Una mecánica sin talachas

7
LA CIENCIA PARA TODOS

FÍSICA

FERMÍN VINIEGRA HEBERLEIN

La Ciencia
para Todos

Desde el nacimiento de la colección de divulgación científica del Fondo de Cultura Económica en 1986, ésta ha mantenido un ritmo siempre ascendente que ha superado las aspiraciones de las personas e instituciones que la hicieron posible. Los científicos siempre han aportado material, con lo que han sumado a su trabajo la incursión en un campo nuevo: escribir de modo que los temas más complejos y casi inaccesibles puedan ser entendidos por los estudiantes y los lectores sin formación científica.

A los diez años de este fructífero trabajo se dio un paso adelante, que consistió en abrir la colección a los creadores de la ciencia que se piensa y crea en todos los ámbitos de la lengua española —y ahora también del portugués—, razón por la cual tomó el nombre de La Ciencia para Todos.

Del Río Bravo al Cabo de Hornos y, a través de la mar Océano, a la Península Ibérica, está en marcha un ejército integrado por un vasto número de investigadores, científicos y técnicos, que extienden sus actividades por todos los campos de la ciencia moderna, la cual se encuentra en plena revolución y continuamente va cambiando nuestra forma de pensar y observar cuanto nos rodea.

La internacionalización de La Ciencia para Todos no es sólo en extensión sino en profundidad. Es necesario pensar una ciencia en nuestros idiomas que, de acuerdo con nuestra tradición humanista, crezca sin olvidar al hombre, que es, en última instancia, su fin. Y, en consecuencia, su propósito principal es poner el pensamiento científico en manos de nuestros jóvenes, quienes, al llegar su turno, crearán una ciencia que, sin desdeñar a ninguna otra, lleve la impronta de nuestros pueblos.

UNA MECÁNICA SIN TALACHAS

Comité de Selección

Dr. Antonio Alonso
Dr. Francisco Bolívar Zapata
Dr. Javier Bracho
Dr. Juan Luis Cifuentes
Dra. Rosalinda Contreras
Dr. Jorge Flores Valdés
Dr. Juan Ramón de la Fuente
Dr. Leopoldo García-Colín Scherer
Dr. Adolfo Guzmán Arenas
Dr. Gonzalo Halffter
Dr. Jaime Martuscelli
Dra. Isaura Meza
Dr. José Luis Moran
Dr. Héctor Nava Jaimes
Dr. Manuel Peimbert
Dr. José Antonio de la Peña
Dr. Ruy Pérez Tamayo
Dr. Julio Rubio Oca
Dr. José Sarukhán
Dr. Guillermo Soberón
Dr. Elias Trabulse

Coordinadora

María del Carmen Farías R.

Fermín Viniegra Heberlein

UNA MECÁNICA SIN TALACHAS

la
ciencia/7
para todos

Primera edición (La Ciencia desde México), 1986
Segunda edición (La Ciencia para Todos), 2001
Primera edición electrónica, 2010

Viniegra Heberlein, Fermín
Una mecánica sin talachas / Fermín Viniegra Heberlein. — 2ª ed. — México : FCE, SEP, CONACyT, 2001
210 p. ; 21 × 14 cm — (Colec. La Ciencia para Todos ; 7)
ISBN 978-968-16-6308-7

1. Física 2. Mecánica 3. Gravitación 4. Divulgación científica I. Ser. II. t.

LC QA805 V55 Dewey 508.2 C569 V.7

Distribución mundial

Carretera Picacho-Ajusco, 227; 14738 México, D. F.
www.fondodeculturaeconomica.com
Empresa certificada ISO 9001:2008

Comentarios: laciencia@fondodeculturaeconomica.com
Tel. (55) 5227-4672 Fax (55) 5227-4694

La Ciencia para Todos es proyecto y propiedad del Fondo de Cultura Económica, al que pertenecen también sus derechos. Se publica con los auspicios de la Secretaría de Educación Pública y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

ISBN 978-607-16-0396-8 (electrónica)
978-968-16-6308-7 (impresa)

Hecho en México - *Made in Mexico*

INTRODUCCIÓN

Se dice por ahí que hace unos tres y medio millones de años nació un chango que ya no era del todo mono y empezó a ser hombre. Tenía cara de mono, cuerpo de mono; su cuerpo estaba totalmente cubierto de pelo, como cualquier mono y sus ruidos, gritos y movimientos eran ni más ni menos que los de un mono. Por supuesto él no lo sabía, pero al momento de nacer adquirió un nombre; un nombre muy difícil de pronunciar, sobre todo para un mono como él; se llamó *Australopiteco* y su apellido fue *Afarensis.* Su bautizo ocurrió precisamente tres y medio millones de años después, y sus padrinos fueron descendientes que quisieron darle a su familia un antepasado digno y comenzaron por ello a borrar aquel estigma de que su tatarabuelo ni nombre tenía.

Pero si *Australopiteco* tenía la pinta de mono, cuerpo de mono, etc., ¿qué lo distinguió realmente del resto de los monos? Bueno, tal vez la respuesta no se halle en su aspecto exterior, ni en sus medidas, ni en la disposición o forma de sus huesos. El signo que lo puso al margen de sus congéneres, el que de pronto lo segregó de todos, colocándolo en un nicho sumamente importante en la historia del mundo fue que ya no pensaba como chango, con ese pensamiento rudimentario que parece ser el típico de los primates y que consiste en tomar decisiones simples, instantáneas, sin mayor planeación, sin previsión, para dar respuesta inmediata a los problemas que saltan a su encuentro a lo largo de la vida; no, este mono pensaba de diferente manera; su cerebro, de pronto, adquirió una nueva estructuración y con ella, el *Australopiteco Afarensis* pudo, por primera vez meditar. Al sentarse bajo la sombra de un árbol, en una mañana luminosa de ese remotísimo pasado, de pronto se le ocurrió que aquella piedra que tenía en su mano, aquel guijarro con el que jugaba, arrojándolo sin ton ni son a cualquier parte, tal vez podía servir como proyectil para matar a distancia, sin correr como chango enajenado, sin fatigarse, tras una liebre que, a menos que fuera tullida o estuviera dormida, siempre corría más rápido y mejor que él. De pronto, en su muy primitivo cerebro de trescientos centímetros cúbicos, apareció una representación de una escena que podía convertirse en realidad. Aquel mono comenzó a prever sucesos, a planear acciones, a perseguir un objetivo. El más formidable suceso de la historia del mundo ocurrió entonces.

Por supuesto, nadie se percató del cambio ocurrido en aquel peludo individuo; si bien hubo dos consecuencias de la mayor trascendencia del simple acto de pensar: la primera fue que ese mono se volvió el líder, el jefe de su grupo. Esto es absolutamente lógico, si se piensa que en el momento de convertirse en un cazador de artillería, en vez de la tradicional infantería de siempre; esto es, en vez de correr y correr todo el día tras una presa, que en el noventa por ciento de las ocasiones escapaba por estar mejor dotada, para casi todo, que el mono, el Australopiteco perfeccionó la técnica de matar a distancia, cómodamente, en reposo, esperando que un animal apareciera para darle una buena pedrada entre ceja y ceja. Así, pudo más, cobrar mejores presas, desgastarse menos, comer mejor y tal vez iniciar el comercio, canjeando la comida que le sobraba por servicios.

La segunda consecuencia importantísima se derivó de la anterior: al tomar el liderazgo de su grupo el Australopiteco se convirtió ipsofacto en el macho de la manada, el inseminador. Así que escogiendo a las mejores hembras se puso a practicar frenéticamente la inveterada tarea de producir más australopitecos. Allí se disparó, una línea genética, una corriente de evolución que desembocó, tres y medio millones de años después en un primate lampiño, enclenque, carente de garras o colmillos; imposibilitado para correr aún más que su ilustre antepasado, pero que es hoy por hoy el dueño del planeta: el hombre.

Después de aquel día, todos los descendientes del abuelo Australopiteco Afarensis continuaron con el hábito de pensar. El pensamiento inteligente fue mejorando generación a generación, a la par que fue creciendo la capacidad del cerebro; al hacerse más y más evolucionado, más apto para esa tarea.

Hace unos veinte o treinta mil años el hombre había llegado a ser una creatura prácticamente idéntica al ser humano actual. Su talla era un poco menor, pero de ahí en fuera, todas sus características externas e internas eran las mismas. Si se pudiera viajar a través del tiempo, en una nave que pudiera llevar a sus pasajeros a cualquier época pasada o futura y en uno de esos viajes a aquel lejano pasado, cuando se inició la agricultura, se pudiera traer al siglo XXI a un bebé de la especie Cromagnon, aquí, en la época actual se desarrollaría el niño sin ningún rasgo que lo distinguiera notablemente de los demás. Esencialmente, aquellos que poblaron el planeta Tierra hace veinte o treinta mil años eran idénticos al ser humano actual. Sin embargo, nuevamente, había algo dentro de sus cerebros que aún no había alcanzado el estado de evolución que tiene el hombre moderno; hacía falta dar otro gran paso en el sendero de la inteligencia, pero ese paso se tendría que dar mucho después.

Hace unos tres mil años, en lo que hoy es Grecia un hombre realizó el más importante descubrimiento de la historia: descubrió que pensaba. Para entonces ya habían pasado tres millones cuatrocientos noventa y siete mil años después del *Australopitecus Afarensis,* cuando el gran abuelo había comenzado a pensar. Lo que ocurrió es que todo mundo se puso a pensar pero nadie se daba cuenta cabal de ello. Hasta que un griego vestido con una sábana se percató de su propio pensamiento. Fue entonces cuando nació la filosofía y de aquella ciencia madre se derivaron todas las demás.

Más o menos por aquella misma época, en la Grecia de Pericles, otro hallazgo catapultó a la humanidad hacia la modernidad. Este otro fue cuando se inventó la matemática y se descubrió su íntima relación con la Naturaleza. Desde la cuenta de los días y las esferas de las estrellas hasta las palancas de Arquímedes, más y más fue la humanidad cayendo en la cuenta del estrecho vínculo que hay entre los fenómenos naturales y las matemáticas: la geometría, el álgebra y la trigonometría. Fue entonces cuando aparecieron los físicos teóricos, aquéllos que les dio por construir modelos intelectuales lógicos, expresados en términos de la matemática, para describir y comprender los diversos aspectos del mundo natural; las llamadas "teorías".

De todas las teorías que han aparecido en el mundo, la mecánica es la más antigua. La génesis de esta soberbia estructura intelectual se remonta al siglo tercero antes de la era cristiana, cuando, ayudados por la geometría y la experimentación, algunas mentes brillantes lograron sintetizar los primeros resultados de orden general referentes al movimiento de los cuerpos.

Este libro pretende hacer un relato de esta magnífica teoría, comenzando por la historia de quienes sentaron las bases, desarrollaron y luego llevaron la mecánica clásica a sus más altas expresiones. El primer capítulo de esta obra expone la historia de Arquímedes, Eratóstenes e Hipatia, la bella científica que dirigió la Biblioteca de Alejandría hasta su destrucción final. El capítulo se desarrolla en forma anecdótica, tratando de interesar al lector por la historia de la ciencia y por el pensamiento científico mismo. En el segundo capítulo se habla del ocaso de la ciencia griega y el amanecer de la europea, con las historias de esos dos personajes que son como los extremos de dos madejas; uno, Claudio Ptolomeo, al que le tocó cerrar con broche de oro el dilatado periodo de la inteligencia griega en Egipto y el otro, Roger Bacon, quien se puede considerar como el pionero del pensamiento científico europeo, cuando después de mil años de obscuridad de superstición y fanatismo, el hombre de Europa volvió a interesarse por la búsqueda de la verdad experimental de la lógica y de la razón pura.

El tercer capítulo relata la ciencia del renacimiento europeo. Sus representantes conspicuos: Copérnico, Tycho Brahe, Kepler y Galileo son descritos y sus trabajos científicos comentados en esta parte del libro. El lector podrá apreciar como el pensamiento se ha depurado y agudizado, para iniciar la síntesis de la mecánica y echar las bases de una teoría completa que trate de los movimientos de los cuerpos materiales, tanto sobre la superficie de la Tierra, como en el espacio, atendiendo a sus causas: las fuerzas.

Los siguientes cuatro capítulos: el cuarto, el quinto, el sexto y el séptimo se dedican a desarrollar ante los ojos inquisitivos e interesados del lector, la teoría de la mecánica clásica misma; partiendo de la historia del genio que la estructuró completamente; ese extraño individuo de nombre Isaac Newton; tal vez el mayor genio de la historia de la ciencia; continuando con los axiomas fundamentales acerca de la estructura del espacio, del tiempo de los observadores y de la materia, para luego establecer los postulados llamados las leyes de la mecánica: las reglas con las que habrá de jugarse este estupendo juego intelectual. Aquí y allá, a lo largo de estos cuatro capítulos, se abordan y resuelven algunos de los problemas más representativos del tema, para dar al lector la sensación de potencia del poder que brinda el tema de la mecánica a quien domina el tema, permitiéndole una visión clara y lógica acerca del funcionamiento de las cosas, los cuerpos, los mecanismos, las estructuras, que son, en última instancia, objeto de estudio de la mecánica.

El último, el octavo capítulo trata en particular dos de los problemas conspicuos: la gravitación y el trompo, con los cuales la mecánica clásica alcanzó su más alta expresión. Se mencionan los conceptos de Gaspard de Coriolis, quien generalizó la teoría para volverla utilizable, no nada más por el estrecho grupo de los llamados observadores inerciales, sino el más amplio de aquellos que, observando el mundo desde un marco de referencia acelerado, puede traducir sus pesquisas y hallazgos en términos de observadores en reposo mediante una brillante técnica conocida como las transformaciones de coordenadas. La última parte de este capítulo se dedica a dar una somera descripción de las nuevas mecánicas; esto es, aquellas teorías que habiendo tomado los elementos constitutivos de la mecánica clásica, así como la estrategia general para armar una teoría que propuso Newton, arman nuevos constructos intelectuales con el objetivo de cubrir aquellas deficiencias; aquellas limitaciones de principio que tuvo la teoría madre. Así, el mundo de lo muy rápido y de lo muy grande se comprende con la teoría de la relatividad de Einstein y el mundo de lo ultra pequeño, con la mecánica cuántica.

Por ultimo cabe aclarar que éste no es un libro de texto, no está concebido como tal. Ha sido escrito con el ánimo de dar al lector una idea clara de lo que es la mecánica clásica y ubicarlo en el espacio y en el tiempo, de quienes aportaron sus conocimientos y sus talentos para la construcción de la teoría. Un libro de texto debe contener menos historia y más ecuaciones, tal como se acostumbra hoy en día, para dar al estudiante del tema las herramientas matemáticas y los conceptos físicos que le ayuden posteriormente a atacar y resolver problemas dentro de este tema.

No, este libro no se hizo pensando en un texto. En el mejor de los casos puede servir al profesor para ayudarse en sus exposiciones, con los datos históricos y con los conceptos que aquí se exhiben y analizan. También puede ayudar a los estudiantes del nivel medio y quizá hasta aquellos de los primeros semestres de alguna licenciatura en ingeniería, en química, en física, matemáticas o astronomía, como complemento de sus estudios académicos formales. Todos los temas que aquí se tratan son verdaderos y científicamente correctos.

Varios temas, muchos a decir verdad, se han omitido en este libro. La razón para ello es doble: en primer lugar porque no se consideraron indispensables para el desarrollo del contexto. Así por ejemplo, el gran tema sobre la energía en sus diferentes manifestaciones fue dejado de lado porque no obstante su enorme importancia para el manejo y resolución de problemas de movimiento de cuerpos materiales no se juzgó vital para el desarrollo histórico-crítico de la mecánica clásica.

Por otra parte, la omisión de algún o algunos temas obedeció también a un deseo de economizar volumen del libro; a un interés de optimizar la lectura, haciendo la obra amena y atractiva. Muchas veces un lector potencialmente interesado en una obra, desiste de su empeño de leerla, a la vista de un pesado y voluminoso mamotreto. Por ello, hay que insistir, los temas que el lector hallará en esta obra, no corresponden a los que de necesidad habría que incluir en un texto formal sobre el tema.

I. Dadme una palanca (La historia de Arquímedes)

I.l. La mecánica, su definición y alcances

La mecánica es una parte de la física. Es, tal vez la parte más antigua de ella, pues los primeros estudios y resultados de que se tiene noción dentro del campo de la mecánica, se remontan a más de 2 500 años. Históricamente, la mecánica fue el primer modelo teórico que se desarrolló.

La mecánica es la ciencia que estudia el movimiento de los cuerpos materiales en el espacio. Para hacerlo establece un esquema general; una estrategia que es necesaria para atacar y resolver los problemas acerca del movimiento de los cuerpos, hasta culminar con una expresión matemática mediante la cual se puede predecir el conjunto de posiciones sucesivas que ocupará el o los cuerpos en el espacio, llamada la ecuación de la(s) trayectoria(s).

El objetivo primordial de la mecánica es obtener las ecuaciones de las trayectorias para cada cuerpo en el espacio, que se mueve urgido por algún agente físico. De esta manera cumple con su carácter predictivo.

Es por ello que en este libro se pondrá todo el énfasis precisamente en la estructura, el esquema de la mecánica, así como en el funcionamiento general de esa estupenda maquinaria intelectual que es la llamada mecánica clásica; misma que aquí se desarrollará.

Para comenzar es importante tratar de entender de qué manera nació esta disciplina. ¿Cuándo comenzó a formarse? ¿Qué hechos dieron lugar a ella? y, por qué no, hay que rendir pleitesía a aquellos hombres y mujeres; a aquellos talentos que, con sus ideas, con sus experimentos; con su sentido crítico y sintético fueron aportando en forma gradual los cimientos, luego los resultados trascendentales con los cuales la teoría quedó ya, sin lugar a dudas, como el modelo completo con el cual el movimiento de los cuerpos y sus causas quedaron plenamente comprendidos.

Y a todo esto, ¿cuáles fueron los antecedentes de la mecánica? La respuesta a esta pregunta es de una simplicidad sorprendente. Dos han sido las más grandes inquietudes de la humanidad desde tiempos inmemorables; dos cuestiones han jugado sendos papeles en su desarrollo y su evolución: la agricultura y la guerra. Con estas dos vertientes, civilizaciones completas han surgido, se han vuelto poderosas y finalmente han desaparecido, avasalladas por otras con historias parecidas. Mientras más fuerte como potencia agrícola ha sido una nación, mayor ha sido también su influencia y su poder; más ha ejercido ese poder sobre sus vecinos por medio del comercio y más alto ha sido el nivel de vida de sus habitantes. Por su parte, el poder bélico es tan conocido que sus repercusiones difícilmente pueden escapar al entendimiento del más simple individuo. Al igual que con el poder económico que da el comercio, el poder de las armas proporciona riqueza y bienestar a los habitantes de una nación, a costa, claro, de la pobreza y la sumisión de otras. Así ha sido desde aquel día en que una pequeña aldea usó con éxito la fuerza contra otra, cuando se requirió mayor espacio para sembrar, para apacentar, o bien cuando el vecino comenzó a ser tan próspero que se volvió una competencia peligrosa para el propio desarrollo.

Pues bien, la agricultura y la guerra son, a no dudarlo, los dos grandes motores de la mecánica. Por una parte, el pueblo cuya agricultura fue la mejor de todas, fue aquel que aprendió cuándo sembrar, cuándo cosechar y en qué momentos no debía hacerse ninguna de las dos cosas; y para saber esto con certeza hubo de aprender astronomía. La duración precisa del año; las estaciones y con ellos sus climas peculiares; la periodicidad con que se repiten fueron asuntos de la mayor importancia.

La astronomía planteó el primer problema acerca del movimiento de cuerpos en el espacio. Para los primeros observadores del cielo, los cuerpos celestes se pueden clasificar, según sus movimientos al través de la bóveda celeste en tres categorías sucesivas de complejidad: en primer lugar están las estrellas; cuerpos simples que exhiben una conducta prácticamente inmutable al través del tiempo. Todos los días aparecen al anochecer por el oriente, siguen trayectorias sencillas, prácticamente circulares, estables y al amanecer desaparecen con la luz del Sol, cuando han recorrido su camino hasta ponerse en el poniente. No varían sus rutas y muy poco influyen en la Tierra.

A decir verdad, el movimiento de las estrellas tiene una ligera variación. A muy largo plazo se observa que su orto y su ocaso varían según un movimiento poco perceptible entre el sur y el norte, dentro de un pequeño intervalo. Cada día del año una estrella dada aparece y se pone un poco más hacia el norte que al año anterior, hasta llegar a un punto extremo. Luego, con gran lentitud, sus ortos y sus ocasos son en puntos más y más hacia el sur, hasta completar un ciclo con una duración de 26000 años. Esta es la que se llamaría posteriormente *Precesión de los Equinoccios*, sin embargo, es tan extraordinariamente lenta que pasaron muchos años antes que siquiera se percataran los observadores de ese efecto.

En segundo lugar está el Sol. Por mucho el Sol es el cuerpo celeste más importante para la vida en la Tierra y a no dudarlo, es el elemento esencial para la agricultura. A lo largo del año, el Sol aparece y se pone día a día en lugares del horizonte que van cambiando. Tomando como punto de partida el Equinoccio de Primavera, el 21 de marzo, es muy notable cómo el Sol despunta cada mañana un poco más temprano que el día anterior (para los habitantes del hemisferio norte ocurre así. En el sur, las cosas son al revés: cada día el orto solar es más tardío a partir de esa fecha); los días se vuelven más largos y las noches más cortas, en la misma razón en que el Sol nace más y más hacia el norte. El máximo ocurre del 21 al 22 de junio; el llamado solsticio de verano. Es entonces el día más largo del año y la noche más corta. Es cuando el Sol despunta más al norte a unos 23.5° de latitud. De ahí en adelante, los días se van haciendo cada vez menores y las noches más prolongadas. El Sol comienza su camino hacia el sur hasta que el 23 de diciembre alcanza su punto más austral, a 23.5 m de latitud sur. El solsticio de invierno marca el punto de retorno, cuando el astro rey inicia otra vez su viaje al norte. En total 365.25 días se lleva el Sol en cada ciclo. Este fue el origen de los años y aquel pueblo que mejor fue para llegar a esta medida del tiempo, así como discernir el inicio y el fin de cada estación, estuvo en mejores condiciones para regular sus ciclos de siembra y recolección.

Comprender los movimiento del Sol era un asunto de primera importancia, pero se trataba de un problema bastante más complicado por resolver, que el simple y uniforme movimiento de las estrellas fijas. Esos bamboleos del astro, de norte a sur y luego, de nuevo de sur a norte no eran fáciles de explicar. Aquel que diera con una explicación sensata sobre este fenómeno podría tener mucho mayor control sobre sus propios ciclos agrícolas. Las crecidas de los ríos o las épocas de sequía se podrían predecir, para tomar provisiones.

En tercer lugar en el orden de complejidad creciente, venía el gran problema de describir los extraños movimientos de esos astros, llamados por los antiguos griegos "planetas", que significa algo como "vagar errante". En verdad que para aquellos tiempos remotos, la visión de cuerpos que a veces avanzan en el firmamento y luego se detienen y regresan, que a veces aceleran el paso y rebasan a todas las estrellas en su vecindad, como si de pronto se sintieran animados por extraños y ajenos, espíritus que los impulsaran con sus poderosas fuerzas y luego, así como habían apresurado su paso, también de pronto, se vieran agotados y paran su carrera para descansar, era inquietante y causaba desazón y angustia.

El asunto de comprender los movimientos erráticos de los planetas en su tránsito al través de los cielos, era también de la primera importancia para aquellas mentalidades. De mucho tiempo se asocia al nacimiento de los individuos, ciertos rasgos particulares vinculados con los planetas. De hecho, los nombres de los planetas se dieron en función del acento; del rasgo característico que imprime en aquéllos que nacen bajo su influencia. Mercurio, el mensajero, el ser mitológico que presta servicio a los demás llevando y trayendo información. Es también el que regula y fomenta el comercio. Venus, la diosa del amor. Marte el dios de la guerra y así sucesivamente. Sobre la base de la influencia que ejercen sobre las personas, se convirtió el problema de estudiar y comprender la conducta de los planetas, en un asunto de estado. Conocer el movimiento y predecir sus virajes y carreras era equivalente a controlar el carácter y la personalidad de los súbditos, así, un rey o un patriarca podía, en un momento dado, frenar los nacimientos en cierta época o por el contrario, multiplicarlos en otra, cuando las condiciones de los astros fuesen propicias para el reino.

En la otra vertiente de este tema está la guerra. Hacer la guerra es algo de la más grande importancia para la humanidad. Conquistar territorio, hacerse de recursos naturales que por geografía no pertenecían a un pueblo, pero que los requiere para su propio desarrollo. Obtener mano de obra regalada en forma de esclavos; prisioneros de guerra, para que sirvan en las labores más pesadas de la industria o del campo. Robar; apoderarse de riquezas ajenas. Imponer condiciones leoninas en los tratos comerciales con los pueblos sojuzgados. Son un ramillete de apetitos a los que se ha entregado la humanidad con mayor o menor fruición a lo largo de los tiempos. Hacer la guerra y hacerla bien; lo mejor que sea posible, para perder lo menos y ganar al máximo, esa ha sido la divisa.

Para hacer bien la guerra es necesario tener poder, el poder de asestar golpes al enemigo; golpes eficientes, efectivos que, con el menor número diezmen al otro.

Ahora se sabe que la efectividad de toda arma tiene que ver con la energía que es capaz de desarrollar, en el menor tiempo posible, para causar estragos en bienes y en vidas; esto es, la potencia. En estos tiempos actuales la potencia se mide en megatones. En aquellas épocas, desde luego no existían tales conceptos, pero ya la intuición conocía que mientras más seco, mientras más rápido se asesta un golpe, su resultado es mejor. En aquellos tiempos, el que lanzara flechas más veloces, a mayores distancias, o bien el que pudiera disparar los pedruscos más pesados, era el que tenía mejores perspectivas de obtener la victoria. Lanzar objetos, destruir las defensas enemigas, perforar los escudos y los blindajes, esto era "KATAPULTA" (la palabra "pelte" era el nombre que los griegos daban al escudo de los soldados. Por su parte, "kata" es un prefijo que denota movimiento descendiente).

1.2. LAS CATAPULTAS GRIEGAS Y ROMANAS

El arco y la flecha es un arma con origen remotísimo. A no dudar el hombre que cruzó por el estrecho de Bering desde el continente de Asia al de América hace unos veintiséis mil años, ya venía dotado de un arco y un mazo de flechas o dardos. Da la impresión que el arco y la flecha ha sido un invento multitudinario, pues diversos pueblos en tiempos diferentes, en lugares apartados, aislados entre sí, sin posibilidad de haber hecho contacto y por lo tanto de haber intercambiado información, han llegado al mismo invento. Es tan simple, tan fácil de fabricar que casi todo mundo lo inventó. La tensión de una cuerda, hace de fuerza de tracción sobre el dardo que sale más o menos libremente disparado, siguiendo una trayectoria fácil de prever; tanto más fácil, cuanto más delgada, cuanto mejor sean sus pequeñas superficies de control, cuanto más ligera sea la flecha.

En la época de Hornero, en la Grecia antigua, un hombre joven, fuerte, con una buena estatura (tal vez de 1.70 m), bien adiestrado, podía pulsar un arco de 2 m de longitud y lanzar con gran puntería un dardo de 0.90 m a una distancia de 450 m. Era todo un récord, pues los arcos ordinarios, los reglamentarios no pasaban de 170 cm y las flechas de 70 cm tenían un tiro seguro a no más de 200 m. Esta era la distancia a la cual se podía iniciar el combate con la primitiva artillería del siglo VI a.c.

La idea original de la catapulta, parece ser que se dio en Grecia en el siglo IV a.C. Se trataba de un artefacto ingenioso para lanzar flechas y pequeñas piedras, basado en la idea del arco flexible. Las flechas debían tener el tamaño de una jabalina ligera y las piedras tenían que ser suficientemente ligeras (tal vez de no más de 250 g), como para ser lanzadas a mano igualmente. En la figura 1.2 se muestra el dibujo de una primitiva catapulta de siglo IV a.c.[1] Las máquinas que se volvieron reglamentarias en el ejército griego y posteriormente, con muy ligeras modificaciones, en el romano, podían arrojar piedras de entre 13 y 26 kilogramos con una precisión notable a una distancia de hasta 640 m. Concentrando la artillería sobre un solo blanco mediante disparos sucesivos, era relativamente fácil demoler las almenas de los fuertes, sobre sus murallas, o bien, desgarrar las armaduras protectoras de las torres móviles de asedio. La mecanización, la tecnología para la construcción de catapultas llegó a superar por mucho las posibilidades de los arqueros humanos y pudo así convertirse en la primera arma reglamentaria de la artillería pesada.

Durante el sitio de Jerusalén en el año 63 d.c, el general judío Josefo comandante de las fuerzas que defendían la ciudad, menciona cómo la cabeza de su amigo fue arrancada de cuajo por un proyectil romano, lanzado desde una catapulta a una distancia que pudo ser mayor de 400 m. Podían las flechas atravesar varias filas de soldados antes de detenerse. Las jabalinas largas y pesadas, literalmente clavaban a los soldados al piso, como mariposas. En el sitio de Gaza, en el año 332 a.c, Alejandro el Magno fue herido por una flecha lanzada desde una catapulta, que atravesó su escudo y su coraza.

