

NEWTON Y EL UNIVERSO FÍSICO

Héctor Rago A. y Luis Herrera Cometta



INTRODUCCIÓN

Odio las citas. Dime lo que sabes.

Ralph Waldo Emerson

La conmemoración de los 350 años de ese par de eventos, casi simultáneas, la muerte de Galileo Galilei y el nacimiento de Isaac Newton, es una ocasión apropiada para reflexionar sobre las concepciones que Newton tenía del mundo físico, acerca de sus contribuciones y acerca de cómo esas contribuciones marcaron profundamente el desarrollo posterior de nuestro entendimiento de la realidad. La herencia que Newton nos legó, tuvo un formidable impacto en el desarrollo de la cultura occidental. No hubo ámbito del pensamiento que escapara inmune a las consecuencias de la enorme mutación cultural que produjo su trabajo.

La coincidencia de la muerte de Galileo con el nacimiento de Newton es simbólica, porque de alguna manera Newton retoma el hilo de la física donde Galileo lo había dejado. Esta afirmación contiene inocentemente la idea de que existe una evolución histórica en las nociones que el hombre ha tenido acerca del universo que lo rodea.

La ciencia, tal como hoy la entendemos, requiere de una manera particular de ver el mundo, y a su vez ella, la ciencia, va modificando lentamente esa visión. Las generaciones y los hombres que han logrado una nueva manera de ver la realidad han hecho contribuciones decisivas a la historia del pensamiento. Alguna vez Borges escribió:

Un prosista chino ha observado que el un unicornio, en razón de lo anómalo que es, ha de pasar inadvertido. Los ojos ven lo que están habituados a ver.

Newton sintetizó una nueva forma de ver el mundo físico, sus ojos vieron la realidad de una manera distinta y por eso alguien comentó de él que era el más feliz de los mortales.

LA INVENCION DE LA REALIDAD

*La física es matemática no porque sepamos
mucho del mundo físico, sino por lo poco que sabemos de él.
Son sólo sus propiedades matemáticas
las que podemos descubrir*
Bertrand Russell

Isaac Newton es justamente famoso por haber sido el constructor de una hermosa y exitosa teoría física. Para entender sus méritos debemos entonces preguntarnos: ¿Qué es una teoría física?

La pregunta puede ser desmedida y diversos “expertos” podrían dar respuestas diferentes, pero contentémonos con señalar que en esencia una teoría física es un Modelo de la Realidad, o más bien, de una parte de ella, además de una serie de reglas de interpretación que permiten conectar el modelo con la realidad que pretende simular.

Es como si viendo a dos jugadores de ajedrez en acción, pretendamos reproducir las reglas del juego. Advertimos regularidades, el caballo siempre se mueve en L, el alfil en diagonal...La enorme complejidad y la infinita variedad del ajedrez tienen su sustento en unas cuantas reglas simples. Se trata de interrogar al mundo y tratar de averiguar sus hábitos y sus mañas, que pretensiosamente llamamos leyes de la naturaleza. ¿Estará la diversa, interesante y multiforme realidad también controlada por unas cuantas leyes simples que podemos (y debemos) encontrar?

En física tal “invención de la realidad” está usualmente asociada a una formulación matemática que conforma la estructura del modelo. El modelo mismo y las reglas de interpretación establecen la clase de preguntas que el modelo es susceptible de responder, y los problemas potencialmente solubles. A diferencia del ajedrez, la naturaleza evidencia una enorme complejidad y no basta con asomarse a ella para que nos entregue fácilmente el botín de sus secretos. Debemos inventar conceptos útiles que nos permitan describir (partes de) la realidad de la manera más general y que no dependa de los puntos de vista, las creencias políticas ni religiosas.

El valor de una teoría radica no sólo en su habilidad para reproducir las leyes parciales a partir de las cuales fue diseñada, sino en su capacidad para predecir nuevas leyes que se adapten a nuevas observaciones, experimentos o fenómenos. Si no se ajusta a los hechos (en experimentos y observaciones bien diseñados y bien interpretados, asunto nada trivial, por cierto), la teoría no califica

para describir esa rebanada de la realidad, independientemente del hecho de que sea elegante, e independientemente de por quién haya sido formulada. Si no se ajusta a los hechos, simplemente no sirve.

Ciertamente, no fue Newton el primero que intentó una descripción matemática de la naturaleza, pero lo hizo en el momento histórico apropiado y con la dosis de talento necesaria para ser el más exitoso. Con Newton, el pensamiento cuantitativo se hizo sinónimo de pensamiento científico y la descripción matemática de la naturaleza se convirtió en sinónimo de explicación en la física. Un tratamiento matemático de la realidad permite pensar en ella trascendiendo los prejuicios culturales, porque hace uso de un lenguaje universal que colabora eficazmente con el pensamiento y con la deducción de resultados, gracias a que contiene en su propia fábrica una serie de preceptos lógicos que se cumplen automáticamente cada vez que se use el lenguaje. Esta manera de concebir la realidad física, mirándola a través del prisma de un modelo, supone que sólo necesitamos estudiar un subconjunto pequeño del universo físico (¡y no tenemos otra opción!!) para dilucidar su patrón de comportamiento y sus temas principales. El científico comparte la sabia admonición literaria del escritor ruso León Tolstoi: “Describe bien tu aldea, y describirás el Universo”.

LEX ET REGULA

*Dios podría variar las leyes de la naturaleza y
hacer mundos de diferentes clases
en diferentes partes del Universo.*
Isaac Newton

La creencia en la existencia de leyes que gobiernan al universo, de preceptos que regulan el curso de las cosas, es de carácter metafísico y ha existido en muy diversas culturas y en épocas muy diferentes. Ciertamente, no hay razón alguna para que el mundo físico no contenga elementos arbitrarios y absurdos, en el cual no se precisen regularidades y lo caótico se imponga a lo ordenado y el desconcierto a la coherencia. Sin embargo, tras la diversa y cambiante realidad, el hombre ha vislumbrado o creído vislumbrar claridad y armonía y por tanto, la posibilidad de entender. Sherlock Holmes dice en La Caja de Cartón:

¿Qué significa esto, Watson? ¿Cuál es el objeto de este círculo de miseria, violencia y miedo? Debe tender a un fin, de lo contrario nuestro Universo estaría gobernado por el azar, lo cual es impensable. Pero ¿con qué fin?

La razón última de los antiguos mitos de la creación, en los que todo está en su lugar, y en los que nada ocurre al azar, todo es certidumbre y hay sensación de orden, es la misma que subyace a los intentos de construcción de teorías unificadas en la física contemporánea. Sólo han cambiado los métodos, no las motivaciones.

La metáfora *Leyes de la Naturaleza*, que tan acostumbrados estamos a oír, es de aparición relativamente reciente. Ciertamente no la usaron los griegos, y es tan sólo en el siglo XIII, cuando entra en escena posiblemente de la mano de Roger Bacon, quien la introdujo como sinónimo de regularidad desprovista ya de connotación religiosa. *Lex et Regula* se referían al mundo físico y se trataba de establecer una regla con la cual juzgar las cosas. Pero la motivación última para creer en una descripción coherente del mundo, la fe en una realidad no fragmentaria, más allá de su aparente diversidad, es originalmente de carácter religioso.

NADA NUEVO BAJO EL SOL

*No hay nada tan absurdo que no haya
sido dicho por algún filósofo.*
Cicerón

Al menos nada nuevo que no haya sido antes imaginado por un griego. Desde la idea fundamental de intentar explicar el mundo en términos de la interrelación entre sus constituyentes, que para Anaxágoras era el agua, para Heráclito el fuego, para Xenófanes la tierra y para Empedócles el agua, el aire, el fuego y la tierra; hasta las ideas de conservación, tan caras a la física actual, (en las palabras de Demócrito, “nada puede ser creado de la nada ni destruido y regresado a la nada”), o las ideas de causalidad, tan claramente expresadas por Leucipo, “todo lo que acontece tiene causas precedentes, nada sucede al azar, todo se debe a la razón y a la necesidad”; el lenguaje de nuestra ciencia está atiborrado de la herencia griega.

Anaxágoras avanzó la idea de un universo infinitamente extenso, con infinitas semillas o átomos capaces de alterar nuestros sentidos, controladas por una Mente Universal. Los Cielos y la Tierra estaban hechos de una misma substancia, y el universo no estaba gobernado por Dios. Por supuesto que estas opiniones lo llevaron a ser juzgado por impiedad y condenado por herejía. Pitágoras creía en una armonía matemática que controlaba el Universo; Platón enfatizó las diferencias entre apariencia y realidad y entre mente y materia. La tensión entre la persistencia en Parménides por una parte, y el cambio permanente en Heráclito, por otra, alegórica prefiguración del rígido e inmutable espacio absoluto de Newton, y del voluble y cambiante espacio de la relatividad einsteniana respectivamente, los conceptos comenzaban lentamente a madurar.

Pero a pesar de que los griegos hacían observaciones, argüían por analogías, analizaban en términos de constituyentes, usaban de algún modo principios de conservación y algunos otros ingredientes que hoy reconoceríamos como fundamentales en la física posterior a Galileo y Newton, ellos no se apoyaban de manera importante en los hechos experimentales y mucho menos intentaron darle una expresión matemática a los resultados de sus observaciones. Su visión de la naturaleza estaba aun muy penetrada por concepciones religiosas y filosóficas. La idea precisa de lo que hoy llamamos ley de la naturaleza, no estaba suficientemente desarrollada. A pesar de sus grandes avances matemáticos que le permitieron a Eratóstenes calcular la circunferencia de la Tierra con

asombrosa precisión, prevalecía la creencia de que las matemáticas servían de imagen a un mundo ideal y no se suponía que algo tuviera que ver con la realidad física de nuestro desordenado mundo sublunar.

Por otra parte, a pesar de que los griegos comprendieron bien cómo medir longitudes, nunca tuvieron claro de qué forma se podían medir intervalos de tiempo. Esta ausencia de una base operacional firme, hizo que las nociones fundamentales de espacio, tiempo, velocidad y aceleración fuesen conceptos más bien vagos. El proceso de límite, que tanto agobia a nuestros estudiantes de matemáticas básicas, tampoco era bien comprendido, como lo ilustran las paradojas de Xenón, diseñadas para mostrar las dificultades de la noción de movimiento. Esto les impedía apreciar de manera sistemática cómo cambian algunas magnitudes a medida que transcurre el tiempo, y esto es fundamental para la construcción de una teoría del movimiento.

PARADOJA DE XENÓN

Una forma de ilustrar la paradoja de Xenón es la siguiente. Imaginemos que Aquiles intenta recorrer una distancia cualquiera. Recorre la mitad en un tiempo $T/2$. La mitad de lo que falta, en un tiempo $T/4$, y así sucesivamente. El tiempo total $T/2 + T/4 + T/8 + T/16 + \dots$ ¿es infinito? Los griegos pensaban que sí, puesto que estaban sumando un número infinito de términos. Hubo que esperar hasta la edad media para que las series infinitas fueron comprendidas. Esta comprensión aclaró el concepto matemático de límite.

