" de William Gilbert y "De hemellop" de Simon Stevin. Kepler dio una explicación a sus tres leyes que explican cuál es el movimiento y cómo son las órbitas de los planetas en torno al Sol gracias a estas dos obras. Este modelo magnético que presenta Kepler es un poco complejo: prevé una fuerza magnética que provoca un movimiento de revolución circular alrededor del Sol y otra que causa un movimiento radial de acercamiento y alejamiento respecto a éste, de tal forma que la composición de esos dos movimientos da lugar a las órbitas elípticas. Esta teoría fue aceptada por muchos filósofos naturales de la época, entre ellos Christopher Wren, que fue quien propuso la apuesta de los 40 chelines. Hay que destacar que Kepler introduce ya el concepto de fuerza inmaterial, que será clave en la Mecánica Newtoniana.



La filosofía mechanicista, sin embargo, establece que todos los fenómenos naturales deben ser explicados mediante partículas, el movimiento de éstas y sus colisiones mutuas. El adalid de esta corriente fue Descartes con "Los Principios de la Filosofía".

Puede decirse que Newton construyó la práctica totalidad de su obra científica teniendo como base a "La Géométrie" de Descartes y a la "Arithmetica infinitorum" de John Wallis.

Descartes en su Géométrie mostró que el álgebra y la geometría correspondían a las dos caras de una misma moneda. Merced a la introducción de un sistema de coordenadas cartesianas, una curva plana puede considerarse el lugar geométrico de los puntos del plano cuyas coordenadas x e y satisfacen la relación algebraica: $y = f(x)$. El problema de su aproximación a la geometría en términos algebraicos es su limitación a expresiones algebraicas finitas cuando ya, en ese tiempo, se sabía que un gran número de magnitudes geométricas no pueden expresarse mediante un número finito de términos. Para remediarlo, los matemáticos del siglo XVII habían generalizado el análisis cartesiano mediante diversas técnicas, siendo las series infinitas la más importante, aunque este método no tenía unas bases muy sólidas.

Por medio de la obra de Wallis, Newton aprende mucho sobre series infinitas, llegando así a desarrollar la serie binomial. Esta serie se obtiene expresando $(1+x)^n$, donde n es un número real, como una serie de potencias de x . La serie binomial, válida para todo x superior a -1 e inferior a 1, se escribe:

Donde el término $m+1$ de la serie es igual a:

Con la ayuda de esta serie, Newton calcula fácilmente el área definida por algunas curvas, estableciendo las dos reglas siguientes para este cálculo:

1. Para calcular el área subtendida por una curva cuya ecuación se expresa mediante una serie infinita, es necesario calcular las áreas subtendidas por las curvas correspondientes a los términos de la serie y sumar (teniendo en cuenta el signo) estas series.
2. El área subtendida por la curva de ecuación $y = f(x)$, siendo $c = \text{cte}$, y el intervalo $[a, b]$ es igual a:

Inmediatamente después de haber descubierto la serie binomial, toma conciencia de un hecho extraordinario: el problema de determinar la tangente en uno de los puntos de una curva y el problema del cálculo del área delimitada por dicha curva, son uno el inverso del otro. Este resultado corresponde a una de las mayores generalizaciones de la historia de las Matemáticas. No se trata de la resolución de un problema particularmente difícil, sino de la resolución de toda una clase de problemas que se reducen ahora al cálculo de áreas o de tangentes. Este descubrimiento supuso el principio de lo que hoy llamamos cálculo diferencial e integral, o cálculo infinitesimal, cuya base es el Teorema Fundamental del Cálculo (el alemán Leibniz creó este cálculo infinitesimal casi al mismo tiempo).



Gottfried Wilhelm von Leibniz

Newton llega a este teorema fundamental mediante la adopción de una visión cinemática de las magnitudes geométricas: las concibe como si estuvieran generadas por un movimiento continuo (considera una curva como la trayectoria de un punto en movimiento). Las magnitudes geométricas así generadas se denominan *fluyentes*, y sus *velocidades instantáneas*, o *tasas de aumento, fluxiones*.

Desde 1690, Newton denota con las letras x a las magnitudes *fluyentes* y con \dot{x} sus *fluxiones*. Indica, además, con Δx un intervalo de tiempo infinitamente pequeño. Así, \dot{x} corresponde al incremento infinitesimal de la magnitud *fluyente* en el intervalo de tiempo infinitesimal (Δx). (este producto de la velocidad instantánea por el intervalo de tiempo Δx se denomina *momento de la magnitud fluyente*).

Cabe subrayar algunas diferencias respecto de los procedimientos actuales. Newton habla de "curvas", no de "funciones" (el concepto abstracto de función *emergerá* más tarde, y es que las matemáticas del siglo XVII están todavía muy ancladas en la interpretación geométrica). Utiliza magnitudes infinitamente pequeñas y una regla de cancelación donde nosotros utilizamos un procedimiento de *paso al límite*. En lugar de usar los conceptos rigurosos

de límite, convergencia, existencia, unicidad, continuidad, diferenciabilidad, etc., Newton confía en la intuición de la generación de magnitudes "por movimiento continuo".

Con todo esto, penetra en un mundo nuevo, un mundo desconocido para los matemáticos de la época, como ya hizo Descartes al unificar el Álgebra y la Geometría. Pero este científico francés no sólo le fue fuente de inspiración en el campo de las Matemáticas, sino que también lo fue en óptica, aunque Newton hará referencia también a obras de Walter Charleton, Robert Boyle y Robert Hooke.

Según las teorías de todos los autores mencionados, la luz blanca es simple y los colores son modificaciones de ésta. Se denominan por ello, teorías "modificacionistas" de la luz. Isaac pronto se convencerá de la existencia de algo insatisfactorio en estas teorías tras llevar a cabo una serie de experiencias con un prisma.

La mayoría de los experimentos con prismas se habían realizado a partir de imágenes refractadas sobre una pantalla colocada cerca del prisma. Newton, en cambio, inspirado por la obra de Boyle, oscurece la habitación, practica



un pequeño agujero en la persiana de una ventana y proyecta la imagen sobre una pantalla colocada a varios metros de distancia. Consigue así observar la formación de un espectro: aparece una imagen alargada donde se manifiestan los colores del iris. Newton acababa de descubrir algo asombroso: los colores no son modificaciones de la luz blanca; al contrario, la luz blanca está compuesta por los colores. Observa también que las componentes de la luz

blanca se caracterizan por el cociente entre el ángulo de incidencia y el de refracción: éste es mayor para la luz azul, menor para la roja e intermedio para la amarilla.

Una consecuencia práctica de la teoría newtoniana de la luz concierne a la construcción de telescopios. Se sabía desde hacía tiempo que los telescopios

constituidos por lentes sufren un efecto en la focalización de la imagen, la aberración esférica. Además, dado que cada componente de la luz blanca se caracteriza por su índice de refracción, una lente no puede focalizar en el mismo punto las distintas componentes de una fuente puntual de luz blanca, por tanto, las lentes se ven también sometidas a la aberración cromática. Ésta está relacionada con la refracción, pero no con la reflexión: los rayos de colores distintos se reflejan del mismo modo. Es por eso por lo que Newton idea y construye un telescopio de reflexión: en éste, los rayos reflejados por el espejo parabólico cóncavo caen sobre un espejo plano inclinado. La imagen se ve a través de un ocular montado con el eje perpendicular al eje del telescopio.

Aunque los telescopios reflectores no constituían ninguna novedad, Isaac será el primero en establecer una base teórica para explicar el fracaso de los telescopios de refracción.

Todas estas aportaciones en el campo de la óptica las presenta Newton en un artículo en 1672, pero contrariamente a sus previsiones no se recibe con aplausos. Antes bien, se le critica con tres tipos de objeciones:

1. En primer lugar, algunos filósofos naturales (entre ellos el jesuita francés Ignace-Gaston Pardies y el jesuita belga Franciscus Linus) no consiguen replicar el experimento.
2. Otros, como Hooke, no niegan el resultado experimental, sino la interpretación teórica.
3. Los hay también, como Christiaan Huygens, que afirman que Newton ha captado un aspecto secundario de la luz: la "distinta refrangibilidad" de sus rayos.



Christiaan Huygens

El debate sobre el artículo de 1672 resultará en algunos puntos espinoso. Desde el punto de vista metodológico, se trata de uno de los debates más interesantes en la historia de la ciencia. Todos los contendientes tendrán parte de razón, algo que Newton no estaba dispuesto a admitir. Las objeciones sobre las dificultades de replicación

del experimento encuentran su justificación en el hecho de que Newton había proporcionado una descripción demasiado somera del procedimiento. Además, la pretensión de refutar, a partir de una sola experiencia, una teoría aceptada para proponer otra completamente distinta no podía parecer más que provocadora y poco creíble. Los contemporáneos de Newton, fieles a las enseñanzas de Bacon, consideraban que, antes de concluir algo sobre la naturaleza, era necesario realizar pacientemente un gran número de experimentos.

Newton se distancia de esa práctica aceptada, lo que alimenta las críticas de quienes desaprueban su interpretación teórica. Por ejemplo, Hooke hace notar que algunos ensayos, como los que se realizan sobre lámina fina, parecen indicar que la luz es un fenómeno dotado de periodicidad: en la teoría de Newton esta característica está ausente. En realidad, Isaac estaba intentando definir su propia metodología, una metodología innovadora en la que hay una distinción entre el plano de la hipótesis sobre la naturaleza (plano típico de los filósofos mecanicistas) del experimental sobre el descubrimiento de realidades matemáticas. Esto queda manifiesto en este escrito suyo:

"Dado que la ciencia que se ocupa de estos (los colores) parece hallarse entre las más difíciles que un filósofo pueda desechar, espero, a modo de ejemplo, demostrar el valor de la matemática para la filosofía natural y con ello exhortar a los geómetras a disponerse a un más riguroso examen de la naturaleza y a los amantes de la ciencia natural a apropiarse antes de la geometría, a fin de que los primeros no malgasten su tiempo en especulaciones inútiles para la vida humana y los segundos, largamente esforzados en un método inadecuado, no pierdan la esperanza, sino que filosofeando los geómetras y ejercitando la geometría los filósofos, obtengamos, en lugar de conjeturas y probabilidades, que se vende por doquier, una ciencia de la naturaleza finalmente confirmada por la más alta evidencia."

Se puede observar cómo quiere cambiar las reglas de juego de la ciencia, haciendo entrar en escena a los geómetras filósofos, o los filósofos geómetras, de los que se siente pionero.

En el artículo presentado en 1672, Newton sugiere que la luz blanca constituye una mezcla de cuerpos que se propagan en el espacio como pequeños proyectiles: a cada color le corresponderían corpúsculos de naturaleza distinta. Estos corpúsculos se distinguirían también por otra característica: la velocidad. Los cuerpos que el ojo percibe como azules se moverían más lentamente que los que generan la sensación de rojo. Según él, cuando los cuerpos se acercan a la superficie de separación entre el vidrio y el aire son atraídos en dirección normal a la superficie. La velocidad distinta explicaría que los corpúsculos de color rojo se desvien menos que los corpúsculos propios de color azul.

Debido a la presión que sufrió por las críticas, en 1675, presenta en la Royal Society un ensayo titulado *"An hypothesis explaining the properties of light"*. En él se compromete a formular explícitamente una "hipótesis sobre las propiedades de la luz". Decide así jugar al juego de sus adversarios. En ese ensayo Newton sostiene que el espacio está invadido por un éter sutilísimo, una especie de fluido elástico. Ese fluido no se encuentra sólo en el espacio libre, sino que invade también los poros de los "cristales del vidrio y del agua"; la densidad del mismo es, sin embargo, mayor en el espacio libre que en los cristales. En el éter se propagan vibraciones análogas a las vibraciones acústicas.

La luz consta de un flujo de "corpúsculos de varias formas" que interaccionan con el éter. En esa nueva hipótesis todos los corpúsculos se mueven a la misma velocidad. El éter "refracta la luz": los corpúsculos tienden a desviarse hacia zonas donde el éter es menos denso. Además, los corpúsculos ponen el éter en vibración y esta vibración les transmite ciertas propiedades periódicas. Los fenómenos de interferencia observados en láminas delgadas (pompas de jabón, mica, etc.) por Hooke y otros, se explican, pues, a partir de esas propiedades periódicas de la luz. Es éste un razonamiento mucho más asequible para los defensores de la teoría ondulatoria.

Según Newton, en la superficie de una lámina delgada se produce un fenómeno de refracción y condensación periódica del éter. Los corpúsculos, en la proximidad de la superficie, atraviesan un estrato de éter cuyo grado de densidad basta para reflejarlos o cuyo nivel de

enrarecimiento permite transmitirlos. Intenta así, por un lado, salvar la hipótesis corpuscular de la luz y, por otro, aportar una explicación de los fenómenos de interferencia.

En el ensayo de 1675, Isaac aplica la hipótesis del éter no sólo a los fenómenos ópticos, sino también a la fisiología de la percepción y a fenómenos químicos, eléctricos y magnéticos. Asimismo, Newton se pregunta si "la atracción gravitatoria de la Tierra" no podría ser causada por la "condensación de algún otro espíritu etéreo semejante". Especula, por tanto, sobre una hipótesis mecanicista de la gravitación, lo que resulta sorprendente, al ser esta una gravedad tan poco "newtoniana".