Con el tiempo, las catapultas se hicieron más potentes, más ligeras, más eficientes. Muchos desarrollos e ingenios aparecieron. Por ejemplo, en vez de un arco, se inventó un sistema con cuerdas torcidas y un par de brazos que permitía lanzar pedruscos mucho más pesados, hasta de 170 kg a grandes distancias y con enorme fuerza.

Una de las etapas cruciales en el diseño del resorte de torsión fue la de establecer la relación entre el diámetro y la altura de los ovillos cilíndricos de cuerdas elásticas. Si la altura era demasiado pequeña la fricción interna de las cuerdas impedía que se estiraran al máximo, a la hora de tensarlos, disminuyendo la potencia de disparo. Si, por el contrario, era demasiado alto el ovillo en proporción a su diámetro, parte de la torsión no se utilizaba y perdía también eficiencia. Hubo de alcanzarse una optimización crítica al diseñarlas. Conocer esta proporción entre el diámetro del ovillo y su altura se convirtió en uno de los primeros secretos militares. La fórmula que vinculaba la altura contra el diámetro del ovillo de cuerdas elásticas daba por resultado un diseño con un máximo alcance del proyectil. En aquella época nada se sabía de termodinámica, ni de elasticidad, pero ya se usaban ciertas proporciones que tenían que

[1] El orto es la aparición de un cuerpo celeste en el horizonte, en tanto que, el ocaso es la puesta. Así, se habla del orto del Sol al amanecer y su ocaso es al caer la noche. Tomado de la revista *Investigación y ciencia.* Edición en español de *Scientific American,* mayo 1979, pp. 93-101. Sin título del artículo, ni nombre del autor.

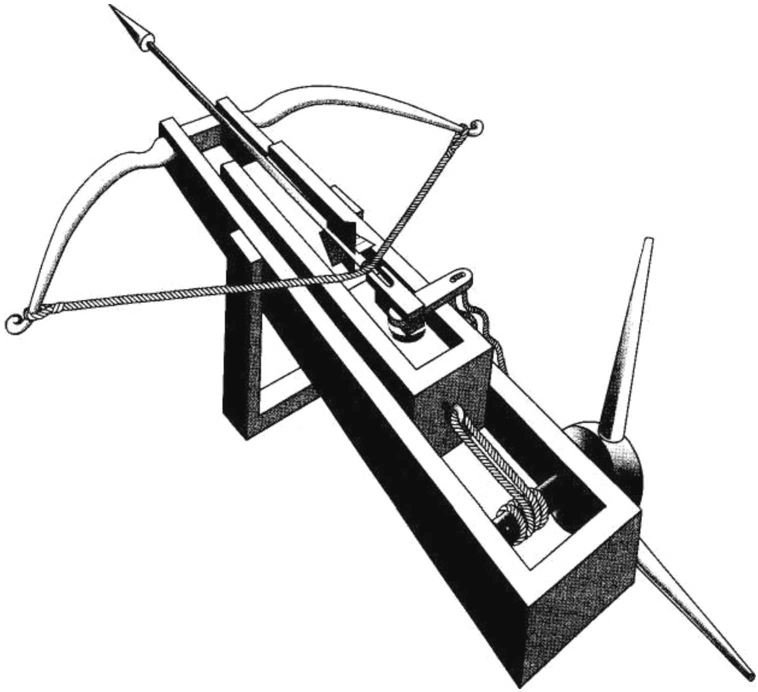

Figura 1.1. Dibujo de una catapulta primitiva, lanzadora de flechas, hecha en Siracusa por Dionisio el Antiguo, en el siglo IV a.c.

ver con estas cuestiones. Aquella fórmula asociaba la torsión en los ovillos, con la tensión inicial de ellos al enrollarlos, por el cuadrado del ángulo de torsión y por el cubo del diámetro de los mismos. Así, para expresar el diámetro del ovillo en términos de la masa del proyectil que se deseaba lanzar, había que extraer una raíz cúbica. En esos tiempos nadie sabía extraer raíces cúbicas, ni resolver ecuaciones de tercer grado, hubieron de desarrollar así mismo, un complicado método gráfico para hacerlo, basado en el Teorema de Pitágoras.

Por supuesto, hace 2 000 años no se tenía la formidable herramienta teórica llamada álgebra; todos los conocimientos eran empíricos; sin embargo, ya entonces sabían que era necesario extraer la raíz cúbica del diámetro del ovillo para obtener las especificaciones de diseño de la catapulta.

El tamaño y la potencia de las catapultas crecieron con el conocimiento empírico de la mecánica. El imperio romano llegó a ser el más poderoso del mundo, tanto por la organización y la disciplina de sus ejércitos, cuanto por los desarrollos en materia de artefactos bélicos. Arietes, torres de asalto, navíos de guerra de diseños avanzados y, sobre todo, catapultas ligeras, fáciles de mover y transportar, llegaron a constituir un temible arsenal ante el cual las naciones no pudieron defenderse. Muchas naciones prefirieron celebrar alianzas dignas con Roma, antes que enfrentar tan terrible máquina de guerra.

Hubo un pequeño estado que decidió defender su soberanía; una isla muy cercana a Italia; actualmente se conoce como Sicilia. En aquel entonces, el siglo n a.c. estaba poblada principalmente por una industriosa gente. Griegos que habían llegado doscientos años antes desde el continente y se habían asentado allí, formando un pequeño reino, el de Siracusa. Ese pequeño pueblo, un día puso casi de rodillas al poderosísimo imperio romano, gracias al talento, ingenio y creatividad de uno de sus moradores; un científico e ingeniero que diseñó y construyó máquinas de guerra con las cuales defendió su patria.

1.3 Arquímedes

Una industriosa y progresista colonia griega se estableció en Sicilia, tal vez desde el siglo v a.c. Allí, con gran sentido de organización y solidaridad llegaron a tener una agricultura floreciente, artesanías y artes para su propio consumo y deleite y para comerciar con estados vecinos. El pequeño reino de Siracusa fue conocido en todo el mundo de la antigüedad por sus productos de excelente calidad, por sus exquisitas piezas de cerámica y por sus obras de arte.

La importancia que tuvo aquel pequeño reino para la actualidad es que fue la cuna de uno de los más conspicuos hombres de ciencia. Arquímedes nació allí, en Siracusa —nombre de la ciudad capital y del reino— muy probablemente en al año 287 a.c. Hijo de un astrónomo de la clase noble, desde muy pequeño se interesó por el estudio y dio muestras de un gran talento para las matemáticas, así como de una extraordinaria curiosidad y sentido deductivo. También es posible que siendo un joven adulto de 35 años haya sido enviado a Alejandría, donde conoció a Eratóstenes, y a Apolonio, con quienes formó un importante grupo de jóvenes científicos que habrían de trascender por sus ideas y por sus desarrollos teóricos y descubrimientos a los milenios.

Se cuenta que Arquímedes poseía un talento fuera de lo común para manejar números grandes y hacer cuentas con ellos. En uno de los pocos libros que fueron salvados del incendio y destrucción de la biblioteca de Alejandría por las hordas cristianas del obispo de esa ciudad, Cirilo, Arquímedes muestra la técnica para el manejo de esas cantidades, usando una notación muy parecida a la que se usa hoy, de expresar a los grandes números por medio de exponentes de diez y sumar o restar los exponentes a la hora de multiplicar o dividir los números. Ese libro existe —no su original— y se conoce como el Recolector de Arena; en griego: "Psammites" (ψαμμιθεσ: arenario) y está dedicado al rey Gelón de Siracusa. Cualquier estudiante actual sabe cómo manejar grandes números, con la técnica de los exponentes, así que puede ser que hoy por hoy nadie sienta mayor cosa al saber de aquel joven que hacía cálculos para contar el número de hojas de todos los árboles de un bosque, o el número de granos de arena en las playas de Sicilia. Lo sorprendente es que los hiciera en una época cuando ni siquiera se contaba con la escritura arábiga de los números, de modo que la simple multiplicación de dos números de dos cifras representaba de por sí una empresa complicada.

A su regreso a Siracusa se puso al servicio de un noble de nombre Hierón. Lo ayudó con gran acierto en su campaña política para convertirse en rey de Siracusa, Hierón, que además era tío de Arquímedes, logró el éxito y se coronó rey al poco tiempo. El joven científico pudo así gozar de una envidiable posición como sabio de la corte. Se le asignó un excelente salario y se le dio en posesión una villa espaciosa, con magnífica ubicación, justo al borde de los acantilados que dan a las playas de Siracusa, desde la cual el genio podía contemplar la salida del Sol en el horizonte del Medi terráneo.

Se dice que la excelente posición económica y la alta investidura como primer científico de la corte, se la ganó Arquímedes después de haber resuelto un complicado problema que le planteó Hierón justo después de haber sido coronado rey de Siracusa. Parece que el nuevo soberano decidió mandar hacer una corona de oro que sirviera como ofrenda y testimonio de gratitud a uno de los dioses del panteón griego; aquel a quien Hierón había rezado y le había solicitado el favor para ganar las elecciones. Se dice que el rey había entregado a un orfebre una cantidad exacta de oro para realizar el trabajo, así como una bolsa con una buena dotación de piedras preciosas y semipreciosas, con las cuales se harían los adornos y aplicaciones necesarios a la corona. Se cuenta, así mismo, que el rey Hierón recibió puntualmente el trabajo: una verdadera obra de arte, bien trabajada, excelentemente diseñada; tal como la había deseado el cliente. No obstante, desde el principio, el soberano presintió que el orfebre aquel pudo haberlo timado, robando parte del oro que se le entregó y luego, aleándolo con plata y otro metal de inferior calidad, pudo haber recuperado el peso faltante, de manera que, cuando el rey pesó la corona no notó falta alguna.

Acosado por la duda, Hierón planteó su problema a Arquímedes y le pidió que lo resolviera, pero a condición de no lesionar en forma alguna aquella obra de arte. El joven pudo dar solución a aquel asunto de forma brillante. Uno de los historiadores de aquella época, cuenta que Arquímedes pudo encontrar la respuesta cuando se hallaba tomando un baño en los baños públicos de la ciudad. Fue entonces cuando notó que al hundir su cuerpo en agua de la tina, estando llena hasta el borde, caía al suelo una cantidad de líquido que era igual al volumen de su cuerpo. Esta observación le dio la clave para resolver el problema de la corona, pues si en verdad había sido adulterado el oro con otro material, aunque el peso fuera el mismo que el original, el volumen no, dado que cada metal tiene un peso específico propio.

Se dice que el hallazgo causó tanta excitación al científico, que salió de los baños públicos completamente desnudo y gritando ¡Eureka! (¡lo he encontrado!) dirigiéndose al palacio, para disponer de inmediato los materiales y el equipo para llevar a efecto su prueba. En sendas vasijas colmadas de agua sumergió la corona y un peso idéntico en oro y piedras preciosas. Cuidadosamente midió luego la cantidad de agua derramada de cada vasija y comprobó que, en efecto, mayor había sido el líquido desplazado por la corona que por idéntico peso de oro. Esto demostró en forma irrebatible y sin dañar la corona, que parte del oro original había sido reemplazado por un material de menor densidad.

El orfebre ladrón fue a dar con sus huesos al calabozo y el joven científico recibió como prueba de agradecimiento del recientemente coronado rey, la villa y el nombramiento como científico de la corte.

Sumergir un cuerpo en el seno del agua, proporcionó a Arquímedes, además de su casa y su sustento, un par de ideas, que con el correr del tiempo, se convertirían en los principios básicos para el estudio de los fluidos.

Dentro del mismo tema de los fluidos, Arquímedes desarrolló el mecanismo conocido como "El tornillo de Arquímedes", como el que se muestra en la figura 1.2. Se trata de un tubo hueco, enrollado alrededor de un eje. Al girar el eje, en cierto ángulo, el agua asciende por el tubo, de manera que es posible servirse de él para extraer el líquido de los ríos o lagos poco profundos. Este mecanismo aún se usa en diversas partes del mundo para la irrigación o para obtener el agua para el uso doméstico.

Sus biógrafos han afirmado que Arquímedes fue un hombre que

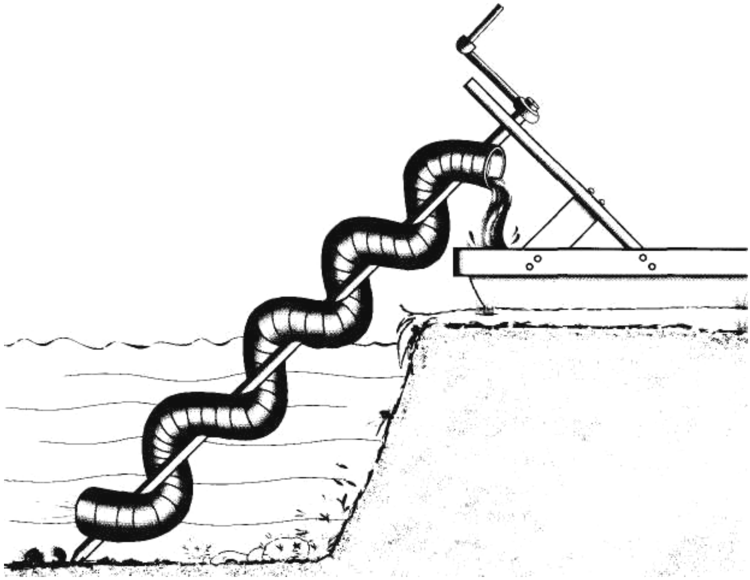

Figura 1.2. Tornillo de Arquimedes. Este mecanismo aún se usa en el mundo para extraer agua de los ríos y lagos.

desarrolló, por encima de todo, un conocimiento teórico basado en el pensamiento abstracto y que desdeñaba el uso práctico que se daba a tales conocimientos. Lo cierto es que cada vez más se ha vuelto claro que este hombre en verdad fue un ser universal. El tornillo de Arquimedes es una muestra de su ingenio y de su habilidad para resolver un problema práctico. Su "arenario", por lo contrario, muestra su genio para resolver problemas abstractos.

Un ejemplo concreto de la habilidad de Arquimedes para resolver problemas prácticos es todo el estudio que realizó sobre las propiedades de la palanca. Éste los dejó a la posteridad en un libro que, afortunadamente también sobrevivió a la destrucción de la Biblioteca de Alejandría; *Sobre el equilibrio de los planos,* en dos volúmenes, donde discute, además el método para hallar el centro de gravedad de cualquier cuerpo.

El descubrió cómo es posible, por ejemplo, elevar un cuerpo masivo por medio de una palanca, en uno de cuyos extremos se halla el cuerpo y por el otro, se ejerce una fuerza, que puede ser leve, siempre que exista un punto de apoyo adecuado. Luego, colocando el objeto a moverse en distintas posiciones con respecto al punto de apoyo o "fulcro", pudo dar una clasificación de los tipos diferentes de palancas. Finalmente, inventó la polea múltiple o polipasto, entendiéndola como un práctico sistema de palancas que permite mover grandes pesos con poco esfuerzo.

En una carta que Arquímedes envió al rey Hierón, su pariente y protector, le escribió que con una potencia dada se podría mover un cuerpo pesado, sin importar cuanto fuera este peso. En esa carta le declaró, en el colmo de su emoción, que si hubiera un buen punto de apoyo, él podría, por medio de una simple palanca, mover el mundo. Hierón quedó asombrado ante tan audaz afirmación, así que pidió al científico que demostrara su aserto, moviendo algún gran peso con una fuerza ligera. Arquímedes, entonces escogió un barco mercante, el más grande que encontró en el muelle de Siracusa; uno de esos navios con tres mástiles, de la flota real. Mandó que fuera cargado hasta su límite con las mercaderías que normalmente transportaba. Pidió que toda la tripulación estuviera en el barco, como cuando navegaban. Ató una cuerda por uno de sus extremos al barco aquel y por el otro, a través de una polea múltiple hasta sus manos. Luego, cómodamente recostado sobre la arena de la playa, enfrente del rey Hierón y de una multitud de curiosos, comenzó a jalar con toda suavidad de la cuerda, sin ningún signo de esfuerzo. El mercante comenzó a moverse y al poco rato, había encallado en la playa ante el asombro generalizado.

Arquímedes desunió luego el sistema aquel de poleas a la nave y dejó que toda la tripulación, ayudada por decenas de jóvenes siracusenses, haciendo el mayor de los esfuerzos, empujaran al barco y lo desencallaran hasta dejarlo nuevamente a flote.

En el año 215 a.c, Roma decidió anexarse la isla de Sicilia. Armó una poderosa flota y ordenó a su comandante, el general Marcelo, que atacara e invadiera la isla. Para ese momento la ciudad de Siracusa contaba con un sistema de defensa que había sido concebido y calculado por Arquímedes, quien personalmente había supervisado su construcción y emplazamiento, había creado una milicia civil disciplinada y hábil para manejarlo. Aquel sistema de defensa consistía en una batería de catapultas lanzadoras de flechas y de piedras, con dimensiones distintas a las que se aceptaban convencionalmente. Estas eran más cortas de sus ovillos torcidos y más anchas, de manera que podían hacer disparos a cortas distancias, más precisos y con tiempos de recarga más breves. Había también un conjunto de garfios de bronce, como garras de ave, que podían ser disparados desde los acantilados y luego retraídos mediante un sistema de poleas compuestas y una cuerda jalada por los hombres de la milicia civil. Se dice, aunque esto ha sido puesto en duda por los historiadores modernos, que mandó construir un sistema de lentes, o pudieron ser espejos cóncavos, para enfocar haces de luz sobre los cascos y los velámenes de los barcos enemigos y quemarlos.

Por la retaguardia, a la salida de la ciudad que da a las montañas del norte, construyó torres huecas, para situar a los arqueros a una altura tal que su alcance de tiro fuera muy superior al de los arqueros invasores y, más adelante, un sistema de trincheras donde resguardar a los hombres del "fuego" enemigo.

Por su parte, Marcelo, el general romano consideró que con asaltar la ciudad, desde el mar y luego desembarcar y dejar que la infantería hiciese el resto, sería más que suficiente para cumplir con su cometido. Un asalto rápido, un desembarco y luego la invasión de la capital serían cosas sencillas y que no deberían presentar el mayor obstáculo a sus fuerzas. ¡Grave error! Confiar en la debilidad de un enemigo al cual muy poco conocía.

En cuanto la flota romana echó anclas y se dispuso para abrir fuego con sus catapultas, entre los cuales destacaba una inmensa lanzadora de piedras que llamaban Sambuca y que para dispararla había que emplazarla sobre una pesada tarima hecha con gruesas vigas de madera, colocadas entre dos navíos de guerra. Arquímedes, que observaba con cuidado los movimientos romanos, dio orden de iniciar el ataque en contra de los invasores. Una primera andanada de piedras de unos 78 kg cada una, salieron disparadas con enorme impulso y con gran precisión fueron a dar exactamente en la sambuca, haciéndola pedazos antes de que pudiera siquiera lanzar su primer proyectil. Los pedruscos destrozaron la sambuca, quebraron las vigas y perforaron los cascos de los navíos romanos, que se fueron al fondo, antes que el general Marcelo pudiera decir algo.

Sin pérdida de tiempo, Arquímedes dio orden de lanzar los garfios en forma de garras. Tres navíos fueron atrapados por la proa y la popa por esas tenazas. Inmediatamente, el de Siracusa dio la señal y a un tiempo hombres y mujeres jalaron con fuerza de las cuerdas en el extremo opuesto de los garfios. Los navíos fueron sacados del mar en vilo, se elevaron por los aires con todo y tripulación, y luego, comenzaron a girar, lanzando todo cuanto llevaban. Hombres, cuerdas, remos y armas salieron como rehiletes de los barcos de guerra grotescamente suspendidos, ante la mirada estupefacta de Marcelo y su ejército.

Mientras tanto, una batería de catapultas ligeras lanzaba, una tras otras, sin descanso, andanadas de piedras y flechas sobre las demás naves y se dice que fue entonces cuando Arquímedes dispuso las lentes o los espejos, concentró los rayos del Sol, que a aquella hora del día caían a un ángulo adecuado sobre la Tierra, y pronto los velámenes de los buques de guerra romanos ardían como teas. El ejército romano, despavorido comenzó a gritar y gemir. Los remeros, desordenadamente tiraron de sus remos para escapar de aquel infierno. Con gran dificultad, Marcelo, el general romano, se hizo obedecer a gritos y ordenó retirada. La nave capitana, gravemente lastimada por los pedruscos, las flechas y aquel primitivo láser, escapó a todo trapo del espantoso contraataque siracusense. El pequeño estado, había infligido una vergonzosa derrota a la más poderosa fuerza del mundo. Obviamente, la cosas no iban a quedar así.

Tres años después el ejército romano volvió a Siracusa. Esta vez actuó con enorme cautela. En vez de un ataque directo, frontal. Marcelo optó por poner sitio a la ciudad. Anclando lejos del alcance de los disparos isleños, las tropas romanas lograron desembarcar por varios puntos de la costa de Sicilia. Luego, protegidos por la obscuridad de la noche, se acercaron desde todos los puntos y pusieron asedio a la ciudad. En poco tiempo capituló, Marcelo dio orden de saquear Siracusa, a condición de respetar la vida de los ciudadanos; hombres y mujeres. Ordenó así mismo, localizar y tomar prisionero a Arquímedes, con el objeto de llevarlo a Roma y usar de su conocimiento, de su talento y de su genio. Sin embargo, un soldado romano, hallándolo en su villa, sentado bajo la sombra de un roble en el traspatio de la casa, lo atravesó con su lanza, dando muerte así al más grande físico y matemático de la antigüedad. Marcelo se sintió conmovido al conocer el deceso del sabio. Mandó construir una lápida en la tumba de Arquímedes que, se dice, existe aún. Como única inscripción en ella aparece un círculo y un cuadrado inscrito; el símbolo de aquel que halló la cuadratura al círculo: Arquímedes de Siracusa.

1.4. Eratóstenes

No quedaron evidencias escritas de la Biblioteca de Alejandría, todo fue destruido y quemado. Es muy difícil saber quiénes fueron los sabios que visitaron las salas de lectura, quiénes escribieron y qué fue lo que se escribió allí. Lo poco que ha llegado al presente ha sido a través de los relatos que hicieron aquellos que vivieron aquellas épocas y que los historiadores asentaron en sus libros. Así, aunque no es del todo seguro, parece ser que Arquímedes, en efecto conoció a Eratóstenes durante el tiempo que presumiblemente pasó en Alejandría. Éste último viajó allá por órdenes de Gelón, el rey de Siracusa, cuando murió su padre el astrónomo Fidias. Aparentemente fue enviado a aquel lugar para distraerse y recuperarse del gran dolor que le causó esa pérdida. El hecho es que ese viaje parece haber dejado una profunda huella en Arquímedes, pues una vez de regreso, investigó y escribió casi sobre todos los temas. Aquella curiosidad natural del genio eclosionó y lo convirtió en un hombre universal. Es muy factible que quien, influyó grandemente en esa metamorfosis haya sido precisamente Eratóstenes,

Eratóstenes fue griego; se educó en Atenas, pero muy joven aún viajó a Alejandría donde pasó el resto de su vida, aunque no se tiene certeza, parece ser que nació en el año 273 a.c. y antes de cumplir los veinte ya radicaba en esta ciudad. Desde el principio mostró dotes de una muy despierta inteligencia, así como de una inagotable sed de conocimientos. Aprendió de todo; no hubo tema que no hubiese sido investigado por él. Su fama de universalista fue grande y todo mundo lo equiparaba al gran Aristóteles. Lo criticaban por ello y toda la vida resistió las presiones de aquellos que de buena o mala fe lo urgieron para que abrazara alguna especialidad. Alguno de esos seres que se sienten con el derecho de opinar y arreglar la vida de los prójimos, alguna vez le puso un sobrenombre que lo acompañó toda la vida: "Beta", la segunda letra del alfabeto griego, porque se decía que él, Eratóstenes era el número dos, el segundo más brillante sabio de Grecia, después de Aristóteles mismo, a quien siempre se le llamó "Alfa". Claro, este sobrenombre tuvo también una connotación despectiva, pues sugería que su poseedor era el segundón; aquel que si bien era brillante, genial, jamás alcanzaría el número uno.

Pues bien, fue este personaje, Eratóstenes, quien mostró por primera vez y en forma irrefutable, que la Tierra no es plana. El propuso, también por primera vez una medida de la circunferencia terrestre, bastante aproximada a la exacta. Se dice que un día recibió la noticia de que en una ciudad al sur de Alejandría llamada Siena, cada veintiuno de junio a las doce del día el sol pasaba exactamente por el cénit. Una estaca clavada verticalmente, a esa hora, no proyecta sombra alguna.

En Alejandría, ese mismo día del año: el solsticio de verano, a las doce del día, el Sol no está exactamente en el cénit sino ligeramente al sur, de manera que una estaca clavada sobre el piso, verticalmente, proyecta una pequeña sombra de, aproximadamente siete grados con respecto a la plomada. Para ser precisos, la información era que la sombra en Alejandría era de un cincuentavo de una circunferencia, lo cual da 7° 24'. Eratóstenes pagó entonces a un hombre para que fuera a pie hasta Siena, tratando de caminar en línea directa y que contara los pasos desde el centro de Alejandría, hasta la plaza central de aquella ciudad. El resultado descrito en kilómetros actuales viene a ser de unos ochocientos. El resultado de aquella caminata fue de 5 000 estadios, que era la unidad que se tenía en aquel entonces para grandes distancias. Un estadio equivale aproximadamente a 163 m (o sea unos 815 km). Con estos datos el radio terrestre es de 6485.6 km y su circunferencia 40 750 km [algunos autores aceptan, sin embargo, que un estadio es de 145 m, con lo cual la medida de la circunferencia terrestre es de 36 250 km]. A continuación formuló varias hipótesis de trabajo: 1) que Siena está justo al sur de Alejandría, sobre el mismo meridiano; 2) que la Tierra es esférica y 3) que los rayos del Sol llegan a la superficie terrestre en forma paralela. Entonces, debido a las propiedades de los ángulos complementarios, él dedujo que ese mismo ángulo (7°24') es el que corresponde al que subtiende el arco de circunferencia entre Alejandría y Siena. De estas simples consideraciones se obtiene de inmediato que la circunferencia terrestre es de 40 000 km. Todos los cuerpos celestes: la Luna, el Sol, los esquivos planetas y las lejanas estrellas muestran una forma esférica. Durante milenios la Tierra fue considerada como plana; una superficie gigantesca sobre la cual las montañas y los mares podían estar en equilibrio, inmutables. Este es el lugar donde la más especial de todas las creaturas fue formada. No tendría por qué ser esférica; al contrario, siendo un sitio único por cuanto a su contenido, debería ser distinta a los demás. Ésta era muy probablemente la forma de pensar de la gente en aquellos tiempos. Más que hablar de un sistema de Universo geocéntrico, se debe decir de aquél, que era antropocéntrico. En realidad, con las investigaciones de Eratóstenes, la concepción humana acerca de la estructura del Universo y la ubicación de la Tierra dentro de él, inició un lento camino hacia la periferia, hacia la modestia. El gran hito en la historia lo plantó Eratóstenes cuando puso al planeta Tierra, el asiento de la vida humana, en el mismo nivel que el resto de los planetas; es decir, como una gran masa esférica, prácticamente indistinguible de los demás. Con ello la vanidad humana sufrió su primer descalabro.

1.5 Hipatia

La biblioteca de Alejandría había nacido en el siglo m a.c. y durante cerca de seiscientos años fue el centro de la cultura, de la inteligencia en el Mundo. Dentro de sus muros, cientos de científicos se formaron, algunos brillantes como Euclides o Arquímedes, desarrollaron sus más conspicuos trabajos. El últimos de los directores de ese importantísimo centro no fue un hombre; fue una mujer: Hipatia. Ella nació allá mismo, en Alejandría, alrededor del año

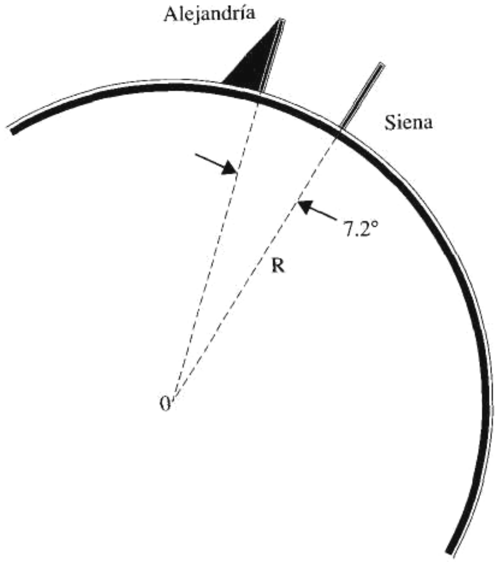

Figura 1.3. La sombra proyectada por el Sol, el día del solsticio de verano, a mediodía, proyecta una pequeña sombra de 7.2° sobre el piso de Alejandría y ninguna sobre el piso de Siena, a 800 km al sur, cuando incide sobre sendas estacas clavadas verticalmente. Este hecho puso a Eratóstenes en la pista de la redondez de la Tierra.