ARISTOTELES

Aristóteles mantenía que las mujeres tenían menos dientes que los hombres. Aunque estuvo casado dos veces, nunca se le ocurrió verificar su afirmación contándoles los dientes a sus esposas.
Bertrand Russell

La figura más influyente en el panorama intelectual del mundo occidental, desde unos 250 años antes de Cristo hasta la época de Galileo, fue sin duda el filósofo de la ciudad de Estagira, Aristóteles. Sus opiniones sobre la naturaleza fueron erigidas por la Iglesia, máxima autoridad en cuestiones de religión, ciencia y filosofía para entonces, en dogmas inamovibles. Apartarse del dogma podía acarrear la excomunión, juicios y otras perversiones de tono mayor.

Su trabajo abundó más en la recolección incesante y la clasificación de datos, que en establecer nexos o relaciones entre los hechos, o en manipular artificialmente la naturaleza para probar alguna hipótesis. Con él, adquirió vigor la concepción del universo como un ser viviente. Esta idea en el fondo no resulta tan extraña si nos situamos en el contexto de una cultura sin demasiada experiencia con artefactos tecnológicos y máquinas, pero sí con una gran preocupación por el estudio de los organismos vivos.

La física cualitativa de Aristóteles no podía concebir una ecuación matemática cuyas soluciones describieran los diversos tipos de movimiento de un cuerpo, es decir, lo que hoy llamamos una ecuación de movimiento. Además, su noción de movimiento, estaba ligada a la de fuerza. En la terminología contemporánea diríamos que para Aristóteles existía una proporcionalidad entre la velocidad de un cuerpo y la fuerza que sobre él actúa. Si deja de ejercerse la fuerza, el cuerpo detiene su movimiento. Esta visión corresponde vagamente a lo que observamos todos los días si nos olvidamos de que la fricción actúa como una fuerza que detiene el movimiento, pero no era útil para avanzar en la construcción de una verdadera teoría del movimiento.

Por otra parte, para Aristóteles no existía el vacío, ya que la ausencia total de resistencia sobre los cuerpos haría que estos adquirieran velocidades infinitas. Aristóteles imaginaba un universo cerrado y pleno de sustancia. Estas y muchas otras fueron las ideas que durante más de un milenio habrían de perdurar y que hacen de Aristóteles un pensador tan influyente en la historia del pensamiento occidental.

DE ARISTOTELES A NEWTON

A todo dogma le llega su día.

H.G. Wells

La evolución de las ideas del mundo físico desde Aristóteles hasta Newton fue la transición del universo cerrado y pleno al universo abierto y vacío que habían vislumbrado los primeros atomistas griegos. Fue el transitar también de la asociación entre fuerza y velocidad, a la asociación entre fuerza y aceleración (o cambio de la velocidad); de concebir al universo como un ser vivo a entenderlo como un complejo mecanismo de relojería, con un funcionamiento preciso, y finalmente pasar de la descripción cualitativa al establecimiento de leyes expresables en exactas ecuaciones matemáticas.

Este camino se recorrió lentamente, con avances y retrocesos, en medio de confusiones y certezas, verdades incompletas y medias falsedades. Significó ir precisando las nociones de espacio, tiempo, velocidad y aceleración. Supuso también que, gracias a los aportes de los artesanos e ingenieros europeos, se consolidara la idea de que la naturaleza es manipulable, que podemos no sólo observarla pasivamente, sino también prepararla para interrogarla y experimentar activamente con ella. Señalemos a vuelo de pájaro algunos de los pasos recorridos en este largo camino.

* La noción de impulso fue sugerida por Hiparcus y refinada por Philónus en el siglo II A.C. Durante la edad media se comenzaron a limar y a pulir las nociones de espacio y de tiempo. Hacia 1.400 ya se sabía que si un cuerpo se mueve con aceleración constante, entonces su velocidad aumenta uniformemente, y el espacio que recorre aumenta como el cuadrado del tiempo transcurrido. A estos resultados se había llegado mediante el uso de gráficas, precursoras del cálculo diferencial.

* William Ockham sugiere la existencia de fuerzas que actúan a distancia, sin necesidad de contacto entre los cuerpos.

* Hacia finales del siglo XV el francés Jean Buridan ya entiende la cantidad de movimiento de un cuerpo como una magnitud proporcional a su masa y a su velocidad y sabe que un cuerpo en caída libre aumenta su cantidad de movimiento en cantidades proporcionales al tiempo transcurrido.

* En 1500, Leonardo da Vinci enfatizó la idea de que los cuerpos que caen libremente tienen siempre la misma aceleración. Y más avanzado el siglo, el matemático belga Simón Stevinus experimentó dejando caer piedras de distinto peso y concluyó que su movimiento era independiente del peso. Este experimento, por cierto, se le atribuye erróneamente a Galileo.

* Johannes Kepler, a finales del siglo XVI se apoyó en precisas observaciones de su mentor Tycho Brahe, propuso tres leyes expresadas en forma matemática que describían el movimiento de los planetas en torno al sol.

* Posteriormente, recién entrado el siglo XVII, el francés Pierre Gassendi, dejando caer objetos desde la punta del mástil de una barca en movimiento, observó que caían al pie del mástil, exactamente como si la barca no estuviese moviéndose. Comenzaba a sospecharse que la velocidad uniforme es irrelevante. El Principio de Relatividad de la velocidad comenzaba a tomar forma.

* Luego Jeremiah Horrocks, un religioso que sólo vivió 22 años, sostuvo que la luna se mueve alrededor de la Tierra siguiendo una elipse perturbada por el sol, y sugirió que los planetas se perturban unos a otros, en una clara anticipación a la ley de gravedad universal.

* A comienzos del siglo XVII, la mente descomunal de Galileo sistematizó gran parte de los descubrimientos medievales acerca del espacio, el tiempo y el movimiento. Corroboró que los cuerpos que se mueven sin influencia alguna mantienen constante su cantidad de movimiento, mientras que los que caen libremente están sometidos a una aceleración constante. Mostró también que el período de un péndulo depende de su longitud y no del peso. Creyó erradamente que la ley de inercia se aplicaba al movimiento circular, o dicho en otras palabras, no supo percibir que un cuerpo que se mueve siguiendo un círculo está acelerado. Aunque fue el primero en usar el recién descubierto telescopio con fines científicos y realizó importantes descubrimientos astronómicos en nuestro sistema solar, su física se centra en experiencias terrestres. No consideró las leyes de Kepler ni teorizó acerca del movimiento planetario, salvo para sustentar la concepción de Copérnico de un sol fijo alrededor del cual giran los planetas, contraviniendo el dogma ptolemaico. Declaró de modo tajante que tanto el mundo celestial como el sublunar eran físicos, contribuyendo así a la progresiva desacralización de los cielos. Como es sabido, estas actitudes lo llevaron a un conflicto con la

iglesia católica, y bajo amenaza de tortura debió retractarse y abjurar del sistema heliocéntrico. Fue “perdonado” oficialmente por la iglesia en noviembre de 1632, luego de 13 años de deliberaciones, probablemente como homenaje a los 350 años de su muerte.

* René Descartes fue heredero de la tradición medieval según la cual la naturaleza aborrece el vacío. Descartes postulaba una distribución continua de materia con remolinos causantes de las fuerzas que impulsaban a los planetas. Hizo una contribución decisiva al combinar la geometría con los métodos del álgebra, lo que permitió etiquetar los puntos del espacio a través de números, creando lo que hoy conocemos como geometría analítica, herramienta que tan útil resultó para las innovaciones que habría de proponer Newton. Descartes percibió claramente que el movimiento que no es rectilíneo y uniforme es acelerado, de modo que la ley de inercia en la forma en que hoy la conocemos, se la debemos a él.

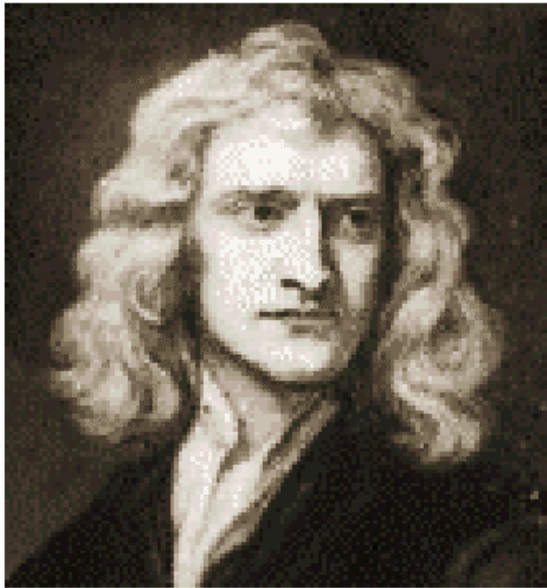
* Posteriormente Christian Huygens mostró que un cuerpo que describe uniformemente una trayectoria circular está sometido a una aceleración hacia el centro del círculo y cuyo valor es V^2/R , donde V es la velocidad del cuerpo y R es el radio del círculo.

* Los contemporáneos de Newton, Robert Hooke, Christopher Wren y Edmund Halley, esbozaron cualitativamente lo que Newton explicaría después de forma cuantitativa: que un cuerpo viaja con una velocidad constante cuando no está sometido a fuerza alguna que lo desvíe de su estado natural. Lo que explica que como los planetas no se mueven en línea recta sino que orbitan alrededor del sol, están continuamente halados por una fuerza hacia éste. Para Hooke era intuitivamente claro que la naturaleza de la fuerza que gobierna al sistema solar era la misma que hace que las cosas caigan sobre la Tierra. Y Halley se preguntaba cuál sería la trayectoria de un cuerpo sometido a una fuerza del inverso del cuadrado de la distancia. Sólomente un hombre en el mundo tenía todas esas respuestas.

NEWTON, EL GRAN ARQUITECTO

*Uno tendría que ser un Newton
para advertir que la luna está cayendo,
cuando todo el mundo ve que no cae.*
Paul Valery

Sólo hacía falta en el escenario el genio de Newton, para desechar lo superfluo y retener lo valioso, discernir entre las medias verdades y las visiones erradas para poder armar el errático rompecabezas, construir las matemáticas que faltaban y transformar las vagas descripciones pictóricas y las incipientes leyes matemáticas en un sistema armonioso, coherente, preciso y general, que fuera capaz de dar cuenta de una manera unificada, de una enorme cantidad de fenómenos distintos. El gran reto de la nueva ciencia emergente era entender la estabilidad de las órbitas planetarias, para lo cual necesitaba una teoría del movimiento. Esto a su vez supone dos cosas: entender cómo se genera el movimiento, es decir, dada una fuerza, cuál es la regla, o ley o ecuación que permite deducir la trayectoria, (actualmente le decimos ecuación de movimiento). Y en segundo lugar conocer cuál es la fuerza que actúa sobre los planetas y los mantiene en órbita. Casi nada.