De hecho, hasta finales de los años ochenta, el movimiento de los planetas no se consideró resultante de una fuerza que operara a distancia y estuviese dirigida hacia el Sol. Al contrario, Newton sostiene que la gravedad se debe a la acción por el contacto de algún medio interplanetario. Con todo, en sus años juveniles llega a un resultado interesante, que guarda relación con el movimiento de los planetas y la tercera ley de Kepler.

En un manuscrito de finales de los años sesenta, Newton supone que los planetas describen órbitas circulares. Expuesto con mayor exactitud, los planetas orbitan alrededor del Sol trazando un movimiento circular uniforme. Aunque se trata de una presunción incorrecta, las órbitas elípticas de los planetas tienen una excentricidad tan pequeña, que pueden considerarse circulares.

Asimismo, aprendió de los "Principios de la filosofía" de Descartes, que un cuerpo puesto en movimiento circular uniforme está sujeto a dos tendencias (*conatos* o fuerzas): una tendencia a moverse a lo largo de la tangente y otra a alejarse del centro. Es en los años ochenta del siglo XVII, probablemente gracias a una sugerencia de Hooke, cuando Newton rechaza la teoría cartesiana del movimiento circular. En 1665 y 1666, obtuvo la siguiente medida cuantitativa de la "tendencia a alejarse del centro":

Esta fórmula fue descubierta de forma independiente por Huygens, que la publica en su "Hologram oscillatorium" en 1673. Isaac eliminará por completo, en sus escritos de madurez, la idea de una fuerza centrífuga asociada al movimiento circular uniforme. En los *Principia*, ese movimiento está engendrado por una fuerza centrípeta, dirigida hacia el centro. A esa fuerza le corresponde, por la tercera ley de la dinámica, una fuerza de igual intensidad y sentido contrario, pero que no se aplica al cuerpo en movimiento circular uniforme, sobre el que actúa una sola fuerza.

Newton llegó al siguiente resultado:

que combinado con la tercera ley de Kepler y con la relación de proporcionalidad escrita anteriormente da lugar a:

EL MANZANO DE NEWTON



Es durante los "Annus Mirabilis" cuando tiene lugar la famosa anécdota de la manzana de Newton. Pese a tener carácter legendario y no quedar claro hasta qué punto metafórico (la gravedad se le presenta como una inspiración divina) la historia nace del propio Newton según queda recogido en la primera biografía del célebre físico. Dicha obra fue escrita por William Stukeley, gran amigo de Isaac, siendo editada pocos años después de su muerte en 1752. La traducción de la obra original es la siguiente:

"Después de cenar, como hacía buen tiempo, salimos al jardín a tomar el té a la sombra de unos manzanos", escribe Stukeley. *"En la conversación me dijo que estaba en la misma situación que cuando le vino a la mente por primera vez la idea de la gravitación. La originó la caída de una manzana, mientras estaba sentado, reflexionando. Pensó para sí por qué tiene que caer la manzana siempre perpendicularmente al suelo? Por qué no cae hacia arriba*

o hacia un lado, y no siempre hacia el centro de la Tierra? La razón tiene que ser que la Tierra la atrae. Debe haber una fuerza de atracción en la materia; y la suma de la fuerza de atracción de la materia de la Tierra debe estar en el centro de la Tierra, y no en otro lado. Por esto la manzana cae perpendicularmente, hacia el centro. Por tanto, si la materia atrae a la materia, debe ser en proporción a su cantidad. La manzana atrae a la Tierra tanto como la Tierra atrae a la manzana. Hay una fuerza, la que aquí llamamos gravedad, que se extiende por todo el universo".

There is a few more whom he knew. 15
after dinner, the weather being warm, we went
into the garden, & drank there under the shade of
some apple-trees; only he, & my self. Amidst
other discourse, he told me, he was just in the
same situation, as when formerly, the notion of
gravitation came into his mind. why sh. that
apple always descended perpendicularly to the ∞
ground, though he to himself, occasion'd by the fall
of an apple, as he sat in a contemplative mood.
why sh. is not go sideways, or upwards? but con-
sistantly to the earth's center? assuredly, the rea-
son is, that the earth draws it. there must be a
drawing power in matter. & the sum of the draw-
ing power in the matter of the earth must be in
the earth's center, not in any side of the earth.
Therefore does this apple fall perpendicularly
or toward the center. if matter thus draws mat-
ter; it must be in proportion of its quantity.
Therefore the apple draws the earth, as well
as the earth draws the apple.

Thus by degrees, he began to apply this
property of gravitation to the motion of the
earth, & of the heavenly bodies: to consider their
distances, their magnitudes, their periodical re-
volutions: to find out, that this property, conjointly

Texto de Stukeley

EL PROFESOR DE LA CÁTEDRA LUCASIANA

Tras su estancia en Woolsthorpe, Newton regresa en Abril de 1667 a Cambridge. Para entonces ha iniciado una relación de amistad y de colaboración científica con Barrow. En este periodo inician juntos una serie de estudios matemáticos, ópticos y alquímicos a lo largo de los cuales el profesor lucasiano tiene la oportunidad de conocer a fondo las capacidades del joven Newton. Así, no tuvo dificultades para ser elegido "minor Fellow" y poco después "mayor Fellow" del Trinity college.



A finales de 1668, Barrow recibe de Nicholas Mercator su "Logarithmotechnia", en la que se muestra el desarrollo en serie de $\ln(1+x)$. A raíz de ello, anima a Newton a publicar sus grandes logros matemáticos. Sin embargo, es reacio a publicarlos; no obstante, la obra de Mercator le ayuda a poner en orden sus conocimientos acerca del desarrollo en serie y sobre el método de las fluxiones. El fruto de este trabajo será un escrito que titula "De Analysis per aequationes numero terminorum infinitas", publicado muchos años después.

En 1669, apenas diez años después del ingreso de Newton en Cambridge, Barrow renuncia a la cátedra lucasiana en su favor; para llegar a ser, tres años más tarde, director del Trinity. Además, Newton pasa a ser uno de los siete profesores de la Universidad.

Entre las tareas de su nuevo y bien remunerado cargo (cien libras de renta al año) se incluían impartir lecciones sobre disciplinas matemáticas, atender las dudas de los estudiantes durante dos horas semanales y depositar por escrito parte de sus lecciones para la biblioteca del Trinity.

Hasta 1670 colabora con Barrow llegando a contribuir en su libro "Lectiones geometricae" y escribe un nuevo tratado acerca de las fluxiones y el cálculo infinitesimal: "Tractatus de Methodis Serierum et Fluxionum". Sin embargo, pronto abandona temporalmente las matemáticas dejando de lado su trabajo de profesor lucasiano, que será para él un quehacer residual. Así, se centra ahora en su labor como filósofo natural, para posteriormente interesarse por temas alquímicos y teológico-históricos.

A principios de los setenta Newton entra a formar parte de la Royal Society de Londres. Entusiasmado por el gran éxito de su telescopio entre los miembros de la misma, se decide a publicar su teoría de la luz, que será objeto de duras críticas sobre todo por parte de Hooke. La actitud reacia de Newton a publicaciones futuras se halla sin duda condicionada por el pesar que siente ante las duras críticas recibidas. Así, se adentra aún más en su introvertido mundo. Esta situación provoca un distanciamiento con los miembros de la Royal Society.

En los años siguientes, Newton mantiene una relación epistolar con Hooke iniciada con dos cartas conciliadoras enviadas por éste último a raíz de la tensa situación vivida tras las críticas recibidas por el profesor lucasiano. Hooke pretendía, desde su recién estrenado puesto de secretario de la Royal Society, recuperarlo para la discusión científica activa.

Las cartas se suceden entre ellos resultando para ambos un gran estímulo las discusiones que trataban en ellas. Así, se abordan temas relacionados con las cónicas y con la toma de datos acerca de órbitas celestes. Aunque de tinte físico, guardan un trasfondo del rencor que ambos se profesaban: Newton siempre le reprochó las críticas que dedicó a su teoría de los

colores; por otro lado, Hooke consideraba que parte del mérito de los descubrimientos de Newton le pertenecía. Sin embargo, Hooke acostumbraba a defender como suyo más de lo que había hecho. Aunque es innegable que en algunas cartas se aprecian errores de concepto de un Newton que aún se hallaba muy lejos de enunciar la "Ley de la Gravitación Universal". No se sabe hasta qué punto la correspondencia entre ambos inspiró en Newton algunas de las ideas que le serían determinantes. Si bien es cierto que en ningún momento Hooke tuvo una visión global de la situación ni la capacidad de enunciar los resultados que obtuvo Newton.

Cabe destacar la célebre carta que el catedrático lucasiano envió a Robert Hooke el 5 de Febrero de 1675. En ella, escribe la siguiente frase:

"Si he conseguido ver más lejos es porque iba a hombros de gigantes".

Esta famosa frase se interpreta como una muestra de humildad y reconocimiento por parte de Newton a físicos tales como Kepler o Galileo. Sin embargo resulta curioso el posible matiz sarcástico dirigido hacia Hooke que, lejos de ser un gigante, era de corta estatura.

Durante este tiempo también se carteó frecuentemente con Halley, que estaba muy cerca de observar, en 1682, el famoso cometa.

No obstante, en estos años la labor de Newton se centró en la alquimia y la teología.



Las primeras muestras de interés por la alquimia datan de su estancia en la casa del señor Clark, pero es desde 1698 y durante treinta años cuando leerá e investigará con gran pasión, y en secreto, los textos de la tradición alquímica. Así, en su despacho, construye un laboratorio donde llevará a cabo experiencias sobre la transmutación de materiales que describirá detalladamente y con lenguaje arcano en sus notas. Sus experimentos tratan de dar respuesta a cuestiones profundas que le atormentan. Newton está convencido de que el mundo no

puede explicarse sólo mediante colisiones y combinaciones de corpúsculos. Se plantea los mecanismos que producen la germinación de una flor, la forma en que se pasa de la voluntad de mover un brazo a su movimiento efectivo...

No sólo el mundo vivo manifiesta características irreducibles. También aparecen ante Newton fenómenos químicos de transformación que sólo pueden explicarse a través de un agente: Dios, al que Newton identifica en este ámbito como "espíritu vegetativo".

En sus investigaciones distingue entre la "química sublime" (la alquimia) y la vulgar. Newton busca mediante el desarrollo de la alquimia la restauración del conocimiento de los antiguos.

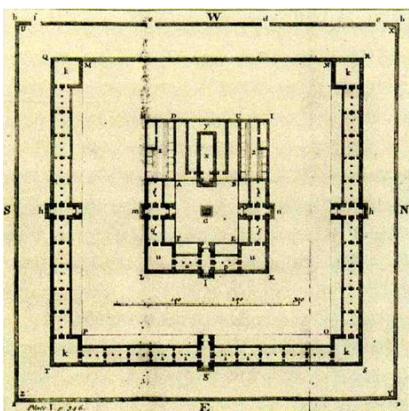


Mediante la materia viva y la química, justifica la existencia de "movimientos" que no pueden ser entendidos en términos mecanicistas. Para él, la filosofía mecanicista constituye una disciplina peligrosa si se lleva hasta sus últimas consecuencias y se entiende como algo único. Así, al asumirla como explicación última no sólo se yerra desde la fe, sino también desde el punto de vista de la explicación y del entendimiento intrínseco de la naturaleza. Newton siempre guardó reservas acerca del ateísmo que se podía derivar de la filosofía mecanicista pura; mentalidad que compartía con Henry More.

La mayor producción de Newton no es sobre matemáticas o física, sino sobre química y alquimia, disciplinas cuyo estudio mantuvo en secreto. Esto es debido a que la posición de la que gozaba no le permitía hacer público su interés por la "magia" y temas esotéricos. Así, sólo vieron la luz sus reflexiones más concluyentes y menos místicas. Sin embargo, se conoce bastante de su obra acerca de esta materia gracias a una gran cantidad de cartas y escritos atesorados a lo largo de los años en un baúl que salió a la luz tras su subasta en 1936. Newton se presenta así como el último mago del siglo de la razón.

En sus estudios se caracterizó por la aplicación del método inductivo y de sus trabajos se destaca la influencia que causó en los atomicistas. Además, se relacionó con algunos químicos famosos de la época, ejemplo de ello es

Robert Boyle con el que mantuvo correspondencia durante varios años. Por otra parte, sus experimentos en el laboratorio le fueron de gran ayuda a la hora de describir en el segundo volumen de "Los Principia" los fenómenos de densidad, cohesión, resistencia, viscosidad,...



Medidas del Templo del Rey

Salomón calculadas por Newton

Su estudio de la química no es sólo experimental. Además se consagra a la tarea de descifrar textos antiguos y herméticos. Del mismo modo interpreta también obras Bíblicas e históricas, convencido de que la historia revela la intención divina. Por lo tanto, para Newton es fundamental hallar una correspondencia de las profecías bíblicas con los hechos históricos. La Biblia se muestra como un código que debe descifrarse.

Conforme avanza en sus indagaciones se convence cada vez más de que la Iglesia Católica es el Anticristo: el Concilio de Nicea habría sido el punto en el que, con la introducción del dogma trinitario, la Iglesia habría entrado en el pecado. Pese a trabajar en el Trinity College Newton reniega de la Sma Trinidad, por lo que debe ser cauto con sus indagaciones bíblicas así como con su atracción por la hermética y la mística. Su permanencia en Cambridge una vez es nombrado catedrático se produce para él sin los problemas de conciencia que le acarrearía pertenecer a un credo "sacrílego", ya que gracias a Barrow se ve exento de jurar los dogmas cristianos en la toma de posesión de la cátedra.