370 d.c Toda una joya fue esta señora, pues además de ser matemática, física y astrónoma, fue la directora de la escuela de filosofía neoplatónica de Alejandría; todo un ramillete de virtudes, y por si fueran pocas, estaba dotada de una personalidad arrolladora y una gran belleza: alta, de tez clara, con ojos verdes como esmeraldas, cabello negro y un porte distinguido, que le permitieron desarrollarse y progresar en un medio y en una época en que la mujer no era considerada más que un objeto en propiedad de los varones. Se dice que tuvo muchos pretendientes, pero ella rechazó todas las proposiciones matrimoniales. Vivió al lado de un obscuro científico; un físico que había sido su profesor cuando fue estudiante en la misma biblioteca. Aunque no quedó ningún vestigio de su compañero, se sabe que fue él quien habiendo descubierto su enorme talento la espoleó y la impulsó para que culminara su brillante carrera científica y más tarde la apoyó en su labor como directora de la biblioteca.

La ciudad de Alejandría, en la época de Hipatia estaba enteramente bajo el dominio de Roma. Sufría en aquellos días graves tensiones sociales debido a su cosmopolismo. Además, la esclavitud había subyugado a casi todos los nativos de aquella región ante la entrada indiscriminada del capital romano.

La Iglesia cristiana, había sacado buen provecho de esta situación, convirtiendo a mucha gente con el pretexto de extirpar la influencia, y la cultura paganas. En un momento determinado, Hipada se convirtió en el centro de las tormentas sociales, debido a que, ante los ojos de la Iglesia, era ejemplo viviente de todos los males, de todos los vicios y conductas que habían sido el origen de las desgracias de los alejandrinos. Cirilo, el arzobispo de la ciudad, la veía con odio, por sus virtudes y sus logros; por su amistad con el gobernador romano, porque se había convertido en el paradigma de la cultura y de la ciencia agnóstica y antidogmática, que la Iglesia cristiana de aquellos años asociaba al paganismo y a la herejía, pero, sobre todo por aquella relación poco discreta que la mujer había llevado toda su vida adulta con el científico griego, su profesor.

Hipada sabía de la maledicencia de Cirilo, y estaba consciente de la actitud cada vez más hostil de la gente del pueblo hacia su persona; conocía al pueblo, y percibía su creciente agresividad y rechazo. No obstante, continuó desempeñándose como directora, siguió acudiendo a impartir su clase al grupo neoplatónico; publicó y llevó una vida prácticamente normal, hasta que un día, en el año 415 d.c, cuando iba de camino a su trabajo en la biblioteca de Alejandría, fue emboscada por una turba fanática de desarrapados de la Iglesia de Cirilo. La sacaron violentamente de las andas, desgarraron sus vestidos, la golpearon salvajemente y luego, semidesmayada la desollaron, arrancándole la carne a pedazos con conchas marinas filosas hasta dejar sólo sus huesos. Sus despojos fueron lanzados a una hoguera, donde perros y ratas acabaron de dar cuenta de todo vestigio de aquella hermosa e inteligente mujer.

La turbamulta enardecida tomó por la fuerza la biblioteca y le prendió fuego. Todos los artículos, todos los libros de Hipatia fueron consumidos por las llamas, junto con el ochenta y cinco por ciento de los rollos y libros que a la sazón tenía aquella institución. Fue aquello como una operación de cirugía mayor del cerebro, donde la humanidad entera hubiese sufrido la extirpación de buena parte de su órgano pensante. La memoria, la razón, la curiosidad científica desaparecieron del mundo. En muchos casos, sólo quedaron algunas hojas sueltas de los trabajos que allí se guardaban con celo, con amor. En la mayoría ni la obra, ni el título, ni el autor dejaron huella. De las ciento veintitrés obras teatrales de Sófocles sobrevivieron siete, entre las que quedó *Edipo* rey.

Una cuantas obras fueron salvadas de aquel desastre. Los beduinos que pasaban cerca de la biblioteca cuando el incendio había casi terminado, se metieron al edificio ya en ruinas y de entre las pavesas y ceniza, rescataron algunos documentos que milagrosamente no se habían quemado. Llevaron esos rollos a Bagdad y los obsequiaron al emperador persa Yazdegerdo I, llamado por los cristianos "el pecador", quien había recientemente iniciado la construcción de un edificio que, a semejanza de aquel otro en Alejandría, se destinó al desarrollo y fomento del conocimiento, las ciencias y las artes. Siguiendo la política de Alejandro de Macedonia, Yazdegerdo difundió la orden de que todo viajero que llegara a Bagdad debería donar documentos; rollos de papiro o pergaminos para la biblioteca. Así, algunas de las obras maestras del talento del genio universal, pudieron salvarse y sobrevivir a aquella brutalidad fanática, y el saber pudo salvarse, al menos en pequeña medida, de desaparecer para siempre.

De hecho el conocimiento humano cambió de sede y de idioma. Los libros y rollos de Alejandría fueron la base del conocimiento matemático, astronómico, físico y químico de la cultura árabe, de allí en adelante. Desarrollaron el álgebra y la trigonometría, impulsaron la astronomía y la navegación con el perfeccionamiento del astrolabio y del sextante. Estudiaron la medicina de Hipócrates y la llevaron a grandes alturas de desarrollo. Escribieron tratados de anatomía, de terapéutica, y de herbolaria. En química hicieron la clasificación de cientos de sustancias por sus pesos específicos, a partir de los conceptos y enseñanzas de Arquímedes de Siracusa...

Los árabes aprendieron y desarrollaron su propio conocimiento científico. Entraron a Europa, desde España, y durante ochocientos años, trasmitieron sus conocimientos e hicieron renacer allí el interés por la ciencia y el método de razonamiento científico. Mil años de obscuridad, comenzaron a dar paso gradualmente a una era de razón. A Cirilo, la iglesia lo convirtió en santo, y todos los días nueve de febrero se celebra y se recuerda su nombre.

El gran paréntesis entre la ciencia griega de Atenas y Alejandría, de los siglos IV a.c. hasta IV d.c, y el renacimiento europeo debe entenderse cabalmente como un periodo de receso y de incubación de la inteligencia humana. Si en efecto, la ciencia sufrió un trágico revés en Alejandría, en el año 415 d. c, también es cierto que no murió; sino que buscó un sitio mejor para reflorecer. Buscó, así mismo un talento y una mentalidad diferentes; porque si bien es cierto que los griegos asestaron una fenomenal nalgada al intelecto, que lo catapultó a una altísima cumbre, no menos es verdad que muchos avances posteriores hubieran sido absolutamente imposibles sin por ejemplo, el invento de un sistema de numeración adecuado para expresar fácil y rápidamente los resultados de medidas y cálculos. Tampoco se hubiera avanzado un ápice, sin el invento del lenguaje algebraico para expresar relaciones entre medidas.

Es innegable que los desórdenes sociales y la exacerbación de las pasiones místicas contribuyeron a la declinación de la cultura griega, pero también debe ser que las deficiencias para expresar mediante un formalismo matemático las ideas y los conceptos de la ciencia griega, representaron un freno cada vez más poderoso para el avance científico. Difícilmente puede considerarse como un asunto del destino, de la mala suerte, la declinación del fervor científico de los griegos en Grecia, Egipto y Sicilia, y tampoco puede afirmarse que fue un mero accidente la explosión intelectual de la Europa de los siglos XIII al XVII, cuando se mira todo esto desde la perspectiva de un proceso de gestación de un sistema comprensivo y sintético como lo fue el álgebra.

II. Historia de Ptolomeo y el proceso de la ciencia

II. 1. Claudio Ptolomeo

Cerca de cuatrocientos años después de Eratóstenes, la concepción sobre el sistema planetario había progresado muy poco. Las erráticas trayectorias de los planetas seguían siendo objeto de asombro. Sus continuos adelantos y retrasos con respecto al resto de las estrellas en la bóveda celeste no podían ser explicados en términos sencillos. La tendencia generalizada era de atribuirles vida; es decir, no se les consideraba como simples masas en vuelo al través del cielo, sino que se les pensaba dotados de cierta alma; de cierto tipo de vida e inteligencia, de modo que sus veloces carreras o sus repentinos descansos deberían responder a alguna voluntad intrínseca.

Aristarco de Sainos (siglo III a.c.) había propuesto un sistema planetario heliocéntrico ya hacía mucho tiempo, sin embargo, su proposición fue hecha sin mayor justificación, ni cálculo alguno, sino simplemente como una ocurrencia que podría ayudar a comprender de manera más fácil los movimientos de los planetas. De hecho Aristarco no hizo otra cosa que revivir esa que había sido idea de alguien aún anterior a él: Heráclito de Ponto (siglo IV a.c). Su idea fue desechada. El argumento más fuerte contra las ideas heliocéntricas fue que si en verdad la Tierra recorriera una trayectoria alrededor del Sol, las estrellas se verían desde ella en posiciones distintas a lo largo del año, debido al paralaje.[1] Este hecho no se observa, así que la Tierra debe estar fija. Tuvieron que pasar dieciocho siglos para que las ideas de Heráclito y Aristarco revivieran con el sistema heliocéntrico de Copérnico.

El principal defensor e impulsor del sistema geocéntrico fue Claudio Ptolomeo (aproximadamente ¿75? d.c). Descendía de inmigrantes griegos que hacía tiempo se habían asentado en Egipto. Vivió en Alejandría toda su vida y trabajó en la Biblioteca que, aunque ya no tenía el mismo esplendor ni la misma importancia para el conocimiento y la ciencia del Mundo, pues había sufrido un incendio accidental en el año 48 a.c.[2] que había mutilado una parte apreciable a su acervo, seguía siendo un sitio de prestigio universal. En un sentido preciso se puede afirmar sin temor a cometer un grave error que este personaje, romano-egipcio fue el último científico importante de la antigüedad. Su obra fue de tal trascendencia que dominó la visión popular del Universo durante más de mil quinientos años. Fue el precursor del método científico y promotor de él, pues sostenía que para llegar a un conocimiento cierto, era menester observar, experimentar y tomar nota de ello, para poder sintetizar. No hubo rama de la ciencia de su época que no examinara y reestructurara: la geografía, la astronomía, la óptica, todas fueron objeto de su estudio y en todas ellas hizo alguna contribución. Escribió varios libros, entre las que destacan su Geografía y, el más famoso: El Almagesto. En el primero se propuso trazar el mapa de todo el mundo conocido; abrió nuevos caminos en esta ciencia, al proponer por primera vez una forma inequívoca y sistemática de ubicar sitios mediante el uso de la latitud y la longitud; líneas que representan un sistema de coordenadas esférico, de dos dimensiones. Desarrolló el método usado aun hoy en día para proyectar superficies esféricas sobre mapas planos.

Por su parte, El Almagesto (del árabe: "al majisti", que significa "la mas grande compilación"), fue el tratado de astronomía. En él, Ptolomeo vertió todo el saber de su época acerca del Universo: los ciclos estacionarios de la Tierra; el catálogo de las estrellas, ordenadas por su magnitudes o brillos aparentes y los nombres con que él las registró. Conocía la precesión de los equinoccios; ese ciclo de cerca de 26 000 años, por el cual el polo norte precede. Menciona también en el *Alamagesto* la refracción de la luz del Sol en la atmós-

[1] Paralaje es el efecto de observar un cuerpo celeste en posiciones aparentemente distintas en el firmamento, debido al hecho de que la Tierra, desde la cual se observa, se encuentra en puntos distintos de su órbita alrededor del Sol.

[2] Ni tan accidental. Diocleciano había mandado quemar todos los libros sobre alquimia que allí se tenían.

fera terrestre y predice los eclipses de Sol y de la Luna con gran precisión[3].

Ptolomeo sostenía que la Tierra es el centro del Universo y que a su alrededor giran la Luna, el Sol y los planetas. Para explicar las extrañas maneras como se comportan estos últimos, adelantándose a veces y retrasándose después, Ptolomeo supuso que cada planeta gira alrededor de la Tierra como si estuviera unido a una esfera invisible, perfecta, sutil, llamada deferente, en cuyo centro se encuentra ésta, pero que no está sujeto a tal esfera, sino que a su vez gira sobre otra más pequeña, centrada en algún punto de la deferente. A estas esferas menores les llamó "epiciclos". (Véase figura II.l). Todos los elementos de que se valió Ptolomeo para construir su modelo del sistema planetario son absolutamente necesarios. En primer término, el sistema debía ser geocéntrico una vez que se mostró, sin lugar a dudas, que no se observa paralaje alguno cuando se ven las estrellas lejanas en los solsticios de verano y de invierno. Claramente, no se tenía en aquella época una medida ni remotamente aproximada de las distancias a las que se encuentran las estrellas de la Tierra. Con una distancia de orden de dos o tres años luz, el paralaje es completamente indistinguible, sin instrumentos ópticos otros que los ojos.[4] Las deferentes, por su parte son curvas perfectas; esto es, círculos, alrededor de la Tierra. No podían ser de otra manera tomando en cuenta que cualquier otra curva requiere ser "corregida" punto a punto, no así el círculo. Una vez echado a andar un planeta, no puede menos que seguir un círculo. Mucho tiempo y mucho trabajo tuvo que hacerse después para concluir que ante una interacción gravitacional que depende del inverso del cuadrado de la distancia entre dos cuerpos masivos la trayectoria que dibuja cada uno alrededor del centro de masa del sistema es alguna de las cónicas: círculo, elipse, parábola o hipérbola, de acuerdo con la energía. Nada de esto se conocía en aquella época, así que no podía haber un argumento mejor, que preguntarse quién puso allí los planetas, y Él, solamente pudo hacerlo perfectamente, de modo que las órbitas deben ser perfectas: círculos. Pero ahora, si sólo se considera a las deferentes entonces es imposible explicar los movimientos retrógrados de los planetas, como Marte, que se adelanta y atrasa de tal manera durante su recorrido aparente por la bóveda celeste, que los antiguos egipcios le llamaban "el que viaja para

[3] Refracción es el fenómeno que se observa cuando la luz pasa de un medio a otro; los rayos luminosos cambian de dirección.

[4] Un año luz es la distancia que recorre la luz en un año. Así, la velocidad de la luz es aproximadamente de 300000 km/s y un año dura 365.25 X 31, 556, 736 segundos, en el lapso la luz viaja una distancia de 9.467 billones de kilómetros; ésta es un año luz.

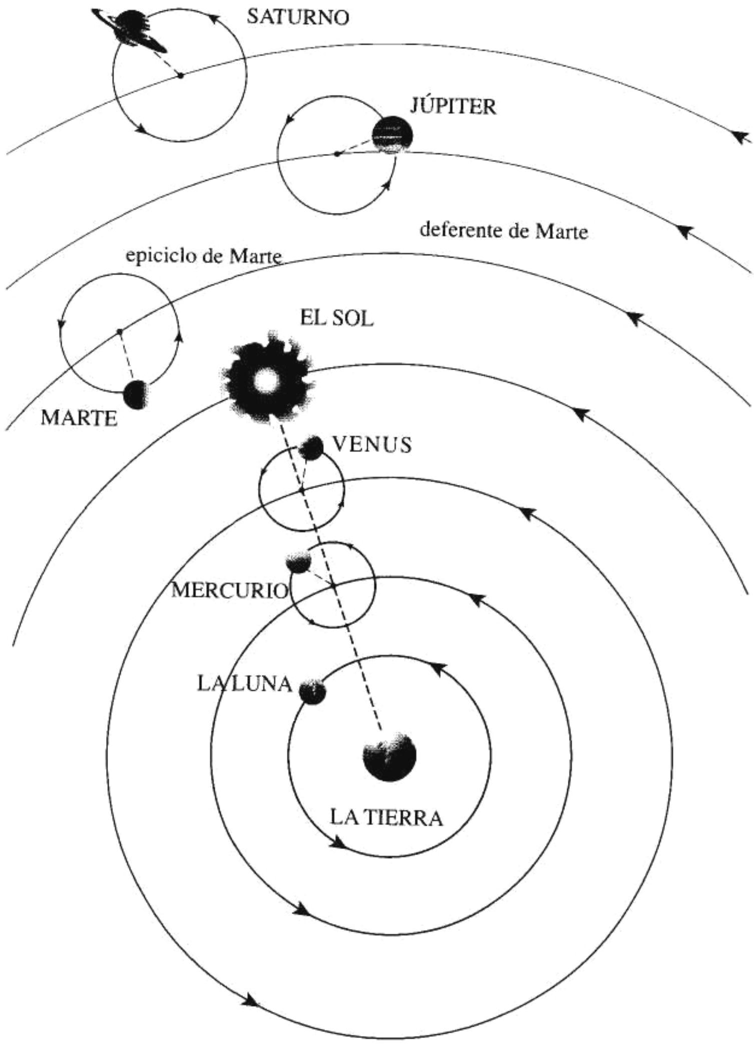

Figura II. 1. Modelo del Sistema Solar de Ptolomeo. Las órbitas grandes centradas en la Tierra son las "deferentes". En algún punto de una deferente está centrada una órbita más pequeña, llamada "epiciclo". Un planeta como Marte gira en torno a su epiciclo y éste en torno a la Tierra sobre su deferente. Los centros de los epiciclos de Mercurio y Venus son sincrónicos con el Sol. Sólo éste y la Luna carecen del epiciclo.

atrás" *(sekded-ef em khertkhet).* Para poder explicar este fenómeno, Ptolomeo tuvo que considerar los epiciclos. En la figura II.2 se muestra parte de una órbita de un planeta que sigue su epiciclo y su deferente, dibujando una línea, que en efecto, a veces retrocede.

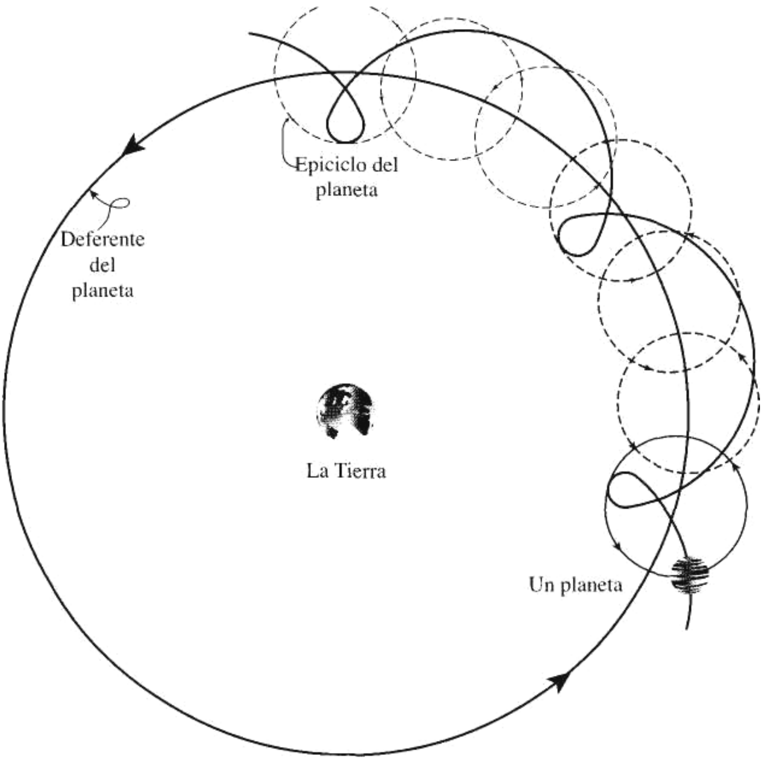

FIGURA II.2. Órbita epicíclica de un planeta, en el modelo de Ptolomeo. Al girar alrededor de la Tierra, se desarrolla un movimiento en el cual a veces parece como si el planeta se acelerara hacia adelante y otras, retrocede.

Lo peor de todo, es que el modelo debía ser predictivo, esto es, debía servir para predecir con exactitud, las posiciones de los planetas en algún instante del futuro, o del pasado y confirmarlo a través de las observaciones realizadas o por realizar. El problema se convirtió en un verdadero dolor de cabeza durante trece siglos, pues a pesar de contarse con una buena cantidad de datos y observaciones, siempre fallaba el pronóstico. De hecho, había que hacer ajustes mayores en las efemérides con cierta regularidad, pues al cabo de algunos años, los datos calculados discrepaban gravemente de las observaciones.

II.2. Roger Bacon (El amanecer de la ciencia)

Preso entre las redes de las supersticiones y las supercherías, hace ya mucho tiempo existió un hombre que se puso a aprender el conocimiento griego de Aristóteles y de los sabios de Alejandría y el árabe de Averroes y Avicena. Cualquier persona que en aquella época supiese algo acerca de la pólvora, que manipulara alambiques y hornos, que describiera aparatos voladores y máquinas que navegaran por debajo de las aguas, carros sin caballos y barcos que surcaran los mares sin velamen ni remos, fácilmente se convertiría en un sospechoso de herejía y merecedor de la cárcel. Ese hombre fue Roger Bacon.

Realmente es muy poco es lo que se conoce de este personaje de leyenda y muchas de sus premoniciones y vaticinios quizá sean parte de las mentiras e insidias que sus detractores crearon para malquistarlo ante los ojos del Santo Oficio. El "Doctor Amabilis", que era el mote, un poco en serio y un poco en burla, que le pusieron sus colegas, nació probablemente en 1214, aunque el lugar preciso pudo ser en Bilsey de Gloucester o en Ilchester, en el condado de Somerset, en Inglaterra. Y aunque nació en el seno de una familia acomodada, no aprendió a leer ni a escribir hasta cumplidos sus 40 años. Hay que darse cuenta que en aquella época, leer y escribir era un conocimiento que muy contadas personas podían adquirir y solamente se daba dentro de las órdenes religiosas. Aquellas personas que deseaban dar a sus hijos formación y cultura tenían como única opción meterlos a un convento para que siguieran una carrera religiosa y se ordenaran sacerdotes. Allí les enseñaban además, latín, astronomía y música.

Pues bien, aquel joven se pasó 39 años dedicado a otras actividades más dulces y agradables, hasta que sentó cabeza e ingresó al convento; uno de la orden de los franciscanos en Oxford. Se volvió un asiduo lector de Aristóteles, para lo cual se comprometió profundamente. Aprendió griego y luego de enterarse de los trabajos de Arquímedes, de Eratóstenes y de Apolonio de Pérgamo; después de conocer profundamente las ideas de Ptolomeo y la estrujante historia de Hipatia, se puso a aprender árabe para seguir la huella del conocimiento científico después de la trágica desaparición de la Biblioteca de Alejandría y el renacimiento de la ciencia en Bagdad y en Córdoba.

Parece ser que quien ejerció sobre Bacon una influencia importante, lo encauzó y lo alentó para cultivar y aprovechar su enorme inteligencia fue un tal Robert Grosseteste (1168-1253), quien a la sazón era el obispo de Oxford, profesor en su universidad y un importante erudito. Este hombre se percató de la gran potencialidad del pupilo y lo asesoró y encauzó por el camino de la ciencia y de la enseñanza.

En 1247 algo extraño le pasó a Bacon. Después de una larga enfermedad, al recuperarse ya no fue el mismo, ser sumiso y devoto, sino que se transformó en una persona agresiva y hosca, que creaba conflictos en todas partes. Sus superiores, al principio desconcertados por los cambios de conducta de Bacon, no supieron como tratarlo, pero pasado un tiempo no tuvieron más remedio que castigarlo y lo sometieron a una rígida disciplina, confinado en su celda y sin oportunidad para impartir cátedra. Entonces el fraile apeló ante el papa Clemente IV en una misiva, en la cual se quejaba de que, habiendo estado trabajando sen un ambicioso y amplio proyecto de recopilación de conocimientos científicos, con los cuales se beneficiaría grandemente la Iglesia, había sido olvidado, abandonado y escarnecido por todos y, que lo habían "enterrado vivo", sin posibilidad de proseguirlo. En su carta, hacía una lista de los temas a los que se había abocado, entre los que estaban, estudios sobre la óptica, sobre la alquimia y en la astronomía. Se trataba de una enciclopedia donde se recopilaba todo el saber científico de su tiempo, producto de las traducciones del griego y del árabe que había hecho a lo largo de años de trabajo paciente y agotador. El Papa se interesó grandemente por esa obra y de inmediato contestó, ordenándole a Bacon que terminara cuanto antes y le enviara su trabajo para mandarlo copiar. En un tiempo notablemente breve el hombre de ciencia envió al Papa tres libros: *Opus Majus Opus Minus* y *Opus Tertium*, en ese orden. En estos volúmenes, habla de los "desatinos de los magos", a quien tilda de charlatanes y establece por primera vez el método de investigación experimental, afirmando que es necesario dudar de principio de todo lo sabido y establecer un conjunto de etapas sucesivas, comenzando por separar el objeto de estudio de todo lo demás que pueda enturbiar su definición; luego, realizar una serie de experimentos que permitan dilucidar sin lugar a dudas sus propiedades físicas y sin invocar jamás a Dios para explicarlas, pues si bien es cierto que "Dios puede convertir un asno en árbol, jamás lo ha hecho, lo cual muestra a las claras que aunque, tiene el poder para hacerlo, deja al asno como asno y al árbol como árbol para que nosotros podamos reducirlos a su más pura esencia a través del conocimiento".

En su obra Bacon muestra las matemáticas desarrolladas por los árabes y menciona que ellas son el "alfabeto de la filosofía". Así mismo, resume todo el conocimiento acerca de la óptica, diciendo de ella que se trata de una ciencia "dulce y noble". Afirma que la luz no es una emanación de partículas sino una transmisión de movimiento (energía) y dice que haciendo pasar la luz a un medio refractivo "se pueden dar formas a los objetos y agrandarlos hasta que parece que los podemos tocar con la mano, aun cuando se hallen a una gran distancia. Así, desde lejos podemos leer letras pequeñas o contar partículas ínfimas". Toca el tema de la alquimia, mencionando los esfuerzos que se han hecho hasta su tiempo por hallar la "piedra filosofal"; aquélla que al tocar el plomo lo trasmuta en oro puro.

Hace referencia a las pesquisas de un tal Petrus Peregrinus de Marincourt, un cruzado que estuvo en Palestina, el cual descubrió la piedra llamada magnetita (el imán), con la cual se puede construir un sencillo aparato que al ponerlo a flotar en el agua, gira espontáneamente hasta colocarse en la dirección del Polo Norte; la brújula, que sería empleada doscientos años después por Cristóbal Colón en su viaje de descubrimiento del Nuevo Mundo.

Describe los sistemas planetarios de Ptolomeo y de Heráclito y menciona las grandes dificultades que presenta el primero, contra la sencillez del segundo, pero concluye que el sistema Heliocéntrico no es aceptable, pues las estrellas fijas no muestran paralaje alguno; esto es, que vistas en diciembre o en junio están exactamente en su misma posición, aun cuando deberían tener en apariencia posiciones diferentes, si la Tierra se desplazara en una órbita alrededor del Sol, pues observadas en invierno se verían en una situación muy distinta, que si se vieran en verano, ya que el punto de referencia estaría muy distante en ambos extremos. Obviamente, Roger Bacon cayó en la misma trampa que otros, cuando supuso que las estrellas fijas están a distancias mucho más cercanas de la Tierra de lo que en realidad ocurre.

Entre 1277 y 1279 fue condenado a prisión por los franciscanos, debido a ciertas sospechas de que estaba propalando conocimientos prohibidos por la Iglesia. Parece ser que la causa real de su condena no fueron sus publicaciones revolucionarias, sino los agrios ataques que lanzó contra los teólogos y los escolásticos, a quienes tachó de crédulos e inertes. No se sabe con certeza cuánto tiempo pasó en la cárcel. Su último trabajo lo publicó de manera incompleta en 1292. Se cree que murió en 1294 y que fue enterrado en la iglesia franciscana de Oxford, en Inglaterra.

III. Las esferas celestes

III. 1. COPÉRNICO

Mikolaj Koppernigk Waczenrode nació en Torun; una pequeña ciudad de Europa Oriental, que hoy pertenece a Polonia, el 14 de febrero de 1473. En el mundo ha sido conocido como Nicolás Copérnico que fue el nombre latinizado que él mismo adoptó cuando de joven viajó a Italia para realizar sus estudios profesionales y su doctorado. Se ordenó sacerdote en Roma y posteriormente, en 1503 se doctoró en la Universidad de Padua. Regresó a Polonia para encargarse de la parroquia de Frauenburg. Allí transcurrió su vida y allí murió en 1543.

Estando en el curato de Frauenburg, recibió una invitación del Papa en Roma para que se integrara a un equipo de muy alto nivel científico, a fin de corregir el viejo y desarreglado calendario juliano. Se trataba de establecer uno nuevo; ése que hoy por hoy rige con el nombre de "calendario gregoriano" en honor al papa Gregorio XIII que lo instituyó en 1583. Copérnico declinó humildemente la invitación pues adujo que a la sazón no contaba con conocimientos confiables y profundos acerca de las posiciones, ni las órbitas del Sol, de la Luna, ni de los planetas, para hacer las rectificaciones pertinentes al sistema ptolemaico. Prometió, en cambio, que se aplicaría de inmediato a hacer observaciones precisas y que sus resultados los enviaría a Roma en cuanto los hubiera confirmado y organizado.