Isaac Newton
(1642 – 1727)

El punto clave que le permitió a Newton construir el edificio entero de su teoría del movimiento fue romper con la idea aristotélica según la cual la fuerza está asociada con la velocidad, (*velocidad* \propto *Fuerza*), y propone en su lugar que la idea de fuerza está asociada con el ritmo o la tasa de cambio de la velocidad:

$$\frac{\text{Cambio de velocidad}}{\text{unidad de tiempo}} \propto \text{Fuerza}$$

Así, un cuerpo sobre el que no actúen fuerzas (lado derecho cero), no cambia su velocidad (ni en dirección ni en magnitud). Con algo más de precisión y en notación contemporánea, Newton postula en su segunda ley una ecuación en la cual la fuerza es igual a la derivada respecto del tiempo, de la cantidad de movimiento, es decir,

$$\frac{d(m\vec{v})}{dt} = \vec{F}$$

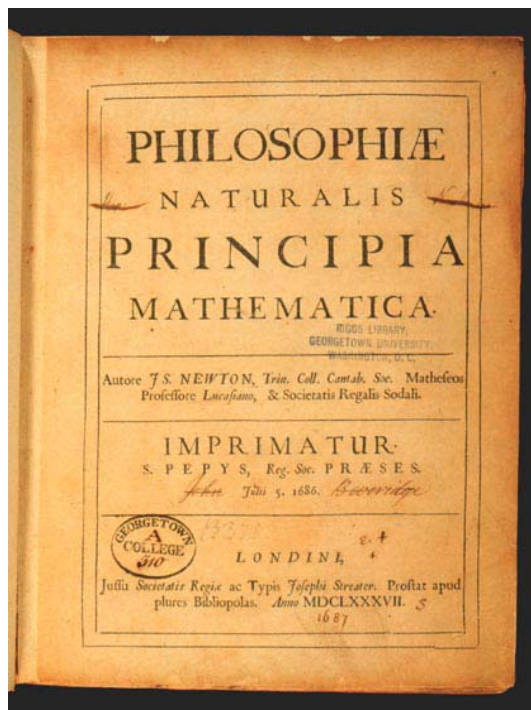
Esta segunda ley es particularmente importante porque asociar la idea de fuerza, no con la velocidad, sino con el *cambio* en la velocidad, conduce a buscar en el sol la fuerza que curva la trayectoria de los planetas y a descubrir la ley de la gravitación, como veremos más adelante.

Las Tres Leyes de Newton

- *Todo cuerpo continúa en estado de reposo o de movimiento uniforme a lo largo de una línea recta, a menos que se vea obligado a cambiar ese estado porque una fuerza actúa sobre él.*
- *El cambio de movimiento es proporcional a la fuerza ejercida y está en la dirección de la línea recta en la que la fuerza se ejerce.*
- *A cada acción se opone siempre una reacción. Dicho de otra manera, las acciones mutuas entre dos cuerpos, siempre son iguales y opuestas*

Las leyes de movimiento de Newton ilustran singularmente la nueva manera de entender el mundo físico, quizás no tan revolucionaria ni tan novedosa como algunos pudieran pretender, pero que con Newton es puesta en escena con extraordinaria claridad y

sobre todo con enorme éxito. Newton intuyó que debía separar el *cómo* del *porqué*, hacer una descripción de la manera en que las cosas ocurren en la naturaleza, dejando de lado el propósito filosófico último del porqué ocurren. Este deslinde le permitió separar los problemas solubles de los no solubles y considerar sólo los que son susceptibles de ser analizados en términos de las observaciones e interrogaciones a la naturaleza. Sin duda estrechó o redujo considerablemente los objetivos de los filósofos naturales, pero lo que perdió en amplitud lo ganó en profundidad. De Newton en adelante las leyes de la naturaleza no podían tener la forma de afirmaciones filosóficas generales. Sólo aquellas que pudieran pasar la prueba experimental contrastándolas con los hechos manifiestos podrían calificar para leyes de la naturaleza. Newton terminó de separar completamente el significado, del método en la ciencia, que ya habían comenzado a divorciarse con Kepler, Descartes y Galileo.



IDEALIZACIÓN

*Es absurdo negar el papel de la fantasía
incluso en la ciencia más estricta.*

V.I. Lenin

Otro aspecto que debe ser señalado y que está patentemente inscrito en la primera ley, es que nadie ha visto un cuerpo sobre el cual no actúen fuerzas. No hay manera de aislar un cuerpo de las influencias inevitables del ambiente, en particular de la influencia gravitacional. De modo que cuando Newton propone su primera ley no está realizando simplemente una descripción empírica de lo que se observa, puesto que describe una situación que nadie observa. Su primera ley es una creación espectacular de la mente en la que concibe una situación ideal a través de una serie de observaciones de situaciones no ideales y por medio de un proceso en el que descarta los factores accesorios para darles relevancia los aspectos esenciales del fenómeno. Una vez concebida la ley puede entonces procederse a considerar aspectos secundarios. Este método ha sido luego seguido por los científicos en innumerables ocasiones y quizás el sello de todo gran científico está en su habilidad para descubrir los aspectos esenciales de un fenómeno en medio de la maraña de aspectos episódicos.

Newton por él mismo

“Tras considerar todas esas cosas, me parece muy probable que Dios haya creado desde el comienzo toda la materia en forma de partículas sólidas, masivas, duras impenetrables y móviles, con tales tamaños y figuras y con tales otras propiedades y en una proporción tal al espacio que resulten lo más apropiado al fin para el que fueron creadas. Estas partículas primitivas, al ser sólidas, son incomparablemente más duras que cualquier cuerpo poroso, formado a partir de ellas. Tan duras incluso como para no gastarse ni romperse nunca en pedazos, pues ningún poder ordinario es capaz de dividir lo que el mismo Dios ha hecho uno en la primera creación”.

“Hay en la Naturaleza agentes capaces de hacer que las partículas de los cuerpos se atraigan por fuerzas muy fuertes. Y es la ocupación de la filosofía experimental conseguir esas fuerzas”.

“Es suficiente que la gravedad exista y actúe de acuerdo a las leyes que hemos aplicado y eso basta

para dar cuenta de los movimientos de los cuerpos celestes y de nuestras mareas”.

Así aparecieron una serie de nociones ideales tales como superficies sin fricción, esferas perfectas, cuerdas inextensibles, partículas puntuales, aislantes o conductores perfectos y otras entidades con las que mortificamos a los estudiantes en su proceso de aprendizaje. Estas nociones no existen en el mundo real pero son casos límites de objetos reales. Hoy en día hablaríamos de un modelo y en gran medida, a partir de Newton hasta ahora, la labor de los físicos ha sido la de modelar partes de la realidad física, hacer lo que hemos llamado una *invención de la realidad*, cada vez con mayor precisión.

LA LEY DE GRAVITACIÓN

*¿Qué hace la Gravedad
fuera de su cama a medianoche?*
William Shakespeare

El sistema que Newton erigió no hubiera tenido el impacto que tuvo, de no haber incluido su otro gran aporte a nuestra comprensión del mundo físico, su Ley de gravitación Universal.

Recordemos que Galileo había sistematizado el conocimiento de su época acerca del movimiento de objetos en las cercanías de la superficie de la Tierra. En particular se sabía que un cuerpo que cae libremente tiene una aceleración constante, que no cambia a medida que se mueve (insistimos, cerca de la superficie terrestre) y que vale $g \cong 10 m/seg^2$. También se sabía que la velocidad vertical aumenta proporcionalmente al tiempo transcurrido, mientras que la velocidad horizontal permanece constante. Por último, se conocía que la distancia que cae el móvil es proporcional al cuadrado del tiempo.

Por otra parte, Johannes Kepler había propuesto tres leyes a partir del análisis de las observaciones astronómicas del movimiento de planetas del sistema solar. Estas tres leyes de Kepler, son:

- La trayectoria que los planetas describen alrededor del sol, es una elipse. El sol se encuentra en uno de los dos focos de la elipse.
- La línea (imaginaria) que va del sol a un planeta, barre áreas iguales en tiempos iguales; es decir, que la velocidad a la que cambia el área, es constante.
- El eje mayor de la elipse elevada al cubo y dividida entre el período (lapso en dar una vuelta entera), es una misma constante para los diferentes planetas. Una manera diferente de decir esto es que la energía cinética de un planeta decrece como el inverso de su distancia al sol.

Kepler se lamentaría ocasionalmente más tarde de haber “poblado la astronomía con el estiércol de las elipses”, porque el simétrico y elegante círculo perdía el privilegio de representar el movimiento de los astros. En realidad estaba sentando las bases para el inminente desplazamiento del énfasis estético en la apreciación de la

realidad: de las trayectorias (soluciones) a las ecuaciones básicas que gobiernan estas soluciones. Son las leyes fundamentales las que deben ser simétricas y elegantes. Pero aun no habían sido descubiertas.

Las leyes de Galileo daban buena cuenta del movimiento de proyectiles en la Tierra. Permitían responder a las preguntas pertinentes. Las de Kepler hacían lo propio en el sistema solar. La física terrestre tenía sus leyes y la celeste, las suyas ¿para qué más? Sucede que en la naturaleza misma de la ciencia, está el tratar de explicar la mayor diversidad de fenómenos apoyándose en el menor número de principios, y no morir en el intento.

Newton con su formidable intuición supo “ver” las mismas causas en el movimiento de los cuerpos celestes que en el movimiento de los cuerpos terrestres, y con su enorme capacidad pudo construir un modelo teórico que contemplaba y explicaba ambas situaciones. No es difícil (hoy) reconstruir la lógica de su pensamiento apoyándose en un dibujo que él mismo hizo y que incluyó en muchas de las ediciones de sus obras. Al lanzar un proyectil desde una montaña, caerá al suelo describiendo la parábola que las leyes de Galileo prescriben. Imaginemos que lo vamos lanzando cada vez con mayor velocidad horizontal. Llegará un momento en que la curvatura de la Tierra compense la caída del proyectil que entonces dará una vuelta completa y llegará al punto inicial con la misma velocidad inicial y se transformará en un satélite. Como la luna. La clave para unir la física terrestre con la celeste estaba en la ley de gravitación.

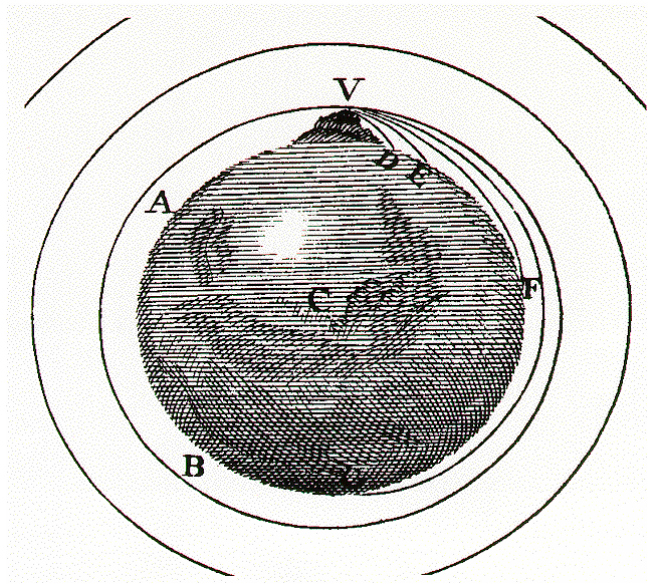
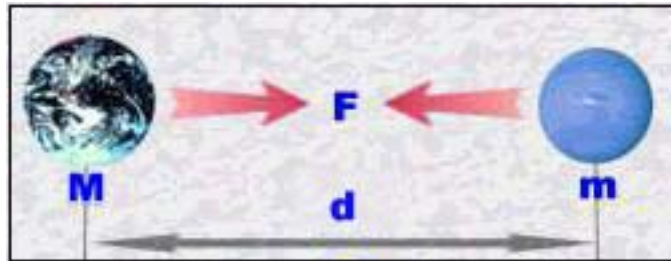


Figura 1

Quizás el primer manuscrito de Newton en el que hay referencias precisas a dicha ley es de 1665, y a pesar de no tener título hoy se le conoce como *Sobre El Movimiento Circular*. Allí el joven Newton concluye a partir de la tercera ley de Kepler y de la expresión para la aceleración centrípeta, que la fuerza necesaria para mantener a un planeta en una órbita circular debe cambiar según el inverso del cuadrado de la distancia al centro de giro. Esta demostración (que incluimos más adelante en el Divertimento 1), es válida únicamente para órbitas circulares, pero en los Principia, Newton extendió la demostración al caso de curvas cónicas, es decir, elipses, hipérbolas y parábolas.