EL RECHAZO DE LOS MODERNOS

En Noviembre de 1669 muere la madre de Newton, con lo que regresa a su casa natal de Woolsthorpe. Se inicia con este hecho la edad madura del célebre matemático. A sus veintisiete años, Newton experimenta un profundo cambio en su mentalidad científica. Como colofón a un proceso que se había iniciado años antes, abandona la filosofía mecanicista y rompe con las matemáticas de René Descartes.

En su redescubrimiento de la historia, Newton rinde culto a los matemáticos antiguos, llegando al punto de pensar que su labor no es más que la de

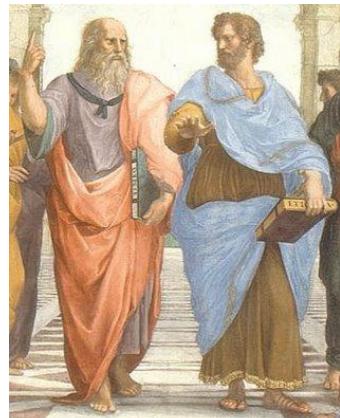
redescubrir la filosofía natural conocida por los antiguos hebreos y griegos y perdida en el tiempo. Esta creencia en la sabiduría primordial, la "prisa sapientia" es defendida por algunos y muy criticada por otros filósofos naturales de la época que, como Christian Huygens, muestran una actitud escéptica al respecto.



Durante los años setenta caen en las manos de Newton algunos de los libros responsables de su cambio de actitud. Cabe destacar las "Collectiones Mathematicae", ocho libros escritos por Pappus en el siglo IV a.C. que compendian el saber geométrico amasado en la escuela de Alejandría. Mediante estos, el célebre filósofo natural accede a los conocimientos de Arquímedes, Apolonio y otros filósofos griegos. Así mismo, entra en contacto con la tradición pitagórica de la que desentraña una interpretación propia: la verdadera estructura del mundo fue revelada por Dios a Noé y a Moisés, siendo este último el encargado de transmitir su conocimiento a Pitágoras.

Newton se admira con los conocimientos de los pitagóricos que asumían el heliocentrismo y la cosmología del vacío y de los átomos.

Mención especial merece "Varia Opera Mathematica" obra póstuma de Pierre Fermat que reconstruye parte de la geometría antigua. Ésta causa una gran influencia en el catedrático lucasiano, que se ve impresionado por el rigor en la resolución de los problemas allí planteados por Apolonio.



"La Escuela de Atenas"
Rafael Sanzio

Por otra parte Descartes consideraba que con sus métodos había alcanzado un grado de perfección mayor al de los antiguos al haber resuelto el problema de las cuatro rectas. Newton, sin embargo es reacio a aceptar que la resolución cartesiana pueda ser más elegante que la que en su momento hubieran alcanzado los griegos en la figura de Apolonio. Así, se pone manos a la obra para "redescubrir" el método geométrico que superara la resolución algebraica de Descartes. Obsesionado con dotar a sus matemáticas y demostraciones de una mayor rigurosidad, Newton concibe en el Libro I de los Principia una solución genial al problema de las cuatro

rectas anticipando conceptos matemáticos que serán objeto de estudio en el siglo XIX.

Newton consigue así obtener el dominio de la geometría antigua, dotando a sus trabajos de un mayor rigor y motivándose para redescubrir lo que, en realidad, su genialidad concibió por vez primera.

Sin embargo Newton tiene un problema: ¿Qué pasa con sus descubrimientos acerca de las fluxiones?

El giro metodológico que acomete en esta etapa de su vida le impide publicar lo que él considera un método simbólico de inferior calidad al geométrico. La justificación de esta no publicación se encuentra, además, en la imitación de los geométricos de la antigüedad que habrían mantenido oculto a los no iniciados sus avances trascendentales.

Es de gran importancia la revisión que, respecto de su método de fluxiones, acomete Newton; mediante la cual reescribe su método juvenil en clave geométrica separándolo en dos partes: el método analítico, correspondiente al elaborado durante los annus mirabilis y el sintético, en el que Newton se refiere directamente a figuras generadas por un flujo continuo que genera figuras geométricas. Éste último se trata ampliamente en "La Geometría Curvilínea", obra que redacta alrededor de 1680. Con su desarrollo, se permite atribuir un significado objetivo a la suma de infinitésimos mediante la representación geométrica.

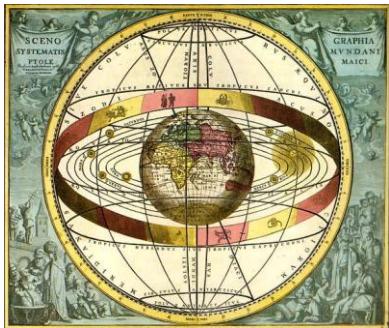
Newton con sus métodos, no publicados en un principio, adelanta veinte años los avances de Leibniz, teniendo en su poder incluso una primera versión del Teorema Fundamental del Cálculo.

Sistemas del Mundo anteriores a Newton

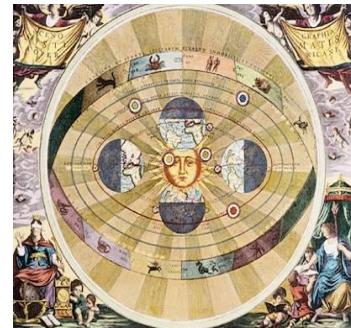
Resulta inevitable, antes de proceder a analizar el contenido de los *Principia* de Newton, recordar algunas de las características de los más importantes Sistemas del Mundo que precedieron al construido por nuestro autor.

El primero al que hay que hacer mención tiene el sello de Aristóteles y en él se encuentra definida y argumentada esa escisión, que tanto esfuerzo requeriría cerrar, entre lo terrestre (sede del cambio y la mutación) y lo celeste (morada de lo inalterable y perfecto). El modelo Aristotélico es

consustancial a la visión del movimiento del autor: *todo movimiento exige un motor*, idea que traducida al lenguaje de la física establece una relación causal entre movimiento y fuerza.



Sistema Ptolemaico



Sistema Copernicano

Las elaboraciones posteriores de Ptolomeo con el objetivo declarado de mejorar la precisión y hacer útil la astronomía, *salvando las apariencias*, no modificaron sustancialmente el soporte físico del Cosmos y la física aristotélica pudo mantener su hegemonía hasta mediados del siglo XVI, cuando la irrupción de una astronomía alternativa alumbró un nuevo Sistema del Mundo.

Con la publicación en 1543 del "De Revolutionibus Orbium Celestium" copernicano se inicia una mutación esencial que acabaría transformando no sólo la astronomía y, con posterioridad, la física sino también alterando el sustrato cultural de la época porque sus consecuencias obligaban al hombre a reubicarse en el Mundo. Copérnico defendía un modelo heliocéntrico de gran importancia para el desarrollo posterior del pensamiento humanista y científico.

Tras el modelo heliocéntrico aparece la figura de Galileo que marcará el devenir de los pensamientos de Newton.

Principia Mathematica

La antesala: De motu corporum in gyrum

En 1684, Halley recibe un breve manuscrito en el que se encuentra la respuesta a la cuestión planteada por Wren. Se trataba de "De Motu Corporum in Gyrum", la antesala de lo que serían "Los Principios Matemáticos de la Filosofía Natural". Halley recibió más de lo que

esperaba. En este pequeño tratado de tan sólo nueve páginas, Newton no sólo demostraba que una órbita elíptica implica una fuerza proporcional al cuadrado de la distancia a uno de los focos de la elipse, sino que también resolvía el problema original: La curva sometida a las condiciones impuestas por Halley es una elipse siempre que las velocidades fuesen menores que unos determinados valores. Además, a partir de unos postulados, Newton demostraba la segunda y tercera Ley de Kepler.

De inmediato Halley se pone en contacto con los miembros de la Royal Society y anima a Newton a desarrollar sus ideas y publicar su trabajo. Pronto se ve contagiado del entusiasmo de Halley y se pone a trabajar con una intensidad increíble: escribe de pie, duerme escasas horas, se salta comidas... hasta el tiempo de tomar un bocado o sentarse en una silla le parece desperdiciado!

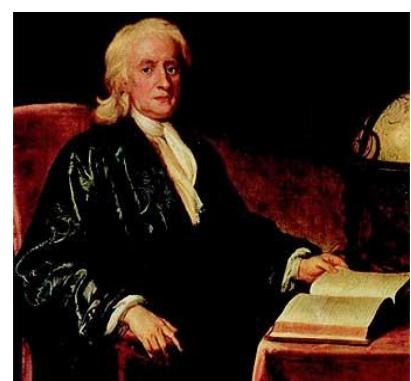
Al cabo de tres años Newton ha evolucionado el pequeño manuscrito hasta conseguir terminar una de las obras más influyentes en la historia de la humanidad: Los Principia.

La labor de Halley en este proceso es de una vital importancia. Por un lado es el encargado de subvencionar la impresión y edición de la obra aun sin gozar de una posición económica demasiado buena. Por otro, su contribución consiste también en mediar entre Newton y los miembros de la Royal Society. En este punto Robert Hooke considera que Newton debe reconocerle alguna participación en el descubrimiento de la gravitación universal. De igual forma John Wallis, que consiguió algunos de los resultados de Newton aunque de forma menos general.

Estilo Newtoniano

El estilo Newtoniano en el que están escritos los Principia consta de tres pasos:

- En primer lugar, comienza simplificando e idealizando la naturaleza. Esto le lleva a la creación de un espacio geométrico en el que las entidades se mueven en un tiempo matemático según un determinado conjunto de leyes que le dan sentido al modelo.



Isaac Newton

- Posteriormente, deduce las consecuencias que se pueden extraer por procedimientos matemáticos del modelo creado para traducirlas al mundo observable de la naturaleza física.
- Finalmente, Newton aplica los resultados obtenidos en los pasos anteriores para dar lugar a la Filosofía Natural a fin de elaborar el Sistema del Mundo.

Los dos primeros pasos se corresponden con los dos primeros volúmenes de los Principia, que aducen a unas matemáticas dedicadas al movimiento de los cuerpos. Por su parte, el Sistema del mundo trata de ser establecido en el tercer volumen.

Una obra genial, pero mal escrita

Newton, en su furor inventivo, concibió una obra repleta de circunvoluciones, imprecisiones terminológicas y lagunas. Su lectura es harto difícil. En muchas ocasiones es preciso leer un corolario con anterioridad al teorema correspondiente. Otras veces, se deja al lector la "fácil" demostración de un enunciado que no tiene nada de trivial. Además en algunas de las demostraciones se emplean hipótesis que no han sido definidas con anterioridad con objeto de alcanzar la conclusión deseada.

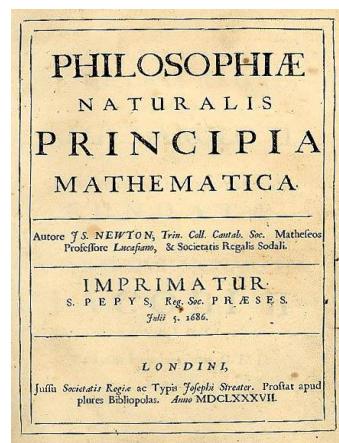
A pesar de todo ello, "Los Principia" constituyen una obra genial que sienta las bases de la mecánica y que marcó un punto de inflexión en la historia de la ciencia. Es considerada, por muchos, como la obra científica más importante jamás publicada.

Libro Primero: Del movimiento de los cuerpos

Este volumen es de una importancia capital para el desarrollo de la ciencia y las matemáticas. La reputación consagrada de "Los Principia" se debe sobre todo a la primera mitad de este libro I.

Primera Edición de "Los Principia" de Newton.

Publicada en 1687.



Previo al comienzo del libro y en primer lugar, se encuentra un poema de Halley dedicado a Newton:

"He aquí la Ley del Universo, las divinas medidas de la masa, he aquí el Cálculo del cielo; leyes que, mientras establecía los principios de las cosas el Creador de todo no quiso violar, y así establecer los fundamentos de las obras [...]"

Continúa alabando y describiendo la gloriosa obra para terminar ensalzando la figura de una de las más grandes mentes de la historia:

"[...] Celebrad conmigo a quienes tales cosas nos muestra, a Newton que abre el cerrado cofre de la verdad, a Newton, amado de las musas, en cuyo limpio pecho habita Febo, de cuya mente se apoderó con todo su Numen; Pues no está permitido a un mortal tocar más de cerca a los dioses".

"Del Movimiento de los cuerpos" se encuentra constituido por catorce secciones precedidas por dos apéndices de una importancia capital: "Definiciones" y "Axiomas o Leyes del Movimiento". Este primer volumen de la obra aborda el estudio de las fuerzas centrales, las Leyes del movimiento, la descripción de las secciones cónicas y del movimiento de los cuerpos en ellas, el movimiento de los péndulos, el problema de dos cuerpos y unas breves pinceladas de análisis matemático entremezcladas con un estilo algebrista.

Así, el libro comienza con un conjunto de definiciones de los conceptos que va a utilizar: Define la materia como la cantidad surgida de su densidad y magnitud; la cantidad de movimiento como la medida surgida de la velocidad y cantidad de materia; La cantidad motriz de una fuerza centrípeta como la medida proporcional al movimiento que genera en un tiempo dado. Además introduce la fuerza ínsita de la materia, la fuerza impresa, la fuerza centrípeta y la cantidad absoluta de una fuerza.