En efecto, el joven Copérnico se dedicó con esmero a esta labor. Construyó una tabla ranurada, con una plomada y dos trasportadores: uno horizontal y otro vertical y con este sencillo instrumento, ayudado por su fiel discípulo y amigo Georg Joachim "Rháticus", inició un cuidadoso estudio de la Luna, de los planetas y del Sol. La atmósfera allá en el pueblito de Frauenburg se prestaba estupendamente para hacer observaciones astronómicas: llueve muy poco durante el año y la mayor parte se tienen días y noches límpidos y transparentes. Las estrellas y los planetas se observan fácilmente y la visión que se tiene es amplísima, pues a la redonda no hay obstáculos naturales que la entorpezcan. Así pues, noche tras noche, durante un periodo que se fue prolongando hasta treinta años, Copérnico realizó sus observaciones con la ayuda de su pupilo, la tabla ranurada y su buena vista. Con aquellos datos, se puso a determinar las deferentes y los epiciclos de los planetas y de la Luna, de acuerdo con el sistema de Ptolomeo.

Cabe aclarar que en aquel tiempo, a casi 1 500 años de haberse establecido, el sistema geocéntrico de Ptolomeo, había tenido que complicarse cada vez más, para hacer que las observaciones se ajustaran a ese modelo. Además de las deferentes y de los epiciclos, habían sido incorporados al mismo, nuevos elementos. Así, para explicar los cambios aparentes del diámetro solar a través del año, se había propuesto la idea del "ecuante"; éste era un movimiento anual del centro de la deferente de este cuerpo celeste. Así, en el transcurso de un año, este punto emigra desde el centro de la Tiemrra hasta un punto sobre un ápside y luego regresa al centro de la Tierra. En realidad, con este cambio del centro de un círculo, lo que se genera es una elipse, pero tal afirmación no podía hacerse porque ello implicaría que los senderos en el cielo no son tan perfectos como lo es el círculo y esto llevaría a polémicas de orden teológico que debían ser evitadas a toda costa.

Por si esta complicación fuera poca, a algunos planetas, como Marte, hubo necesidad de adscribirles, adicional mente, un movimiento extra, llamado hipociclo, superpuesto al de la deferente y el epiciclo, para ajustar las observaciones del modelo.

A Copérnico le molestaba la enorme complicación del sistema ptolemaico, en boga, para hacer predicciones más o menos confiables acerca de las posiciones de los astros al través de la bóveda celeste. Después de tanto trabajo de ajuste y de cálculo, tuvo que llegar a la idea que tanto parche, tanta superposición de círculos en círculos, en círculos, debía contener algún error de principio. Decidió entonces revisar el modelo teórico desde sus cimientos, así que se puso a estudiar el Almagesto de Ptolomeo. Imbuido de un afilado criticismo, llegó a establecer todo un conjunto de dudas razonables acerca de aquel trabajo. Por ejemplo, aquella prístina idea sobre la perfección del círculo, en relación con los movimientos de los cuerpos celestes, en realidad hacía mucho tiempo que se había traicionado. Al dotar a un planeta de movimiento circular, a lo largo de su epiciclo y luego, dotar al centro del epiciclo de un movimiento circular a lo largo de su deferente, el movimiento resultante ya no tenía que ver con el círculo. La añadidura de hipociclos y ecuantes daba completamente al traste con la idea de las figuras perfectas de Dios.

Le llamó poderosamente la atención a Copérnico, las referencias que el propio Ptolomeo hizo de Aristarco de Samos (265-? a.a), así que se puso a investigar y consiguió un antiguo libro, donde el autor exponía ligera y genéricamente la tesis de aquel astrónomo griego y de cómo había establecido un sistema planetario heliocéntrico, basándose en las ideas de otro personaje anterior a él: Heráclito de Ponto (siglo IV a.c).

Al principio las ideas heliocéntricas le parecieron absurdas y

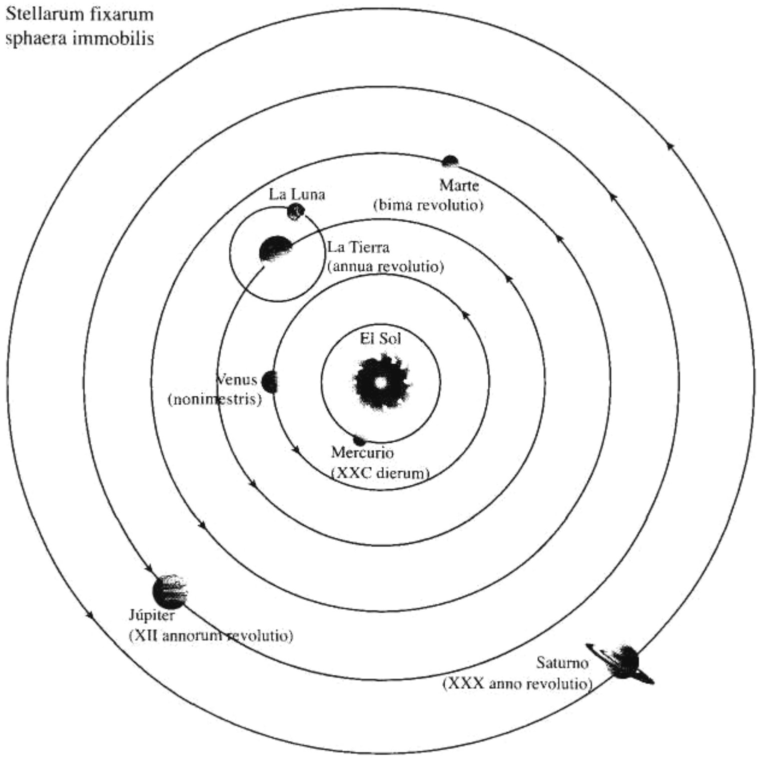

Figura III. 1. Sistema planetario heliocéntrico de Copérnico.

repugnantes a Copérnico, sobre todo por la herejía implícita que significa el poner a la Tierra fuera del centro de la Creación. Sin embargo, casi como un juego, se dio a la tarea de ubicar a la Luna y los planetas, incluida la Tierra en las posiciones sucesivas que él había observado durante aquellos años, pero en relación al Sol, situando a éste en el centro, tal como lo habían sugerido los griegos del siglo III y IV a.c. Colocó a la Tierra en tercer lugar, después de Mercurio y Venus y después de ella a Marte, el esquivo planeta rojo, a Júpiter y a Saturno.

El resultado de ese trabajo fue el sistema heliocéntrico, como se muestra esquemáticamente en la figura III. 1. Copérnico siguió pensando en las esferas (*orbis*) de Ptolomeo; esas superficies invisibles donde viajan los planetas en su movimiento alrededor del centro del sistema, ocupado ahora por el Sol. El sistema heliocéntrico, a diferencia del geocéntrico de Ptolomeo, resultó de una inefable belleza y simplicidad. Todos los planetas pronto, quedaron ordenados y en un movimiento armonioso y suave alrededor del Sol. Ni epiciclos, ni ecuantes, ni excéntricos; todos fueron simples círculos.

A lo largo de treinta años de observaciones y medidas, hechas con aquella tabla ranurada que mandó construir desde el principio de su estancia allá en Frauenburg, Copérnico solo había acumulado un muy pequeño acervo de datos realmente dignos de ser tomados en cuenta. Los demás estaban mal, traían algún error, algún sesgo, que los volvió completamente inútiles para su uso. En total el sabio polaco sólo había recabado veintisiete datos precisos, dentro de un margen razonable de exactitud, tomando en cuenta lo rudimentario de su equipo. Veintisiete observaciones sobre Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno, fueron la magra cosecha de casi treinta años de trabajo. Al vertir los datos en el sistema heliocéntrico, fueron apareciendo sin lugar a dudas, que todo estaba bastante bien estructurado. Se puede afirmar que las posiciones de los planetas en efecto, fueron dibujándose en forma de círculos concéntricos alrededor del Sol. Sin embargo, es necesario aclarar también, que, pese a su gran atractivo estético, la carencia de datos confiables impedía hacer de ese un modelo predictivo acertado. De ningún modo se puede afirmar que el de Copérnico haya quedado mejor que el ptolemaico. Había que tener muy buena disposición de ánimo para creer que aquellos tres puntos en un pliego de papel correspondían, por ejemplo a otras tantas posiciones de Marte a lo largo su órbita circular con el Sol en el centro y si de esta suposición se deseaba inferir alguna otra posición del planeta en una fecha futura, el error era al menos tan importante como el que habría cometido de haber usado las tablas ptolemaicas de *El Almagesto*.

Tal vez fue por esa gran incertidumbre y la pobreza de los datos, que Copérnico se resistiera tanto a publicarlos. Sus amigos tuvieron que instarlo, e incluso apremiarlo para que diera a la luz sus resultados.[1] De hecho, el primer esquema completo de su sistema planetario fue impreso cuando él ya hacía algunos años que había muerto, en un pequeño libelito titulado *Commentariolus*. Sus amigos más cercanos habían obtenido unos cuantos ejemplares de él años antes, en forma manuscrita. El trabajo lo había hecho su fiel discípulo y amigo Georg Joachim "Rhaeticus" y lo había distribuido, aun con la reticencia de Copérnico. Este curioso y excéntrico personaje es el responsable de que las ideas del gran sabio de Thorn

[1] Hay una muy interesante carta de Nicolás Schonberg, cardenal de Capua a Nicolás Copérnico donde lo alienta para que publique su obra, pues juzga que el sistema heliocéntrico será de grandísima utilidad para la ciencia (1536).

hayan trascendido, pues de otra manera, nunca hubieran sido publicadas. Copérnico nunca se distinguió por su gran deseo de comunicar sus hallazgos a otros, ni mucho menos.

Georgjoachim "Rhaeticus" (1514-1574) llegó a Frauenburg en 1539, buscando conocer a Copérnico, que a la sazón disfrutaba ya de una pequeña fama a nivel local como sabio y como genio científico. Después de mucho insistirle, finalmente obtuvo la autorización de su maestro para publicar parte de su trabajo. El discípulo hizo todo: ordenó los resultados, que eran una maraña de hojas de papel acumuladas aquí y allá sin orden ni concierto. Redactó el libro, consiguió al impresor y finalmente lo editó. Ese primer libro fue titulado *Narratio Prima* y salió a la luz en 1540. Tanto éxito tuvo la obra que al año siguiente hubo que hacer una segunda edición, la cual, nuevamente se agotó. La *Narratio Prima* fue como una sonda exploradora que le dio a Copérnico seguridad y confianza para avocarse a la publicación de la obra completa.

Nuevamente Rhaeticus se dio a la tarea de manuscribir el libro. De acuerdo con su maestro, le dio el título de *De Revolutionibus Orbium Caelestium Libri VI.* ("Sobre las revoluciones de las esferas celestes", en seis libros). Copérnico le dictó el prefacio de los seis libros", así como un párrafo introductorio sobre las hipótesis del trabajo. Un asunto familiar imprevisto obligó a Rhaeticus a suspender su trabajo de compilación y redacción; si bien el libro estaba prácticamente terminado para principios de 1543, aún faltaban algunos detalles: corrección de errores, adendos de último minuto y, lo más latoso de todo, llevarlo al impresor, regatear el precio y atosigarlo hasta recibir la edición completa. El fiel Rhaeticus partió de Frauenburg dejando la responsabilidad a otra persona.

Andreas Osiander (1498-1552) se había incorporado recientemente al equipo de trabajo de Copérnico. Era un individuo extraño, con una personalidad obscura que inspiraba desconfianza a primera vista. Lo más raro era que Osiander había abrazado el protestantismo de Lutero con fanatismo y, a pesar de ello, había insistido en trabajar al lado del canónigo católico Copérnico y de su no menos católico asistente Rhaeticus. Tampoco queda claro por qué fue aceptado CR el seno de aquel cerradísimo círculo de trabajo al que, por lo visto, sólo unos cuantos habían tenido la oportunidad de penetrar. El hecho es que, urgido por su conflictiva familiar, Rhaeticus dejó en manos de este personaje la grave responsabilidad de publicar las *Revoluciones de las esferas celestes.* A la sazón, el gran astrónomo de Thorn se hallaba enfermo y recluido en la casa parroquial, así que era cosa de sacar aquel libro a luz lo más pronto posible, pues todo mundo temía un desenlace fatal en cualquier momento.

Osiander terminó la obra y de inmediato partió a Nürnberg para publicar el trabajo. Le preocupaba sobremanera la acogida que fuera a tener aquella obra, sobre todo por las revolucionarias implicaciones que habría de provocar en la concepción religiosa del Mundo. En un acto absolutamente reprobable, escribió al final del libro un párrafo extenso sobre "las hipótesis del libro", donde Osiander aclaraba que su sistema planetario, en modo alguno debía tomarse como la verdad, sino únicamente como una hipótesis de trabajo con la cual la descripción de movimiento de los planetas podía hacerse en forma extraordinariamente simple y clara.[2] Trataba, quizá, de proteger a su maestro ante posibles ataques de la jerarquía religiosa. El hecho es que el libro, con esas hipótesis apócrifas, sin firma, entró a la imprenta y así fue editado.

Tal vez aquellas líneas hayan servido como suavizantes de opiniones adversas que pudieran haberse generado como consecuencia de la teoría heliocéntrica. Lo cierto es que Copérnico siempre gozó de gran aprecio y estimación de la Iglesia católica y su libro, cuando por fin salió de la imprenta, recibió una excelente acogida. La única expresión contraria a Copérnico y sus ideas ha sido aquella que tuvo Martín Lutero (1483-1546) en una comida con sus cercanos colaboradores, en la que curiosamente estuvo presente Andreas Osiander en persona. Allí se dice que Lutero se refirió a aquel como "un astrónomo advenedizo que sostiene que no es la Tierra, sino el Sol el que está en el centro del Universo y que con sus ideas puede causar muy serios problemas...".

Finalmente, se imprimió el libro. A toda prisa Osiander tomó el camino de regreso desde Nürnberg y llegó a Frauenburg al atardecer del 24 de mayo de 1543. Copérnico agonizaba. Se dice que alguien puso en manos del moribundo el imprimátur de las *Revoluciones de las esferas celestes;* aquel anciano solamente lo recibió y lo hojeó un poco, ya sin fijar su vista en el texto. Pocos minutos después dejó de existir.

Casi cuarenta años después de la muerte de Copérnico, el papa Gregorio XIII reformó el calendario que desde la época de Julio César había regido al mundo. Aquel viejo calendario juliano, había sido tomado de los egipcios, aceptando que un año tiene una duración de 365.25 días; es decir, trescientos sesenta y cinco días y seis horas. El papa Gregorio XIII ordenó que el día después del 4 de octubre de 1583 fuera el 15 de octubre de ese mismo año y que en adelante, un año tuviera una duración de 365 días, 5 horas, 48 mi-

[2] Fue Johannes Kepler (1571-1630) quien identificó las hipótesis como apócrifas y descubrió al autor de ellas. Calificó la difamación de Osiander como de "absurda ficción".

ñutos y 46 segundos; es decir, que los años, de ahí en adelante fueran más cortos que el calendario juliano por 11 minutos y 14 segundos. Desde entonces ése es el calendario que rige en el mundo, conocido como el calendario gregoriano. En realidad, en aquel entonces la medida del tiempo aún no se hallaba tan refinada como para tomar en cuenta a los segundos; ni siquiera se había definido el segundo en aquellas fechas. Para hacer funcionar el calendario, el papa Gregorio XIII ordenó que, al igual que en el calendario anterior, cada cuatro años se añadiera un día (el 29 de febrero) en los bisiestos, pero estableció que en los inicios de siglo, los años 1 700, 1800, etc., no fueran bisiestos, excepto que fueran un múltiplo de 400 como 1 600 o 2 000, sin embargo, no se considera bisiesto el año 4000.

Las ideas de Copérnico fueron puestas al servicio de la Iglesia para ayudar al papa Gregorio XIII a elaborar el calendario. Un entusiasta discípulo de aquel gran descubridor fue quien llevó a cabo la modificación anuaria. Erasmus Reinhold (1511-1553), un muchacho talentoso y apasionado de los cálculos matemáticos, se puso a tomar notas y a hacer cálculos matemáticos en cuanto tuvo en sus manos copias de los *Revolutionibus Orbis.* Después de siete años de ingratas y desagradables sesiones de cálculo, de trazar figuras y de comparar resultados con observaciones, finalmente Reinhold terminó sus "Tablas Prusianas". En ellas, con cuidado, el autor estableció las posiciones de los planetas conocidos y de la Luna y de la Tierra, en torno al Sol. Fueron éstas tan superiores a todo lo que se conocía a la fecha, que muy pronto se convirtieron en las más utilizadas de Europa. Cuando Gregorio XIII estableció el calendario en 1583, confió en las tablas de Reinhold a pie juntillas y aunque el autor de las tablas prusianas no mencionó el hecho de que para su confección hubiera hecho uso del sistema copernicano, fue evidente para los conocedores de la época que semejante belleza y precisión de los datos solamente pudo haber provenido de este sistema. Así, se puede afirmar que, contrario a la opinión generalizada, en el sentido que la Iglesia se opuso a las ideas de Copérnico, fue ella quien dio el gran espaldarazo a su teoría con la modificación del 15 de octubre de 1583 al calendario juliano.

III.2. TYCHO BRAHE

Sólo tres años habían pasado desde la muerte de Nicolás Copérnico, cuando nació Tycho Brahe. El 14 de diciembre de 1546, en el castillo de Elsinor, en Knudstrup, Dinarmarca, nacieron dos gemelos en el primer alumbramiento de la madre. Uno de ellos nació muerto y el otro, Tycho, fue secuestrado por su tío Joergen, vicealmirante de la flota del rey Federico II. El secuestro fue realizado con la anuencia del padre, pues tiempo atrás, en una tertulia familiar generosamente acompañada de cerveza, ambos, el padre y el tío habían acordado que al nacer el primogénito, de ser varón, sería adoptado por el vicealmirante, ya que su esposa no podía tener bebés. Así, Tycho resultó ser un niño privilegiado desde su nacimiento, pues además de tenerlo todo, comodidades, lujos, sirvientes y la mejor educación que podía recibir un infante en aquella época, tuvo la suerte adicional de tener dos padres y dos madres que lo adoraban y que se llevaban de maravilla entre sí.

No obstante, mientras "Tyge", como le llamaban cariñosamente, era aún un joven estudiante, su padre adoptivo, Joergen, conoció un prematuro y glorioso final, dejándolo en la semihorfandad. Resulta que el vicealmirante acababa de regresar de una feroz batalla naval contra los suecos, que había sido ganada con muy pocas pérdidas materiales y de vidas por la armada danesa. Llegaba el rey cabalgando, vestido con su traje de gala, seguido inmediatamente por el tío, para entrar al castillo real y celebrar la victoria; de pronto, al pasar sobre el puente levadizo que daba acceso al castillo, algo asustó al real caballo, que se encabritó. Federico II salió disparado de su cabalgadura, y cayó al agua. Joergen, el vicealmirante, ni tardo ni perezoso, se lanzó valientemente detrás de su rey, pues sabía que el soberano no sabía nadar. Tomándolo con firmeza del cuello nadó hasta la orilla y lo rescató. Una semana después, el bueno y valiente del tío Joergen murió de una pulmonía. Las exequias fueron a todo lujo; se le dio en forma póstuma el rango de almirante y héroe de Dinamarca. El rey Federico II dio la orden de que, de ahí en adelante nada faltara a la viuda ni al hijo adoptivo.

Tyge era un muchacho vivaz, inteligente, meticuloso, profundo en sus razonamientos. Hablaba siempre imprimiendo en todo lo que decía un fuerte acento de autoridad. Sus estudios iniciales los hizo en la universidad luterana de Copenhague, recibiéndose después de haber cursado las siete artes liberales: el trivium, consistente en gramática, retórica y lógica y luego el quadrivium, con geometría, astronomía, aritmética y música. Pero lo que más gustó al joven fue la astronomía experimental, que no se enseñaba por aquellas latitudes. Se sentía frustado; de hecho, irritado, por la frivolidad y la superficialidad de la existencia de la clase acomodada que sólo piensa en divertirse. Frivolidad de los nobles que piensan que todo lo merecen y cuya vida transcurre, según sus propias palabras, entre caballos, perros y lujos. Por contraste, Tycho sentía una profunda admiración ante la solidez y la maravillosa ingenuidad y limpieza de los conocimientos astronómicos, Cuando aún no había cumplido los catorce años había presenciado un eclipse parcial de Sol y le había impresionado sobremanera la precisión con que había sido pronosticado para aquella fecha, a la hora y minuto en que realmente ocurrió.

Después de tres años en Copenhague su tío, que aún vivía consideró que ya era tiempo que el muchacho fuera a otra universidad en el extranjero, para foguearse y ampliar sus conocimientos. Así, al lado de su preceptor, lo envió a Leipzig y después a Wittenberg, a Rostock y a Augsburg. A los veintiséis años regresó a Copenhague cargado de conocimientos y de aparatos que fue adquiriendo aquí y allá, como un enorme cuadrante de latón y madera de 11 metros de diámetro, que tenía indicadores de latitud con precisión hasta de décimas de un minuto, y que se manejan mediante un sistema de poleas y cuatro manubrios giratorios.

Ya de regreso de sus estudios de posgrado por el extranjero fue cuando ocurrió la desgracia aquella del caballo encabritado, del rey con dotes de astronauta surcando los cielos y "amarizar" y del tío Joergen adelantándose por siglos a Tarzán de los monos, lanzándose a rescatar al soberano y morir poco heroicamente de una pulmonía fulminante. Federico II, por el agradecimiento al vicealmirante otorgó por decreto al joven Tyge y a perpetuidad, la isla de Hven, cerca de Copenhague (1576), con 5 km de largo y una superficie plana de cerca de 500 ha y ordenó así mismo, que a expensas del erario danés, se construyera un observatorio astronómico perfectamente dotado para que el muchacho realizara su trabajo. A éste lo dotó con una muy generosa renta anual y le concedió varias sinecuras. Ordenó que los habitantes de la isla, de allí en adelante, dependieran del astrónomo y que sus impuestos lo pagaran a éste para ayudarlo a sostener el observatorio-castillo de Uraniborg —que así fue como lo llamó Tycho, quedando en calidad de súbditos del científico.

Tycho se instaló en el castillo y vivió veinte años, literalmente a cuerpo de rey. Se hizo rodear de un ejército de sirvientes y ayudas de cámara y todas las noches celebraba banquetes donde abundaban las más ricas y variadas viandas. La isla de Hven brillaba con las luces de cientos de antorchas que alumbraban el castillo-observatorio de Uraniborg y a varios kilómetros se podía percibir los sonidos de la música ejecutada por los citaristas y laudistas de aquella corte. Para amenizar las tertulias, Tycho se hizo acompañar siempre de un bufón enano llamado Jepp, que lo desternillaba de risa con sus ocurrencias y sus payasadas. La cerveza corría por raudales, así que la amable concurrencia regresaba con mucha frecuencia a sus aposentos ya bien entrada la noche, en estado absolutamente deplorable, colgados como estola, sobre los hombros de los sirvientes, o ensayando toda suerte de arabescos sobre los pasillos y las escalinatas del castillo. En el gran salón comedor, donde ocurrían aquellos pantagruélicos banquetes, había siempre una buena cantidad de perros obesos e inútiles que estaban allí para devorar las sobras de carne y roer los huesos a medio comer que lanzaban los comensales por encima de sus hombros, sin pudor ni respeto. Como toque de distinción a todo este fasto, Tycho Brahe crió un alce desde que era un pequeño cervatillo, cuando lo dejó huérfano de madre en una de las cacerías que organizó por los bosques cercanos. El alce creció dentro del castillo y se convirtió en un animal totalmente dócil y educado. Durante los banquetes, la mascota aquella se acostumbró a beber cerveza en una palangana que el astrónomo, su amo, situaba en el piso a un costado de la mesa, en el lado derecho de la cabecera, donde se sentaba a presidir sus sesiones sibaríticas. El pobre alce muy pronto se convirtió en un alcohólico irredento, bebía y bebía hasta quedar totalmente borracho; con sus cuatro patas semiabiertas y la cabeza gacha; tambaleante y estulto; eructando los gases de la cerveza y babeando profusamente, ante la risa de la gente. El desafortunado ungulado no había terminado de curarse la "cruda" de la noche anterior, cuando ya estaba nuevamente sumergido en los vapores etílicos de la siguiente, viviendo en un mundo ajeno en todos los aspectos, a lo que debió ser su vida normal. Una noche, cuando se encontraba de nuevo en el quinto cielo de Baco, sus bien educados esfínteres lo traicionaron y ante el asombro de los allí presentes y la consecuente ira del anfitrión cometió una abominable falta a las buenas costumbres de la corte. A una orden del señor, los pajes tomaron al infeliz alce de los cuernos y otros lo empujaron por las grupas hasta sacarlo del comedor por la fuerza. Luego, tratando de echarlo fuera del castillo para que con el cierzo se le depejara la bóveda cornil, lo llevaron por los pasillos hasta llegar a una escalera. Allí lo empujaron violentamente y sin piedad, haciendo que el pobre animal cayera dando tumbos y vueltas. Al llegar a la base de la escalinata ya no pudo levantarse; se había fracturado sus patas delanteras. Hubo que llamar al encargado del establo para que acabara con la vida de ese desgraciado y a rastras sacara su cadáver. A pesar de todo, Tycho sintió profundamente la muerte del que había sido su mascota por más de diez años; ordenó que fuera enterrado atrás del observatorio, en medio de unos setos.

Años atrás, cuando Tycho Brahe aún no contaba con 17, en agosto de 1563, el joven danés hizo la primera de muchas observaciones astronómicas, de entre miles que habría de hacer en su vida. El 24 de ese mes, viendo al cielo con la ayuda de un simple compás de dibujo, encontró que Júpiter y Saturno estaban tan juntos que así, a ojo, no podía apreciarse separación alguna entre ellos. Su tío materno Steno Belle le había obsequiado recientemente una copia de las tablas prusianas de Reinhold y al acudir a ellas para ratificar la conjunción de los planetas, encontró con gran sorpresa que tenían una equivocación de un mes en esa predicción.

A la edad de 20 años, mientras aún era estudiante en la Universidad de Rostock, en un baile que se había celebrado en casa de uno de sus profesores, se hizo de palabras con un compañero de estudios que pretendía ser mejor matemático que él. La discusión subió de tono y en un momento dado dejaron la ciencia y la inteligencia para pasar a la técnica y la enjundia. Se retaron a duelo. Ambos comelitones salieron de la casa del profesor seguidos por sus hinchas y se fueron al jardín posterior. Allí, en medio de la más absoluta obscuridad, se trenzaron en un feroz combate con sables. A la siete en punto de la noche del 29 de diciembre de 1566, con un golpe un tanto despistado y sin demasiado efecto ni coraje, el sable del adversario le rebanó la nariz por la mitad, dando con ello término a la disputa.

La ventaja de aquel duelo fue que nunca se llegó a dilucidar quien, en efecto, fue el mejor matemático, así que tanto el vencedor, como el vencido pudieron salir del trance alardeando de sus extraordinarias dotes en ese arte. Por otra parte, Tycho salió de la justa con una cicatriz de guerra que de allí en adelante lo hizo inconfundible; una mancha adicional en su piel de tigre, que le dio fama de valiente y osado. Hubo necesidad de llevarlo de inmediato con un cirujano para que le removiera los huesecillos astillados y los pedazos de tejido sueltos. Toda la parte superior de su nariz tuvo que ser extirpada, dejándolo con un hueco de muy feo aspecto. Una vez que la herida cicatrizó, meses después de aquel desafortunado encuentro, Tycho se mando fabricar con una aleación de oro y plata una prótesis. Con ella cubría el hueco desagradable a la vista. Adicionalmente mandó preparar un ungüento que llevaba siempre en una pequeña caja como de rapé y que aplicaba a su nariz frecuentemente para aliviar la resequedad y la irritación que le producía aquel cuerpo extraño en su mutilado apéndice nasal. Tal vez él nunca lo supo, pero el orfebre que le hizo la áurea prótesis, igual como había ocurrido dieciocho siglos atrás con Hierón en la lejana isla de Sicilia, le robó parte del oro con el cual supuestamente fabricó la nariz y añadió en vez de él una cantidad de cobre. La diferencia fue que aquí el engaño pasó inadvertido. Ni Tycho, ni sus parientes se percataron del robo jamás. Fue hasta 1901, en el 300 aniversario de su muerte, que se descubrió, cuando fue abierta la tumba del astrónomo y sus restos exhumados; entonces se observó que su cráneo presentaba una mancha de color verde, a la altura de las fosas nasales, debida al óxido de cobre. A esas alturas el danés ya no estaba para quejarse ni el ladrón para responder, ni las leyes para actuar, así que ese fue un crimen perfecto.

Por otra parte ha quedado siempre la impresión de que aquel asunto de la nariz de oro del buen Tyge no tuvo la mayor importancia y, sólo fue un hecho que puso en el rostro un signo indeleble de la personalidad. La verdad es que ese acontecimiento pudo ser muy bien el que marcó el principio del fin del personaje, pues esa herida siempre abierta le ocasionó un proceso infeccioso que le atacó particularmente a los riñones. En los cuadros y retratos que se tienen de él se observa una hinchazón alrededor de los ojos, en los párpados inferiores y superiores, que es signo de un problema renal. Tal vez los órganos filtrantes del astrónomo sufrieron de allí en adelante un continuo bombardeo por las bacterias que proliferaban fatalmente en el hueco de la nariz y, debido a la carencia natural de defensas, sus riñones eventualmente fueron siendo invadidos también por los microbios, ocasionando una pielonefritis crónica, que a la postre lo llevó a la tumba.