El producto final en términos del concepto ideal de partículas puntuales puede ser expresado como sigue. Dadas dos partículas puntuales de masas m y M , separadas por una distancia R , la fuerza gravitacional con la que se atraen es directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa, y está a lo largo de la línea que las une. En términos matemáticos y en notación actual, escribiríamos que $F \propto mM/R^2$.



Es importante señalar que aunque existían indicaciones previas de que la gravedad podía describirse con una ley del inverso del cuadrado de la distancia (un comportamiento probablemente sugerido por la manera como decrece la energía luminosa a medida que nos alejamos de la fuente, que ya se sabía que era como el inverso del cuadrado de la distancia a la fuente), la ley cobra su verdadera importancia cuando se le junta con la segunda ley de movimiento de Newton, porque sólo así es posible calcular las órbitas o trayectorias de los cuerpos. Únicamente la pareja ley de gravitación y ley de movimiento tiene relevancia física y es empíricamente contrastable.

La ley de gravitación de Newton ilustra de manera impactante lo que señalábamos en párrafos anteriores. Newton logra captar la esencia del fenómeno gravitacional desechando factores irrelevantes y concentrándose en unos pocos importantes. Así, el campo

gravitacional creado por el sol a su alrededor no depende de la naturaleza interna ni de la composición del sol, ni siquiera de su tamaño. Todo lo relevante está condensado en el valor de su masa (eventualmente el valor de la masa podría ser calculada en base a su estructura interna y composición, pero ese es otro asunto). Conocida la masa del sol, la intensidad del campo gravitacional en un punto cualquiera del espacio depende únicamente de la distancia entre el punto considerado y el centro del sol.

EXITOS DE LA TEORÍA

*Las predicciones son difíciles,
especialmente acerca del futuro.*

Niels Bohr

La manipulación matemática de las ecuaciones de Newton complementadas con su ley de gravitación permitió entender de un modo más profundo al universo. Las leyes de Galileo y las de Kepler podían ser deducidas como casos particulares del sistema newtoniano. Las soluciones matemáticas permitían conocer que los planetas se mueven en elipses, que cerca de la Tierra los proyectiles se mueven en parábolas y que los cometas se mueven en hipérbolas. Además se podía predecir sus trayectorias. Física y astronomía quedaron unidas para siempre.

Se entendió el fenómeno de las mareas de nuestros océanos y porqué los astros son esféricos (un resultado de la autogravitación, las diversas partes de un cuerpo muy masivo, halándose entre sí). La luna y su movimiento y el de las lunas de otros planetas fue seguido muy de cerca, encontrándose que no le era infiel a lo que dictaminaba la ley de gravitación newtoniana. Ella sirvió para predecir la existencia de nuevos planetas del sistema solar y salió airosa de cada confrontación con la realidad a la que fue sometida. Sólo una leve discrepancia en la descripción de la trayectoria de Mercurio, permaneció sin clara explicación. Fue en el siglo XX cuando se entendió que las circunstancias de Mercurio son precisamente aquellas en las que la teoría de gravedad newtoniana comienza a fallar y debe ceder su lugar a otra teoría de la gravedad más apropiada a esas circunstancias., como veremos más adelante.

LA CONSTANTE GRAVITACIONAL

*Nada hay en este mundo constante;
excepto la inconstancia.
Jonathan Swift*

En la ley de gravitación hay una cantidad que es obviamente variable: la distancia entre las partículas. Las masas de las partículas son cantidades constantes que naturalmente son distintas en general para partículas diferentes. Pero la proporcionalidad implícita en la fórmula $F \propto mM/R^2$, está aludiendo a una constante de proporcionalidad que llamaremos G y que permite escribir la igualdad

$$F = G \frac{mM}{r^2}.$$

Esta cantidad G llamada actualmente la constante gravitacional de Newton, no aparece en los Principia sino más tarde en el siglo XVIII, cuando es introducida por Pierre Simón Laplace y denotada por la misma letra que usamos hoy, y es, como se comprenderá, de primerísima importancia.

¿Qué queremos decir cuando afirmamos que G es una constante? Queremos decir que tiene el mismo valor para cualquier par de masas que consideremos, para cualquier instante en que hagamos la medición, para cualquier región del universo, temperatura, condición física del laboratorio..., es decir que es una constante de la naturaleza; de hecho, es la primera constante que aparece en una ley fundamental. Ella mide la intensidad intrínseca de la fuerza gravitacional, más que del valor circunstancial obtenido por haber considerado eventualmente dos cuerpos con algunos valores particulares de sus masas y que estén a la sazón a determinada distancia uno del otro. La constante G reaparecerá más tarde en la teoría general de la relatividad cumpliendo el mismo papel que en la teoría de Newton.

La constancia de G ilustra el hecho singular de la universalidad de la ley de gravitación, un aspecto en el que el propio Newton insistió suficientemente. El valor numérico de G no fue conocido por Newton y sus contemporáneos por una sencilla razón. La aceleración de un cuerpo en la superficie de la Tierra está dada por la ecuación

$$a = \frac{GM_T}{R_T^2}$$

El valor de a puede medirse y como sabemos el resultado es (aproximadamente) $10m/seg^2$, el radio de la Tierra, R_T era conocido, unos $6400Km$, pero la masa de la Tierra M_T no era conocido, de modo que no se podía determinar G . Hubo que esperar avances tecnológicos que le permitieron al físico inglés Henry Cavendish, usando una balanza de torsión tan precisa que permitía medir la fuerza gravitacional entre dos esferas de masas conocidas (apenas un kilogramo cada una), colocadas una cerca de la otra, para obtener el valor numérico de G . Hábil publicitariamente, Cavendish tituló su trabajo *Pesando la Tierra*, porque al determinar G era posible calcular el valor de la masa de la Tierra. El valor medido actualmente de la constante gravitacional de Newton es $G = 6,67 \times 10^{-11} m^3/seg^2 kg$. El lector podrá fácilmente rehacer el cálculo de Cavendish despejando M_T de la fórmula anterior y obtener para la masa de nuestro planeta, el valor $M_T \approx 6 \times 10^{24} kg$.

Hace algún tiempo los periódicos reseñaron la noticia de un jefe civil de un pueblo brasileño, quien encomendó a un equipo de ingenieros, un estudio de factibilidad para la construcción de una presa hidroeléctrica. Al conocer el informe de los ingenieros donde se concluía que la presa no podía construirse porque lo prohibía la ley de gravitación, el jefe civil entró en cólera y ordenó que investigaran si esa ley era municipal, federal o nacional, para derogarla. ¡No se imaginaba que la ley de gravitación no puede derogarse por ser una Ley Universal.

A partir del establecimiento de la ley de gravitación universal, la separación de las leyes fundamentales en dependencias funcionales y constantes de la naturaleza ha sido una práctica usual. Han surgido otras constantes fundamentales como la velocidad de la luz en el vacío, la constante de Planck, asociada con fenómenos cuánticos, la carga eléctrica del electrón y algunas otras. Nuestra visión del mundo físico está basada en leyes deducibles de algunos principios generales y en estas constantes, cuyos valores numéricos determinan en gran medida la estructura del universo en que vivimos.

A los físicos siempre les ha intrigado si estas constantes son verdaderamente constantes o aproximadamente constantes. Como la distancia de nuestro planeta a la luna se conoce con enorme exactitud (gracias a un espejo colocado por astronautas y al cual se envían rayos Laser cuyos reflejos se detectan de nuevo en la Tierra, pudiendo medir el lapso entre el envío y la recepción, el error es de apenas unos centímetros), datos muy recientes, de enero del 2003, permiten concluir que G es constante al menos en una parte en un billón (10^{12}) al año.

Actualmente no sabemos por qué razón estas constantes fundamentales valen lo que valen y únicamente la experimentación nos permite conocer sus valores numéricos. Sólo sabemos que nuestro universo sería radicalmente diferente si por ejemplo la constante gravitacional de Newton G tuviese otro valor. Por ejemplo, si G fuese apenas unos cuantos puntos porcentuales mayor, las temperaturas en el interior de las estrellas sería mucho mayor y vivirían por tanto mucho menos, tal vez no vivirían lo suficiente como para propiciar la emergencia de la complejidad bioquímica en los planetas. En cambio, si G fuese ligeramente menor, la atracción gravitacional no sería suficiente para conducir a órbitas estables. En particular los planetas no girarían establemente alrededor del sol.

Tras los esfuerzos de los teóricos que hurgan en las teorías fundamentales se esconde la fe de que algún día los valores de las constantes físicas puedan determinarse como consecuencia lógica de una teoría aun no descubierta.

EL ESPACIO ABSOLUTO

*Nada me intriga tanto como el problema
del espacio y el tiempo, y sin embargo
nada me preocupa tan poco,
nunca pienso en ellos.*

Charles Lamb

Newton desarrolló el andamiaje de su teoría usando una noción de espacio, que concide con la de nuestra intuición: es lo que queda en un cuarto que ha sido despojado de todos sus muebles, es el espacio en que se mueven los planetas y los objetos del universo. Entendemos que nos podemos mover a lo largo de tres direcciones independientes (por ejemplo adelante-atrás, izquierda-derecha y arriba-abajo) y que podemos etiquetar cada punto del espacio con tres números o coordenadas, por ejemplo (x, y, z) . Es decir, es intuitivo que el espacio tiene tres dimensiones y que además obedece a la vieja y noble geometría de Euclides. Pero la existencia de diversas maneras de otorgar coordenadas a los puntos del espacio (es decir, de numerosos sistemas de referencia), llevó a Newton a introducir la noción de espacio absoluto.

En los *Principia* lo definió de la siguiente manera:

*El espacio absoluto por su propia naturaleza y sin relación
a nada externo permanece siempre similar e inmutable.*

Sin embargo, en la física de Newton -en sus ecuaciones- no aparece para nada tal cosa como el espacio absoluto. Sólo aparecen los espacios relativos de cada observador que se mueve con movimiento rectilíneo y uniforme (observador inercial) y para el cual son válidas las leyes de movimiento. La determinación de cuál de ellos es el espacio absoluto carece de sentido. Sólo el movimiento de un cuerpo relativo a algún sistema de referencia tiene sentido en la física newtoniana y todos los sistemas de referencia inerciales son igualmente válidos para estudiar el movimiento. La caída de una manzana es vertical para un observador en reposo respecto del árbol, pero es parabólica vista por un pasajero de un tren que a la sazón viaje por el lugar. Sin embargo la ley $\vec{F} = m\vec{a}$ que describe el fenómeno es la misma para ambos observadores, o para decirlo en lenguaje técnico, la ecuación de movimiento es invariante bajo transformaciones entre sistemas inerciales.