Le sigue a las definiciones un pequeño escolio en donde se expone la importancia del tiempo y el espacio absoluto. Newton dice: "...será conveniente distinguir allí entre lo absoluto y lo relativo, lo verdadero y lo aparente, lo matemático y lo vulgar."

Newton establece que se puede distinguir de un movimiento absoluto a uno relativo, ya que el movimiento absoluto solo se puede cambiar al imprimirlle una fuerza, y el relativo puede cambiar si se mueven los cuerpos con los

cuales se está comparando. Para demostrar su afirmación emplea el siguiente ejemplo:

Un cubo con agua, en el que si se observa que el agua se alza hacia los bordes esto es debido a que el cubo está en rotación respecto del espacio absoluto. Si, en cambio la superficie del agua se mantiene plana se puede afirmar que el cubo no está en rotación.

Esta introducción de espacio y tiempo absoluto resulta de una gran trascendencia para el posterior desarrollo de la física. La introducción de estos conceptos por parte de Newton parece tener origen teológico y constituye una forma de dar explicación a unas fuerzas que "no son reales", como la que provoca la subida del agua por los bordes del cubo. Para conseguir que la ciencia hable de fuerzas realmente existentes, se precisa considerar el movimiento absoluto de los cuerpos, es decir, las aceleraciones medidas respecto del espacio y del tiempo absolutos.

Para concluir esta sección, fija como objetivo de los Principia la deducción de los verdaderos movimientos a partir de los aparentes y viceversa.

[12]

A X I O M A T A SIVE L E G E S M O T U S

Lex. I.

Corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum, nisi quatenus a viribus impressis cogitur statum illum mutare.

Projectilia perseverant in motibus suis nisi quatenus a resistentia aeris retardantur & vi gravitatis impelluntur deorsum. Trochus, cuius partes cohærendo perpetuo retrahunt se a motibus rectilineis, non cessat rotari nisi quatenus ab aere retardatur. Majora autem Planetarum & Cometarum corpora motus suos & progressivos & circulares in spatiis minus resistentibus factos conservant diutius.

Lex. II.

Mutationem motus proportionalem esse vi motrici impressae, & fieri secundum lineam rectam qua vis illa imprimitur.

Si vis aliqua motum quenvis generet, dupla duplum, tripla triplum generabit, sive simil & simel, sive gradatim & successive impressa fuerit. Et hic motus quoniam in eandem semper plagam cum vi generatrice determinatur, si corpus antea movebatur, motu ejus vel conspiranti additur, vel contrario subducitur, vel oblique oblique adjicitur, & cum eo secundum utriusq; determinacionem componitur.

Lex. III.

Posteriormente se encuentran los axiomas sobre los que se fundamentan los tres libros:

- Todo cuerpo persevera en su estado de reposo o de movimiento uniforme y rectilíneo a no ser en tanto que sea obligado por fuerzas impresas a cambiar su estado.
- El cambio de movimiento es proporcional a la fuerza motriz impresa y ocurre según la línea recta a lo largo de la cual aquella fuerza se imprime.
- Con toda acción ocurre siempre una reacción igual y contraria: O sea, las acciones mutuas de dos cuerpos siempre son iguales y dirigidas en direcciones opuestas.

Estos tres enunciados constituyen las bases de la mecánica. Cabe citar que los términos en los que fueron enunciados por Newton son los mismos con los que se los conoce hoy día.

La segunda Ley no se expresa de forma simbólica en los Principia; sin embargo, no cabe duda de que Newton comprendía perfectamente los aspectos conceptuales implicados en $F = m a$. Sobre la ausencia de esta expresión es necesario precisar que "Los Principia" están escritos de una forma geométrica. No se utiliza el cálculo de las fluxiones y por tanto no se puede escribir una expresión del tipo $F = m a$. Sin embargo no es una exageración afirmar que Newton estaba perfectamente capacitado para ese enunciado; si bien habría sido demasiado, para los lectores a los que estaba destinado, el escribir el libro en un nuevo lenguaje matemático.

La inclusión de esta sección de principios constituye uno de los mayores aciertos de la obra y la propiedad que más impresionó a los lectores de la época. Así esta primera parte se mostraba como un compendio de la mecánica, una obra retrospectiva que ordena y expresa como nunca antes el conocimiento obtenido a lo largo de todo el siglo anterior.

Cabe destacar los corolarios uno y dos en los que se enuncia: "Un cuerpo sometido simultáneamente a la acción de dos fuerzas describe la diagonal de un paralelogramo, en el mismo tiempo en el que describiría los lados de este paralelogramo si las fuerzas actuasen por separado".

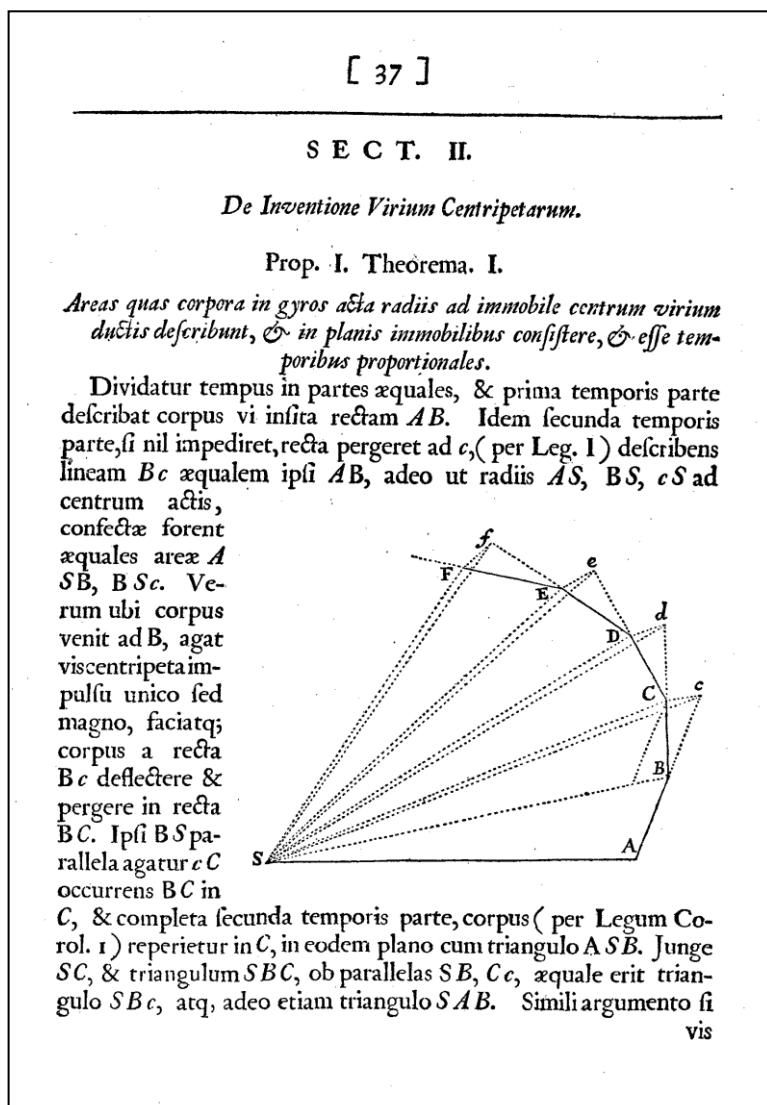
Esta sección de axiomática también termina con un escolio, en el que indica no ser el autor de estas leyes ya que son "principios aceptado por los

matemáticos". Le da el crédito a Galileo que trabajó con proyectiles y movimiento parabólico, y a Wren, Wallis y Huygens, "los mejores geómetras de nuestro tiempo", que trabajaron con impactos. Explica una serie de experimentos para mostrar la certeza de las leyes.

La sección primera: "Del Método de las Razones Primeras y Últimas", está constituida por once lemas que permiten avanzar en las demostraciones futuras sin necesidad de repetir los conceptos básicos que se señalan aquí.

En esta parte Newton busca salvar las dificultades lógicas y de fundamento que entrañan los métodos infinitesimales y se acerca al concepto actual de límite. Pese a que Los Principia están construidos en base a demostraciones geométricas, aquí se pueden encontrar algunas resoluciones analíticas que constituyen la primera información publicada acerca de su cálculo diferencial e integral.

La segunda sección, titulada "Sobre el descubrimiento de las fuerzas centrípetas", aborda el estudio de las fuerzas centrales mediante el planteamiento del siguiente teorema:



"Las áreas descritas por cuerpos que giran sujetos a un centro de fuerzas inmóvil por radios unidos a dicho centro, están en el mismo plano inmóvil y son proporcionales a los tiempos."

Para su demostración Newton considera un cuerpo, cuya posición se indica con el punto P, y un punto S. En primer lugar, divide el tiempo en intervalos finitos e iguales. Se supone que al final de cada intervalo una fuerza dirigida hacia S actúa instantáneamente y con un gran impulso de tal forma que la velocidad del cuerpo cambie instantáneamente. Asumiendo una velocidad inicial en el punto A, la trayectoria será una poligonal ABCDEF (ver figura). Las áreas SAB, SBC, SCD,... son barridas por el radio vector que une S con P en tiempos iguales. Aplicando las dos primeras leyes del movimiento, se demuestra que estas áreas son iguales:

Si al final de Δt_1 , cuando el cuerpo está en B, la fuerza no actuara, el cuerpo continuaría su trayectoria a velocidad uniforme y en línea recta (gracias al primer axioma). Así el cuerpo llegaría a C al final de Δt_2 , de manera que AB=BC. Los triángulos SAB y SBC tienen áreas iguales. Sin embargo al final de Δt_1 la fuerza impulsiva dirigida hacia S actúa. ¿Dónde está entonces el cuerpo al final de Δt_2 ?

Para responder a la pregunta Newton hace uso del corolario uno anteriormente expuesto:

En primer lugar, supone que la fuerza impulsiva genera, en un cuerpo situado en B, un desplazamiento en el intervalo de tiempo Δt_2 igual a BV. Así, según el corolario un cuerpo sobre el que actúan dos fuerzas simultáneamente se moverá describiendo la diagonal de un paralelogramo. A partir de esto Newton deduce que el cuerpo se moverá a lo largo de la diagonal del paralelogramo BcCV, llegando a C al final de Δt_2 . El segmento cC es paralelo a BV, por tanto los triángulos SAB y SBC tienen áreas iguales, se puede concluir que las áreas SAB y SBC son iguales. Repitiendo el mismo razonamiento para los puntos sucesivos se obtiene que el cuerpo describe una trayectoria poligonal y que el radio vector barre áreas iguales en tiempos iguales. Sin embargo aún falta un paso importante: Newton salta de la trayectoria poligonal a la trayectoria curvilínea con un procedimiento intuitivo de paso al límite: Si se aumenta el número de triángulos y se disminuye hasta el infinito su longitud, su perímetro ADF será una línea curva; por ello la fuerza centrípeta por efecto de la cual el cuerpo es desviado continuamente de la tangente a esta curva, actúa de manera continua y las áreas descritas SADS, SAFS, que son siempre

proporcionales a los tiempos utilizados para describirlos, lo serán también en este caso.

Demuestra que la ley de las áreas es válida si y solo si la fuerza que acelera al cuerpo es central y con centro de fuerza en S. Así, una fuerza tal o es atractiva y dirigida hacia S o es repulsiva y dirigida hacia el exterior. Estas dos proposiciones constituyen una de las conquistas más importantes dentro de la historia de la dinámica.