En la noche del 11 de noviembre de 1572, Tycho volvía a pie de casa de un tío suyo: Steno Belle, con quien había pasado la tarde hablando de astronomía, cuando levantó la vista al cielo y descubrió en la constelación de Casiopea una estrella más brillante que Venus, en un sitio donde antes no había una estrella visible. Días después, la intensidad de la luz de esa estrella aumentó aún más hasta el punto en que pudo verse a la luz del día. Durante dieciocho meses el espectáculo pudo ser visto en todo el hemisferio norte, hasta que desapareció así como se inició. Fue un acontecimiento que revistió una importancia enorme, pues puso en tela de juicio la doctrina cristiana básica al contradecir el aserto de que el Universo es inmutable. Tomando como referencia la posición de otras estrellas fijas, mostró sin lugar a dudas que ésta; la que de pronto había aparecido en el cielo, pertenecía a la misma clase que las otras; esto es, que no se hallaba dentro del sistema de planetas, sino en la "octava esfera", donde están las fijas. Al año siguiente de aquel 1574 en que desapareció finalmente la "Nova", publicó su primer libro *De Stella Nova,* con una exacta descripción de sus observaciones sobre la estrella nueva, así como del instrumento que usó para realizarlas. Con este reporte, de pronto, se volvió famoso, debido al detalle con que describió sus observaciones, que no dejó ni el más leve rastro de duda sobre la validez y exactitud de sus conclusiones. Ese libro constituye el primer reporte científicamente riguroso y preciso en la ciencia.

Veinte años pasó Tycho en la isla de Hven, durante ese lapso, observando el firmamento noche tras noche, anotando cuidadosamente sus observaciones, pudo compilar una lista de 777 estrellas fijas y construir un mapa del cielo. Así mismo, estableció con toda precisión las posiciones de los planetas Mercurio, Venus, Júpiter y Saturno al través de la bóveda celeste, hasta tener una lista que le permitió trazar sus trayectorias, con respecto a la Tierra, con una exactitud nunca antes alcanzada, de menos de un minuto de arco. El planeta Marte siempre lo desconcertó por su forma de comportarse tan errática, con adelantos y retrocesos inexplicables. Y aunque lo observó con igual esmero y cuidado que los otros, siempre quedó desconcertado por sus resultados, dudando de sus propias observaciones.

Con los datos recabados, generó su propio modelo del sistema planetario. Hasta sus manos había llegado, tiempo atrás, una copia del *Commentariolus* de Copérnico, donde el astrónomo polaco propuso el sistema heliocéntrico, pero al confrontar sus medidas con las que pronosticaba éste, halló una enorme discrepancia y ello le hizo dudar de este esquema planetario. Las posiciones de los planetas evidenciaban errores tanto más grandes o al menos iguales que en el sistema ptolemaico. Las órbitas circulares que proponía Copérnico alrededor del Sol no ajustaban con las trayectorias que el había obtenido. Así, tomó la decisión de rechazar el sistema heliocéntrico y propuso uno propio.

El sistema geocéntrico de Tycho Brahe consistía nuevamente en poner a la Luna, al Sol y al resto de los cuerpos celestes en órbitas alrededor de la Tierra. Sin embargo, no lo hizo de la misma manera como Ptolomeo. Él introdujo un detalle con el cual las trayectorias retrógradas de Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno podían ser explicadas sin necesidad de todos los artilugios y remiendos que se habían puesto al viejo sistema. Para tomar en cuenta todas las peculiaridades de estos cuerpos celestes, Tycho propuso que los planetas, de Mercurio a Saturno giraran en torno al Sol, tal como Copérnico había establecido, pero el Sol mismo, al igual que la Luna se movían alrededor de la Tierra en órbitas circulares. Así, el sistema surgió con todas las ventajas del modelo de Copérnico, con los planetas girando a su alrededor. Los movimientos "raros" de avance y retroceso se explicaban igualmente como resultado de las posiciones relativas de los cuerpos celestes con referencia a la Tierra, de manera que todo parecía tomar su lugar en forma natural y lógica. Las estrellas lejanas; las llamadas estrellas fijas también estaban colocadas en una esfera centrada en la Tierra, a una gran distancia, muy por afuera de la última órbita, la de Saturno, ocupando el octavo sitio en este sistema.

Las irregularidades de Marte desazonaban a Tycho Brahe y le obligaron a dejar su modelo planetario sin publicación. Ese detalle fue el causante de que pospusiera indefinidamente echar a la luz pública el sistema y toda su vida se la pasó tratando de hallar alguna explicación que le permitiera salvar el obstáculo. Nunca lo consiguió. Su obra, su creación quedó guardada con todos sus planos, cálculos y datos en una gaveta de su cubículo de trabajo y solamente la mostraba a sus visitantes y amigos en ocasiones especiales. Uno de esos fue al matemático de la corte imperial de Checoslovaquia, un individuo de apellido Ursus, que años después publicó el sistema de Brahe como propio, con la consiguiente ira del danés.

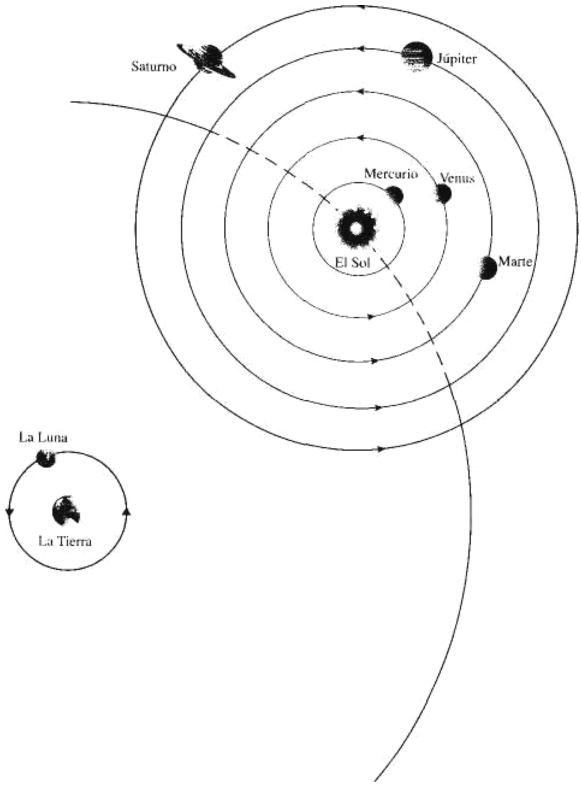

Figura III.2. Sistema planetario de Tycho Brahe. Coloca la Tierra al centro y propone que la Luna y Sol orbitan alrededor de ella en trayectorias circulares. Los planetas Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno se mueven a su vez alrededor del Sol siguiendo órbitas circulares. Aunque aparecen en la figura, las estrellas fijas quedan en la "8a esfera", esto es, más allá de la última órbita, la de Saturno, centrada también en el planeta Tierra.

En 1588, el rey Federico II de Dinarmarca murió y lo sucedió al trono su hijo, Christian IV. Aquel monarca que había ayudado tanto a Tycho, aquel que le había obsequiado la isla de Hven, aquel que tanto había apoyado al astrónomo, desapareció y con él, desafortunadamente desaparecieron las sinecuras y las canonjías que había gozado tantos años el genio danés. El nuevo monarca, ajeno a la gratitud que había animado a su padre, después de aquel terrible accidente cuando cayó de su caballo y fue rescatado por el padrastro de Tycho y por el cual había muerto, no halló motivos para seguir financiando la investigación y decidió cortar toda ayuda y recuperar para la corona danesa la isla, con todas sus instalaciones. Así, tras veinte años de excelente labor, el buen Tycho Brahe, ya cincuentón, tuvo que abandonar el castillo de Uraniborg. Con un séquito de veinte personas, entre ayudantes, sirvientes y su bufón particular Jepp, tomó las de San Fernando y se puso a conseguir trabajo en otra parte.

Tras deambular por varias ciudades europeas, finalmente consiguió un excelente puesto precisamente en Checoslovaquia, como matemático imperial en la corte de Rodolfo II. El rey había despedido a aquel personaje, Ursus, de oscuro pasado y aprovechó la noticia de que Tycho se hallaba cesante para tenerlo en su corte. Le asignó un fantástico castillo en el poblado de Benatek, a 35 km al noroeste de Praga, para que lo acondicionara como observatorio y allí pudiera proseguir sus investigaciones. Asimismo, lo dotó con un magnífico presupuesto, con el cual el astrónomo pudo adquirir aún más equipo y contratar a otros investigadores y asistentes. Tycho Brahe aprovechó la oportunidad y de inmediato se trasladó a ese lugar, instaló su observatorio e hizo traer a otros astrónomos; lo mejor de lo mejor, para establecer el más importante centro astronómico del mundo de aquella época.

Hacía ya buen tiempo que una nueva luz había comenzado a brillar en el ámbito científico de Europa. Un joven talento se había revelado con sus escritos sobre los planetas; un individuo genial, agudo, audaz, que había propuesto explicaciones atractivas sobre sus movimientos y sus órbitas. Ese talento era el alemán Johannes Kepler. Desde dos años antes de la llegada de Tycho a Benatek, había comenzado a tener una relación por correspondencia con este astrónomo, así que ante la oportunidad, lo invitó a unirse a su equipo de trabajo. El 4 de febrero de 1600 llegó Kepler a Praga y se conocieron los dos gigantes. Este, cumpliría en mayo 29 años, en tanto que el danés acababa de cumplir el diciembre anterior 53. El primero, un torbellino de ideas, un carácter irascible y voluntarioso, el otro, un tirano taimado y tranquilo, acostumbrado a dar órdenes, a manejar gente. Kepler, un plebeyo de origen miserable y lleno de achaques psicosomáticos, Tycho, un burgués rollizo, de cuna noble y con una enfermedad renal avanzada que muy pronto lo llevaría a la tumba. De hecho, al conocerse, le quedaban escasamente dieciocho meses de vida, así que aquel encuentro por muy poco estuvo a punto de no hacerse.

El 13 de octubre de 1601, Tycho Brahe acudió a una cena en Praga, en donde corrieron abundantes cantidades de cerveza, allí, en la animada conversación con los comelitones, el astrónomo retuvo sus aguas mucho más allá de lo que exigía la cortesía y la etiqueta. Una carga brutal para sus ya de por si deteriorados riñones. Al beber más y más, sintió que la tensión en su vejiga se incrementaba y su cintura comenzó a dolerle, pero puso la educación por delante de sus urgencias... Cuando llegó a casa fue incapaz de orinar. Tras cinco noches de sufrimiento y agonía, entró en un delirio y el 24 de octubre murió. Esa noche, en su seminconsciencia, repitió varias veces: "que no parezca que he vivido en vano...".

III.3. JOHANNES KEPLER

En uno de esos días tan lejanos del siglo XVI, cuando las ciudades europeas aún carecían de los servicios urbanos más elementales, con casas alineadas en formas caprichosas por las cuales transitaban durante el día una abigarrada multitud de seres humanos, bestias de carga, perros y cerdos, emitiendo toda suerte de ruidos: gritos, gruñidos y ladridos, en una muy modesta casita a las afueras de la ciudad de Weil, en lo que ahora es el estado de Württemberg en Alemania, una cálida madrugada de mayo de 1571; el 16 para ser más exactos y a las 4:37 horas, para contarlo con absoluta precisión, fue concebido un niño a quien su madre, Katherine Guldenmann puso por nombre, al nacer, Johannes Kepler. Tras un periodo de gestación que duró 224 días, nueve horas y cincuenta y tres minutos, el bebé vio la primera luz.

Muy rara vez, la concepción, el embarazo y el alumbramiento han sido tan cuidadosamente registrados como aquellos que culminaron con el nacimiento de Johannes Kepler. Quien anotó estos datos fue su madre, a quien le fascinaba llevar cuenta de todos los acontecimientos con todo esmero, para confeccionar horóscopos. Con ellos guiaba su vida y se ganaba el pan, para alimentar a su dilatada prole, pues su esposo era un sinvergüenza, mercenario y aventurero que se pasaba la vida alquilando su espada en las guerras, que reyezuelos y caciques provocaban por doquier, tratando de sojuzgar y esquilmar a sus enemigos vecinos, siempre alejado de su casa y de vez en cuando haciendo visitas conyugales furtivas y apresuradas en las cuales, casi a tiro por viaje, dejaba nuevamente embarazada a su esposa. Eso era lo único que dejaba en sí en el hogar, pues el dinero, brillaba por su ausencia.

Katherine vendía horóscopos, bebedizos y pócimas mágicas, y de ello se sostenía también a duras penas, pues siempre vivía en un continuo sobresalto, temiendo ser descubierta y llevada a la hoguera por practicar la brujería.

Por su parte, el pequeño Kepler creció con una muy precaria salud. Sus piernitas se desarrollaron flacas, débiles y arqueadas debido a la desnutrición crónica que padeció en la infancia. Su vista fue defectuosa; su estómago y su intestino le dieron problemas toda la vida, pues muy probablemente agarró desde muy temprano una parasitosis múltiple. Ya mayor, padeció de hemorroides que le impedían permanecer sentado por mucho tiempo, pues al cabo de un rato se le inflamaban, la comezón y el dolor lo obligaban a levantarse. Acudió muy irregularmente a la escuela; faltaba a sus clases con frecuencia, debido a constantes accesos de fiebre y tos.

Ya mayor, aprendió de su madre el arte de confeccionar horóscopos, y la afición de escribir con cuidado y prolijidad todo género de datos, y hechos en un diario que llevó toda la vida. En él, se han encontrado anotaciones, donde expresa ideas muy pobres acerca de su propia persona. En una de ellas, existe una referencia de él mismo, en la que se describe como un perro flaco y pulguiento. Al igual que su madre, Johannes Kepler se dedicó a la astrología. Se cuenta que un día pronosticó lluvias torrenciales que inundarían durante muchos días una comarca. Así ocurrió. Desde entonces su fama como astrólogo creció; todo mundo quería hacerse un horóscopo con Kepler y por ello pagó buen dinero. Kepler obtuvo así una posición económica desahogada de allí en adelante.

Se graduó en 1591 y posteriormente obtuvo su posgrado en teología. Fue profesor de matemáticas y astronomía en la Universidad de Gratz. Aunque su clase era buena pues explicaba con claridad los conceptos, muchas veces se perdía en digresiones sin sentido que sus estudiantes no comprendían. Le fascinaban las matemáticas y su bitácora se hallaba siempre atiborrada de cálculos y operaciones. En muchas ocasiones creyó haber hecho un descubrimiento portentoso; sin embargo, casi siempre resultó que su hallazgo ya hacía mucho tiempo había sido obtenido por alguien más y lo había escrito y publicado. Lo que pasaba es que Kepler pocas veces estudió a sus antecesores, así que aquello que él creía haber descubierto era casi siempre un hecho del dominio público desde hacía siglos.

Un día, cuando se hallaba dando su clase en la universidad, al estar dibujando en el pizarrón unas figuras geométricas ante sus estudiantes, para demostrarles las propiedades de los ángulos, de pronto le llegó una idea a la cabeza, que lo dejó mudo, estupefacto. Se le ocurrió que, tal y como lo había propuesto Nicolás Copérnico en su libro, los planetas giran alrededor del Sol describiendo órbitas circulares concéntricas. Pero la idea brillante era que esas órbitas no se hallan a cualquier distancia unas de las otras, sino que los radios de los círculos están determinados por una proporción perfectamente establecida entre sí. Esa proporción corresponde al espacio que hay entre esferas, cuando se inscribe en cada una de ellas un poliedro regular. Por ejemplo, si se tiene un cubo, se puede inscribir en él una esfera, cuyo radio es igual a la distancia del centro del cubo a una cara. Pero ahora si el cubo está inscrito a su vez dentro de otra esfera, entonces ésta tiene un radio mayor, igual a la distancia desde el centro del cubo, hasta uno de sus vértices. Así, dado un cubo, se pueden construir dos esferas concéntricas; una menor inscrita al cubo y otra mayor que los circunscribe. Kepler imaginó que esas proporciones entre una esfera interior y otra exterior deberían corresponder a las que se dan entre una órbita de un planeta y otra del siguiente sistema planetario. Más aún, como la distancia entre órbitas no es constante, entonces él dedujo que los poliedros regulares deben ser distintos: un cubo, para una pareja de órbitas, un tetraedro para la siguiente órbita, un icosaedro para la siguiente, y así sucesivamente. Además, dado que se conocían sólo seis planetas: Mercurio, Venus, la Tierra, Marte, Júpiter y Saturno, sólo hay seis esferas concéntricas alrededor del Sol y por lo tanto deben existir cinco figuras regulares entre ellas: un cubo, un tetraedro, un dodecaedro, un octaedro y un icosaedro, ¡que son todas las figuras tridimensionales regulares que existen! Concluyó entonces que Dios creó las esferas de las órbitas planetarias a espacios perfectamente establecidos, de acuerdo con las proporciones dadas por los poliedros regulares.

Copérnico había hecho solamente 27 observaciones de los planetas. Con ellas, le fue suficiente para arriesgar la afirmación de que el centro del sistema solar es el Sol, y que a su alrededor giran en órbitas circulares los planetas, incluyendo a la Tierra. En la época actual, ningún científico se hubiera atrevido a hacer una afirmación de tal envergadura y menos a publicarla sobre todo tomando en cuenta que la Iglesia tomaba cualquier pretexto para declarar hereje a quien quiera que osara afirmar cualquier cuestión que pudiera remotamente parecerle contraria a las Sagradas Escrituras, y mandarlos de inmediato a comparecer ante el Santo Oficio. Copérnico se había atrevido, debido a la alta consideración que le tenían muchos encumbrados personajes de la jerarquía católica, entre los que se encontraban un cardenal, y el propio papa, a quien le

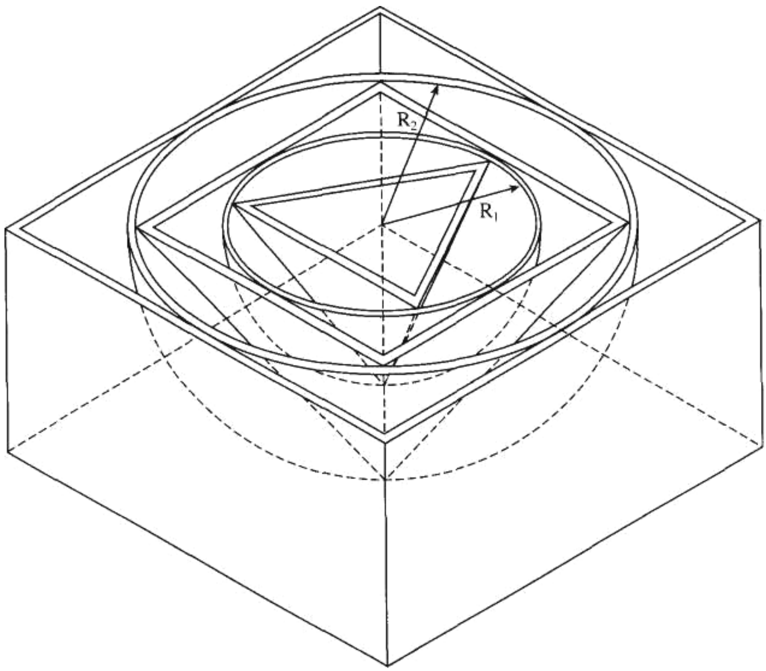

Figura III.3. Dos esferas concéntricas limitadas por tres poliedros regulares; de dentro hacia afuera: un tetraedro, un octaedro y un cubo. Los radios R, y R_2 guardan proporciones con los poliedros. Ésta era la idea de Kepler sobre los radios de las órbitas planetarias.

interesaba contar cuanto antes, con un modelo cosmológico confiable que permitiera corregir aquellos errores del calendario juliano que se habían vuelto tan graves después de mil cuatrocientos años de uso.

Claro está que, con tan pocas observaciones era prácticamente imposible precisar la forma exacta de las órbitas planetarias, de modo que la afirmación que eran círculos se hizo en forma eurística, siguiendo con aquella vieja idea de los círculos perfectos de Dios. Kepler tomó las veintisiete observaciones de Copérnico y añadió otras tantas que él mismo realizó con la ayuda de una tabla ranurada y un sextante que mandó confeccionar a un carpintero local. Con estos datos quiso ratificar el aserto copernicano de las órbitas circulares, pero no lo pudo hacer. Hubo ciertos detalles que lo desazonaron. Por más luchas que hacía, las órbitas no se ajustaban enteramente a los círculos. Por supuesto, aquellas discrepancias no eran ni muy notables, ni definitivas, pues con tan pocos registros observacionales, con tan poca exactitud, ninguna persona sensata podría esperar una concordancia absoluta. No eran hechos que pudieren hacer perder el sueño a nadie. Por su parte, la tabla ranurada de Kepler no había sido construida por un experto, sino por un simple carpintero que así, a buen ojo, la había aserrado y había construido un armatoste burdo, completamente inadecuado para realizar mediciones precisas. Para colmo de todo, el mismo Kepler era un dilettante en eso de hacer observaciones del cielo, y su vista era tan pobre, que difícilmente podía distinguir a plena luz del día un gato de un conejo, a una distancia de cinco metros, así que cuando realizó sus propios registros unos veintitrés o veinticuatro, estos datos adicionales ayudaron muy poco a mejorar las figuras que se tenían. No se asustó demasiado al hallar órbitas oblongas en vez de círculos. Lo que en cambio sí le preocupó, fue que al dibujarlas dentro del esquema heliocéntrico, sistemáticamente aparecía el Sol alejado del centro de las trayectorias planetarias.

Dios, en su infinita perfección y sabiduría debió haber diseñado el sistema solar en forma perfecta; no pudo ser de otra manera. Y lo perfecto es el círculo; ésta es la figura perfecta. Además, ¡claro está!, el Sol debería quedar precisamente al centro, pero... ¿qué tal que esto no fuera así? Kepler intuyó que este asunto era de la más alta importancia. Para dilucidarlo, requería de más datos, muchos más; datos confiables y precisos que permitieran, sin lugar a dudas, dibujar las órbitas planetarias con toda exactitud y ubicar al Sol justo en el lugar que ocupa. Esos datos se los podía proporcionar sólo un hombre en el Mundo; ese hombre era Tycho Brahe, el famoso astrónomo danés que se había vuelto célebre por sus reportes sobre las estrellas.

Hoy en día, a casi cuatrocientos años de aquellos hechos, resulta por demás evidente que si Kepler no hubiera contado con aquel incalculable tesoro de datos y registros, jamás hubiera podido llegar a formular sus leyes. Muy probablemente alguien más lo habría hecho, pero la coyuntura histórica era crítica: Copérnico había muerto casi cuarenta años atrás, y con su desaparición, había quedado una enconada polémica acerca del sistema del Mundo; una polémica que no sólo había afectado hasta sus raíces la concepción del Universo, sino también a la religión, a la teología y a la sociedad. Por poco, no habría coincidencia entre Kepler y Tycho Brahe, pues cuando finalmente ocurrió el encuentro entre estos dos colosos, al buen "Tyche" sólo le quedaba escasamente un año y medio de vida.

En cuanto se conocieron al llegar Kepler a Praga para trabajar en el observatorio de Benatek, el carácter explosivo y visceral de éste, chocó abiertamente con la personalidad bonachona del tiranuelo Brahe. Durante los dieciocho meses que duró esa relación, las rabietas y berrinches del joven alemán de veintiocho años menudearon. Por quítame estas pajas, Kepler montaba en cólera y mandaba a su jefe a freír espárragos. En una de ellas le tiró el trabajo en la cara, respingó su aguda naricilla, y se largó de vuelta a Alemania. Pero así como de pronto se enfurecía, al poco rato pasaba su enojo y entonces se arrepentía, pedía mil perdones, y regresaba compungido y avergonzado al observatorio, ante la indulgencia del cincuentón, que veía en su nuevo colaborador la chispa del genio, el poder de síntesis profundo que él mismo nunca había alcanzado.

Curiosamente, aquellos datos que Kepler ávidamente necesitaba, para resolver su problema con las órbitas planetarias, nunca se los dio Tycho Brahe. Este tenía su propia teoría del Mundo y no deseaba revelar sus resultados hasta en tanto su modelo quedase acabado, así que guardó celosamente sus hallazgos, cuando lo sorprendió la muerte.

En cuanto murió Brahe, su parentela se lanzó sobre las pertenencias que había dejado en el castillo-observatorio de Benatek, en una rapiña infernal, sólo parada por los abogados, ya que amenazaba convertirse en una lucha campal, al olvidarse las buenas costumbres y melosos sentimientos familiares, con que habían adulado al astrónomo para vivir a sus expensas durante muchos años. Como buitres, cayeron sobre los despojos del ilustre desaparecido. Las autoridades civiles sellaron entonces la puertas y ventanas del castillo, tratando de evitar el saqueo. Kepler, hábilmente se introdujo a las oficinas de su jefe, una noche antes de la clausura de los aposentos, y sustrajo las pilas de papeles de Brahe, con todas sus anotaciones. Así pudo hacerse finalmente de los datos que requería para su propio trabajo.

En cuanto pudo, Kepler se aplicó a la frenética tarea de vaciar los datos que Tycho había dejado, en hojas de papel de estraza. Toda una hilera de puntos sucesivos fueron apareciendo representando las posiciones de los planetas alrededor del Sol. El sueño tantos años acariciado por el astrónomo alemán, finalmente comenzó a tomar forma... pero no, las cosas no salieron como se esperaba. Las órbitas, una vez trazadas, no aparecieron circulares de nueva cuenta. El Sol tampoco quedó al centro; ocupaba, igual que antes una posición excéntrica, hacia uno de los ápsides o extremos de aquellos óvalos. Esta vez ya no había duda. Todas las observaciones que había hecho el danés eran precisas, con menos de un minuto de arco de error, de modo que no era posible achacar aquellas deformidades a la falta de exactitud de las medidas. Las órbitas eran, en efecto oblongas; esto es, más largas que anchas, y el Sol se hallaba en todas ellas desplazado del centro. Cuando más tarde Kepler aprendió geometría, pudo identificar aquellas figuras como elipses, y, así mismo, ubicar al Sol ocupando uno de sus focos. Este hallazgo se conoce como la primera Ley de Kepler y afirma: "las órbitas de los planetas, alrededor del Sol, son elipses, y éste se halla en uno de sus focos".

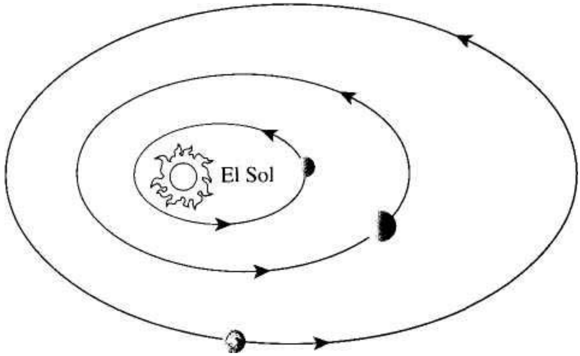

Figura III.4. Kepler halló a partir de los datos de Tycho Brahe que las órbitas de los planetas son elipses. En uno de sus focos se encuentra el Sol. Este descubrimiento se conoce como la primera Ley de Kepler.

Quizá nunca se percató él mismo, pero al establecer su ley, Kepler había dado un salto gigantesco. De pronto ante la evidencia, aceptó sumisamente que los planetas no siguen los caminos que la tradición y la fe dictaban. Por primera vez, se trataba de un científico desprovisto de todo compromiso con la religión o el dogma, afirmando un hecho surgido de la pura observación, sin trabas ni ataduras.