Newton estaba al tanto de la indetectabilidad de la velocidad uniforme absoluta e imaginó experimentos para intentar una determinación del espacio absoluto a través del movimiento acelerado. Mantuvo por medio de su discípulo Samuel Clark una polémica con Gottfried Wilhelm Leibniz, para quien el espacio no es otra cosa que el conjunto de relaciones que guardan los objetos entre sí, por lo que no se puede atribuir existencia al espacio mismo. Para Leibniz el espacio vacío, sin ningún objeto, es un concepto sin sentido. En cambio para Newton la imagen del espacio absoluto es la de un cuarto vacío que, eventualmente, puede ser llenado de objetos, muebles... En última instancia la controversia sobre la naturaleza absoluta o relativa del espacio fue zanjada tan sólo en 1916 con el advenimiento de la relatividad general.

EL TIEMPO DE NEWTON

*El tiempo absoluto, desdeñoso del placer
y del dolor, sólo transcurre.*
Octavio Paz

Isaac Newton era un hombre precavido. Por eso en sus *Principia*, escribe:

No defino al tiempo porque es bien conocido de todos. Sólo debo señalar que el hombre común no concibe esta magnitud bajo ninguna otra noción que no sea la relación que mantiene con objetos sensibles, y de ello surgen ciertos prejuicios para cuya eliminación será conveniente hacer la distinción entre lo Absoluto y lo relativo; lo Verdadero y lo aparente, y lo Matemático y lo común.

El tiempo Absoluto, Verdadero y Matemático, tomado por sí sólo, sin relación a ningún cuerpo, transcurre de un modo uniforme correspondiente a su propia naturaleza.

Newton logra así deslastrar nuestra noción de tiempo de elementos subjetivos, y simplificarlo al punto de permitir un tratamiento matemático. Físicamente, Newton identifica al tiempo con la variable independiente de la física: el tiempo transcurre y las cosas se mueven. Matemáticamente, Newton identifica al tiempo absoluto con la recta real, a un lapso, con un segmento y a un instante con un punto de la recta, es decir, con un número real. El tiempo newtoniano hereda así los atributos que los matemáticos le brindan a los números reales; una estructura diferenciable, unidimensional, con una topología Hausdorff, metricidad o distancia entre dos instantes, infinito y no compacto.

Para Newton estas propiedades eran necesarias para legitimar un análisis local, poder hacer una disección en la anatomía del tiempo y considerar lapsos infinitesimales dt , para poder aplicar su cálculo de fluxiones [Véase el capítulo Newton y La Matemática, de Carlos Domingo en este volumen]. Note también lo sugestivo del lenguaje, el tiempo t es el fluente, el que fluye.

El tiempo absoluto de Newton es intuitivamente convincente. Más allá de la subjetividad que a veces nos sugiere que el tiempo fluye de manera desigual, el sentido común nos advierte que debe existir un patrón uniforme, homogéneo, regular que nos permita medir duraciones de discursos presidenciales, lapsos entre cosechas,

tiempo transcurrido entre un par de eventos cualesquiera. La intuición y la experiencia cotidiana nos dice que el valor de un lapso dado no depende de quién lo mida, que cuatro horas son cuatro horas para cualquier observador. Ese es el sentido de “tiempo absoluto” en la física de Newton. Como veremos, la historia nos mostró que el tiempo absoluto es tan sólo una (muy) buena aproximación, pero que es incompatible con el hecho de que la velocidad de la luz (en el vacío) es una constante universal. Nuestra intuición resultó un tanto provinciana y no adaptada a velocidades cercanas a la de la luz.

El sistema newtoniano tuvo tal éxito que afianzó tremendamente la noción de la existencia de leyes de la naturaleza entendidas como ecuaciones diferenciales de evolución en el tiempo. Además, el formidable éxito empírico llevó de la mano la legitimación de la metafísica del tiempo, el tiempo absoluto como el *sensorium* de Dios. Más aún, la predictibilidad y su *alter ego*, el determinismo absoluto (laplaciano) se arraigó profundamente en la estructura de la física: la condición o el estado de un sistema en un determinado instante permite al menos en principio, conocerlo (ecuaciones de evolución mediante) en cualquier instante posterior o anterior. La diferencia entre el hombre y una inteligencia superior capaz de discernir todos los eventos pasados y futuros del universo, es sólo cuestión de grado.

Paradójicamente, el triunfo del sistema newtoniano despoja al universo de la necesidad del tiempo. Si tanto el futuro como el pasado están contenidos en las ecuaciones de un sistema, podemos sencillamente prescindir de la noción de tiempo.

En el corazón mismo del sistema newtoniano está la idea de que el lapso transcurrido entre dos eventos, tiene el mismo valor para todos los observadores. En este sentido el tiempo newtoniano es absoluto: el ritmo de cualquier reloj mide el flujo de un tiempo trascendente y único. Como señalamos antes al comprender que la velocidad de la luz es la mayor de las velocidades posibles y por tanto, que es una constante física universal, hubo que revisar las nociones de tiempo absoluto y de espacio absoluto, tan caras al sistema newtoniano.

NEWTON, NEWTONIANOS Y EL FUTURO

El futuro ya no es lo que solía ser.
Robert de Niro en El Ángel Diabólico.

Al poco tiempo de publicado los *Principia*, el sistema newtoniano se convirtió en el paradigma de la explicación científica del mundo. La imagen del universo era la de una inmensa maquinaria, un preciso mecanismo de relojería cuyas leyes de funcionamiento es posible (y es nuestro deber) desentrañar. Dios es el gran relojero que lo ha construido y lo ha echado a andar, pero una vez en movimiento evolucionará fatal e inexorablemente de acuerdo con las leyes newtonianas. La presencia de Dios fue desplazada de los conceptos de espacio y tiempo absolutos, nociones cada vez menos consideradas por los postnewtonianos, hacia el concepto de promulgador de leyes. Dicen que cuando Laplace mostró su monumental Mecánica Celeste al Emperador Napoleón, se estableció el siguiente dialogo:

Napoleón: -Usted ha escrito este enorme libro sobre el sistema del mundo sin mencionar ni una vez al autor del Universo.

Laplace: -Señor, Dios es una hipótesis que no me hace falta-

Más tarde, cuando Napoleón le contó el incidente a Lagrange, este comentó: -ah, pero es una hipótesis tan fina, explica tantas cosas...

Nunca antes las nociones de determinismo, causalidad y predictibilidad se habían hecho tan reales como con la mecánica de Newton. Para conocer la trayectoria de una bala, basta conocer su posición inicial y su velocidad inicial, además de las fuerzas que actúan sobre ella. La evolución del sistema solar puede ser obtenidas si conocemos las posiciones y las velocidades de los planetas y del sol en un instante arbitrario. En gran medida el sistema newtoniano es un algoritmo para predecir el estado del mundo en un instante cualquiera si se conoce el estado en otro instante. Laplace lo entendió profundamente cuando intuyó la presencia de una inteligencia

...que pudiera conocer todas las fuerzas que animan la Naturaleza y las posiciones mutuas de los entes que la componen; Si ese intelecto fuese lo suficientemente vasto como para someter estos datos a análisis, podría condensar en una sola fórmula el vasto movimiento de los cuerpos más grandes del Universo y el del átomo más liviano. Para tal

inteligencia nada sería incierto y el futuro así como el pasado, estarán presentes ante sus ojos.

El éxito de esta visión mecanicista de la realidad física iba de la mano con el éxito empírico de las leyes de Newton: ellas no sólo proveían una unificación de la física terrestre con la celeste, sino que además explicaban el porqué de las mareas y los movimientos de los planetas del sistema solar. Gracias a ellas podíamos vaticinar con exactitud los eclipses y prever la aparición de los cometas con una certidumbre que iba más allá de las hojas de tabaco y la bola de cristal. El broche de oro fue lograr la hazaña de predecir nada menos que la existencia de un nuevo planeta en el sistema solar: Neptuno.

El desarrollo futuro del paradigma newtoniano fue la generalización de los principios establecidos por Newton a otras áreas, a nuevas situaciones, al hallazgo de nuevos campos de aplicación y a la elaboración de novedosas y sofisticadas maneras de formular los principios newtonianos. Para decirlo en el lenguaje de Kuhn, desarrollar la ciencia normal que terminara de consolidar el paradigma una vez terminada la revolución que lo instauró. Así, William Rowan Hamilton, Leonard Euler, Joseph Lagrange y Gustav Jacobi desarrollaron nuevos formalismos en los cuales nuevas estructuras matemáticas servían de apoyo a los mismos conceptos físicos. Estas sugestivas presentaciones del sistema newtoniano permitieron desarrollar técnicas de cálculo para sistemas más complicados y fueron fundamentales para el desarrollo de la teoría cuántica, ya en el siglo XX.

EL DESCUBRIMIENTO DE NEPTUNO

Los astrónomos del siglo XIX observaron que la órbita que describía el planeta Urano no se correspondía con la que establecía la ley de gravitación de Newton. En lugar se concluir que la ley de gravitación fallaba, Urbain Jean Le Verrier en Francia y John Couch Adam en Inglaterra supusieron que un planeta hasta entonces desconocido e inobservado perturbaba gravitacionalmente a Urano, haciéndolo seguir la trayectoria anómala que observaban los astrónomos. Con datos en la mano, calcularon con la teoría de Newton cuál debía ser su localización. A finales de agosto de 1846 Leverrier presentó sus cálculos a la Academia de Francia; el 18 de septiembre le escribió al astrónomo alemán Johann Gottfried Galle, de Berlín. El 23 de septiembre apareció en las lentes de los telescopios y con apenas un grado de desviación respecto de la posición predicha por Leverrier, el nuevo planeta. Para gloria de Newton y Leverrier,

Neptuno acababa de ser descubierto y el poder predictivo del sistema newtoniano se había anotado otro éxito espectacular. Muchos años después, en 1930, el planeta Plutón fue descubierto usando la misma estrategia.

Por otra parte, Lagrange había notado que es posible expresar la ley de gravitación de Newton en términos de la influencia de un campo que llena el espacio continuamente y que George Green en 1828 llamó *potencial*. Laplace fue capaz de conseguir una ecuación diferencial para el cambio del potencial en el espacio exterior a las masas que crean el campo. Poco después, Simeón Poisson generalizó la ecuación de Laplace concibiendo una ecuación que determina el cambio del potencial en el interior de una masa cualquiera, en términos de la densidad de la masa.

Además, se desarrollaron también como extensiones naturales de la teoría de Newton, la hidrodinámica o dinámica de fluidos y la acústica o teoría de propagación de las ondas sonoras; es decir, se logró obtener la descripción de los medios continuos como un caso límite de una teoría con un número muy grande de partículas discretas, cada vez más juntas. Esta generalización es la base de las modernas teorías de campo que juegan un papel fundamental en la física contemporánea. Incluso las leyes de la termodinámica fueron entendidas hacia finales del siglo pasado como efectos del promedio de la acción de un enorme número de moléculas sujetas a las leyes de movimiento establecidas por Newton.