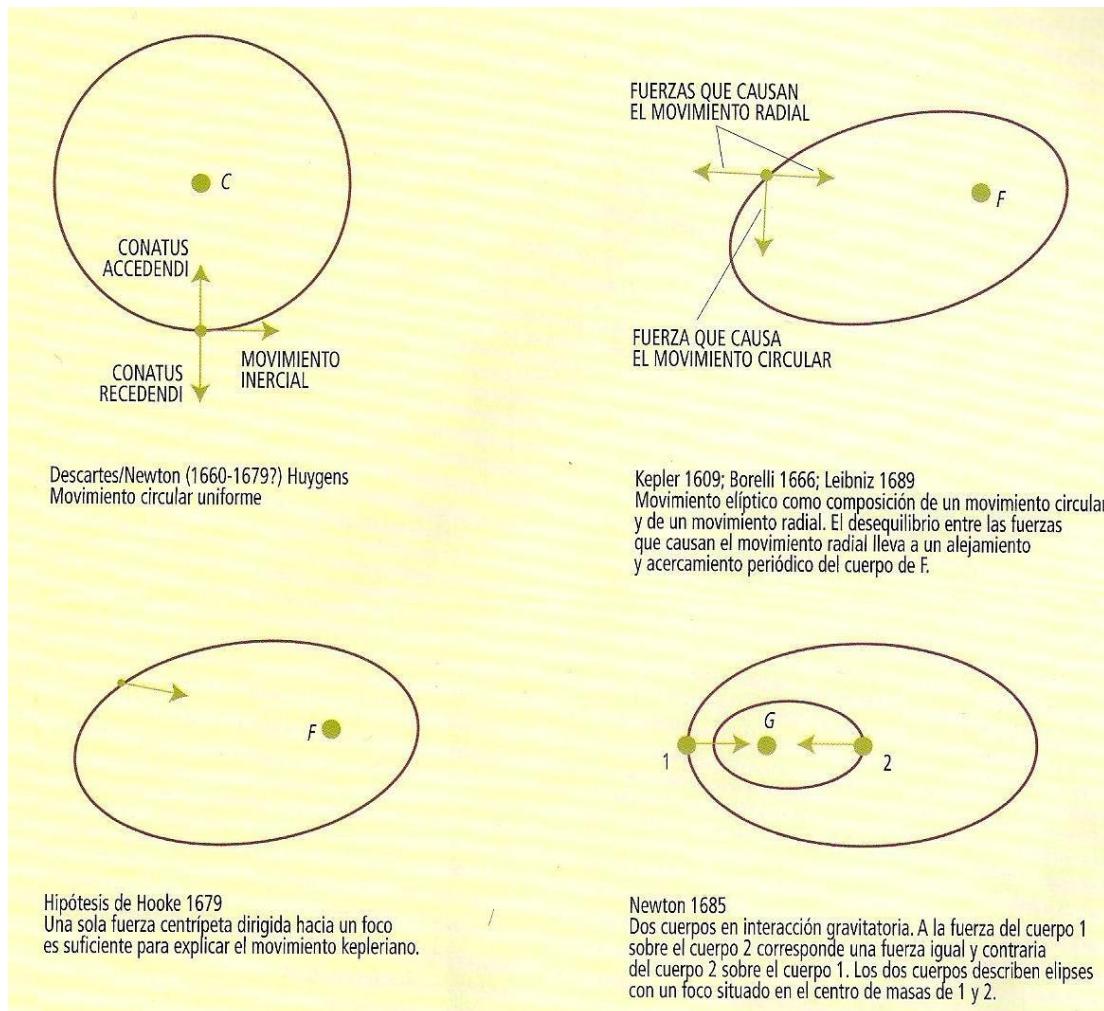
Es a continuación, hacia la segunda mitad del Primer volumen, donde el propósito de deducir todo matemáticamente a partir de unas verdades fundamentales empieza a fallar. Newton aborda a lo largo de varias secciones el estudio de problemas sobre la atracción de esferas y esferoides en los que apenas emplea las Leyes del movimiento. Sin embargo, aun sirviéndose de hipótesis estáticas formuladas de forma incompleta, resultan de gran interés las ingeniosas soluciones que logra alcanzar y que describen con bastante precisión las soluciones de dichos problemas.

Posteriormente, el libro I se dedica ampliamente al estudio de los problemas de dos y tres cuerpos siendo éste último una de las piezas maestras de dicho volumen.

En cuanto al estudio de los dos cuerpos, Newton considera, en primera instancia, la existencia de sólo dos cuerpos S y P, de masas M y m . A partir del empleo de las Leyes de Kepler, ampliamente demostradas según la explicación anterior referente a fuerzas centrales, Newton afirma que la intensidad de la fuerza de atracción entre dos masas es proporcional al producto de las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa.

Mediante métodos geométricos Newton demuestra que la tercera Ley de Kepler deja de ser válida en el caso de que la masa M sea mucho mayor que m . Introduce así un factor corrector que sí la hace apropiada para todas las situaciones:

Según esta expresión la corrección es muy pequeña, lo que explica que en el caso estudiado por Newton del Sol (M) y los planetas (m) no se aprecia experimentalmente en las observaciones astronómicas (de la época).



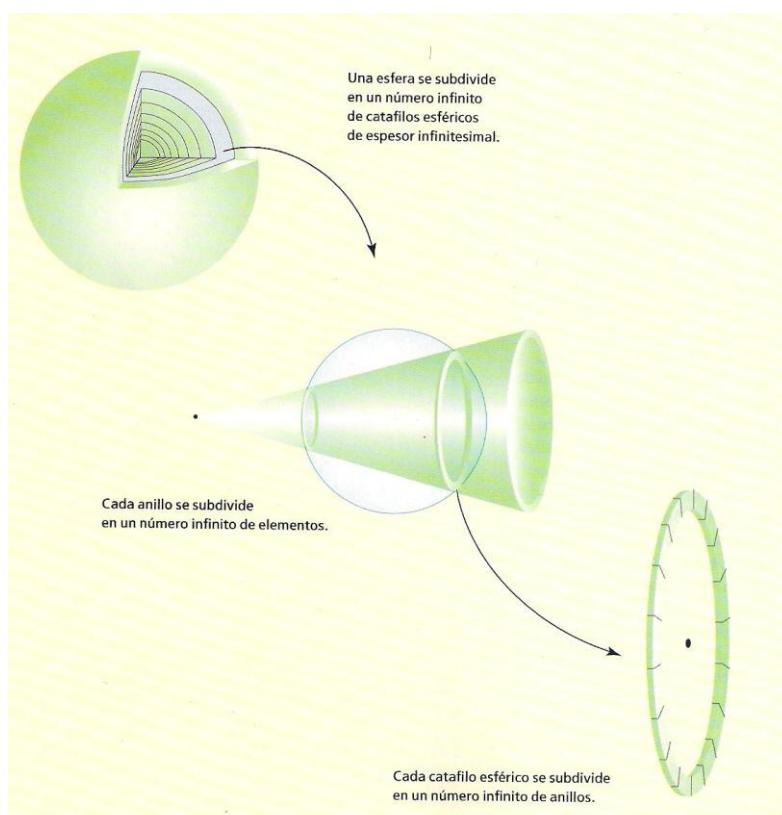
A continuación, y motivado por el estudio del Sistema Solar, Newton aborda en las secciones 9 y 11 el problema de los tres cuerpos mediante la consideración de la Tierra, el Sol y la Luna. Aunque sólo se hace intervenir un cuerpo más en relación con el problema Kepleriano, resulta imposible la obtención de soluciones generales o analíticas. Desde el siglo XVIII este problema constituyó un quebradero de cabeza para físicos y matemáticos siendo su resolución únicamente posible desde un enfoque perturbativo partiendo de la solución conocida del problema de los dos cuerpos.

En los Principia, Newton se adelanta a su época y con unas herramientas matemáticas aún precarias para abordar este problema, consigue obtener conclusiones muy importantes gracias al estudio de la perturbación que

provoca la gravedad solar en la trayectoria elíptica lunar. Dichos resultados:

- Demuestra que las órbitas, si son limitadas, han de ser necesariamente cerradas en el caso de que la fuerza actuante sea central e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, o central y proporcional a la distancia (de tipo elástico).
- Predice matemáticamente una serie de perturbaciones de la órbita de la Luna debidas a la fuerza perturbadora del Sol.
- Predice matemáticamente el fenómeno de precesión de equinoccios que consiste en la alteración de la posición que indica el eje de la Tierra en la esfera celeste (un ángulo de $23^{\circ} 27'$ respecto a la eclíptica) que se desplaza recorriendo una circunferencia completa cada 25.780 años.

Por último, es de gran interés la consideración de masas no puntuales que Newton aborda en las secciones 12 y 13.



El planteamiento newtoniano consiste en subdividir los cuerpos extensos en elementos infinitesimales y en estudiar la atracción ejercida por estos. Para obtener la atracción total ejercida por el cuerpo solamente resta sumar todas las atracciones de los elementos infinitesimales.

El resultado obtenido en este desarrollo sorprendió al propio Newton:

"La atracción gravitatoria ejercida por una esfera de densidad uniforme y masa M sobre una masa puntual P externa a la esfera es la misma atracción gravitatoria ejercida sobre P por un punto de masa M situado en el centro C de la esfera."

Sin embargo, ¿Qué ocurre con un punto interior? La demostración brilla por su sencillez y elegancia:

En primer lugar, Newton divide la esfera en catafilos: esferas de espesor infinitesimal. A continuación, considera un cuerpo P puntual en el interior de una esfera de densidad uniforme y construye un cono con vértice en P y ángulo sólido $d\phi$. Las áreas dA_1 y dA_2 interceptadas por el cono sobre el catafilo esférico son proporcionales al cuadrado de la distancia. Debido a que la atracción gravitatoria es proporcional al cuadrado de la distancia se tiene que dA_1 y dA_2 ejercen atracciones iguales y contrarias sobre P . Este hecho es cierto para cualquier dirección escogida. Así, P se encuentra en equilibrio. Por lo tanto un catafilo esférico no ejerce ninguna atracción sobre un punto interior al mismo.

Una vez demostrado que P se encuentra en equilibrio, Newton subdivide la esfera en muchos catafilos:

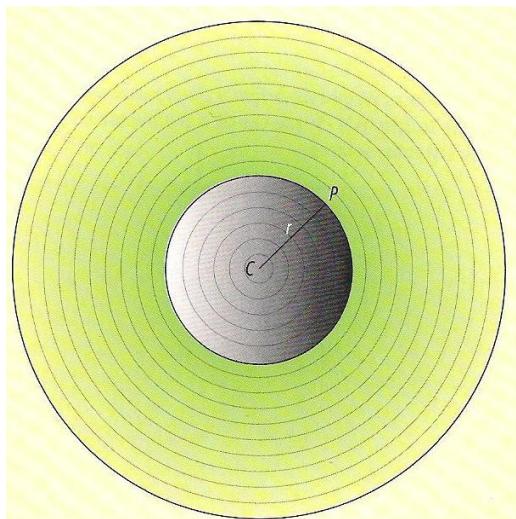
Por lo que se acaba de demostrar, los catafilos exteriores al punto P se pueden despreciar, al ser nula su atracción sobre P .



Un punto P en el interior de un catafilo esférico de espesor infinitesimal está en equilibrio.

Los interiores (en negro) constituyen una esfera de radio r . El punto P se puede tomar como un punto exterior a cada esfera. Por el teorema anterior se tiene que sobre el mismo se ejerce una atracción proporcional a la masa de la esfera de radio r e inversamente proporcional a r^2 . La masa de la esfera viene dada por el producto de la densidad ρ por el volumen V . Así, la atracción ejercida sobre P es proporcional a:

$$-\frac{m}{r^2} -$$



El catáfilo esférico exterior a P (en verde) no ejerce atracción alguna sobre P . La esfera interior (en negro) ejerce una atracción sobre P proporcional a la masa e inversamente proporcional al cuadrado del radio.

Por lo tanto sobre el punto P se ejerce una fuerza proporcional a la distancia r desde el centro. Esta fuerza es de tipo elástico, sigue la Ley de Hooke: si se dobla la distancia, se dobla la fuerza; si se triplica, se triplica la fuerza...

El Primero de los libros de "Los Principia" es una muestra de que la pregunta de Halley había quedado atrás para Newton. El intento de hallar una respuesta para ella le había inducido a plantearse problemas mucho más complejos que hábilmente consiguió resolver con una matemática rudimentaria y gracias a un genio increíble. El sólo hecho del avance para la historia de la ciencia que supone esta contribución del Primer volumen, hace que cualquier lector del mismo se sobrecoja ante la proeza de una de las mentes más brillantes de la historia de la humanidad. Prueba de ello son

las palabras de William Whewell, científico filósofo inglés, que escribía en el 1837:

"Desde entonces, el pesado instrumento de la síntesis, tan eficaz en las manos de Newton, no ha sido utilizado por nadie más para tales fines; y nosotros lo remiramos con admirada curiosidad, como si fuera un gigantesco instrumento de guerra, que ha quedado abandonado entre los vestigios de tiempos antiguos, y nos induce a preguntarnos qué tipo de hombre era aquel que podía blandir como un arma lo que nosotros podemos sólo levantar a duras penas."

Otra prueba de la rotunda influencia del Primer volumen de los Principia se encuentra en la siguiente afirmación del filósofo y físico positivista Ernst Mach:

"Los Principios de Newton bastan por sí mismos, sin la necesidad de introducir nuevas leyes, para explorar en detalle todo fenómeno mecánico que ocurre en la práctica."

LIBRO II DE LOS PRINCIPIA

En los Libros Primero y Segundo de los Principia, Newton tratará "... todo lo relativo a la gravedad, levedad, elasticidad, resistencia de los fluidos y fuerzas por el estilo, ya sean de atracción o de repulsión...", que representan los principios matemáticos en filosofía, ya que "... toda la dificultad de la filosofía parece consistir en que, a partir de los fenómenos del movimiento, investiguemos las fuerzas de la naturaleza y después desde estas fuerzas demostremos el resto de fenómenos."

La motivación que le llevó a redactar el Libro Segundo de los Principia, titulado "Del movimiento de los cuerpos", fue el querer conocer como es la resistencia que ofrece un fluido al desplazamiento de un cuerpo finito en su seno. Esto no es tarea fácil ya que hay muchas clases de fluidos presentando una asombrosa variedad de comportamientos.

Newton tenía dos visiones de los fluidos que se diferenciaban notablemente: unas veces como compuestos por partículas discretas que "huían unas de otras", y otras veces como un medio "continuado". Por medio de esta doble visión ya se vislumbra algo característico de este Libro: el desmoronamiento de su programa de deducción racional a partir de los axiomas. Así, Isaac

tiene que recurrir a menudo a comentarios puramente cualitativos a los que a veces da el nombre de "corolarios" a pesar de no estar demostrados a partir de las proposiciones ni éstas a partir de los axiomas. Utiliza una argumentación difícil de seguir ya que no se limita a simples conjeturas: de cuando en cuando aparecen demostraciones matemáticas correctas de los detalles más sencillos. En esto coincide con los escritos de Galileo que también presentan una apariencia de construcción lógica sin ser más que un conjunto de intuiciones.