Una vez encaminado sobre estas líneas de pensamiento puramente empírico, el teutón abordó el problema más difícil, el más moderno de la astronomía de su época. Atacó una cuestión que ni por equivocación hubiese podido plantear astrónomo alguno antes que él: buscar una relación matemática que vinculara la distancia media de los planetas al Sol con la duración de su periodo de tránsito alrededor de él; es decir, su "año". Desde la antigüedad se conocían con aceptable precisión esos periodos, así como, por ejemplo, se sabía que el planeta Mercurio, el más cercano al Sol, requiere de algo menos que tres meses para completar sus revoluciones; (88 días para ser más exactos), Venus, el segundo planeta del sistema, el gemelo de la Tierra, necesita siete meses y medio, o sea, doscientos cuarenta días; la Tierra misma trescientos sesenta y cinco días: un año. Marte, el pequeño planeta rojo, precisa de dos años terrestres, o seiscientos ochenta y siete días; Júpiter, el gigante del sistema solar, doce años o cuatro mil trescientos treinta y dos días, y saturno, el bello planeta de los discos, el más alejado de los planetas conocidos en aquella época, treinta años o diez mil setecientos setenta y cinco días. Cuanto mayor es la distancia que separa a cada uno de estos cuerpos celestes del Sol, más tiempo le lleva cerrar una órbita completa. Todo esto es perfectamente lógico. Lo que ya no lo es tanto, es que la proporción con la que aumenta ese lapso entre una órbita a otra, no crece proporcionalmente. Saturno, por ejemplo, se halla dos veces más lejos del Sol que Júpiter, así que lógicamente debería requerir el doble de tiempo que éste para recorrer su ciclo; veinticuatro años terrestres y sin embargo lo hace en treinta. Esto significa que a medida que un planeta se encuentra más y más lejos del Sol se mueve más y más lentamente. ¿Por qué? Kepler mismo propuso la respuesta. En su libro de hechos, se advierte el cambio que experimentó en su pensamiento. Dice al principio: "...o las almas que mueven a los planetas son menos activas cuánto más lejos se hallen del Sol o existe tan sólo un alma motora en el centro de todas las órbitas; ésta hallándose en el propio Sol, que dirige a todos los planetas con tanto mayor vigor, cuanto más cercanos se encuentren éstos de aquellos, pero se vuelve casi exhausto al actuar sobre los más exteriores, debido a la gran distancia...". Más adelante en el mismo libro, Kepler añade algunas notas adicionales, que muestran su eclosión como un científico puro: "...las tales ánimas no existen...", "...si sustituyo la palabra "alma" por "fuerza", entonces habremos llegado exactamente al principio que sustenta mi física de los cielos...". "Hubo un tiempo, en que creía que la fuerza motora de un planeta era un alma; las almas de los ángeles que pueblan los cielos y los empujan, obligándolos a llevar senderos distintos de los círculos, que son figura perfectas, sin embargo, tras de reflexionar sobre el hecho que esta fuerza motriz disminuye con proporción a la distancia, de la misma forma que la luz del Sol disminuye a medida que aumenta el espacio, he llegado a la conclusión, de que la tal fuerza debe ser algo substancial, no en el sentido literal de la palabra, sino en el mismo en el que lo es la luz, dando a entender con ello que es algo que emana de un cuerpo material".

Doce años después de la muerte de Kepler habría de nacer el gran Isaac Newton, y sin las leyes que aquel formuló, tal vez éste nunca hubiera podido realizar su síntesis genial. Kepler formuló por primera vez en forma precisa, el concepto de acción a distancia como un mecanismo de transmisión de la fuerza gravitacional. Sin aquella idea, esta ley no se hubiera podido dar.

Más adelante, en el mismo trabajo, Kepler cierra genialmente sus consideraciones y propone: "... y cuánto más lejano se halla un planeta del Sol, he podido determinar que el periodo de revolución, multiplicado por sí mismo dos veces, está siempre en la misma proporción, que el cubo de la distancia a la que este planeta se encuentra del Sol". Esta afirmación es la que se conoce como la tercera Ley de Kepler, que actualmente reza: los cubos de las distancias medias de los planetas al Sol, son proporcionales a los cuadrados de sus periodos de translación. La fórmula matemática que expresa esta ley es de una belleza y sencillez admirables:

donde *R* representa la distancia del planeta al centro de la órbita, tomando a ésta como si fuera un círculo, cuyo radio puede ser el promedio de los semiejes de la elipse, que realmente describe en su tránsito alrededor del Sol. *T,* por su parte representa el tiempo que le lleva a ese planeta recorrer una órbita completa; se le llama *periodo de traslación* o *revolución sidérea,* y *K* es una constante que Kepler encontró con, la cual la expresión matemática anterior se cumple para todos los planetas del sistema solar. El valor de esta constante de proporcionalidad en las unidades actuales de metros y segundos es:

$$k = 3.396 \times 10^{18} \left[\frac{m^3}{S^2} \right]$$

Las leyes del movimiento planetario que hoy en día se conocen como la primera y tercera, fueron las primeras de tres que obtuvo Kepler. Estas las publicó en su libro *Mysterium Cosmographicum.* La ley que falta, la que se conoce como Segunda Ley de Kepler, le costó al gran alemán el mayor esfuerzo analítico, a través de muchos cálculos, y desarrollando al máximo su poder de síntesis, pudo llegar a ella. Después de haber demostrado que los senderos que recorren son elipses en uno de cuyos focos se encuentra el Sol, y después de haber encontrado la relación de las distancias con sus periodos de revolución; sólo después de hallarlos, se pudo dar cuenta cabal que al transitar en su órbita un planeta, no puede moverse siempre a la misma velocidad. ¡Claro! Si a veces está más cerca del Sol, y otras se aleja de él, entonces debe de viajar rápido, y después lento, es decir, que su velocidad no es uniforme. Haciendo dibujos en un papel Kepler se percató, finalmente, que existía otra relación más para la órbitas de los planetas; una que vincula a las áreas que van cubriendo en su movimiento orbital tomando como pivote al Sol, con los tiempos que les lleva "barrerlas". Como se mueven más lentamente cuando están lejos, y más rápido cuando están cerca del astro rey, los ángulos que subtienden son menores en el primer caso y mayores en el segundo, pero las áreas barridas son siempre las mismas en un lapso igual. (Véase figura III.5). Así, se desarrolló la segunda Ley de Kepler: en su recorrido alrededor del Sol los planetas barren áreas iguales y en tiempos iguales. Esta ley apareció publicada muy tardíamente en la segunda edición de su libro Mysterium Cosmographicum.

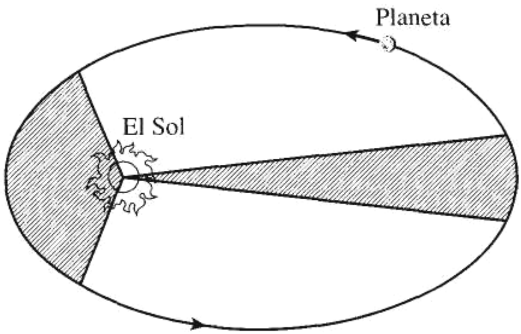

Figura III.5. La segunda Ley de Kepler establece que en su recorrido a lo largo de sus órbitas, los planetas "barren" áreas iguales, en tiempos iguales.

Las efemérides de Kepler, se usaron por más de un siglo en Europa. El 15 de noviembre de 1630, en la ciudad de Ratisbona, en Alemania, dejó de existir uno de los astrónomos más grandes de todos los tiempos después de haber sufrido casi dos semanas de fiebres y dolores en todo su cuerpo, sin que sangrías y mejunjes que suministraron los médicos surtiesen el menor efecto. Hasta el fin de sus días, trató de conciliar sus portentosos descubrimientos de la mecánica celeste, con sus ideas juveniles de los sólidos perfectos; aquellas leyes, las más importantes para la astronomía, siempre ocuparon en la mente del genio un segundo plano...

III.4. GALILEO GALILEI

Pocos fueron los amigos que tuvo johannes Kepler a lo largo de su vida. Tal vez con el único que mantuvo cierta relación de correspondencia fue con un italiano de nombre Galileo Galilei. Este era ocho años mayor que Kepler, nació el 15 de febrero de 1564 en Pisa, una hermosa ciudad de Italia.

El padre de Galileo Galilei, era un noble florentino que había perdido sus bienes porque no le gustaba trabajar, se dedicaba a la poesía, a la música y a los estudios clásicos, pero descuidó sus negocios y cayó en desgracia. Cuando su mujer lo increpaba demasiado, porque ya no había para comer, vendía algunas telas, algunos muebles y conseguía dinero, pero regresaba de inmediato a su música y a su poesía.

En cuanto Galileo estuvo en edad, su padre lo envío a estudiar en la excelente escuela jesuita del monasterio de Vallombrosa, cerca de Florencia. Allí hizo sus primeros conocimientos, al principio, su padre pensó en convertirlo en mercader, pero como el muchacho mostró una inteligencia tan despierta y una mente tan analítica, cambió de parecer y lo envió a la Universidad de Pisa para que estudiara medicina. Intentó que le dieran una beca, para no tener que pagar por los estudios del muchacho, pero no lo consiguió.

Galileo era una persona muy especial. Era bajo de estatura, de amplias espaldas, cuello corto y cabeza grande. Más bien parecía un estibador que un intelectual. Toda la vida se vistió desaliñado y con ropa demasiado grande para su talla. Los faldones de su camisa frecuentemente colgaban por afuera de sus bragas, dándole el aspecto de un paria. Al caminar se mecía de un lado al otro, pues tenía los pies planos. Su cabello era rojizo y quebrado y nunca se peinó, ni siquiera cuando tuvo que asistir a actos solemnes donde la etiqueta marcaba reglas de higiene y aliño. Su cara mostraba rasgos más bien ordinarios: una nariz ancha, un par de ojillos azules, bajo espesas cejas y una boca grande con labios delgados. Era muy dado a entrar en polémicas por cualquier motivo. Discutía apasionadamente, tratando a toda costa de hacer valer sus puntos de vista y si sus interlocutores no quedaban convencidos por sus razones, igualmente pasaba a los puñetazos para hacerlos cambiar de opinión. Este espíritu conflictivo y peleonero le causó a lo largo de su vida muchos sinsabores. Nunca hizo amigos y sí, en cambio, enemigos.

Ingresó a la Universidad de Pisa para estudiar medicina, como había deseado su padre, pero poco a poco fue perdiendo el interés en esa carrera profesional. Los estudios estaban basados en los antiquísimos libros de Aristóteles, plagados de equivocaciones. La clase de anatomía, por ejemplo, la daba el profesor desde lo alto de su cátedra, recitando alguno de esos textos, mientras abajo, sobre una plancha, un carnicero experimentado, abría y disecaba un cadáver ante los estudiantes. Muchas veces el tema que leía de su libro el profesor, no tenía que ver con la parte que en ese momento mostraba el carnicero de aquel cadáver, y otras al estudiante le parecían a todas luces fantásticas y equivocadas. Como el caso del cerebro, que de acuerdo con Aristóteles es aquel órgano que sirve para enfriar la sangre, debido a su enorme vascularidad y a las circunvoluciones que parecen hechas para disipar el calor. Galileo escuchaba con aburrimiento toda aquella retahíla de sandeces y sentía una antipatía cada vez mayor, por el pensamiento aristotélico. Muchas veces, harto de tantas tonterías, interrumpió al profesor durante su disertación y con su apabullante lógica lo hizo quedar en evidencia. Por supuesto, el académico quedaba muy molesto con el muchacho y a la hora de los exámenes se cobraba la afrenta, otorgándole al estudiante las más bajas calificaciones.

Se cuenta que un día, mientras Galileo se encontraba como de costumbre, aburrido y malhumorado, escuchando una clase en la universidad, observó que los candelabros que iluminaban el aula con sus velas recién encendidas, oscilaban periódicamente. Tocándose la yugular y contando las pulsaciones de su corazón se percató que la frecuencia de oscilación era constante e independiente de la amplitud. Entonces se le ocurrió que un péndulo muy bien se podía utilizar para medir el tiempo, de regreso a su casa se puso a construir una especie de metrónomo al que llamó "pulsilogium", con el cual se podía medir el pulso cardiaco de los pacientes. Allí se comenzó a manifestar su gran ingenio mecánico. De pronto cayó en la cuenta de lo mucho que le entusiasmaba ponerse a meditar sobre la esencia de las cosas: la física, y meterse en aquella covacha, atrás de la casa paterna, a construir ingenios y aparatos para experimentar. Comenzó a estudiar matemáticas y muy pronto se convirtió en una autoridad en la materia.

Como resultado de todas esas inquietudes abandonó definitivamente la carrera de medicina. Sin embargo, se volvió famoso en la pequeña comunidad intelectual de Pisa, por sus dotes como inventor y como matemático y así, en 1591, a la edad de veintisiete años, la misma universidad que siempre le negó una beca, lo contrató como profesor de matemáticas. En ese mismo año murió Vincento Galilei, su padre, dejando en la orfandad y la miseria a una enorme familia. El salario de profesor que recibía Galileo no le alcanzaba para mantener a su madre ni a sus hermanas, así que buscó un empleo mejor remunerado. Lo encontró en la Universidad de Padua. Allí pasó 18 años enseñando física y matemáticas y experimentando. Fueron los dieciocho mejores años de su vida. En ese lapso realizó una gran cantidad de estudios en diversos campos de la física; así, inventó una balanza hidrostática, para medir la fuerza de boyancia o de flotación de los líquidos; construyó un termoscopio: un bulbo de vidrio que contenía probablemente alcohol y que con el calor se dilataba, ascendiendo por un tubo muy delgado y cerrado, del mismo material, mostrando con ello, en forma cualitativa, una relación entre la altura de la columna del líquido en el tubillo capilar y la temperatura del medio que rodeaba al bulbo. Era ése, un aparato muy parecido a los actuales termómetros de mercurio que se ponen en la boca de los enfermos para registrar la fiebre. La única diferencia era que aquel aparato no poseía una escala graduada, de modo que solamente se podía apreciar con él el exceso de temperatura con respecto a la que se tenía en el medio ambiente.

Desde un año antes de salir de Pisa, Galileo comenzó a pensar en el problema que hoy en día se conoce como cinemática y que trata de la descripción del movimiento de los cuerpos en el espacio. En aquella época, de acuerdo con las ideas de Aristóteles, se creía que la rapidez con la que caen los cuerpos dependía de su masa; esto es que un cuerpo que tiene el doble de la masa de otro, cae con el doble de la aceleración que aquél. Galileo demostró que esto no es cierto mediante un razonamiento muy simple. Suponiendo que fuera verdad el aserto aristotélico, llegó a una conclusión absurda y con ello pudo afirmar que todos los cuerpos, sin importar su masa, caen en la Tierra con igual aceleración. Esta demostración la escribió muchos años después en su libro *Diálogos sobre los dos principales sistemas del mundo,* que publicó en 1632.

El razonamiento era más o menos el siguiente: supóngase que en efecto, los cuerpos que se dejan caer libremente desde una misma altura adquieren aceleraciones de acuerdo con las masas; un cuerpo que tiene el doble de la masa que otro caería con una aceleración que es el doble de la velocidad de aquél. Si ahora se unen los dos cuerpos por algún medio, ya sea soldándolos uno al otro o pegándolos firmemente entre sí, se tiene un nuevo cuerpo que contiene en total tres veces la masa del cuerpo original. Por lo tanto, si las ideas de Aristóteles fueran correctas, al dejar caer libremente al cuerpo compuesto por los otros dos, caería con una aceleración que sería el triple del primero. Sin embargo, dado que se ha construido este peso con una masa que es la mitad de la otra, ello daría por resultado que una frenará la caída de la otra a la cual está unida. Por lo tanto se llega al absurdo de que, aunque el cuerpo compuesto tiene tres veces la masa del pequeño, cae menos rápido que el segundo que posee el doble de materia. La conclusión es que la afirmación de Aristóteles está equivocada y que todos los cuerpos que se dejan caer libremente desde una altura, caen con igual aceleración sin importar su masa.

Se dice que para probar su razonamiento, una mañana subió al *Campanile* de la torre inclinada de Pisa y cuando su colegas profesores pasaban por allí rumbo a la universidad, dejó caer cuerpos con diversas masas al mismo tiempo. Los cuerpos llegaron a tierra prácticamente en forma simultánea, sin que los azorados transeúntes pudieran apreciar retraso alguno en sus caídas. Lo cierto es que esta anécdota no ocurrió realmente. Alguno de sus conocidos se encargó de propalarla, pero Galileo jamás subió al Campanile a realizar esa demostración.

Ya instalado en su nuevo trabajo en la Universidad de Padua, la misma donde casi noventa años antes había obtenido su doctorado Nicolás Copérnico, Galileo se dedicó de lleno a estudiar la caída de los graves; esto es, el movimiento de cuerpos pesados. Mandó construir unas tablas bien pulidas que colocaba inclinadas, para dejar deslizar sobre su superficie objetos redondos y estudiar la manera como caían debido a la acción de la gravedad terrestre. Colocaba al objeto en la parte superior y lo soltaba, tabla abajo, hasta llegar al extremo inferior. De estos experimentos casi infantiles obtuvo importantes conocimientos. Lo primero que descubrió fue que al deslizarse por esos planos inclinados, los cuerpos aumentan su velocidad, esto es, se aceleran. Partiendo del reposo, en la parte superior del plano, van adquiriendo una velocidad cada vez mayor, hasta llegar al extremo inferior. El cambio de la velocidad cada vez mayor, hasta llegar al extremo inferior. El cambio de la velocidad es lo que se conoce como aceleración. Otro importante hallazgo fue que la aceleración no depende de la masa del objeto; es la misma si se trata de un cuerpo liviano que de uno muy masivo, siempre que se deslicen sobre un plano a igual inclinación. En seguida, demostró que la aceleración depende de la inclinación del plano; así, si el plano tiene un ángulo pequeño de inclinación, con respecto de la horizontal, un cuerpo que se desliza plano abajo, lo hace con una aceleración pequeña; es decir, va incrementando lentamente su velocidad de caída. Pero a medida que aumenta el ángulo de inclinación del plano, el cambio de la velocidad, de un instante a otro, va haciéndose mayor.

En aquella época no había relojes cronómetros, así que para poder medir los lapsos de caída de sus cuerpos deslizantes, Galileo ideó un método bastante ingenioso. Llenó un barril con agua; uno de esos barriles que sirven para añejar el vino le fue útil en sus experimentos. Entonces, justo en el instante en que soltaba un objeto en la parte superior del plano inclinado, daba vuelta a la llavecilla que tenía el barril y dejaba que saliera el agua que contenía, cayendo en un recipiente. Al llegar al extremo inferior, cerraba la válvula del barril. Para saber el tiempo que tardaba el objeto en descender pesaba la cantidad de agua que había caído en el recipiente. Así, pesando el agua, se hizo de una lista de medidas de tiempo relativas. Si un objeto tardaba en deslizarse la mitad del tiempo en un plano inclinado a cierto ángulo, que a otro ángulo menor, entonces la cantidad de líquido recogido en el recipiente era también la mitad del que había caído en el plano menos inclinado. Con estos burdos aparatos de medida, Galileo pudo obtener un conjunto de resultados que fueron fundamentales para el desarrollo de la física.

Para medir las distancias recorridas por los objetos sobre la tabla inclinada, Galileo grabó marcas en la propia tabla, a intervalos regulares. Una rudimentaria regla y una primitiva clepsidra o reloj de agua fueron sus aparatos para el registro de la longitud y el tiempo, respectivamente. Midiendo las distancias recorridas y dividiendo esas distancias entre los lapsos que le llevaba al cuerpo recorrerlas, obtuvo las velocidades medias. De ese modo pudo cuantificar sus experimentos.

Una vez que calculó las velocidades de caída de un objeto al deslizarse por el plano inclinado, Galileo se puso a compararlas a intervalos de tiempo regulares. Comparando la velocidad del cuerpo en el segundo intervalo de tiempo, con la velocidad en el primero y dividiendo entre el lapso transcurrido entre los dos, obtuvo una medida de la aceleración media, de acuerdo a la regla siguiente:

$$a = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}$$

donde la letra *a* significa la aceleración media, w_2 es la velocidad alcanzada por el cuerpo en el instante t_2 y v_1 es la velocidad que lleva en el instante t_1.

Un resultado sorprendente salió de estos experimentos. En un mismo experimento, con un plano inclinado a cierto ángulo con respecto a la horizontal, Galileo hizo medidas de la aceleración media del cuerpo en diferentes momentos. Quería hallar la forma cómo cambia la aceleración a lo largo de la trayectoria del cuerpo. Realizó el mismo experimento una y otra vez, muchas veces y siempre encontró que la aceleración era la misma. En otras palabras, un cuerpo, al deslizarse va incrementando su velocidad, pero su aceleración es la misma en todos los puntos. Dicho en términos físicos, la aceleración es constante.

Después, aumentando el ángulo de inclinación de la tabla, volvió a hacer sus medidas. Nuevamente encontró lo mismo: la aceleración del cuerpo que se desliza sobre ella es constante a lo largo de su trayectoria. Es constante en efecto, pero ahora su valor es diferente al que había hallado para el caso anterior, cuando el plano estaba a otro ángulo de inclinación.

Experimentó con sus planos una enorme cantidad de veces. Cambió los ángulos de inclinación, desde casi cero grados, cuando el plano estaba prácticamente horizontal, hasta noventa grados, cuando el plano estaba vertical. Así, pudo sintetizar una fórmula para calcular la aceleración de caída de los graves en un plano inclinado, de acuerdo con su ángulo de inclinación. Esa fórmula es la siguiente:

$$a = g \operatorname{sen} \alpha;$$

esto es, que a un ángulo *a* (alfa), la aceleración con la que se desliza un cuerpo tabla abajo es igual a *g* veces el seno del ángulo. El valor de *g* es precisamente el de la aceleración de caída libre; esto es, la aceleración con la que cae un cuerpo verticalmente. Ahora se acepta que al nivel del mar el valor de *ges g* = 9.81, y sus unidades son metros entre segundo al cuadrado; éstas son las unidades en las que se mide la aceleración en la actualidad. Desde luego, el valor que obtuvo Galileo para *"g"* es diferente de éste, pues no se debe olvidar que él utilizó una escala distinta del metro para medir distancias y una escala también distinta del segundo para medir intervalos temporales, pero el resultado matemático al que llegó con sus experimentos fue esencialmente correcto.

Pero el más importante hallazgo que hizo fue lo que ahora se conoce como la "ley de la inercia". Para llegar a él puso en acción el más depurado sentido de síntesis, se puso a pensar ¿qué pasaría si el experimento con el plano inclinado se realizara repetidas veces, dándole a la tabla una inclinación cada vez menor? Partiendo de una posición vertical, disminuir el ángulo, desde 90° hasta 0°. Lógicamente, la aceleración de caída de un cuerpo que se desliza sobre su superficie va a decrecer igualmente; desde *g* hasta cero. ¿Qué quiere decir que un cuerpo tenga aceleración cero? —Pues ello significa que su velocidad ya no cambia. ¿Y qué quiere decir que su velocidad no cambie?— Pues que si estaba en reposo originalmente, seguirá estando en reposo y si al principio el cuerpo se movía con alguna velocidad, continuará moviéndose con la misma velocidad, sin cambio alguno.

Por otra parte, ¿a qué se debe que un cuerpo caiga con la misma aceleración *"g"?* La única razón es que la Tierra posee una propiedad, una "fuerza" con la cual atrae a todos los cuerpos que se hallan sobre su superficie y si el cuerpo se deja caer libremente, la Tierra jala de él obligándolo a seguir un camino, una trayectoria hacia el centro de ella, con una aceleración constante *"g"*. La fuerza de atracción de la Tierra siempre es en la dirección vertical. Entonces, si el cuerpo se mueve sobre una superficie lisa horizontal, la fuerza de atracción de la Tierra no actúa en esa dirección y por consiguiente el cuerpo no cambiará su velocidad; no se acelerará.

Con estos razonamientos, Galileo estuvo en condiciones de formular una afirmación general; un aserto que se conoce como la "ley de la inercia":

Todo cuerpo que se encuentra libre de fuerzas, preserva su estado de reposo o movimiento rectilíneo y uniforme.

Si bien hasta ahora sus biógrafos aún no han podido ponerse de acuerdo sobre si en verdad Galileo propuso explícitamente la ley de inercia, o no, el hecho es que a partir de sus investigaciones sobre el movimiento de los cuerpos que caen por planos inclinados, esta ley quedaba prácticamente formulada tal como se establece aquí. Por lo tanto, bien sea que Galileo efectivamente la haya formulado o no, la comunidad científica le ha dado a este científico italiano la autoría sobre ese aserto. El problema para determinar la paternidad de la inercia ha sido que Galileo escribió muy poco y muchos de sus descubrimientos y resultados no los dejó anotados en documento alguno. Esta falta de evidencia ha dificultado a los historiadores actuales, saber cuáles fueron en verdad sus hallazgos. Muchas de las anécdotas e historias que se conocen de este personaje han resultado ser falsas, pues se ha demostrado que fueron creadas por la gente, en forma de leyendas sobre él. Ahora se sabe, por ejemplo, que Galileo no inventó el termómetro, sino un termoscopio, como ya se mencionó; tampoco inventó el reloj de péndulo, sino un tipo de metrónomo; no inventó el telescopio, ni arrojó piedras desde la torre inclinada de Pisa.

Tampoco fue Galileo el que dio la demostración final a favor del sistema heliocéntrico de Nicolás Copérnico, sin embargo, jugó un papel muy importante en ese sentido. No hay que olvidar que en la Universidad de Padua fue donde el gran astrónomo polaco realizó sus investigaciones doctorales que lo llevaron a recibir el grado académico más alto en 1503, así que Copérnico fue uno de los más importantes personajes para la comunidad universitaria de Padua. Su historia, sus investigaciones y descubrimientos eran conocidos muy de cerca por los paduenses, como si fueran cosas propias, de las cuales se enorgullecían. Galileo llegó allá en 1591 y no pudo menos que enterarse de todos los logros del ilustre antecesor. En forma natural conoció los detalles acerca del sistema heliocéntrico y no pudo menos que interesarse también con este tema y convertirse en un entusiasta seguidor de las ideas heliocéntricas.

Ocurrió, además, un hecho que iba a tener enorme repercusión en el trabajo de Galileo. Resulta que un holandés de nombre Johann Lippershey exhibió en una feria de Holanda en 1508, un aparato compuesto por dos lentes que él mismo pulió, con el cual se podían ver objetos distantes aumentados por un factor de nueve. Este era el telescopio, Galileo supo de aquel invento a través de un panfleto explicativo y se puso a fabricar su propio aparato. Puliendo cristales colocándolos en un tubo de madera a distancias adecuadas uno del otro, logró construir, después de varios intentos, un telescopio con un aumento de 30 veces. Con ese aparato inició sus observaciones del firmamento en 1509. Para hacerse de los fondos necesarios para llevar a cabo sus exploraciones, hizo una demostración de su equipo de observación ante el senado de la república de Venecia. Enfocando el telescopio hacia el horizonte, los miembros del senado pudieron ver la presencia de barcos que llegaban al puerto, dos horas antes de que se pudieran observar a simple vista. Este experimento entusiasmó a los legisladores, quienes vieron en aquel invento un arma poderosísima para defenderse de posibles ataques enemigos. Le comunicaron sus opiniones al dux de Venecia y éste concedió a Galileo un contrato perpetuo como profesor de la universidad, con un sueldazo de mil escudos al año.

A pesar de lo jugoso del contrato, Galileo no permaneció por mucho tiempo en Venecia; al cabo de un año renunció a él y regresó a Padua. Allí realizó cuatro hallazgos de gran importancia para la astronomía: el primero fue que Júpiter, el quinto planeta, tiene lunas que giran alrededor de él, de la misma manera como los planetas giran alrededor del Sol. Galileo descubrió cuatro de esas lunas, a las que les llamó Mediceas, en honor a Cosme de Médicis, su mecenas. Aquel hallazgo fue un duro golpe para las ideas tradicionales que afirmaban que sólo debían existir siete cuerpos celestes (sin contar a las estrellas fijas). Además, era una evidencia en contra del sistema geocéntrico, que afirmaba, como ya se mencionó con anterioridad, que la Tierra es el centro del mundo, porque es el lugar donde ocurrió la Creación, al encontrar otros cuerpos que no giran alrededor de la Tierra, sino de Júpiter, quedó claro que no necesariamente es aquélla el centro del mundo.

El segundo descubrimiento importante de Galileo fue que al enfocar su telescopio a la Luna, encontró que no es un cuerpo absolutamente esférico, sino que su superficie está llena de montañas, hondonadas y cráteres. Por lo tanto también aquí se tuvo evidencia de que los cuerpos celestes no son figuras perfectas, como Dios manda.

El tercer descubrimiento fue que las estrellas fijas, aun con la ayuda del telescopio, no se ven mayores que un punto luminoso. Con esta evidencia se demostró que su lejanía es mucho mayor de lo que se pensaba, con lo cual quedaba explicada la ausencia de paralaje, que constituía una de las más fuertes objeciones al sistema heliocéntrico. Así, estando tan lejanas, las estrellas fijas se ven en la misma dirección siempre, sin importar si la Tierra está en perihelio o en afelio de su órbita alrededor del Sol.

El cuarto y último gran descubrimiento de Galileo fue que la Vía Láctea no es simplemente una franja luminosa que surca el firmamentó; es en realidad un enorme conjunto de estrellas; cientos de miles que, sin la ayuda del telescopio es imposible distinguirlas. Tal hecho es inexplicable por aquellos que afirman que el universo fue creado exclusivamente para el ser humano. ¿Para qué pondría Dios cosas invisibles en el cielo?

Estas observaciones y hallazgos los describió con todo detalle en el primer libro formal que publicó en 1610. Se trata de una obra escrita en un lenguaje llano y simple que todo el mundo puede leer. Su redacción es amena y describe la forma como realizó sus exploraciones del firmamento y los descubrimientos, tanto de las cuatro lunas de Júpiter, como de los cráteres de la Luna, las estrellas fijas y la Vía Láctea. El libro fue titulado *El mensajero sideral.* Realmente se puede decir que este libro malquistó a la Iglesia en contra de Galileo; los comentarios que hizo los escribió siempre en un tono de burla y desprecio hacia la concepción de la religión y esto, por supuesto, no gustó a la jerarquía eclesiástica.