Mientras tanto el inglés James Clerk Maxwell había logrado sintetizar en un compacto conjunto de ecuaciones la descripción de los fenómenos eléctricos y magnéticos. Las ecuaciones de Maxwell no sólo mostraban una profunda unidad y entrelazamiento entre la electricidad y el magnetismo, fenómenos que hasta entonces se habían considerado como independientes, sino que además sugerían con insistencia que la luz no es otra cosa que un campo electromagnético con capacidad de propagarse, integrando la óptica al electromagnetismo. El segundo gran paso en el proceso unificador de las fuerzas de la naturaleza se había consumado.

A finales del siglo pasado una buena parte de la realidad había sido inventada. A los constituyentes básicos del mundo físico de Newton -el espacio, el tiempo, la fuerza y el punto material- se agregaban ahora los campos electromagnéticos. Newton y Maxwell, la física de las partículas materiales y la física del éter. Juntos podían dar cuenta de casi toda la realidad observada. Hubo quien pensó que la física teórica podía darse por terminada y que tan sólo faltaba atar algunos cabos sueltos aquí y allí, hacer

algunas extensiones menores y ampliar el campo de aplicaciones. En 1880 el director de la oficina de patentes de Prusia le pidió a su gobierno que clausurara la oficina, pues ya no había nada concebible que inventar. En 1894 el reconocido físico Albert Michelson opinó así:

Las más importantes leyes fundamentales y hechos de la ciencia física han sido todos descubiertos, y están tan firmemente establecidos que la posibilidad de que sean suplantados como consecuencia de nuevos descubrimientos, es tremendamente remota... Nuestros futuros descubrimientos deben ser buscados en la sexta cifra decimal.

Pero, como siempre, la fantasía le quedó pequeña al mundo, y el futuro, que ya no era el que solía ser, anunciaba sorpresas que habrían de provocar un cataclismo conceptual en el viejo orden.

Nuevas revoluciones científicas que alterarían nuestra imagen y nuestra comprensión del mundo físico estaban por producirse y apenas quince años después de la afirmación de Michelson, estaban en el escenario Einstein y Bohr con la relatividad y la teoría cuántica en sus bolsillos. Ellas nos mostrarían que el Universo es más sutil de lo que se había sospechado y que al penetrar en zonas inéditas de la realidad debemos estar dispuestos a cambiar algunas nociones caducas por otras más apropiadas a las circunstancias. Pero Newton había mostrado cómo recorrer el camino y a pesar de los necesarios cambios su resultado iba a conservar lo esencial del espíritu newtoniano.

LAS RELATIVIDADES

*Las maldades de este mundo
son cosas correlativas...*
Guaguancó cubano

En 1905 algunos pilares básicos del edificio newtoniano fueron estremecidos por un joven de la misma edad que tenía Newton cuando meditaba su teoría del movimiento. La relatividad especial de Albert Einstein resolvió una incompatibilidad que existía entre la física de Newton y las ecuaciones de Maxwell. Paradójicamente el *impasse* estaba en la explicación de un resultado experimental conseguido precisamente por Michelson, aquel que quince años antes había decretado con cierta ingenuidad parroquial que el camino de la física ya había sido transitado en su totalidad.

¿Cómo desenredó Einstein el desacuerdo entre Newton y Maxwell? Sacrificando algunas de las nociones fundamentales del sistema newtoniano que durante más de dos siglos fueron aceptadas como indoblegables, pero que ahora mostraban su flanco débiles. En particular, la idea newtoniana de un tiempo absoluto con un transcurrir igual para todos los observadores, fue sustituida por la idea de un tiempo local, privado, en la cual el ritmo del flujo del tiempo depende del movimiento de cada observador. Asimismo, la simultaneidad dejó de ser un concepto absoluto. De acuerdo con la relatividad especial dos sucesos simultáneos para un observador no lo serán para otro que se mueve respecto del primero.

La energía de un cuerpo que de acuerdo con Newton aumenta cuadráticamente con la velocidad, en la relatividad de Einstein está dada por la ecuación

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío. Esta relación dice entre otras cosas que ningún cuerpo puede tener una velocidad mayor que la de luz, respecto ningún sistema de referencia. El espacio y el tiempo de la relatividad especial están interconectados formando una entidad de cuatro dimensiones, el *espacio-tiempo*, y distintos observadores perciben distintas proporciones del espacio y del tiempo, así como las aristas de un cubo lucen de diversas longitudes vistas desde diversos ángulos.

Todas estas extrañas e insólitas predicciones de la teoría especial de la relatividad son la consecuencia directa e inapelable del hecho observacional -ampliamente verificado- que señalamos anteriormente, a saber: que la velocidad de la luz es siempre la misma, independiente del movimiento de la fuente que la emite o del observador que la detecta. Einstein no hizo otra cosa que seguir el viejo precepto que Sherlock Holmes invocaba con frecuencia delante del inefable Watson “...una vez que hayas eliminado lo imposible, lo que quede, por improbable que sea, tiene que ser la verdad...”

Pero, más allá de las diferencias, hay mucho del espíritu newtoniano en la relatividad especial. La ley de inercia y el principio de relatividad, de acuerdo con el cual las leyes de la física son las mismas para todos los observadores en movimiento relativo uniforme, son exactamente los preceptos newtonianos pero ahora válidos para toda la física y no sólo para la mecánica. Sólo ha cambiado el “diccionario” que permite traducir las observaciones (posición y tiempo, o mejor, las coordenadas espaciales y temporal de un evento) entre distintos sistemas de referencia. Las leyes de movimiento para las partículas en la relatividad, comparten rasgos comunes con las newtonianas: son ecuaciones diferenciales de segundo orden, y basta conocer la fuerza que actúa sobre una partícula para que su trayectoria quede determinada si sabemos su posición y su velocidad en algún instante inicial. De modo que la relatividad es también una forma de predecir el futuro de un sistema si conocemos su estado actual.

Hacia 1915 el otro gran aporte de Newton -la teoría de gravitación- habría de ser desplazado por otra teoría de la interacción gravitatoria, la *relatividad general* o teoría relativista del campo gravitatorio. Esta vez la motivación de Einstein no se debía a ningún desacuerdo o discrepancia entre la teoría y la observación. De hecho no había ningún fenómeno ni experimento que sugiriera que la teoría de Newton debía ser modificada, mucho menos suplantada por otra teoría. Se trataba más bien de una urgencia conceptual, una necesidad de consistencia interna en el propio cuerpo de la física. La relatividad especial prohibía la transmisión de energía a velocidades superiores a la de luz y, sin embargo, la teoría de gravitación newtoniana tenía el pecado original de la acción a distancia instantáneamente, es decir, de propagarse con una velocidad infinita.

La coherencia y la unidad en nuestra descripción de la naturaleza, a las que Newton tanto contribuyó, exigía redimir a la física de ese pecado. Para ello Einstein volvió a sacrificar algunas queridas

nociones. En particular el rígido espacio-tiempo se hizo flexible, cambiante en su interacción con la materia. Es el famoso espacio curvo en el que las propiedades geométricas del espacio (ángulos, longitudes) y el flujo del tiempo (el tic-tac de los relojes) dependen de la gravitación producida por las masas. La unidad indisociable de la nueva teoría gravitacional es espacio-tiempo-materia. El propio concepto dinámico de fuerza gravitacional es reemplazado por el concepto geométrico de curvatura del espacio-tiempo. En las ecuaciones de Einstein, la materia le dice a la geometría a su alrededor cómo se va a curvar, y la geometría le dice a la materia en ella inmersa, cómo se va a mover.

El irlandés George Bernard Shaw ilustró con una elegante ironía, el punto de vista de la relatividad general:

Newton, como buen inglés postuló un Universo rectangular porque los ingleses usan la palabra "square" para demostrar honestidad, verdadero, rectitud. Newton sabía que el Universo consta de cuerpos en movimiento y que ninguno de ellos se mueve en línea recta, ni podría hacerlo. Pero un inglés no se amilana por los hechos. Para explicar por qué los cuerpos se mueven así, inventó una fuerza llamada gravitación y entonces erigió un complejo universo británico y lo estableció como una religión en la que se creyó por trescientos años. El libro de esa religión no es esa cosa oriental mágica: la Biblia, es el tablero de Trenes Ingleses, que da las estaciones de todos los cuerpos celestes, sus distancias, las velocidades a las que viajan y la hora a la que llegan a eclipsar puntos o estrellarse contra la Tierra. Todo ítem es preciso, comprobado, absoluto e inglés.

Trescientos años después de establecido el sistema surge un joven profesor en el medio de Europa y le dice a los astrónomos:

— Caballeros, si Uds. observan el próximo eclipse de sol con cuidado, entenderán qué pasa con el perihelio de Mercurio —....

El joven profesor sonríe y dice que la gravitación es una hipótesis muy útil y da resultados bastante buenos en muchos casos, pero que él, personalmente puede prescindir de ella. Le preguntan ¿cómo? si no hay gravitación los cuerpos celestes se moverían en líneas rectas. Él responde que no hace falta ninguna explicación porque el Universo no es rectilíneo ni exclusivamente británico: es curvilíneo.

La nueva teoría describe cómo los rayos de luz se curvan cuando rozan la presencia de los cuerpos celestes y afirma que la gravitación se propaga a través de ondas gravitacionales que viajan a la velocidad de la luz. La relatividad general permite hablar del triunfo dramático de la gravitación sobre las otras fuerzas en objetos masivos que colapsan para formar huecos negros, en cuyos orígenes una singularidad marca el borde mismo del espacio y el tiempo. La relatividad general es también la base teórica para describir la estructura y la evolución del Universo a gran escala desde su nacimiento hasta su posible destino final. Sin embargo, a pesar de las enormes diferencias formales y conceptuales entre la gravitación einsteniana y la gravitación newtoniana, no deja de ser sorprendente el hecho de que la magnitud física observable más importante en ambas teorías es la misma: los cambios en la fuerza gravitacional.

LA SUPERACION DE LAS TEORÍAS

*“-El Rey: Los Reyes deberían ser inmortales.
-Margarita: Ellos tienen una inmortalidad provisional”*
Eugene Ionesco

“Quítate tú pa´ poneme yo”
La Fania All Stars

¿Podríamos decir que después de Einstein el rey Newton ha muerto, que viva el rey Newton? ¿Podríamos decir que Einstein demostró que Newton estaba equivocado? Decididamente no. La relación entre la relatividad especial y la dinámica de Newton, y entre la relatividad general y la teoría newtoniana de gravitación, ilustran de manera singular el modo de proceder de la ciencia. En ella las verdades absolutas han sido canceladas y ésta es la única verdad absoluta. Las teorías que diseñamos para vestir a la realidad no son más ciertas que las hipótesis en las que se apoyan y que la precisión de los experimentos que las sustentan. Toda teoría científica es una aproximación, de modo que es “cierta” en una determinada área de la realidad. Transgredidos los linderos de esta área, no debemos esperar que la teoría continúe vigente. En la práctica esto ocurre usualmente cuando la teoría no puede dar cuenta decorosamente de nueva evidencia experimental y deberá ser reinterpretada como constituyente de una teoría más amplia. El científico entiende la provisionalidad de las teorías y acepta con resignación el aforismo de Eudomar Santos: “como vaya viniendo, vamos viendo”. Pero cada vez que una teoría generaliza y engloba a otra, comprendemos mejor a qué se parece el mundo y obtenemos una imagen más clara de su proceder. El propio Einstein juzgó acertadamente que el mejor destino que puede tener una teoría física es servir de base para que sobre ella se construya otra teoría.