Los temas tratados en este Segundo Libro son:

1. Afirmaciones genéricas y poco claras acerca de las resistencias y movimientos que experimentan las partes de un fluido.
2. Resistencias de esferas y cilindros en el seno de un medio rarificado y estático.
3. Estudio del movimiento, basado en la Estática, de un fluido "continuado" que cae por una abertura practicada en un recipiente.
4. Resistencias que experimentan esferas, cilindros, y esferoides en el seno de un fluido "continuado", bien tenga este un volumen infinito, bien esté contenido en un canal.
5. Comentarios genéricos sobre la propagación de presiones en un agregado de partículas.
6. Oscilaciones de un fluido incompresible en un tubo con forma de U.
7. La velocidad de ondas superficiales y la naturaleza del movimiento del fluido que las origina.
8. La velocidad del sonido en un gas.
9. Las resistencias de cilindros y esferas que giran sobre sí mismas en el seno de un fluido dotado de rozamiento interno.

Lo que inicialmente pretendía Newton con el estudio de estos temas era trasladarlos, como ya hiciera con sus leyes del movimiento, al plano celeste, pretensión que no fue llevada a cabo como se muestra en los temas tratados en este libro. Probablemente esto fue así debido a que sus conclusiones son tan variadas e hipotéticas que resultan imposibles de aplicar.

En "Del movimiento de los cuerpos" aparece con absoluta claridad tanto el concepto de derivada como el algoritmo para derivar suma, producto,

cociente de funciones, así como funciones potenciales y función de funciones. Esto queda reflejado en el Lema II de la Sección II:

"El momento de una generada es igual a los momentos de cada lado generador multiplicados por los índices de las potencias de dichos lados y sus coeficientes continuamente.

Llamo generada a cualquier cantidad que se engendra, en aritmética, por multiplicación, división, y extracción de raíces de lados o de términos cualesquiera; en geometría del cálculo de áreas y lados, o de extremos y medios proporcionales sin sumar ni restar. Este tipo de cantidades son productos, cocientes, raíces, rectángulos, cuadrados, cubos, lados cuadrados, lados cúbicos y similares.

Considero aquí a dichas cantidades como indeterminadas y variables y como si creciesen y decreciesen con un movimiento o flujo continuo; y a sus incrementos o decrementos momentáneos es lo que llamo momentos: de modo que los incrementos pueden considerarse como momentos añadidos o positivos y los decrementos como negativos o substraídos. Pero cuídese de no entenderlo como partículas finitas. Las partículas finitas no son momentos, sino las cantidades mismas generadas por los momentos. Han de entenderse como los mismos principios nacientes de las magnitudes finitas. Y ni siquiera se contempla en este lema la magnitud de los momentos, sino la proporción primera entre momentos nacientes. Lo mismo ocurre si en lugar de momentos se trata de las velocidades de los incrementos (que también pueden llamarse movimientos, mutaciones, fluxiones de cantidades) o bien de cualquier cantidad finita proporcional a dichas velocidades. El coeficiente de cualquier lado generador es la cantidad que resulta de aplicar la generada a dicho lado.

Por lo cual el sentido del lema es que si los momentos de unas cantidades A , B , C , etc., que aumentan o disminuyen en flujo continuo, o las velocidades de las mutaciones proporcionales a aquellos se llaman a , b , c , etc., el momento o mutación del rectángulo generado AB sería $aB + bA$, el momento del área generada ABC sería $aBC + bAC + cAB$; y los de las potencias generadas A^2 , A^3 , A^4 , $A^{1/2}$, $A^{3/2}$, $A^{1/3}$, $A^{2/3}$, A^{-1} , A^{-2} y $A^{-1/2}$ serán respectivamente: $2aA$, $3a A^2$, $4a A^3$, $(1/2)a A^{-1/2}$, $(2/3)a A^{1/2}$,

(1/3)a $A^{-2/3}$, (2/3)a $A^{-1/3}$, -a A^{-2} , -2a A^{-3} , y (-1/2)a $A^{-3/2}$; y en general, que el momento de una potencia cualquiera $A^{n/m}$ sería $(n/m)a A^{(n-m)/m}$. También que el momento de la cantidad generada A^2B será $2aAB + b A^2$, que el momento de la generada $A^3B^4C^2$ será $3aA^2B^4C^2 + 4bA^3B^3C^2 + 2cA^3B^4C$, y de la generada (A^3/B^2) o de A^3B^2 será $3a A^2B^2 - 2bA^3B^3$, etc."

[251]

res sunt Facti, Quoti, Radices, rectangula, quadrata, cubi, latera quadrata, latera cubica & similes. Has quantitates ut in determinatas & instabiles, & quasi motu fluxu perpetuo crescentes vel decrescentes hic considero, & eorum incrementa vel decrementa momentanea sub nomine momentorum intelligo: ita ut incrementa pro momentis addititis seu affirmativis, ac decrementa pro subductiis seu negativis habeantur. Cave tamen intellectu particulas finitas. Momenta, quam primum finitae sunt magnitudinis, desinunt esse momenta. Finiri enim repugnat aliquatenus perpetuo eorum incremento vel decremente. Intelligenda sunt principia jamjam nascentia finitarum magnitudinum. Neque enim spectatur in hoc Leminate magnitudo momentorum, sed prima nacentium proportio. Eodem recidit si loco momentorum usurpentur vel velocitates incrementorum ac decrementorum, (quas etiam motus, mutationes & fluxiones quantitatum nominare licet) vel finitae quævis quantitates velocitatibus hisce proportionales. Termini autem cuiusq; Generant̄s coefficiens est quantitas, quæ oritur applicando Genitam ad hunc Terminum.

Igitur sensus Lemmatis est, ut si quantitatum quarumcunq; perpetuo motu crescentium vel decrescentium $A, B, C, \&c.$ Momenta, vel mutationum velocitates dicantur $a, b, c, \&c.$ momentum vel mutatio rectanguli AB fuerit $Ab + aB$, & contenti ABC momentum fuerit $ABc + AbC + aBC$: & dignitatum $A^2, A^3, A^4, A^{\frac{1}{2}}, A^{\frac{2}{3}}, A^{\frac{3}{2}}, A^{\frac{1}{3}}, A^{\frac{4}{3}}, \& A^{\frac{5}{3}}$ momenta $2aA, 3aA^2, 4aA^3, \frac{1}{2}aA^{-\frac{1}{2}}, \frac{1}{3}aA^{\frac{1}{2}}, \frac{1}{2}aA^{-\frac{1}{3}}, \frac{1}{3}aA^{-\frac{2}{3}}, -aA^{-\frac{1}{2}}, -2aA^{-\frac{1}{3}}, \& -\frac{1}{2}aA^{-\frac{5}{3}}$ respectively. Et generaliter ut dignitatis cuiuscunq; $A^{\frac{n}{m}}$ momentum fuerit $\frac{n}{m}aA^{\frac{n-m}{m}}$. Item ut Genitæ A quad. $\times B$ momentum fuerit $2aAB + A^2b$; & Genitæ $A^3B^4C^2$ momentum $3aA^2B^4C^2 + 4A^3bB^3C^2 + 2A^3B^4Cc$; & Genitæ B^2 sive A^3B^{-2} momentum $3aA^2B^{-2} - 2A^3bB^{-3}$: & sic in cæteris. Demonstratur vero Lemma in hunc modum.

110

Cas.

A continuación se muestra un fragmento del texto latino de lo escrito anteriormente: Volviendo a los temas propios tratados en este Segundo Libro, y como modo de ejemplo para hacerse una idea de ellos, se pueden mostrar algunos puntos de esta obra:

- La definición que da Newton de fluido aparece nada más empezar la sección cinco o el tema cinco, y dice así:
"Fluido es todo cuerpo cuyas partes ceden a la aplicación de cualquier fuerza, y, al ceder se mueven entre sí con facilidad."

El fragmento del texto latino en el que está esto es:

Methodum vero tractandi hæc Problemata aperui in hujus Propositione decima, & Lemmate secundo; & Lectorem in hujusmodi perplexis disquisitionibus diutius detenere nolo. Ad denda jam sunt aliqua de viribus corporum ad progrediendum, deque densitate & resistentia Mediorum, in quibus motus hactenus expositi & his affines peraguntur.

S E C T. V.

De Densitate & compressione Fluidorum, deque Hydrostatica.

Definitio Fluidi.

Fluidum est corpus omne cuius partes cedunt vi cuicunque illatae, & cedendo facile movetur inter se.

Prop. XIX. Theor. XIII.

Fluidi homogenei & immoti, quod in vase quocunque immoto clauditur & undique comprimitur, partes omnes (seposita Condensatio-uis, gravitatis & virium omnium centripetarum consideratione) æqualiter premuntur undique, & absque omni motu a pressione illa orto permanent in locis suis.

Cas. 1. In vase sphærico ABC claudatur & uniformiter comprimatur fluidum undique: dico quod ejusdem pars nulla ex illa pressione movebitur. Nam si pars aliqua D moveatur, necesse est ut omnes ejusmodi partes, ad eandem a centro distantiam undique consistentes, simili motu simul moveantur; atq; hoc adeo quia simili & æqualis est omnium pressio, & motus omnis exclusus supponitur, nisi qui a pressione illa oriatur. Atqui non possunt omnes ad centrum proprius accedere, nisi fluidum ad centrum condensetur; contra Hypothesim. Non possunt longius ab eo recedere nisi

- En la sección primera a la que Newton da el nombre de "Del movimiento de los cuerpos a los que se resiste en razón de la velocidad", en la Proposición IV o Problema II, se observa como utiliza el concepto de fuerza de la gravedad para la su resolución, base de su obra maestra. Este Problema dice así:

"Supuesto que la fuerza de la gravedad sea uniforme en un medio homogéneo cualquiera y que tienda perpendicularmente hacia el plano horizontal; definir en dicho medio el movimiento de un proyectil que sufre una resistencia proporcional a la velocidad."

La resolución de este Problema mediante técnicas geométricas muestra la complejidad de la mayor parte de estos Principia. La

resolución de este problema se muestra en este fragmento del texto original:

[241]

Prop. IV. Prob. II.

Posito quod vis gravitatis in Medio aliquo similari uniformis sit, ac tendat perpendiculariter ad planum Horizontis; definire motum Projectilis, in eodem resistentiam velocitati proportionalem patientis.

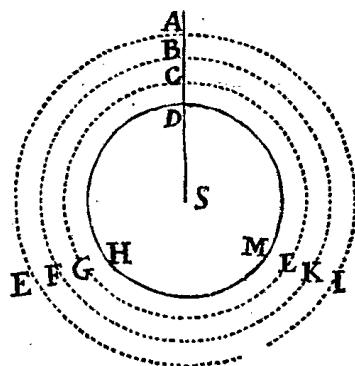
E loco quovis D egrediatur Projectile secundum lineam quamvis rectam DP , & per longitudinem DP exponatur ejusdem velocitas sub initio motus. A puncto P ad lineam Horizontalem DC demittatur perpendicularum PC , & secetur DC in A ut sit DA ad AC ut resistentia Medii ex motu in altitudinem sub initio orta, ad vim gravitatis; vel (quod perinde est) ut sit rectangulum sub DA & DP ad rectangulum sub AC & PC ut resistentia tota sub initio motus ad vim Gravitatis. Describatur Hyperbola quavis $GTBS$ fecans erecta perpendiculara DG , AB in G & B ; & compleatur parallelogrammum $DGKC$, cuius latus GK fecet AB in Q . Capiatur linea N in ratione ad QB qua DC sit ad CP ; & ad rectam DC punctum quodvis R erecto perpendiculari RT , quod Hyperbolae in T , & rectis GK , DP in t & V occurrit; in eo capte VR aequalem $\frac{GT}{N}$, & Projectile tempore $DRTG$ perveniet ad punctum r , describens curvam lineam $DrAF$, quam punctum r semper tangit; perveniens autem ad maximam altitudinem a in perpendiculari AB , & postea semper

- Mediante la siguiente Proposición, la Proposición XX o el Teorema XV (Sección V), queda de manifiesto la asombrosa capacidad y visión de Isaac:

"Si cada parte de un fluido esférico, homogéneo a distancias iguales del centro, que descansa sobre un fondo esférico concéntrico, grava hacia el centro del todo, el fondo soportará el peso de un cilindro cuya base fuese igual a la superficie del fondo y cuya altura fuese igual a la altura del fluido sobrepuerto.

Sea DHM la superficie del fondo, y AEI la superficie superior del fluido. Divídase el fluido en esferas concéntricas de igual grosor, mediante innumerables superficies esféricas BFK, CGL; imagínese

que la fuerza de la gravedad actúe únicamente sobre la superficie exterior de cada esfera y que las acciones son iguales sobre cada parte igual de todas las superficies.