Pero la gota que derramó el vaso fue su segundo libro *Diálogos sobre los dos Principales Sistemas del Mundo,* publicado en 1632, donde expone sus concepciones sobre el movimiento de los cuerpos y da un firme espaldarazo a las ideas de Copérnico acerca del sistema heliocéntrico. También ésta fue una obra escrita en un lenguaje simple y claro que pudo ser leído por cualquier persona. Para exponer sus puntos de vista, Galileo creó a tres personajes que sostienen una conversación sobre los asuntos científicos. Un personaje llamado Salviati en el libro, encarna al propio Galileo. Otro personaje es Sagredo que representa un papel neutral, sin una clara tendencia a favor o en contra de las ideas de Salviati y que la hace de moderador en muchos de los diálogos. En tercer lugar, Galileo crea el personaje de Simplicio. Este es un típico aristotélico, que sostiene puntos de vista a todas luces retrógrados e ignorables y que generalmente sale mal librado de las discusiones con los otros dos. Este personaje encarna, así mismo a un obispo que se distinguió precisamente por sus posturas intransigentes y dogmáticas y que en verdad se llamó Simplicio.

No tardó en reaccionar la Iglesia, ante el sarcasmo de Galileo y entonces, el Santo Oficio lo sometió ajuicio por sus opiniones heréticas. El juicio se llevó a cabo en Roma, en 1633, cuando Galileo contaba con setenta años y había comenzado a perder la vista. El fiscal del Santo Oficio hizo toda una relación de los pecados cometidos por Galileo, y el Inquisidor dictó la sentencia. Por su parte, Galileo declaró y prometió nunca más volver a enseñar, escribir ni comentar ante nadie sus ideas y sus puntos de vista; he aquí partes del alegato del juez y algunas palabras de la abjuración de Galileo:

JUEZ.— Por cuanto tú, Galileo Galilei, de 70 años, hijo de Vincento Galilei, fuiste demandado a este Santo Oficio por sostener como verdadera una falsa doctrina, a saber: que la Tierra se mueve y posee también movimiento diurno (de rotación alrededor de su eje); así como por tener discípulos a quienes instruyes en las mismas ideas; así como por mantener correspondencia sobre el mismo tema con matemáticos alemanes (Kepler); así como por publicar ciertas cartas sobre las manchas del Sol (que por cierto nunca vio); ... ; así como por responder a las objeciones que se suscitan continuamente, por las Sagradas Escrituras, en el sentido que:

1) El Sol es el centro del mundo y está inmóvil en su sitio, que es filosóficamente falsa y formalmente herética.

2) La Tierra no es el centro inmóvil del mundo, sino que se mueve (alrededor del Sol) y también (lo hace) con movimiento diurno, que es filosóficamente falsa y formalmente herética.

Y por cuanto después de haber aparecido un libro tuyo, publicado en Florencia,a saber: Los Diálogos de Galileo Galilei sobre los dos Sistemas Principales del Mundo: el Ptolemaico y el Copérnico; y por cuanto la Sagrada Congregación ha oído que va ganando terreno diariamente la opinión falsa del movimiento de la Tierra y de la estabilidad del Sol, se ha examinado cuidadosamente el mencionado libro y se ha hallado en él una violación manifiesta (de las ideas verdaderas).

Por ello pronunciamos nuestra final sentencia: que el libro "Diálogos de Galileo Galilei" sea prohibido y sea inscrito en el *Index Expurgatorius* (en el mismo donde se había inscrito el libro de Nicolás Copérnico "Sobre las Revoluciones de las Esferas Celestes" algunos años atrás), y a ti te condenamos a prisión formal (y perpetua).

(Después, en atención a su edad, a su ceguera y a su pobre estado de salud, el Santo Oficio conmutó la sentencia de prisión por un arresto domiciliario de por vida.) La fórmula (resumida) de abjuración de Galileo fue la siguiente:

GALILEO GALILEI.— Yo, Galileo Galilei, de 70 años de edad, hijo de Vincento Galilei, arrodillado ante vosotros, los eminentes y reverendos cardenales de este Santo Oficio; inquisidores generales de la República Universal Cristiana, contra la depravación herética, teniendo ante mí los Sagrados Evangelios, que toco con mis propias manos, juro que siempre he creído todos los artículos que la Sagrada Iglesia católica apostólica y romana sostiene, enseña y predica y ... abjuro, maldigo y detesto los errores y las herejías en los que he incurrido y juro abandonar para siempre la opinión falsa de que el Sol es el centro inmóvil y que la Tierra no es el centro inmóvil y en testimonio de ello, con mi propia mano he suscrito este presente escrito de mi abjuración, en Roma, en el Convento de Minerva, en el 22 de junio de 1633...

Galileo regresó a Pisa, su tierra natal y quedó confinado por el resto de sus días a su casa, sin poder salir de ella. Muy pronto quedó absolutamente ciego y prácticamente inútil para valerse por sí mismo. A su cuidado estuvieron hasta el ñnal de su vida sus hijas las tres que había engendrado con Marina Gamba, con quien nunca se casó. La noche del 8 de enero de 1642 murió de fiebres, el más importante científico italiano de todos los tiempos. Su libro permaneció en el *Index Expurgatorius*, con todos los demás, prohibidos por la Santa Inquisición, hasta 1835, cuando el Vaticano comenzó a revisar de nueva cuenta su caso. Doscientos dos años pasó aquella magnífica obra en la obscuridad. En 1992, el papa Juan Pablo II rectificó finalmente las resoluciones de aquel juicio y absolvió a Galileo.

El hecho es que después de aquel brutal golpe a la inteligencia y al talento científico, ningún otro italiano ha sido capaz desde entonces, de cometer "delicuencias" de ese género.

IV. Newton (en hombros de gigantes)

IV. 1. Isaac Newton

La chispa del genio se mudó de país. De hecho salió del Continente Europeo para brillar como nunca antes lo había hecho, como nunca después lo volvió a hacer, en la brumosa isla de Inglaterra. El mismo año en que murió Galileo, el 24 de diciembre de 1642, en la pequeña aldea de Woolsthorpe del condado de Lincolnshire, nació Isaac Newton. Su padre, del mismo nombre fue un humilde agricultor que ni siquiera sabía firmar. Había muerto tres meses antes del alumbramiento de Hannah Ayscough, su esposa, dejándola en muy precarias condiciones económicas.

El pequeño Isaac nació prematuramente, después de siete meses de embarazo de su madre. Era un bebé tan pequeño que, según ella contó después, "hubiera cabido en un tarro de un cuarto". Nadie creía que fuera a sobrevivir. Al nacer estaba completamente cubierto de lanugo y su piel parecía quedarle demasiado grande; no tenía uñas y sus orejas eran sólo un par de membranas de piel que se enroscaban, dándole al recién nacido un aspecto muy extraño. Casi a diario llegaba la abuela materna a casa para saber cómo estaba el niño, temiendo que durante la noche anterior hubiese muerto. Constantemente acercaba a la naricita del pequeño un espejo para cerciorarse de que aún respiraba, observando el vaho que empañaba periódicamente su superficie.

Los primeros dos años de vida del infante fueron muy difíciles para él; su sistema termorregulador no funcionaba bien, así que a veces bajaba su temperatura corporal sin causa aparente y el bebé se ponía lívido y caía en un letargo, para salir de él al poco rato; entonces subía y se tornaba afiebrado.

Cuando Isaac Newton cumplió tres años, su madre volvió a contraer nupcias; se casó con un clérigo anglicano a quien no le pareció buena la idea de cargar con la responsabilidad del hijastro y, convenció a la esposa para que se deshiciera de la carga. Ella envió entonces al pequeño a vivir con la abuela en su granja. Así que sin ser precisamente un niño sin hogar, pues su abuela siempre lo atendió con esmero, se puede decir que quedó sin padre y sin madre. Ya siendo mayorcito, recordaba con amargura aquel gesto de la autora de sus días, a quien nunca le perdonó haberlo abandonado.

Creció demasiado delgado y con una estatura por debajo de la normal. Era tímido y retraído. No gustaba de las cuestiones de agricultura, que su abuela insistía en enseñarle, poniéndolo bajo la tutela de algún peón y, tampoco era buen estudiante en la escuela elemental a la que lo envió para que aprendiera sus primeras letras.

Al cumplir los once años, su conducta y su vida cambiaron radicalmente. El segundo esposo de su madre murió y entonces ella decidió regresar a la casa de su primer marido e insistió en llevarse con ella a su primogénito, Isaac, para que la ayudara en las faenas del campo, y poder sostener a ella y a sus tres hermanastras. Newton se resistió a ello, pero tuvo que obedecer. Entonces se tornó aún más huraño y agresivo. Lo expulsaron de la escuela después de haberse liado a golpes con un niño mayor que él, que lo molestaba constantemente por su baja estatura y su aspecto famélico, pero un tío paterno que era sacerdote intercedió a su favor y después de cierto tiempo fue aceptado nuevamente en el colegio. Estimulado por su tío y con tal de no volver al duro trabajo en el campo, se dedicó a estudiar con gran aplicación y al poco tiempo llegó a ser de los mejores alumnos de su clase.

En 1661 conoció a una joven, la señorita Storey, con la cual inició una amistad que duraría toda la vida. Parece ser que se hizo novio de ella durante algún tiempo, pero aquel noviazgo no prosiguió más allá de unos cuantos meses. Esa mujer fue la única con quien Newton tuvo relación. Nunca más se volvió a saber de otra persona del sexo femenino con la cual sostuviera algún trato.

Al terminar su instrucción básica, a los 19 años de edad, bastante más viejo que el promedio, ingresó al Trinity College de Cambridge como Subsizar; esto es, como estudiante sin recursos que debía trabajar allí mismo fuera de las horas de clase, ayudando en la cocina o en las labores de limpieza de la Universidad, para pagar con su trabajo el costo de sus estudios.

Un profesor del Trinity College, un tal Isaac Barrow, que a la sazón ocupaba la cátedra lucasiana de esa universidad, se interesó por Newton cuando se dio cuenta de la gran inteligencia del estudiante. Se convirtió en su tutor académico y lo dirigió hasta que obtuvo su licenciatura en artes a principios del verano de 1665. En ese mismo año, durante el otoño se soltó en Londres una epidemia de peste bubónica y la universidad se vio obligada a cerrar sus puertas a fin de evitar el contagio de estudiantes, profesores y empleados de la institución.

Con una periodicidad aproximada de cinco años, por toda Europa se propagaban diversas plagas que diezmaban a la población. El tifo, el cólera, la peste bubónica transmitida por las pulgas múridas (las pulgas de las ratas) y otras desgracias parecidas, aparecían en el viejo continente y arrasaban con la gente. Eran aquellas enfermedades las que obraban como eficientes controladores de la población, pues al terminar dejaban a los pueblos con un reducido número de sobrevivientes que comenzaban de vuelta a reproducirse hasta que llegaba la siguiente epidemia que los acabara nuevamente. Era aquella, una época cuando aún no se habían desarrollado los medios para combatir eficazmente las enfermedades; las ciudades aún carecían de drenaje y el más importante medicamento preventivo, el jabón, aún no se había hecho de uso general y cotidiano en el mundo. Así, con tan pobres condiciones de higiene y urbanización, los grandes centros humanos eran presa de aquellas calamidades cada determinado tiempo. Lo único que se podía hacer era pues, tratar de evitar en la medida de lo posible las concentraciones humanas, para impedir la propagación ulterior de la peste y minimizar el número de muertes por esa causa.

Newton regresó a la granja de la abuela en Woolsthorpe. En un pequeño cubículo de la buhardilla de la casa acondicionó su estudio. Se puso a leer la obra de Descartes y Kepler y reflexionó intensamente sobre los resultados experimentales de Galileo. Allí comenzó a pensar en la gravitación.

Dos años pasó fuera de la universidad hasta que la epidemia cedió y desapareció tal como había llegado. Fueron los dos años más fructíferos de su vida, quizá los dos años más fructíferos de la vida de ningún otro hombre de ciencia. La cantidad de ideas y resultados a los que llegó, nunca antes había sido igualada y nunca después que él lo ha sido por nadie. Desarrolló el cálculo diferencial e integral al que Newton llamó cálculo de fluxiones, con el cual la matemática dejó de ser una herramienta estática, inerte, para convertirse en un poderosísimo recurso para describir el movimiento; las cosas cambiantes del Universo. Le fascinó la luz y se puso a pulir cristales para experimentar con ella. Descubrió que al hacer pasar un rayo de luz del Sol por un prisma triangular de vidrio, la luz blanca se descompone en colores, toda la gama de colores del arco iris; lo que ahora se conoce como el espectro. Desarrolló el binomio que lleva su nombre y estableció las bases de la mecánica clásica; el estudio de movimientos de los cuerpos. ¡Lo que hace un hombre por no trabajar! Cada uno de sus trabajos muy bien pudo hacerlo merecedor, hoy en día, a un reconocimiento y un importante premio mundial; pues él los hizo todos, en la quietud de su casa en tan solo dos años.

...Pero no publicó su obra. Una de sus características era esa peculiar aversión a la crítica y a la polémica; él no era persona de combate dispuesta a defender sus ideas y sus puntos de vista ante los demás. Sus trabajos fueron llenando la gaveta allá en su buhardilla de Woolsthorpe, sin salir a la luz durante veintiún años.

En 1667 abrió de nueva cuenta sus puertas la Universidad, así que Newton pudo regresar a ella, esa vez como profesor de matemáticas. Dos años después, su antiguo tutor, Isaac Barrow, renunció al Trinity College y propuso que su sucesor en la cátedra lucasiana fuera Newton; así que este joven de veintisiete años la ocupó desde entonces hasta 1720. Un año antes de ocupar la cátedra había construido un telescopio que superaba por mucho al mejor que había confeccionado Galileo, pero era más pequeño que aquél y más fácil de hacer. Se trataba de un instrumento que, en vez de usar lentes de aumento, cuyo pulimento era tedioso y difícil, usaba dun espejo cóncavo, en forma parabólica que concentraba los rayos de luz en un foco, fue el telescopio de reflexión. Construyó un segundo telescopio en 1671 y lo obsequió a la Real Sociedad de Londres. Entusiasmados por aquel invento con el cual se lograban cuarenta aumentos, la Sociedad inmediatamente lo patentó y aceptó a Isaac Newton como postulante. Ese telescopio sirvió de patrón para construir otros más poderosos con los que el Observatorio de Greenwich se convirtió en el más prestigiado del mundo.

A la sazón el presidente de la Sociedad Real de Londres era un célebre físico, Robert Hooke (1635-1703); un hombre dado a las discusiones, petulante y pagado de sí mismo, que no desaprovechaba ocasión, para lucirse ante sus interlocutores relatando todas las maravillas que había conseguido con sus investigaciones y sus experimentos. Se cuenta que un día, en una de tantas charlas al final de una sesión de la Sociedad, en presencia de un tal Christopher Wren y Edmond Halley (1656-1742), amigo de Newton, alardeaba de haber llegado a la conclusión de que la fuerza que mantiene a los plañetas en sus órbitas alrededor del Sol debía ser inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa de éste; es decir, que la fuerza debería poderse escribir como:

$$F = -\frac{k}{R^2}$$

siendo F la fuerza, R la distancia desde el Sol hasta el planeta y k una constante. Edmond Halley le preguntó a Hooke cómo había llegado a esa fórmula y éste tuvo que confesarle que no había tomado en cuenta algún resultado teórico previo para hallar aquella conclusión, sino que intentando varias fórmulas que se le habían ocurrido, había concluido que la óptima era esa que proponía. Halley le replicó que alguien podía demostrar con argumentos matemáticos irrebatibles esa fórmula (pues en una conversación que había sostenido con Newton, éste le había afirmado que tenía la fórmula de inversos del cuadrado de la distancia, como una consecuencia directa de la tercera ley de Kepler). Hooke, pedante como el que más, le contestó a Halley que en unos cuantos días estaría en condiciones de mostrar una prueba matemática de su aserto y que si alguien más lo hiciera antes que él, entonces con mucho gusto daría un premio de 40 chelines al ganador, a nombre de la Sociedad Real de Londres y la membresía a dicha Sociedad.

Ni tardo ni perezoso, Halley fue a ver a su amigo y le relató la conversación que había tenido con Hooke. Como respuesta a aquel reto Newton elaboró un pequeño tratado de nueve páginas, titulado *De Motu,* en el cual hablaba "sobre el movimiento de los cuerpos en una órbita" y demostraba matemáticamente que una órbita elíptica, como la que siguen los planetas en su tránsito alrededor del Sol se podía explicar sin lugar a dudas, proponiendo una fuerza que actuara como el inverso del cuadrado de la distancia a un centro. Allí venían, adicionalmente la ley de la inercia, formulada en forma general y la que actualmente se conoce como la Segunda Ley de Newton, según la cual, la aceleración que experimenta todo cuerpo es proporcional a la fuerza que lo urge.

Antes de una semana, Halley llevó a Hooke el documento escrito por Newton. No tuvo más remedio que aceptar que el joven Isaac, en efecto había demostrado la fórmula para la fuerza gravitacional. Newton quedó entonces formalmente aceptado como miembro de la Sociedad y recibió su premio de manos del propio Hooke. Sin embargo, de allí en adelante, este individuo se convirtió en el más acérrimo crítico del joven científico. No desaprovechaba ocasión para hacer comentarios poco edificantes del nuevo miembro de la Sociedad. Incluso llegó a afirmar que si bien Newton había llegado en efecto a establecer la fórmula para la fuerza gravitacional, no había aclarado la naturaleza de la misma. Newton replicó en latín "hypotesis non fingo", que quiere decir "yo no hago hipótesis", queriendo decir con ello que las causas últimas; la naturaleza fundamental de la fuerza de gravitación es desconocida y solamente se pueden describir sus efectos sobre los cuerpos, tal como él lo hizo; cualquier intento de penetrar a la esencia de la interacción gravitacional sería mediante una hipótesis arriesgada; una especulación que, al menos en aquella época no podría comprobarse. La respuesta de Newton no nada más fue una bofetada con guante blanco a la arrogancia de Hooke; fue toda una lección de humildad al mundo científico, recordándole que el único camino para alcanzar resultados verdaderos es a través de la observación de la naturaleza y que la labor del hombre o de la mujer de ciencia es partir de los resultados experimentales. Para dar explicación a los fenómenos naturales en el proceso no valen las conjeturas infundadas para alcanzar verdades.

Edmond Halley fue el único verdadero amigo de Newton. Tal vez a él fue a la única persona que el genio de Woolsthorpe le había confesado sus secretos. El fue el único que supo de los maravillosos desarrollos que había hecho en aquellos dos años de retiro en la granja de la abuela. Halley, siempre que se daba la oportunidad, no la desaprovechaba para incitar a su amigo a publicar su obra, pero Newton sistemáticamente se resistía a ello, aduciendo que aquél era un conocimiento peligroso y que ponerlo en manos del vulgo podría acarrear al mundo muy funestas consecuencias. En parte esos temores eran auténticos, pero detrás de todo lo que había era un enorme miedo a enfrentar críticas y controversias.

Por su parte Halley tenía un interés muy particular en los trabajos de Newton sobre la gravitación. El mismo había estado investigando acerca de la fuerza de atracción que obliga a los cuerpos celestes a permanecer en sus órbitas alrededor del Sol y, también había llegado a especular sobre una ley de inversos del cuadrado de las distancias, como la fórmula que explicara esas conductas de los planetas. Al igual que Hooke, él no poseía ninguna base sólida para confirmarla, pero sospechaba que podría deducirse a partir de la tercera ley de Kepler, que relaciona los cuadrados de los periodos de revolución de ellos, con el cubo de las distancias que los separaba del centro de su órbita. Para Halley aquella fórmula de la gravitación era crucial, pues hacía tiempo que venía estudiando las apariciones periódicas de un cometa. Cada 76 años se había reportado la llegada de uno de esos cuerpos brillantes, con una enorme cauda luminosa que llenaba de terror a la gente ignorante y supersticiosa, pues veían en esa aparición, el anuncio de desgracias y calamidades. Halley sospechaba que todas esas apariciones correspondían a un mismo cometa que debía tener una órbita muy oblonga y que se acercaba a intervalos de tiempo regulares al Sol, para luego alejarse de él a distancias enormes y regresar de nuevo. Por supuesto, este cuerpo es el que hoy día se conoce como el Cometa de Halley (curiosamente, Edmond Halley jamás vio el cometa que lo hizo famoso, pues apareció en 1759 cuando ya el astrónomo había muerto y su arribo anterior se había producido en 1683 pero no había podido ser observado). Para demostrar que se trataba del mismo cuerpo, Halley tenía que predecir las características de su órbita; su excentricidad y su periodo y ello solamente se podría hacer, contando con una teoría de gravitación y una mecánica. Ambas cosas habían sido desarrolladas por Newton, pero éste se resistía a hacerlas públicas. Halley presionó a su amigo, tratándolo de convencer de publicar su trabajo; mes con mes, año con año, volvió a tratar el asunto de su teoría de la gravitación, de su cálculo de fluxiones y siempre Newton dio largas al tema de la publicación.

Hasta que en 1686, veintiún años después de la peste, Newton accedió a la solicitud de su amigo. Entonces se decidió a escribir todas aquellas cuestiones que había investigado hacía tanto tiempo; las propiedades de la luz, el binomio, el cálculo de fluxiones, la mecánica y la gravitación. Adicionalmente, describió sus experimentos con los fluidos y su teoría sobre la viscosidad, que desarrolló posteriormente. Auxiliado por el inseparable Halley, en dieciocho meses de intenso trabajo, finalmente salió a la luz la gran obra de Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica,* que se traduce como "Principios matemáticos de la filosofía natural". Veintiún años de secreto; veintiún años de obscuridad habían terminado. La más importante obra científica de la historia fue publicada finalmente en 1687, a los cuarenta y cinco años del autor.

El libro se publicó en dos volúmenes y posteriormente apareció el tercero en 1704. En el primer volumen de los *Principia,* como se les llama en general, Newton enuncia los fundamentos y las leyes de la mecánica. Da crédito a Galileo en sus trabajos sobre la inercia y propone la composición de las fuerzas como vectores. Establece la que ahora se llama ley de la gravitación universal y, a partir de ella, deduce las tres leyes de Kepler. En el segundo tomo, presenta su estudio de los cuerpos que se mueven en un medio resistivo, es el primer tratamiento serio sobre la mecánica de los fluidos. Allí, desarrolla su teoría acerca del movimiento de cuerpos con diferentes formas, en el seno de un líquido, tendiente a establecer criterios científicos para el diseño de barcos. Para hacerlo, utiliza ciertos recursos matemáticos que hoy en día se conocen como el método de variaciones y el de las diferencias finitas. Describe asimismo, un experimento para cuantificar la viscosidad de algunos líquidos y halla la ley de viscosidad lineal de los llamados fluidos newtonianos. El tercer volumen de los Principia es realmente la corona de su obra. Allí describe matemáticamente el movimiento de los satélites que se mueven en órbitas alrededor de los planetas y de éstos alrededor del Sol, con lo cual establece un modelo unificado de la mecánica celeste, con base en su ley de gravitación universal. Propone un método para calcular las masas de los planetas, tomando como referencia a la masa de la Tierra, de la cuál obtiene un valor a partir de una estimación de su densidad media de 5.5 veces la del agua (que tiene, desde los tiempos de Arquímedes el valor de 1). Calcula el achatamiento de la Tierra en sus polos y con ello explica la precesión de los equinoccios que aunque ya se conocía desde la antigüedad, no se había comprendido. Propone su teoría sobre las mareas terrestres y describe las órbitas de los cometas con lo cual convirtió al trabajo de Halley en un caso particular.

Fueron tan impresionantes las consecuencias de la mecánica de Newton que desde entonces y aún en la actualidad, se adoptó una visión mecanicista del mundo, que sugiere que el futuro del Universo se puede predecir, tanto en su conjunto, como en cada una de sus partes, a partir de la mecánica. Por ejemplo, el principio de la Gravitación Universal permite comprender no solo el movimiento de la Luna alrededor de la Tierra y el movimiento de ésta con los demás planetas del sistema, alrededor del Sol, sino que también puede aplicarse a cualquier otro sistema planetario de los que parecen abundar en el Universo. Sin embargo, se sabe también que hay pequeñas discrepancias entre las predicciones y los hechos a nivel planetario y a más grande escala, las galaxias y cúmulos que pueblan el espacio. Mercurio, por ejemplo, el más cercano de los planetas al Sol, exhibe una ligerísima variación en su órbita que nunca ha sido posible explicar con la mecánica de Newton. A una escala mucho mayor, se ha podido observar que las galaxias se alejan, una de las otras, como si hubiera alguna fuerza que no es atractiva, como la que propone Newton, sino repulsiva. Estas discrepancias han obligado a profunda revisión del modelo teórico de Newton y a buscar una explicación alternativa del fenómeno de la gravitación, sobre bases completamente diferentes que utilizó él para construir su modelo. Sin embargo, a escalas de distancia y de tiempos menores, la mecánica clásica, como hoy se le llama, para distinguirlas de otras mecánicas, describe los fenómenos con excelente precisión y confiabilidad. A tal punto es exacta la mecánica de Newton, que la puesta en órbita de satélites artificiales, o el viaje de un artefacto construido por el hombre, desde la Tierra hasta planetas lejanos como Júpiter o Saturno se hacen a partir de los cálculos y las predicciones del esquema Newton.

Después de publicar su obra, Newton perdió el interés en la ciencia y prácticamente no volvió a trabajar en un asunto científico más. Tal vez el hecho que cambió su vida fue la muerte de su madre en 1689, que lo afectó profundamente, a pesar de que nunca se expresó bien de ella, por haberlo abandonado a temprana edad para casarse por segunda vez, sentía un gran afecto por ella y su desaparición lo sumió en una profunda depresión. Pasó varios años con grandes trastornos. No podía dormir, se volvió aún más huraño que antes; su carácter se tornó irascible y explosivo y los pocos amigos que tenía, prefirieron hacer un gracioso mutis y alejarse de él.

En secreto, Newton se dedicó entonces a la astrología y la alquimia, pasando horas enteras tratando de trasmutar el plomo en oro (sin conseguirlo, por supuesto). Aunque el origen de Isaac Newton era cristiano y había sido instruido dentro de la Iglesia anglicana, se convirtió en una suerte de monoteísta judaico, simpatizante de la escuela de Maimónides (un médico español que creó una secta contraria a las Sagradas Escrituras que, entre otras cosas, criticaba el dogma de la Santísima Trinidad porque, decía, era un politeísmo disfrazado de monoteísmo).

En 1699 se le dio el cargo de alcaide de la Casa de Moneda de Inglaterra; en este puesto prestó grandes servicios a la Corona, pues unificó la moneda que a la sazón contaba con muchas denominaciones, y organizó su circulación en el reino. Por su parte, Newton se volvió un hombre rico y poderoso con el nombramiento. Su poder, su posición económica subieron aún más, cuando en 1703 la Real Academia de Londres lo nombró su presidente; cargo que ocupó hasta su muerte, un jueves 20 de marzo de 1727. Durante casi un cuarto de siglo dirigió la política científica de Inglaterra desde el más alto sitial en la sociedad.

Para colmo de todos los honores y reconocimientos recibidos, en 1705, la reina Ana de Inglaterra lo armó caballero por todos sus servicios a la ciencia. Desde entonces ostentó el título de sir Isaac Newton. A su muerte, se le rindieron los honores más altos, jamás vistos para un hombre de ciencia, fue enterrado en Londres y se mandó hacer una tumba monumental en la llamada Cámara Jerusalén de esa ciudad.

IV.2. LA CIENCIA Y SUS MÉTODOS

I. EL MÉTODO EXPERIMENTAL

La ciencia es una de las actividades más agradables y gozosas que hay. Cada día, el científico, sentado enfrente de su escritorio, dentro de un cubículo repleto de libros y artículos científicos, provisto con un lápiz y hojas de papel, se interna en una aventura nueva, en un laberinto de ideas, fórmulas matemáticas y consideraciones lógicas, buscando un camino que lo lleve a desentrañar nuevos misterios de la naturaleza. Es como una competencia donde la meta es hallar las verdades que oculta celosamente el Universo y con ellas poder ampliar el ámbito del conocimiento para utilizarlo en provecho de la humanidad.

El experimentador, en su laboratorio o el astrónomo en el observatorio hacen lo mismo. Armados con sus aparatos de medida y observación, hurgan en las entrañas más profundas de la materia o en los confines del espacio, tratando de hallar signos, evidencias que les permitan colocar piezas adicionales en el enorme rompecabezas del mundo.

Es una labor tenaz, sistemática, donde la inteligencia y el ingenio humano adquieren su más alta expresión, para desvelar los innumerables secretos que guardan los átomos, las moléculas, los tejidos vivos, la Tierra, las galaxias y todo lo demás. Hacer ciencia es buscar conocimientos verdaderos. Para llegar al conocimiento de las cosas es necesario proponer esquemas lógicos generales que abarquen la mayor cantidad de aspectos y detalles sobre el tema y de los cuales se puedan inferir, mediante un proceso deductivo, predicciones acerca de los fenómenos naturales. Estos esquemas lógicos son los que se conocen como teorías. Una vez que se cuenta con una teoría, habrá de someterse a todo género de pruebas, tanto desde el punto de su consistencia lógica, cuanto de su exactitud experimental, para ratificar que los vaticinios, las predicciones que se deducen de ella son correctos; esto es que están de acuerdo con los resultados, con los hallazgos experimentales que se observan. Siempre el experimento y la observación son las pruebas últimas e irrefutables de la exactitud de las teorías. Una teoría es considerada como correcta si las predicciones que se hacen con ella están de acuerdo con los resultados experimentales y observacionales. Al acto de comparar aquéllas con éstos se le llama contrastarían. Una teoría es válida si al someterla a la contrastación, todos los resultados que se deducen de ella están en concordancia con los experimentos.