La teoría especial de la relatividad englobó la teoría de movimiento de Newton fijándole sus límites de aplicabilidad. Para un régimen de velocidades próximas a la velocidad de la luz, la dinámica de Newton no da buena cuenta de las observaciones y debe ceder su lugar a la relatividad especial, pero la relatividad especial se reduce a la mecánica de Newton cuando consideramos bajas velocidades. Del mismo modo, la teoría general de la relatividad se reduce a la teoría de gravitación de Newton cuando analiza campos gravitacionales débiles y se aparta de ella sólo en el caso de campos gravitacionales muy intensos. Por ejemplo, todos los cálculos de órbitas planetarias y movimientos de satélites artificiales que

requiere la tecnología espacial se realizan adecuadamente con la teoría newtoniana, porque las velocidades de los cohetes son tremendamente pequeñas comparadas con la velocidad de la luz y los campos gravitacionales en el sistema solar son muy débiles.

La teoría especial de la relatividad en cambio, es necesaria para el diseño y la interpretación de los experimentos en los aceleradores de partículas, en los que electrones o protones se aceleran a velocidades cercanas a la de la luz. También es imprescindible usarla como base para descripciones de las partículas elementales y sus interacciones a muy altas energías. La teoría general de la relatividad se utiliza para construir modelos teóricos de estrellas muy densas, como las estrellas neutrónicas, o para estudiar fenómenos como el colapso gravitacional, ya que en ambas situaciones, el campo gravitacional puede ser muy intenso. También, como señalamos anteriormente, es ineludible para intentar modelar el comportamiento de nuestro Universo a gran escala. Además de compartir todos los éxitos de la teoría gravitacional de Newton por coincidir con ella para campos débiles, sus múltiples predicciones han sido verificadas en la práctica con un grado confiable de precisión. Es, no hay duda, la mejor teoría de la gravedad que tenemos a mano. Por ahora...

EL MUNDO DE LO MUY PEQUEÑO

“Son aquellas pequeñas cosas...”

Joan Manuel Serrat

“Un golpe de dados jamás abolirá el azar”

Stephan Mallarmé

Hacia la década de los años 20 de nuestro siglo, los físicos inventaron una teoría capaz de gobernar todos los fenómenos del mundo subatómico que no involucran velocidades cercanas a la de la luz. La teoría se llama mecánica cuántica y desempeña el mismo papel en el mundo de lo muy pequeño que la mecánica de Newton juega en el mundo macroscópico, es decir, es el cristal a través del cual miramos esa parte de la realidad física.

El desarrollo de la física cuántica produjo la mayor revolución conceptual en la ciencia desde los tiempos de Newton, por la manera en que nos forzó a reconsiderar nuestras más íntimas convicciones acerca de la realidad física. Y sin embargo, es notable cómo aún en ella se percibe la huella de los conceptos newtonianos. En efecto, el nacimiento de la teoría cuántica se produjo cuando los físicos quisieron comprender la constitución del átomo, el efecto fotoeléctrico y la emisión de la luz por átomos; con los conceptos newtonianos de trayectoria, fuerza, velocidad y partícula puntual. El nuevo territorio de la naturaleza que se comenzaba a explorar se negaba con obstinación a adecuarse a los moldes tradicionales de la física clásica (aquí hay que incluir a las relatividades y a la teoría electromagnética) y por supuesto, hubo que inventar una nueva armazón conceptual: la física cuántica.

En la teoría cuántica hay reglas precisas que permiten obtener el *vector de estado* o la *función de onda* de un sistema físico cualquiera y esa entidad matemática es lo único que necesitamos (y podemos) conocer acerca del sistema. Las leyes de la teoría dictaminan la manera como evoluciona la función de onda a medida que pasa el tiempo. Lo hace a través de una ecuación de un determinismo tan infalible como el de las leyes de Newton. Pero la maquinaria de la teoría cuántica nos permite usar la función de onda sólo para calcular probabilidades para los posibles resultados de cualquier experimento. De modo que si en la física clásica iguales causas conducen a iguales resultados, en la cuántica iguales causas conducen a iguales distribuciones de probabilidad y por tanto a eventuales distintos resultados.

Esta ruptura del determinismo nada tiene que ver con nuestra torpeza para medir con suficiente precisión las propiedades de los sistemas físicos. Es una imposibilidad de predecir, esencial, a menudo mostrada paradigmáticamente a través del principio de incertidumbre de Heisenberg, que afirma vagamente algo así como que mientras mayor sea la precisión con que medimos la posición de un objeto cuántico, mayor será la imprecisión con que conocemos su velocidad, sofisticación de la ancestral invocación según la cual *“quien mucho abarca, poco aprieta”*. El carácter probabilista de la teoría cuántica se ha ilustrado también aludiendo a un comportamiento esquizofrénico de la materia, a veces onda, otras partícula, disyuntiva que ya estaba prefigurada en la famosa polémica entre Newton y Hooke sobre la naturaleza corpuscular u ondulatoria de la luz.

El caso es que cuando los sistemas cuánticos se van haciendo “grandes” en algún sentido bien determinado, las propiedades se localizan cada vez más apretadamente alrededor de sus valores promedios, de modo que los valores medios de las magnitudes físicas en la teoría cuántica obedecen las leyes de Newton. Ni los aficionados a las bolas criollas ni los cosmonautas deben mortificarse por las incertidumbres cuánticas ni abandonar la noción de trayectoria, pues la buena y vieja física newtoniana le dará todas las respuestas.

Hoy, la teoría cuántica nos ofrece una amplia estructura conceptual capaz de explicar el comportamiento de los átomos, los transistores, el Láser, los superconductores, las fuerzas intermoleculares y la estabilidad de la materia ordinaria. Ha superado con éxito la confrontación con el experimento en muy diversas escalas y circunstancias, ha salido airoso en la explicación de nuevos fenómenos ni siquiera soñados por sus creadores y ha impregnado la tecnología cotidiana. Pero no sólo eso, sino que además es capaz de albergar en su seno una gama tan diversa de teorías físicas como ilustra esta sucesión de nombres: teoría cuántica del átomo, teoría cuántica de la radiación, electrodinámica cuántica (o teoría cuántica del campo electromagnético), cromodinámica cuántica (o teoría cuántica de las fuerzas nucleares), huecos negros cuánticos, cosmología cuántica y finalmente, la teoría cuántica de la gravitación, ese insatisfecho sueño de los físicos teóricos y portador, según algunos, de insospechados secretos de la naturaleza.

CONCLUSIONES INCONCLUSAS

Una vana encuesta imaginaria realizada entre los físicos para conocer el “hit parade” de los grandes físicos de la historia, sería interesante sólo para conocer el segundo lugar. La medalla de oro le pertenece sin duda a Isaac Newton. Resumamos apretadamente sus más importantes logros:

En el área de las matemáticas le debemos la fórmula para expandir un binomio a una potencia cualquiera (entera o fraccionaria), buena parte de la teoría de ecuaciones, la clasificación de curvas en algebraicas y trascendentes, la introducción de índices literales, una profunda discusión de las curvas cúbicas, el desarrollo del cálculo infinitesimal, incluyendo el concepto y operatividad de derivada e integral, además del Teorema Fundamental del Cálculo (las operaciones de derivación e integración son inversas una de la otra), esquemas de aproximación de funciones por series de potencias.

En física, sus logros incluyen el haber establecido bases firmes para la construcción de las leyes dinámicas que rigen el movimiento, a través de sus tres leyes fundamentales. Dedujo la estática y sus leyes, unificó la física terrestre (galileana y con aceleración constante) con la física celeste (kepleriana, con aceleración variable) al proponer su ley de atracción universal. Explicó el origen de las mareas y realizó el estudio más detallado posible en su época, del sistema Tierra-Luna. Desarrolló las leyes de la hidrostática y de la hidrodinámica de sistemas fluidos, estudió la propagación de ondas y propuso aplicaciones para determinar la velocidad del sonido en el aire.

Estimulado por su profesor Barrow comenzó a indagar en la naturaleza de la luz, haciendo delicados experimentos con lentes, prismas y espejos. Midió ángulos, estableció relaciones cuantitativas (a diferencia de sus contemporáneos, más dados a las descripciones cualitativas). Logró establecer más allá de toda duda razonable que la luz blanca es la combinación superpuesta de los diferentes colores del arco-iris. Esta conclusión era contraria a la sabiduría en boga para la época, que sugería que la luz blanca era pura y los colores surgían cuando la luz blanca era modificada por las superficies de los cuerpos coloreados. Concluyó correctamente que la separación de colores en un prisma debe a las diferentes velocidades con las que la luz de diferentes colores viaja adentro del prisma. Sin embargo, pensó erradamente que sus observaciones apoyaban la tesis de una luz corpuscular constituida por átomos de cada color que permanecían inalterados por

siempre. Hizo análisis cuantitativos para explicar la formación del arco iris en términos del fenómeno de refracción en las gotas de agua de la lluvia. Inventó el telescopio de refracción o refractor, que permitía obtener imágenes mucho más nítidas que el telescopio de reflexión. Inventó también el sextante.

Todos estos logros concebidos y realizados por un solo hombre es una hazaña intelectual formidable y difícilmente repetible. Luego vendría la restricción del ámbito dentro del cual el sistema newtoniano funciona bien, pero eso es otro cantar.

Con toda seguridad las nociones, conceptos y leyes de los que hoy nos valemos para *inventar la realidad* y darle algún sentido a los fenómenos del Universo físico, serán superados en un futuro en el interminable "*quitate tú pá poneme yo*" y reemplazados por otros que cumplan mejor su labor. Nadie puede pretender imaginarse hoy cuales ni cómo serán, pero no pecaremos de temerarios si afirmamos que el camino para llegar a ellos es en esencia el mismo que Newton nos enseñó a recorrer y que por sofisticados y abstractos que luzcan, tendrán inevitables reminiscencias del portentoso sistema que él erigió. Porque así de profunda es la huella que Newton imprimió en nuestra concepción del Universo físico.

DIVERTIMENTO1: Una deducción de la ley $1/R^2$

Huygens había demostrado que si un cuerpo describe uniformemente una trayectoria circular con radio R , y velocidad V , entonces su aceleración está dirigida hacia el centro del círculo y vale V^2/R . Como la fuerza es proporcional a la aceleración entonces $F \propto V^2/R$, donde el símbolo \propto significa “es proporcional”. La velocidad es el perímetro recorrido ($2\pi R$) dividido entre el tiempo empleado en recorrerlo (período), que denotaremos T y por eso $V^2 \propto R^2/T^2$, de modo que la fuerza es $F \propto R/T^2$. Por otra parte, Kepler había propuesto sus leyes planetarias una de las cuales establecía que el cuadrado del periodo es proporcional al cubo del radio, es decir, $T^2 \propto R^3$. Sustituyendo en la expresión para la fuerza, obtenemos $F \propto 1/R^2$, y por consiguiente la fuerza cambia como el inverso del cuadrado de la distancia. Esta es esencialmente la demostración que hizo Newton a sus 25 años.