Entonces, la superficie más externa *AE* sufre la sola presión de su fuerza de gravedad, que presiona no sólo sobre las partes todas de la superficie superior sino que también (por la Proposición XIX) presiona igualmente en razón de su extensión sobre la superficie segunda *BFK*. Esta segunda superficie *BFK* sufre la presión de su propia fuerza de gravedad, además de la presión añadida de la primera, lo que duplica la presión. La tercera superficie *CGL* padece una presión triple, esto es, la de su propia fuerza de gravedad junto con la presión de la anterior que padece en función de su propia extensión. Y de igual modo, la superficie cuarta padece una presión cuádruple, la quinta quíntuple, y así sucesivamente. Por consiguiente, la presión que padece cada superficie, no es como el volumen de fluido que reposa encima de ella, sino como el número de esferas que hay hasta la superficie superior del fluido; y es igual a la gravedad del orbe inferior multiplicada por el número de orbes: esto es, a la gravedad de un sólido que tiene razón última de igualdad con el cilindro susodicho (siempre que aumente el número de orbes y disminuya su grosor infinitamente, de manera que la acción de la gravedad desde la superficie inferior hasta la superior se haga continua). Luego la superficie inferior soporta el peso del cilindro definido arriba. Q.E.D. Y, por la misma razón, será evidente la proposición cuando la gravedad decrece en una razón cualquiera dada desde el centro, lo mismo que cuando el fluido es más raro arriba y más denso abajo. Q.E.D."

Newton concluye este Libro Segundo con una proposición cuyo objetivo era acabar con la teoría de los vórtices planetarios de Descartes. Es una proposición que no está relacionada con nada de lo que la precede además de no estar definidos los conceptos utilizados en ella. Por otra parte, su demostración se apoya en un dudoso principio de solidificación ya anteriormente utilizado en una proposición acerca de la "catarata". Ésta es la Proposición LIII o el Teorema XLI, y dice así:

"Los cuerpos que arrastrados por un vórtice giran en órbita, tienen la misma densidad que el vórtice y se mueven bajo la misma ley que sus partes en cuanto a velocidad y dirección del recorrido."

El concepto de "catarata" lo utilizó en la segunda edición de los Principia para sustituir el razonamiento esencialmente estático (abandonando sus propias leyes del movimiento) que había seguido en el estudio sobre el flujo de agua que sale de un recipiente. Este estudio fue denominado Proposición XXXVI o Problema VIII. Parte de este problema se adjunta en este fragmento latino correspondiente a la primera edición :

[327]

em eundem CB generatur, minus resistitur quam solidum prius;
si modo utrumque secundum plagam axis sui AB progrediatur,
& utriusque terminus B precedat. Quam quidem propo-
sitionem in construendis Navi-
bus non inutilem futuram
esse censeo.

Quod si figura $DNFB$
ejusmodi sit ut, si ab ejus
puncto quovis N ad axem
 AB demittatur perpendicular
 NM , & a punto
dato G ducatur recta GR
qua^e parallel^a sit recta figuram tangentia N , & axem produc^{et}
fecet in R , fuerit MN ad GR ut GR cub. ad $BR \times GB$: So-
lidum quod figura hujus revolutione circa axem AB facta descri-
bitur, in Medio raro & Elastico ab A versus B velocissime mo-
vendo, minus resistetur quam aliud quodvis eadem longitudine
& latitudine descrip^{rum} Solidum circulare.

Prop. XXXVI. Prob. VIII.

*Invenire resistentiam corporis Sphaericⁱ in Fluido raro & Elastico
velocissime progradientis.* (Vide Fig. Pag. 325.)

Designet $ABKI$ corpus Sphaericum centro C semidiametro CA
descriptum. Producatur CA primo ad S deinde ad R , ut sit AS
pars tertia ipsius CA , & CR sit ad CS ut densitas corporis Spha-
ericⁱ ad densitatem Medii. Ad CR erigantur perpendiculara PC ,
 RX , centroque R & Asymptota CR , RX describatur Hyper-
bola quævis PVT . In CR capiatur CT longitudinis cuiusvis, &
erigatur perpendicularum TV absindens aream Hyperbolicam
 $PCTV$, & sit CZ latus hujus areae applicata ad rectam PC . Di-
co quod motus quem globus, describendo spatiu^m CZ , ex resi-
stantia Medii amitteret, erit ad ejus motum totum sub initio ut lon-
gitud^a CT ad longitudinem CR quamproxime. Nam

Pero no sólo de este problema podría realizarse una crítica, también se puede atacar el cálculo que hiciera de la velocidad del sonido. En la segunda edición de los principia introduce el concepto de "el grosor de las partículas del aire" para así obtener los resultados deseados.

Fue la utilización de estos dos conceptos los que dieron lugar a las mayores críticas de los Principia. Frente al éxito del Libro I, el Libro II, considerado como ensayo hacia una mecánica matemática unificada, fue un fracaso. Pero a pesar de todos sus defectos, ha sido justamente alabado por ser la manifestación más grandiosa del genio de Newton.

El Segundo Libro fue propiamente un reto lanzado a los geómetras de la época. Vieron ante sí la necesidad de corregir los errores, reemplazar las intuiciones mediante hipótesis claras, ordenar esta hipótesis dentro de un esquema de la mecánica racional, sustituir los faroles por demostraciones matemáticas y crear nuevos conceptos para lograr lo que Newton no había conseguido. No es exagerado afirmar que la mecánica racional, y por tanto, la física matemática, junto con la visión de la naturaleza a que ésta da lugar, nació de este desafío, aceptado como fue por la escuela matemática de Basilea. Esta estuvo compuesta por los Bernoulli y Euler, cuya obra sirvió de base a Lagrange, Fourier, Poisson, Navier, Cauchy, Green, Stokes, Kelvin, Helmholtz, Kirchhoff, Maxwell y Gibbs para construir la llamada Física Clásica. Entre los años 1700 y 1750, la escuela de Basilea tuvo competidores en Taylor, McLaurin, Clairaut y D'Alambert. Los geómetras basileños no deben considerarse discípulos de Newton. Es más, les costó reconocer algunos de sus logros.

ÉXITO Y TRADICIÓN EN LA MECÁNICA PRENEWTONIANA

Newton pasó por alto el estudio de tres sistemas mecánicos fundamentales, que ya habían sido investigados con éxito por otros científicos. Estos sistemas son:

1. *Cuerpos rígidos:* Aunque Newton hablase alguna vez de la inercia de un trompo en rotación nunca llegó a intentar formular ninguna teoría concreta de la rotación; tampoco mencionó el problema de la oscilación pendular de un cuerpo finito. Una solución correcta a este

último problema basada en hipótesis restrictivas había sido publicada por Huygens en 1673.

2. *Cuerpos flexibles*: Los problemas de la cuerda vibrante y de la catenaria habían sido ampliamente discutidos antes del nacimiento de Newton. La mayor parte de los trabajos de Beeckman y Huygens sobre este tema permanecieron sin publicar, aunque ello no impidió que fueran bien conocidos en el extranjero. Mersenne publicó sus leyes empíricas de las vibraciones en 1625, y Pardies, en 1673, su impresionante solución del puente colgante. Casi con toda seguridad Isaac conocía estos trabajos; no obstante, sus escritos no mencionan ninguno de estos temas.
3. *Cuerpos elásticos*: Galileo había hablado acerca de la ruptura de cuerpos sólidos, y otros autores habían intentado formular una teoría de la elasticidad. Tan sólo en la descripción newtoniana de la presión de un gas compuesto por partículas encontramos alguna relación con estos temas. Isaac debía estar al corriente de lo que Hooke hablaba sobre la elasticidad y del brillante estudio que hiciera Leibniz en 1684 con el que inició la teoría matemática de los esfuerzos, aplicando por primera vez el cálculo integral a problemas relacionados con fuerzas de contacto.

La mecánica newtoniana caló profundamente en el pensamiento científico, creándose una nueva corriente científica a partir de ésta. No obstante, el desarrollo de esta corriente no impidió la evolución paralela de otras, que fueron:

En Estática:

- El paralelogramo de fuerzas y la ley de la palanca: Newton utilizó el concepto estático de fuerza para resolver problemas cinéticos, pero, sin embargo, dice que estas solo son destacables si producen movimiento. Esto va en contra de la ciencia de la Estática. En relación a este campo, destacar la publicación de "Proyecto de una Nueva Mecánica" en 1687 (año en que se publica el Principia) por

Varignon, así como los numerosos intentos frustrados de este y otros de deducir la Ley de la palanca.

- Trabajos virtuales: Una primera formulación correcta de este principio fue esbozada por Descartes. Este principio pasó un poco inadvertido hasta que en 1788 Lagrange lo tomó como su principal axioma.
- El efecto de las fuerzas de contacto: El concepto de fuerzas internas ejercidas por unas partes de un cuerpo sobre otras fue brevemente tratado por Galileo y utilizado explícitamente en el tratado de Pardies.

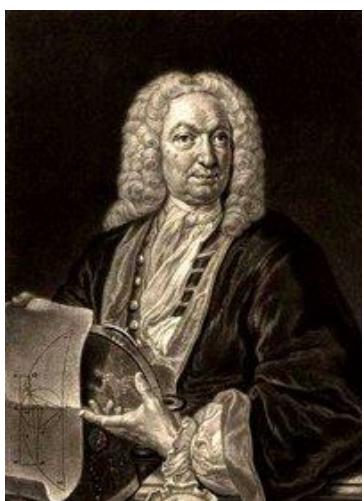
En Dinámica:

- El principio de la energía: Un principio de energía restringida fue propuesto como axioma y utilizado con éxito por Huygens. Otro principio de este tipo fue publicado por Leibniz en 1686.
- El principio de la fuerza inercial: Se suele atribuir este principio a Newton o a D'Alambert, aunque no parece que ninguno de los dos lo dominara completamente.

UN RETAZO DE LA OBRA DE LOS BERNOULLI

El principio de la fuerza inercial tuvo los mismos antecedentes que la mecánica newtoniana, pero se desarrolló independientemente hasta que en 1686 se creó su primera formulación explícita. Este principio sería posteriormente aplicado a todas las formulaciones de la Dinámica. Fue idea de Jaime Bernoulli el desechar el restringido principio de energía debido a Huygens y calcular la oscilación pendular de un cuerpo mediante procedimientos tomados de la Estática. Consideró válida la ley de la palanca tanto en movimiento como en reposo, siempre que el movimiento diera lugar a fuerzas por unidad de masa iguales a las aceleraciones con sus sentidos invertidos. En 1703, Jaime Bernoulli lo explicó y presentó en un gran trabajo, pero restringiéndose al péndulo. Fue bastante tiempo después

cuando este principio unificador adoptó su forma general, en parte, gracias a este miembro de la saga de los Bernoulli.



Juan Bernoulli

La curva catenaria fue determinada en 1690 por Juan Bernoulli, Huygens y Leibniz. Los tres utilizaron artificios muy restrictivos para deducir las ecuaciones que habrían de ser resueltas. Newton y la escuela inglesa permanecieron ajenos a este problema. En esta carrera de 1690 por la determinación de la curva catenaria Jaime Bernoulli no había estado a la altura de su hermano menor, pues no consiguió presentar la solución al problema en el tiempo prefijado. Probablemente dolido por el fracaso, se ocupó de investigar entre 1691 y 1704 la naturaleza de los cables perfectamente

flexibles en equilibrio, sometidos a cargas arbitrarias. Jaime Bernoulli terminó por encontrar cuatro demostraciones independientes de las apropiadas ecuaciones diferenciales:

1. Mediante el equilibrio de fuerzas que actúan sobre un elemento infinitesimal.
2. Mediante el equilibrio de momentos actuando sobre un elemento infinitesimal.
3. A partir del principio de los trabajos virtuales.
4. A partir del principio de la energía potencial mínima.

Las dos primeras demostraciones son las más importantes, pues por una parte, apuntan hacia la teoría general de las deformaciones, y por otra, muestran la equivalencia, para sistemas muy particulares, de los dos principios fundamentales de la Mecánica.

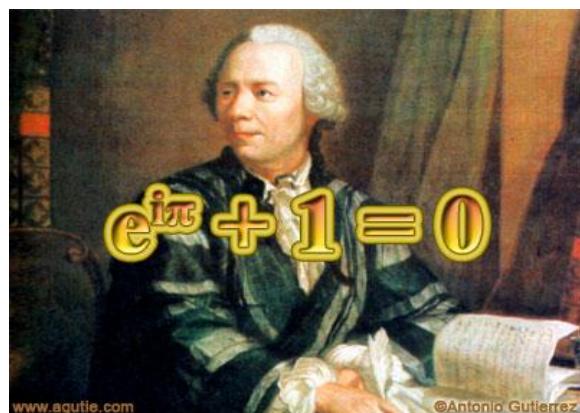
Una manera elegante de obtener la ecuación del movimiento de la cuerda vibrante es aplicar a la ecuación estática de la catenaria el principio de inversión de las aceleraciones de Jaime Bernoulli (para obtenerla también se puede aplicar la Segunda Ley de Newton a un elemento infinitésimo). Fue en 1746 cuando D'Alambert formuló una solución a este problema.

Al acabar su estudio de la catenaria, Jaime Bernoulli empezó a trabajar el problema de la viga elástica. Entre los años 1691 y 1694 obtuvo las ecuaciones diferenciales para la curva elástica, basándose principalmente en el equilibrio de momentos.

Otro ilustre Bernoulli fue Daniel, hijo de Juan. Aplicó por primera vez a una masa deformable la idea de Newton de que la fuerza resultante sobre un cuerpo, cualesquiera sean su geometría, naturaleza y movimiento interno, es igual a la variación en el tiempo de su cantidad de movimiento total. En 1727, utilizando esta idea consiguió calcular la fuerza ejercida sobre una pared por un chorro continuo de agua que incide sobre ella.

Hasta 1738 no fue publicada la ley hidráulica descubierta por Daniel en 1730, obra criticada por su padre Juan debido al método deductivo seguido. Toda esta investigación es contemporánea con la que D'Alambert hizo de la cuerda vibrante.

Una vez desarrolladas todas estas teorías tuvo que ser Euler quien creara las teorías de la membrana flexible y de los fluidos perfectos.



Leonhard Paul Euler

LAS LEYES DE LA MECÁNICA DE NEWTON

Fue Euler el primero en poner en claro que para ciertos sistemas mecánicos, en particular, aquellos formados por varillas rígidas articuladas entre sí, el principio del momento de la cantidad de movimiento ha de ser enunciado como una ley fundamental independiente. Hasta entonces este era

considerado como una consecuencia de la ley de las aceleraciones invertidas de Jaime Bernoulli aplicada a la antigua ley de la palanca. Ahora bien, al no haber sido enunciado todavía dicho principio del momento de la cantidad de movimiento, los geométricos de aquella época no se daban cuenta de que estuvieran aplicándolo.

Surgieron tres problemas cruciales para el progreso de una mecánica general. Los tres exigen el hallazgo de ecuaciones diferenciales del movimiento para determinados tipos de cuerpos masivos:

1. Un cuerpo rígido.
2. Un fluido perfecto.
3. Una barra elástica.

Los tres problemas fueron resueltos por Euler. En 1747 fue el primero en darse cuenta de que para todo sistema discreto las ecuaciones del movimiento son de la forma:

Esta suele ser llamada habitualmente la Segunda Ley de Newton, aunque no aparece en ninguna parte de su obra (pero está implícita en ella) ni en la de nadie con anterioridad a 1747.

Euler no tardó después de haber tenido esta idea en enunciar como la ley general de la Mecánica:

o en la moderna notación de Stieljes:

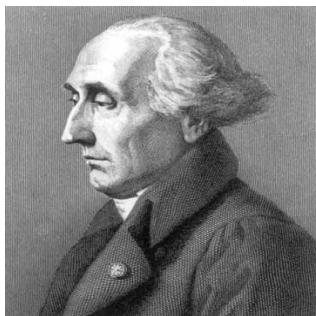
donde \mathbf{F} es la fuerza resultante que actúa sobre una parte arbitraria del cuerpo.

Esta ley la aplicó al movimiento de un cuerpo rígido, con lo que obtuvo las ecuaciones diferenciales que llevan su nombre. Poco después demostró como teorema que en cualquier cuerpo existe una tríada de ejes ortogonales de rotación libre, quedando este teorema libre de restricciones a pequeños desplazamientos.

En 1771 obtuvo las ecuaciones generales de la mecánica para un cable plano deformable. A partir de aquí enunció su principio de la cantidad de movimiento en su forma más general:

Donde \vec{r} es el vector de posición y \vec{L} es el par de fuerzas total aplicado a una parte del cuerpo y que incluye pares de contacto si éstos fueran necesarios. Este principio y la ley general de la Mecánica son las llamadas leyes del movimiento de Euler, que aparecieron como fundamentales e independientes en su memoria de 1775. Con esta memoria surge todo el esquema de la mecánica racional.

LA MÉCHANIQUE ANALITIQUE



En 1788 Lagrange publicó su mecánica analítica que toma el principio de los trabajos virtuales como el axioma básico de la Estática, y cuya Dinámica se obtiene aplicando el principio de las aceleraciones cambiadas de sentido de Bernoulli.

Joseph-Louis de Lagrange

LIBRO III: "SOBRE EL SISTEMA DEL MUNDO"

El Libro III es resultado de la reescritura de una redacción anterior, adoptando una forma retórica en la exposición para acallar las posibles críticas, sobre todo de Hooke. En general se trata de reconstruir un sistema copernicano de acuerdo con las leyes de Kepler y su nueva teoría mecánica, incorporando como centro de la reconstrucción la ley de la Gravedad, que le permite explicar también las mareas, predecir irregularidades en el movimiento de la Luna y los planetas y explicar la trayectoria de los cometas.

D E

Mundi Systemate

LIBER TERTIUS.

IN Libris præcedentibus principia Philosophiae tradidi, non tamen Philosophica sed Mathematica tantum, ex quibus videlicet in rebus Philosophicis disputari possit. Haec sunt motum & virium leges & conditiones, quae ad Philosophiam maximè spectant. Eadem tamen, ne sterilia videantur, illuſtrati Scholiis quibusdam Philosophicis, ea tractans quae generalia sunt, & in quibus Philosophia maximè fundari videtur, ut corporum densitatem & resistentiam, spatia corporibus vacua, motumque Lucis & Sonorum. Superest ut ex iisdem principiis doceamus constitutionem Systematis Mundani. De hoc argumento compofueram Librum tertium methodo populari, ut a pluribus legeretur. Sed quibus Principia posita satis intellecta non fuerint, iij viii consequentiarum minimè percipient, neque præjudicia deponent quibus a multis retro annis infuerunt: & propterea ne res in disputationes trahatur, summanni libri illius transfuli in Propositiones, more Mathematico, ut ab iis foliis legantur qui principia prius evoluerint. Veruntamen quoniam Propositiones ibi quam plurius occurrant, que Lectoribus etiam Mathematicè doctis morari nimis injicere possint, author esse nolo ut quisquam eas omnes evolvat; sufficerit iquis Definitions, Leges motum & sectiones tres priores Libri primi fedulò legat, dein transeat ad hunc Librum de Mundi Systemate, & reliquias Librorum priorum Propositiones hic citatas pro lubitu consulat.

A a a

Hypo-

"Libro III de Los Principia"

mostrar su poder de resolución. Estos casos son: el cálculo de órbitas y cuerpos celestes, una teoría de los movimientos y perturbaciones de la Luna, una explicación de las mareas como efecto de la gravedad hacia el Sol y hacia la Luna y una aproximación de la teoría de los cometas como cuerpos que gravitan en torno al Sol.

En la obra aparecen un montón de datos observacionales acompañando a los problemas, datos que fueron obtenidos de las tablas de observación y de los datos publicados o comunicados por otros, ya que Isaac no era profesionalmente un astrónomo ni tampoco un observador dotado de un instrumental adecuado. Para comprender el alcance de este trabajo no se debe contextualizar entre los logros de la astronomía actual ya que esto llevaría considerarlo un mero tratado de ciencia positiva, un producto típicamente baconiano sin mayor trascendencia que la búsqueda y acumulación de resultados. Si se considerase de esta manera se dejaría de lado la filosofía que Newton plasmó en estas páginas. Sólo si se tiene en cuenta este carácter no baconiano y si cartesiano, se puede comprender que un libro de mecánica, por celeste que este sea, acabe con un Escolio General de amplio sentido teológico (aunque incluido en la segunda edición). Esto sugiere que el conjunto de la obra y sobre todo este Tercer Libro no es sino un retazo de una amplia y religiosa concepción del mundo a cuyo

Todo este Libro puede ser visto como un conjunto de aplicaciones de los otros dos a un caso, el del sistema del mundo. Los presupuestos anteriores, además de los dos libros anteriores considerados como marco teórico, aparecen explicitados en las diez primeras proposiciones junto con las Reglas y Fenómenos incluidos o las Hipótesis y Lemas intercalados a lo largo del libro. Newton se centró en unos pocos casos en los que creía que su tratado podía

descubrimiento dedicó no sólo estos esfuerzos sino también los que dedicó a la Óptica, a la Historia Sagrada, a los estudios bíblicos y con mucha mayor extensión y menos éxito a la alquimia.

Dejando un poco de lado toda esta parte filosófica, lo cierto es que Isaac manifestó en este libro su extraordinaria capacidad teórica. En el Problema III en la Proposición XIX, discute la relación entre los diámetros polar y ecuatorial de la Tierra, logrando por primera vez una imagen aproximada a la realidad. De la Proposición XXV hasta la XXXVIII hace unos análisis de los movimientos de la Luna, con un extenso Escolio a la Proposición XXXV en el que habla de los méritos teóricos de la teoría de la gravitación. La teoría de la Gravedad también se aplica al cálculo de la precesión de los equinoccios en la proposición XXXIX, dando una explicación a un fenómeno observado desde los tiempos de Hiparco. El estudio de los cometas lo llevó a cabo gracias a su nueva teoría, a las observaciones recopiladas y a la técnica de estudio de lugares y puntos de rectas y curvas. Concluye esta obra con el Escolio General mencionado anteriormente.

LOS ÚLTIMOS AÑOS

Después de la publicación de los Principia, su vida intelectual se hace poco a poco cansina y oficialista. En ese mismo año vive un episodio de enfrentamiento con Jaime II, rey católico, por asuntos de la Universidad, y empieza una especie de culto a su persona que se extiende por el Reino Unido y le convierte en una especie de Papa científico. Premia a sus amigos y persigue a sus adversarios o meros competidores, abandona Cambridge en 1696 por un puesto de director de la fábrica de la moneda en Londres, persigue a los falsificadores con saña incontenible, adulza y cultiva a la nobleza, es hecho caballero por la reina Ana, enloquece unos meses en 1693-1694, preside la Royal Society durante 20 años, responde a cartas y a desafíos matemáticos, polemiza con Leibniz sobre el descubrimiento del cálculo y otras cosas, es indiferente con la desgracia de algún amigo como Whiston, Fatio, etc., se hace más reservado en su credo unitario y más sociable con los que le interesa, etc., cosas todas que, en una vida tan larga y cargada de honores, poderes y odios, no es demasiado difícil ir acumulando. Destacar que en este período reeditó dos veces los Principia.

EL FUNERAL

Sir Isaac Newton muere en 1727. Los restos de Newton se expusieron en la catedral de Westminster, donde el 4 de abril fue enterrado junto a los grandes de Inglaterra. El funeral, dice Voltaire, en cuanto a pompas y honores no tiene nada que envidiar al de un rey.



Tumba de Newton. Abadía de Westminster

Sus éxitos científicos obtuvieron un amplio reconocimiento. Alexander Pope, parafraseando los primeros versículos del Libro del Génesis, exclamó: *"La naturaleza y sus leyes estaban escondidas en la oscuridad de la noche. Dijo Dios: ¡Sea Newton!, y todo fue luz."*

Sin embargo, este hombre nacido en el clima de las guerras de religión, último heredero de una tradición renacentista que veía en los Antiguos los poseedores de una religión primitiva y de una sabiduría superior, habría sentido horror por aquellos ilustrados que considerarán la ciencia newtoniana una liberación de los prejuicios de la religión y de la tradición.

"No sé lo que puedo parecer al mundo; pero para mí mismo, sólo he sido como un niño jugando a la orilla del mar, y divirtiéndome al hallar de vez en cuando un guijarro más suave o una concha más hermosa que de costumbre, mientras que el gran océano de la verdad permanecía sin descubrir ante mí"

(Isaac Newton)

BIBLIOGRAFÍA

"Principios Matemáticos de la Filosofía Natural" Alianza Editorial, Filosofía y Pensamiento. Eloy Rada García.

Investigación y Ciencia. Temas 50 Newton.

"Ensayos de Historia de la Mecánica" Ed. Tecnos. C. Truesdell.

"Isaac Newton: obra y contexto. Una introducción." José Granés S., José Luis Cárdenas.

"Isaac Newton: Una vida" Richard S. Westfall.

"Momentos Estelares de la Ciencia", Alianza Editorial, Historia de la Ciencia. Isaac Asimov.

"Biografía de la Física" Alianza Editorial, Física. George Gamow.

"El papel de la fuerza centrípeta en la síntesis newtoniana", Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia. Jaime Karles Gómez.

"*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*: consideraciones en torno a su estructura matemática", Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. J.E. Marquina, R. Ridaura, J.L. Álvarez, V. Marquina y R. Gómez.

Los *Principia* de Newton. Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia. Miguel Hernández González.

"Newton, el Matemático". José Montesinos Sirena.

Bibliografía web:

http://es.wikipedia.org/wiki/Precesi%C3%B3n_de_los_equinoccios

<http://www.cnea.gov.ar/xxi/revista-cnea/2/ornstein.pdf>

<http://platea.pntic.mec.es/aperez4/html/newton/newton2.html>

<http://proyecto.dpis.ull.es/docencia/itm/dinamica/newton/Newton.htm>

www.cnea.gov.ar/xxi/revista-cnea/2/ornstein.pdf

<http://alcachofapensante.blogspot.com/2009/03/ley-de-accionreaccion-o-como-se-enlaza.html>

http://www.nueva-acropolis.es/blog/blog_comment.asp?bi=348

<http://www.ugr.es/~jjimenez/Newton.pdf>

<http://www.juntadeandalucia.es/averroes/centros-tic/23700542/helvia/aula/archivos/repositorio//0/51/PASAJE-4.pdf>

http://es.wikipedia.org/wiki/Philosophi%C3%A6_naturalis_principia_mathematica

<http://platea.pntic.mec.es/aperez4/html/newton/newton2.html>

<http://www.liada.net/Astro/La%20manzana%20de%20Newton.pdf>

http://www.yellowpigs.net/philosophy/science_1684

<http://es.answers.yahoo.com/question/index?qid=20080212163030AA8U0YQ>

<http://www.absolutinglaterra.com/universidad-de-cambridge/>

<http://divulgamat.ehu.es/weborriak/historia/MateOspetsuak/Inprimaketak/Descartes.asp>

<http://www.flickr.com/photos/chemheritage/3251741178/>