DIVERTIMENTO2: La Luna y la manzana

¿Cómo hizo Newton para convencerse de que los movimientos de la Luna y la manzana se deben ambos a la fuerza de gravedad?

La respuesta es la siguiente. Basta corroborar que la Luna cae hacia la Tierra en un segundo (digamos), la 3600-ava parte de lo que cae la manzana en el mismo tiempo, porque la manzana está a un radio terrestre del centro (6400 Km) mientras que la luna está sesenta veces más lejos (380000 km). Puesto que la gravedad disminuye con el cuadrado de la distancia y 60 al cuadrado es 3600, es válida la afirmación. La pregunta se traslada ahora a cómo calcular lo que caen la Manzana y la Luna en un segundo y compararlos.

Cuánto cae la manzana es fácil, ya Galileo lo sabía. Como la aceleración es constante y vale $g = 10 \text{ m/seg}^2$, la distancia que cae es

$$y = \frac{1}{2} g \Delta t^2$$

donde Δt es el intervalo de tiempo considerado, es decir, un segundo y por tanto la manzana cae 5 m.

En el caso de la Luna el razonamiento es así. Inicialmente la Luna

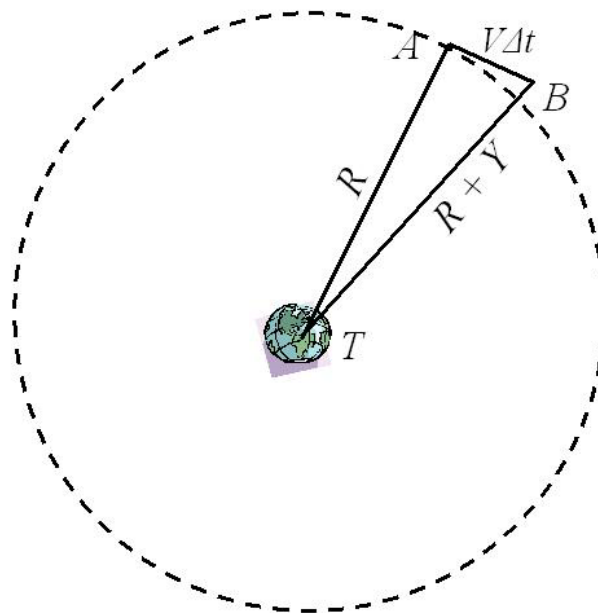


Figura N

está en la posición A (ver figura N) a una distancia R de la Tierra. Si la Luna no cayera, al cabo de un intervalo Δt iría a dar a B , una distancia $V \Delta t$ más allá, donde V es la velocidad de la Luna

alrededor de la Tierra. De modo que para que se mantenga en su órbita a una distancia R , deberá caer la cantidad denotada por el segmento Y . Como el lapso considerado es muchísimo menor al tiempo en que completa una vuelta (28 días) el triángulo TAB es prácticamente un triángulo rectángulo y podemos por consiguiente aplicar el teorema de Pitágoras, que resulta ser

$$(R + Y)^2 = R^2 + V^2 \Delta t^2$$

elevando al cuadrado, despreciando Y^2 por ser muy pequeño y despejando Y , obtenemos

$$Y = \frac{1}{2} \left(\frac{V^2}{R} \right) \Delta t^2$$

Este resultado era previsible (recordemos la sabia ironía de John Wheeler: nunca emprenda un cálculo sin saber cuál es el resultado...): la expresión para la distancia que cae la Luna es idéntica a la de la manzana sustituyendo la aceleración de gravedad en la Tierra, g , por la aceleración centrípeta V^2/R , porque en un lapso tan corto como un segundo (comparado con 28 días) la Luna se mueve en una región donde el campo gravitacional de la Tierra es prácticamente constante.

Finalmente sólo queda obtener el valor numérico de Y , para lo cual hay que calcular V sabiendo que la Luna recorre un círculo de longitud $2\pi R$ en 28 días. Como $R = 380000 \text{ Km}$ la velocidad resulta (luego de las necesarias conversiones de unidades) $V \approx 1000 \text{ m/seg}$, con este valor la ecuación para Y haciendo $\Delta t = 1 \text{ seg}$, resulta $Y \approx 0,0014 \text{ m}$, alrededor de un milímetro y medio cae la Luna cada segundo. El lector puede verificar que esta distancia es 3600 veces más pequeña que los 5 metros que cae la manzana en la superficie de la Tierra. Así supo Newton que estaba en la ruta correcta.

DIVERTIMIENTO 3: ¿Cuánto cambia la aceleración cerca de la superficie de la Tierra?

Es obvio que la trayectoria de un proyectil lanzado en la superficie de la Tierra es diferente de la de un planeta alrededor del sol. El primero describe una parábola mientras que el segundo describe una elipse. En el primer caso la fuerza y por tanto la aceleración del proyectil es constante, mientras que en el segundo la fuerza decrece con el cuadrado de la distancia al centro del sol. La pregunta es: si ambos movimientos están gobernados por la fuerza de gravedad, ¿porqué la descripción es diferente en cada caso?

Un lugar común establece que la matemática es una ciencia exacta, pero la física es sin duda una disciplina que quiere y debe ser aproximada. Un proyectil se mueve cerca de la superficie de la Tierra, de modo que el campo gravitacional que siente es muy aproximadamente constante (es la misma aproximación en la que la superficie de la Tierra se toma como plana).

Podemos calcular en cuánto difiere la aceleración de gravedad medida en dos puntos, uno en la superficie de la Tierra y otro a una altura h del primero. La diferencia en el valor de la aceleración de gravedad entre estos dos puntos (llamémosla Δa) es

$$\Delta a = \frac{\Delta F}{m} = G \frac{M_T}{(R_T + h)^2} - G \frac{M_T}{R_T^2}$$

Usando la fórmula del binomio de Newton y despreciando potencias de h

mayores a uno (recordemos que h es muy pequeño comparado con R), obtenemos

$$\frac{1}{(R_T + h)^2} = (R_T + h)^{-2} \approx \frac{1}{R_T^2} - \frac{2h}{R_T^3} + \dots$$

Sustituyendo esta aproximación en la expresión para Δa ,

$$\Delta a = -G \frac{M_T m}{R_T^2} \left(\frac{2h}{R_T} \right)$$

La cantidad $G \frac{M_T}{R_T^2}$ es la aceleración de gravedad $g = 10 \text{ m/seg}^2$, de modo que

$$\Delta a = -g \left(\frac{2h}{R_T} \right)$$

donde el signo menos significa que en el punto de arriba la aceleración es menor que en el de abajo. Si $h = 10\text{ m}$, más o menos la altura de un edificio de 3 pisos, el valor numérico resulta $\Delta a \approx 3 \times 10^{-6} \text{ m/seg}^2$, una cantidad suficientemente pequeña como para justificar la aproximación de que la gravedad es constante. En general si un cuerpo gravitante tiene una dimensión característica R , el campo gravitacional que produce (y por tanto la aceleración) cambiará apreciablemente en distancias del orden de R .

DIVERTIMIENTO 3: Agujeros Negros Newtonianos

El mismo año que Simón Bolívar nacía en Caracas, el reverendo John Mitchell aplicaba la teoría gravitacional de Newton y las concepciones corpusculares de la luz, para prefigurar lo que doscientos años más tarde se conocería como agujeros negros.

La idea de Mitchell era muy simple. Imaginemos un astro esférico de masa M . Un objeto lanzado desde él caerá de nuevo en su superficie a menos que su velocidad sea igual a una velocidad crítica llamada *velocidad de escape*, cuyo valor lo podemos obtener fácilmente: La ecuación que rige el movimiento del cuerpo lanzado, es

$$m\ddot{R} = -\frac{GMm}{R^2}$$

El signo menos indica que la aceleración es negativa (en la dirección contraria a la que crece R). De aquí es fácil ver que

$$\frac{1}{2}m\dot{R}^2 - \frac{GMm}{R} = E$$

donde \dot{R} es la velocidad del cuerpo a una distancia R del centro (derive esta expresión respecto del tiempo y obtendrá la de arriba). Para que el cuerpo lanzado logre apenas escapar a la gravedad, su velocidad debe ser

$$V_{esc}^2 = \frac{2GM}{R}$$

El lector puede corroborar que la velocidad de escape de un cuerpo en la Tierra es de unos $11\text{Km}/\text{seg}$.

¿Qué pasa si la masa del astro y su radio son tales que la velocidad de escape es mayor que la velocidad de la luz? Mitchell argumentó que la luz no podría escapar y que a partir de alguna distancia, sería invisible. El radio que tendría que tener ese astro de masa M para que la luz no pudiera escapar de él, sería

$$R = \frac{2GM}{c^2}$$

Por ejemplo, para el sol, la fórmula anterior da un valor de apenas 3Km . A finales del siglo XVIII, el matemático y físico francés Pierre Simón Laplace redescubrió este resultado y lo incluyó en las dos

primeras ediciones de su obra *Exposición del Sistema del Mundo*, afirmando que *“la fuerza de un cuerpo gravitante pudiera ser tan grande que ni la luz escaparía de él”*. Luego los experimentos de difracción de Thomas Young impusieron la teoría ondulatoria de la luz y las leyes de Newton no establecen cómo una onda responde a un campo gravitatorio, de modo que Laplace excluyó el cálculo de las ediciones posteriores.

En 1916, a meses de haber sido publicada la relatividad general, Karl Schwarzschild obtuvo la solución a las ecuaciones de la gravedad correspondientes a un cuerpo esférico no rotante y donde aparece exactamente la superficie de radio $R_s = 2GM/c^2$ como una superficie de corrimiento al rojo infinito, que es la manera técnica de afirmar que la luz no puede salir de la región interior, dándole vigencia a la imaginación newtoniana de Mitchell y Laplace. Los trabajos posteriores han permitido clarificar muchos aspectos de estos *agujeros negros*, término acuñado por John Wheeler en 1968. Actualmente la física de los agujeros negros es un área de gran actividad y las evidencias observacionales de su existencia son cada vez más convincentes.

LECTURAS ADICIONALES

John Barrow
The Universe That Discovered itself
Oxford University Press, 2000.

Fritz Rohrlich
From Paradoxe to Reality.
Cambridge University Press, 1987.

Roger Penrose
The Emperor's New Mind.
Oxford University Press, 1989.

Richard Feynmann
Six Easy Pieces.
Addison Wesley Pub, 1994.

Héctor Rago
*Reflexiones Temporales: Del Tiempo del Mito
Al Tiempo Matemático.*
Boletín de la Asociación Matemática Venezolana
Vol. VI, N. 1, 1999.

Héctor Rago
Hablando de Relatividad
Escuela Venezolana de Enseñanza de Física
Ediciones Celciec, 2001.

Max Jammer
Conceptos de Espacio.
Colección Dina, Editorial Grijalbo, 1954.

Arthur Koestler
Los Sonámbulos.
Vol I y II, Biblioteca Científica Salvat, 1986.

Alexander Koyre
Del Universo Cerrado al Universo Infinito. Siglo XXI Editores