Claramente, el papel que juegan los experimentos y las observaciones es crucial para las teorías. Por ello se deben realizar con el mayor cuidado, evitando cometer errores y tratando de hacer las medidas y las observaciones con la mayor precisión y confiabilidad posibles. Para realizar un experimento científico es necesario preparar ciertos objetos llamados muestras y someterlos a procesos controlados con el objeto de que exhiban aquellos fenómenos que se desea probar. Los procesos pueden ser movimientos, calor, fuerzas, etcétera. Las muestras, por su parte, pueden ser cuerpos materiales: compuestos químicos, metales, tejidos, seres vivos y en el caso de la astronomía, son los cuerpos celestes, los planetas las estrellas y las galaxias que pueblan el universo. Los experimentos se trata de llevarlos a cabo en las condiciones más controladas que se pueda, con el fin de que las medidas que se hagan como resultado de ellos sean nítidas y precisas.

En un experimento, observar significa registrar y medir. Para observar los resultados de un experimento hay que contar con aparatos que registren y midan los fenómenos: cámaras fotográficas, relojes, imanes, detectores de luz, etc. Cada vez que se hace un experimento hay que hacer la mayor cantidad de observaciones que sea posible; así, mientras más registros y medidas se tenga, se podrá estar más seguro de los resultados que se obtienen de él y las contrastaciones que se hagan con la teoría serán más confiables.

Por su parte, mientras mayor sea el número de pruebas a las que se haya sometido una teoría exitosamente; mientras haya salido airosa de un mayor cúmulo de contrastaciones experimentales, se dice que es una teoría verdadera, una teoría buena y confiable.

El talento y la inteligencia humanas han construido a lo lago del tiempo, una buena cantidad de teorías sobre muy diversos aspectos de la naturaleza. Algunas teorías han sido esquemas muy atractivos, bellos y en apariencia verdaderos, como aquélla que sostenía Aristóteles de que el cerebro de los animales superiores y del hombre mismo, debido a su forma tan llena de vericuetos, prominencias y hendiduras está hecho para enfriar la sangre, como un intercambiador de calor. Ese esquema, aunque simple y en apariencia lógico, se sabe hoy en día que es incorrecto y aunque las circunvoluciones cerebrales siguen siendo en general un misterio para los anatomistas y para los fisiólogos, hay la certeza de que no sirven al propósito aristotélico de enfriar fluido alguno.

La astrología de Ptolomeo es otro ejemplo de un esquema lógico atractivo y simple que no ha podido sostenerse ante la contrastación. La afirmación de que los rasgos característicos de cada persona vienen desde el momento del nacimiento, como resultado de la peculiar disposición de los astros que afectaron al recién nacido, justo al recibir ese primer contacto con el universo y que quedan como una impronta indeleble en su personalidad, es una explicación que desde luego llama la atención de casi todo mundo por su sencillez, porque da una "razón" para comprender las diferencias, muchas veces notables en la forma de ser de los individuos. De hecho, ha sido tan atractiva esta teoría ptolemaica, que muchos grandes científicos y hombres de estado, famosos por su inteligencia, han sido fervientes seguidores de la astrología y miles de personas en el mundo, no comienzan su día, no dan un paso a la calle, sin antes haber consultado el horóscopo, para saber lo que les depara el día y poder así enfrentarlo bien dispuestos y prevenidos. Kepler, Tycho Brahe y el propio Newton dependían en buena medida de la astrología y regían sus vidas con el apoyo de los horóscopos. Julio César, Napoleón y Hitler planeaban sus campañas de conquista, asesorados por un astrólogo y no iniciaban acción alguna sin antes haber consultado los vaticinios del oráculo.

No obstante, la astrología ha fallado sistemáticamente. No ha resistido la contrastación y en la gran mayoría de los casos los pronósticos que hace resultan ser totalmente incorrectos. De todas, tal vez la prueba más clara de su invalidez sea el caso de los gemelos idénticos. Dos bebés, concebidos de un mismo óvulo y un espermatozoide, que al momento de la primera bipartición de la célula quedaron separados y, experimentaron sendos procesos de gestación en el mismo claustro materno, con los mismos nutrientes y son dados a luz, al término del embarazo, casi de manera simultánea, de acuerdo con la astrología, deberían adquirir exactamente, o casi, los mismos rasgos personales y sus caracteres deberían ser los mismos, máxime si su infancia transcurrió en el mismo hogar, con sus padres y asistieron a la misma escuela. Pues bien, resulta que los gemelos idénticos no son tanto en lo que se refiere a sus personalidades y frecuentemente sus vidas devienen en individuos totalmente distintos, no obstante sus enormes semejanzas originales.

La astrología, como muchos otros intentos que se han hecho por comprender la relación que tiene cada individuo con el Universo, no ha podido sustentarse como un cuerpo estructurado de conocimientos y proposiciones que conduzcan a la verdad.

IV.3.2. El método científico

Toda teoría científica consta, a grandes rasgos, de dos partes: la primera es la etapa inductiva y la segunda la deductiva. En la primera etapa es necesario establecer un conjunto de afirmaciones generales, a partir de la observación y del análisis de los fenómenos propios de este tema; por eso se dice que es la etapa inductiva, porque se parte de un conocimiento particular, sobre un conjunto de hechos o de evidencias más bien insuficientes para establecer afirmaciones generales. Como se sabe, pasar de lo particular para llegar a lo general es lo que se llama inducción. Así, un entomólogo que desee estructurar una teoría sobre los insectos, por ejemplo, tendrá que observar muchos especímenes, pero nunca podrá obtener la información sobre todos ellos. A partir de un cierto número de observaciones, podrá arriesgar una afirmación general: "Todos los insectos tienen seis patas." Desde luego, no le puede constar que, en efecto, todos estos bichitos tengan seis patas. Para ello tendría que observar a todos los insectos, cosa que es materialmente imposible. Sin embargo, ha establecido una afirmación general, como resultado de un proceso inductivo. A partir de pocas (o muchas) experiencias, categóricamente afirma lo general.

Una vez cubierta la etapa inductiva, entonces la teoría alcanza su parte deductiva; es decir, aquella en la cual, a partir de las afirmaciones generales, se infieren resultados particulares. Estos resultados son los que se contrastan experimentalmente para probar la validez de la teoría. Dentro del ejemplo de la teoría sobre los insectos, una vez que el entomólogo ha llegado a su afirmación categórica de que todo insecto tiene seis patas, es necesario que saque inferencias o deducciones a partir de ella. Por ejemplo, las arañas tienen ocho o diez patas; por lo tanto no son insectos, o bien, aunque una abeja o una cucaracha de pronto exhiban sólo cinco patas, siguen siendo insectos, pues seguramente tenían seis, pero por algún accidente perdieron una.

El contraste con insectos de cuatro o cinco patas, en todo caso, no es algo que ponga en entredicho a la teoría, siempre que exista una razón de peso, una evidencia que muestre que tales excepciones no afectan a la regla. Así, perder una pata en una pelea de ninguna manera implica que el individuo deja de ser insecto por ello. Lo grave sería que de pronto se hallara una comunidad importante de bichos con todas las demás características de los insectos, pero que en su estado normal nacieron con cuatro patas. Con tal evidencia experimental toda la teoría se derrumbaría, pues una de dos, o tener seis patas ya no es la característica fundamental de los insectos y en tal caso es necesario volver al laboratorio, a la experimentación, al registro de muchas especies para hallar otra característica que pueda ser generalizada para identificarlos, o bien en efecto, todos los insectos tienen seis patas y aquellos animales raros con cuatro patas por más que parezcan insectos, no lo son. En este caso, nuevamente, las seis patas no bastan para caracterizar completamente al espécimen, así que habrá que experimentar más para complementar la afirmación con otra que ya no deje lugar a dudas sobre la esencia de la insectitud.

Inducción y deducción son las dos partes que conforman una teoría científica. Siempre vienen juntas, primero la inducción y luego la deducción. Primero hay que ascender, desde lo más particular hasta lo más universal, y luego hay que deslizarse por la pendiente de la deducción, desde lo alto de las generalidades, hasta los casos particulares, los resultados individuales. Descender a estas particularidades es deducir. Se trata, pues, de una estrategia que es necesario seguir siempre que se desee construir una teoría científica para aplicar y predecir cierta clase de fenómenos naturales. No puede haber una teoría científica sin parte deductiva; tampoco se le puede llamar teoría científica a un constructo intelectual que carezca de la parte inductiva. Un esquema sin etapa inductiva, se llama religión, en el mejor de los casos, donde lo que se puede hacer es inferir todas sus particularidades a partir del dogma; esto es, a partir de las más elevadas proposiciones universales hechas de pronto; de la nada.

De hecho la inducción es lo que distingue y caracteriza a las teorías científicas de cualquier otro esquema del pensamiento. No es fácil inducir; tal parece que el ser humano está dotado de una inteligencia que lo hace naturalmente dedudictivo, pero a la hora de pasar de aspectos particulares de una cuestión para generalizar, se vuelve torpe, inseguro y frecuentemente se equivoca. Por ello, históricamente la inducción arribó tan tarde al pensamiento científico, pues no tiene más de dos mil años de haberse iniciado allá en las brumosas de Siracusa, en la época de Arquímedes y se consolidó apenas hace unos cuatrocientos cincuenta a quinientos años, con los trabajos de Copérnico, Kepler, Galileo y Newton. Esta estrategia doble, de inducir y deducir después, es la que hoy por hoy se conoce como el Método Científico. Es la más poderosa herramienta intelectual para hallar verdades naturales y, aunque en sus comienzos no tenía siquiera un nombre que la distinguiera y muchos de sus detalles aún no se incluían en ella, hoy en día es un cuerpo de conceptos generales que permiten atacar prácticamente todos los ámbitos del conocimiento científico.

Para poderlo visualizar, el método científico puede entenderse como una resbaladilla o tobogán, al que es necesario subir primero, para deslizarse después. Subir, significa ir paso a paso, por los peldaños de la escalera de la inducción. Estos peldaños representan las fases sucesivas del proceso. Así, para construir una teoría científica, de acuerdo con este método, antes que nada es necesario seleccionar con gran precisión el campo del conocimiento que abarcará tal teoría; por ejemplo, el estudio del comportamiento de los niños mexicanos de la Sierra Tarahumara, entre los 8 y los 14 años, en el período de 1888 a 1894, bajo condiciones de alimentación por debajo de las 1 100 kilocalorías diarias.

Una vez seleccionado el campo de estudio, hay que establecer lo que se conoce como el marco conceptual. Aquí habrán de postularse ciertos hechos básicos que se darán por válidos sin necesidad de prueba. Estos postulados se basan fundamentalmente en dos criterios para su proposición: el primero es el sentido común o el uso o la costumbre y el segundo, la sencillez y la belleza del mismo. Así, al establecer, por ejemplo que todos los niños entre los 8 y los 14 años, allá en la Sierra Tarahumara eran sujetos equivalentes de estudio, se está postulando un principio de homogeneidad de esa población, en el lapso de estudio de 1888 a 1894. Esta proposición no se puede comprobar o refutar *a priori*, así que aquella persona que esté interesada en trabajar con la teoría, tendrá que aceptarla tal como se plantea, sin objetar. ¡Claro que puede estar equivocada! Pero ello solamente podrá saberse hasta que la teoría haya quedado completamente estructurada (al final de la escalerilla de ascenso al tobogán) y el proceso de contrastación haya mostrado que las predicciones que se infieren del modelo no concuerdan con los resultados experimentales.

Toda teoría es limitada. No existe teoría que explique todo sobre todas las cosas. Las teorías son modelos intelectuales que tratan de dar explicación a ciertos aspectos de la naturaleza. Por supuesto que mientras más amplio sea el campo de interés de la teoría, es mejor. Un modelo teórico que, por el contrario, abarcara una franja estrechísima del conocimiento, en condiciones totalmente limitadas, carece de importancia para la ciencia, porque el espíritu de ésta, es siempre de abarcar más y más. Sin embargo hay que recalcar que no existe la teoría de todo. Hay un ámbito, un conjunto de hechos, de individuos, de situaciones que son propios de una teoría y hay todo un universo de cosas que caen por fuera de su dominio de interés de aplicación. Estos límites deben ser también, establecidos con toda nitidez al momento de estructurar la teoría. Así, en el ejemplo pueril que se ha tomado para reforzar los conceptos propios del método científico, hay que establecer que los niños de menos de 8 años o de más de 14; o bien aquellos otros que vivieron antes de 1888 o después de 1894, o que no vivían en la Sierra Tarahumara o también, aquellos cuya alimentación contuviese más de 1 100 kilocalorías no son sujetos del estudio que se presenta.

Establecer claramente los límites de una teoría, es pues un asunto importante y constituye en el esquema del tobogán, el tercer peldaño de la escalera la inducción.

Ya establecido el campo de estudio, el marco conceptual y las limitaciones de la teoría, se está en condiciones de ascender un peldaño más; aquí es necesario hacer acopio de información, toda la información pertinente al tema que tratará la teoría y que pueda conseguirse, deberá acumularse con el objeto de hacer el análisis, una vez clasificada y posteriormente la síntesis de ella. Clasificar la información, significa ordenarla de acuerdo con uno o más criterios, de tal suerte que ciertos parámetros comiencen a mostrar sus tendencias y sus variaciones. Agrupar los datos de los niños de la tarahumara por sus edades, o por sexo, o por la ingesta de calorías, muy bien puede ser una labor que muestre correlaciones en conductas y las edades, etcétera, que puedan servir de indicadores para la ulterior estructuración de la teoría. También será necesario en esta fase, descartar aquellas otras fuentes de información que no rindan datos pertinentes al modelo, porque estén incompletos, confusos o bien por que correspondan a sujetos o acontecimientos fuera de los límites establecidos previamente para la teoría.

Buscar correlaciones es precisamente hacer el análisis de la información. Esta etapa corresponde al sexto peldaño de la escalera de la inducción. Continuando con el ejemplo de la teoría sobre los niños tarahumara del siglo XIX, las etapas 4, 5 y 6 del método científico corresponden al trabajo documental que tuvo que hacer el autor de esa teoría, para hacerse de la mayor información posible sobre el tema: reportes, notas aparecidas en los diarios de aquella época, actas de nacimiento o de defunciones y en fin, todo género de citas que puedan servir a su trabajo. Terminado el acopio de información hubo de seleccionar aquella información, clasificándola por fecha, por tipo, por contenido y haciendo notas de sus pesquisas, donde registró sus hallazgos. El análisis viene después de este prolijo trabajo. De pronto se van volviendo evidentes ciertos hechos; correlaciones que al ojo experto del investigador revelan características profundas de la población que estudia; quizá, a la luz del análisis, comienza a aparecer en forma más y más clara que entre los ocho y los catorce años, aquellos niños tarahumara que carecían de una alimentación adecuada presentaban una gran proclividad a contraer ciertos padecimientos carenciales, o bien, que sus tallas promedio eran inferiores a las de otros niños de las mismas edades pero con una ingestión mayor de calorías, o también, que terminaban en últimos lugares en el juego de patear una pelota de madera por días enteros, sobre montes y valles... El hecho es que el investigador, en forma sistemática, como resultado del acopio, de la selección y clasificación y luego, como producto del análisis de la información, que sintetiza el conocimiento adquirido: los datos muestran que aquellos niños tuvieron deficiencias en sus desarrollos físicos, gran propensión a las enfermedades y expectativas cortas de vida como resultado de su inadecuada alimentación.

En este estadio de su investigación, el hombre de ciencia ha ascendido hasta el séptimo peldaño de la escalera de la inducción, pues ha llegado al establecimiento de proposiciones generales que conciernen a su tema de estudio. Ahora puede dar el último paso y estructurar de manera lógica y formal su teoría, partiendo de los principios básicos que estableció y desarrollando un conjunto de consideraciones basadas en la información recabada, puede establecer un aserto general: todo tarahumara que no coma bien, presentará pobre desarrollo físico, intelectual y motor.

Aquí se inicia el descenso por la pendiente de la deducción. Una vez que una teoría ha quedado totalmente estructurada, es necesario echar a andar esa maquinaria para hacer predicciones, para deducir de ella resultados que sean útiles, que permitan obtener ventajas de ese conocimiento. También aquí se inicia el largo camino de la contrastación. Habrá que diseñar experimentos, habrá que proponer ciertas situaciones prácticas donde la teoría confronte los resultados y ponga a prueba su utilidad. Una curiosa peculiaridad de todo científico es que nunca está del todo satisfecho con una teoría, así que todo el tiempo se la pasa pensando en algún experimento, o en algún razonamiento deductivo con el cual poner en evidencia al modelo teórico, e incluso hacerlo caer bajo el peso de sus inconsistencias. No parece haber placer mayor para un hombre o una mujer de ciencia, que haber clavado la puntilla a tal o cual teoría tenida por válida hasta entonces. Haber sido el matador de un constructo así da una íntima satisfacción, como la de haber cazado un búfalo o haber conquistado la cima de alguna montaña.

Por otra parte, hacer ciencia sin una teoría que ayude a explicar los fenómenos es un trabajo azaroso e inseguro. El científico que se interna en una región donde el conocimiento humano no había penetrado antes, donde ningún constructo había sido intentado, o bien, que a alguna teoría que antes se tenía para explicar los fenómenos propios de ese ámbito, hubiera caído por insostenible, se siente muy mal, sus pesquisas son tímidas y no arriesga la publicación de resultado alguno hasta que ha hecho muchas veces el mismo experimento o el mismo cálculo y siempre obtiene lo mismo. En cuanto se descubre un territorio cognitivo nuevo, prístino, el científico no puede resistir la compulsión de explorar y construir en cuanto pueda una teoría explicativa. Pero en cuanto se tiene la teoría, hará todo los intentos posibles para destruirla... así es la naturaleza humana.

V. El espacio, el tiempo y los observadores

V.l. EL ESPACIO FÍSICO

PARA establecer su marco conceptual, Newton postuló un conjunto de axiomas acerca del espacio, del tiempo, de la materia, de los observadores que estudian y registran el movimiento de los cuerpos y de los acontecimientos físicos que ocurren en tales cuerpos.

Así, postuló que el espacio físico es el escenario en el que ocurren los fenómenos naturales. Se trata de un enorme escenario, en el cual se encuentran todos los cuerpos; desde la más pequeña brizna de polvo, hasta el más gigantesco conglomerado de estrellas y que abarca a todo el Universo. Postuló que tal espacio físico tiene tres dimensiones, tal como lo dicta el sentido común. Son las tres medidas que hay que realizar para determinar la longitud, la altura y el espesor de todos los objetos materiales que se encuentran en él.

Claro que hay algunos cuerpos, como esta hoja de papel, que aunque tiene sus tres dimensiones, una ellas es insignificante. Esta hoja de papel tiene una longitud bien definida y una altura: ambas pueden ser medidas mediante una escala graduada y sin dificultad se obtienen estas dos dimensiones. Sin embargo, su espesor es muy pequeño. Esta dimensión es, tal vez de una cuantas décimas de un milímetro y con una regla normal se vuelve muy incierta su medida. Por ello se puede acordar que una delgada hoja de papel, igual que cualquier otro cuerpo cuya tercera dimensión sea mucho más pequeña que las otras dos, es un objeto con dos dimensiones únicamente. En la geometría, una cosa como estas se idealiza mediante el concepto de "superficie". Así pues, una superficie es un objeto con dos dimensiones: longitud y altura.

De igual manera se hace la idealización de objetos con una sola dimensión. Estas son las líneas. Una línea ideal solamente tiene la dimensión de longitud; sus otras dos dimensiones son despreciables. Finalmente, el punto es la idealización geométrica de un cuerpo sin dimensiones; en efecto, un punto no tiene ni longitud, ni altura, ni espesor, así que su dimensión es cero.

Así mismo, Newton postuló que el espacio de tres dimensiones es "homogéneo"; esto es, que no hay en todo el Universo un punto del espacio que sea distinto esencialmente a los demás. Todos los puntos son, por el contrario, iguales. Es como un principio de equidad, de igualdad que no establece distinción alguna en determinado lugar del mundo, sino que todos son equivalentes.

Tampoco existen direcciones preferentes en el espacio físico. Esto es el principio de "isotropía". Así como todo punto es equivalente a todo otro; cualquier dirección, cualquier derrotero es enteramente equivalente a otro; no hay en el universo, direcciones preferentes o privilegiadas.[1]

Newton propuso que el espacio debe ser euclídeo; esto es, que de acuerdo con Euclídes (365-275 a.c), el escenario de todos los acontecimientos naturales debe satisfacer cinco proposiciones, cin-

[1] Observaciones hechas recientemente con el telescopio Hubble, en órbita alrededor de la Tierra, parecen sugerir que el Universo no es isótropo ni homogéneo.

co postulados fundamentales: 1) dos puntos cualesquiera del espacio pueden ser unidos entre sí mediante una línea; 2) tres puntos cualesquiera, pero que no sean colineales, pueden pertenecer a un plano; 3) dos planos del espacio, que no sean paralelos, se intersecan en una línea; 4) una línea recta atraviesa un plano en un punto y 5) si una línea recta atraviesa otras dos líneas rectas no paralelas, se forma un triángulo, cuyos ángulos interiores suman en total dos ángulos rectos.

V.2. El tiempo

Difícilmente un pez podría desarrollar el sentido de la tercera dimensión con un ojo a cada lado de su cabeza aplanada, lo único que puede percibir es la longitud y la altura de los objetos que observa. El sentido del espesor, la profundidad; la tercera dimensión, no tiene significado para él, como lo tiene un animal superior. Muy probablemente esta cualidad del espacio, la profundidad, el espesor de los objetos, sea percibido por un pez en forma indirecta, por el tamaño relativo de los objetos que los ve más pequeños si están más distantes y más grandes si se encuentran cerca. También es posible que la tercera dimensión, para un animal así, sea una cualidad asociada a los cambios de luminosidad, pues allí, en el mundo submarino, la luz se dispersa mucho más rápidamente que en la atmósfera, la obscuridad invade el paisaje a unos cuantos metros de profundidad y las criaturas en ese mundo fantasmagórico parecen desaparecer cuando se alejan, como si una niebla obscura se las tragara apenas a unas cuantas brazadas del observador. Quizá la luminosidad sea otra forma de percibir indirectamente la tercera dimensión para los primitivos moradores del fondo marino. Así, si otro pez se acerca, el primero percibe el aumento del brillo, lo ve más claramente a medida que se aproxima a él y de ese modo intuye la cercanía.

En todo caso, donde los conceptos de largo, ancho y espesor cobran pleno sentido es arriba del mar, sobre la superficie terrestre. El ave de presa: el halcón o el águila dependen para su sobrevivencia de un sentido muy evolucionado de la vista y de un cerebro también mucho más avanzado, que procesa la información que le llega desde los ojos, al través del nervio óptico y da sentido pleno a los tres elementos fundamentales del espacio físico; sus tres dimensiones. Ni siquiera el ser humano primitivo, aquel cavernícola de finales del cuaternario tenía un concepto tan claro como un águila del escenario en el que vivía y se desplazaba.

De hecho, ese portentoso descubrimiento, a saber, que el espacio, el lugar en donde ocurren todos los acontecimientos naturales, el seno del universo es tridimensional, tuvo que esperar miles y miles de años, hasta que los griegos, entre los siglos IV a.c. y III d.c, desarrollaron la geometría. Comparando los lapsos, se puede decir que ese hallazgo se hizo apenas ayer, si se considera que el hombre hecho y derecho; el homo sapiens, como le llaman los antropólogos al padre del hombre actual, apareció sobre la Tierra hace unos cuarenta mil años.

Pues bien, si el espacio tuvo que esperar hasta que naciera Euclides en el 365 a.C. para hacerse plena y totalmente evidente al ser humano, el tiempo ha tenido que seguir durmiendo el sueño de los justos hasta la actualidad sin que su esencia haya sido comprendida totalmente y de todas las preguntas que disparan inmisericordes los pequeños a sus progenitores cuando llegan a la temible edad de los "porqués" , la más terrible la que más dramáticamente hace aflorar la estúpida faz de la ignorancia en el adulto, es aquella que dice más o menos: ¿y qué es el tiempo, papito? Porque la única respuesta digna es: "...el tiempo es lo que medimos con el reloj, hijo mío...".

Y es que no hay más que esto, pues aunque el ser humano es entre todos los animales el único que se percata del tiempo y distingue su paso con los efectos que hace sobre el mismo y sobre las cosas al irlos deteriorando gradualmente con la edad, no ha podido dar una explicación de él. Hasta ahora, el tiempo sigue siendo aquello que se mide con un reloj... Bueno, a decir verdad, ha habido algunos avances en la concepción del tiempo en lo que va del siglo XX, como se verá al final de este libro, cuando se trate nuevamente este tema, sin embargo, hoy por hoy sigue siendo uno de los misterios más profundos; uno de los secretos más celosamente guardados por la Madre Naturaleza. Es probable que el siglo XXI inicie con ese nuevo descubrimiento y que la humanidad entera pueda comenzar a comprender la estructura del tiempo y así esté en condiciones de defenderse de su implacable fatalidad. Pero para desvelar ese enigma, aún falta tiempo.

Newton tuvo que plantearse el problema de dar una definición del tiempo. Una definición que le permitiera incorporar ese concepto a su esquema teórico, en forma operacional precisa. Sin entrar en complicaciones, Newton postuló que el tiempo es aquello que se mide con un reloj; Así, simplemente, sin entrar en discusiones metafísicas. Y aunque para todos los seres humanos conscientes del tiempo es absolutamente claro que a veces marcha más de prisa y en otras transcurre con una lentitud exasperante, el gran genio inglés estableció que el tiempo discurre en forma totalmente uniforme y universal, esto significa que las unidades de tiempo son todas iguales. Una hora es exactamente igual en duración a otra hora; cada minuto que transcurre es igual al minuto anterior y el que aún no ha pasado, cuando lo haga, será idéntico al que ya quedó en la historia. Además, el segundo medido por un ciudadano de México es, en su duración, exactamente igual al segundo que midió el entrenador olímpico que toma el tiempo a un pupilo en el estadio de prácticas de Timbuctú, al otro lado del Mundo.

Ambas cualidades; que el tiempo esté hecho de lapsos unitarios idénticos y que su medida sea la misma para todo observador, sin importar ni su ubicación en el Universo, ni su estado de reposo o de movimiento, constituyen los elementos que le dan la calidad de "estrictamente monótono" (un segundo igual al siguiente segundo, igual al siguiente, etc.) y "absoluto" (es el mismo para todos). Así pues, Isaac Newton postuló que el tiempo sería incorporado a su esquema teórico, como un parámetro estrictamente monótono y absoluto. Establecido de esta manera, el tiempo quedó desde entonces como aquella propiedad de la Naturaleza que sirve para comparar el movimiento de los cuerpos; pues el estudiarlos y decidir cuál de entre un conjunto de ellos se mueve más rápidamente que los demás, habrá de medir las distancias que recorren, referidas a un mismo patrón que es el tiempo que les llevó cubrirlas. Como el tiempo va uniforme y es absoluto, tomando el empleado al ejecutar el movimiento como el mismo para todos los cuerpos, aquel que recorrió la mayor distancia en el mismo lapso es el más veloz. De la misma manera, para estudiar otras propiedades del movimiento, al referirlas a un tiempo así, quedan como medidas plenas de significado físico.

Hubo un detalle en relación con la definición operacional del tiempo, que aparentemente se le olvidó a Newton, o bien no consideró importante para su teoría. No mencionó el hecho de que el tiempo solamente fluye en una dirección, del pasado al futuro. Tal como estructuró la mecánica, da la impresión, como se verá más adelante, que el sentido en que transcurre el tiempo, muy bien puede tomarse al revés (de futuro a pasado), sin que la esencia del movimiento de los cuerpos se afecte. Así, si por ejemplo se observa un vídeo en el que aparece un proyectil, volando por los aires y describiendo una trayectoria desde el punto en que fue lanzado, hasta el lugar donde toca tierra, ese vídeo puede hacerse correr en sentido opuesto en el aparato reproductor. La escena que se verá entonces será la del proyectil despegando del lugar donde se impactó y volando después hacia atrás hasta llegar al punto de su lanzamiento. Desde el punto de vista de Newton, este movimiento que aparentemente ocurrió en un sentido del tiempo contrario a su flujo natural, también es un movimiento posible para la mecánica. Este hecho es el que se conoce en la física como la "reversibilidad", se dice así, que la mecánica; aquella teoría desarrollada por Newton en el siglo XVII, es un esquema reversible que permite, en principio un sentido de flujo del tiempo contrario al natural.

¿Por qué no incorporó, un axioma adicional, un postulado acerca del sentido unidireccional del tiempo? Porque no era necesario. Desde un principio Newton siguió la táctica de ahorrar la mayor cantidad de afirmaciones axiomáticas en su teoría y solamente quedarse con aquellas que fueran indispensables para su estructuración y desarrollo ulterior. No juzgó entonces necesario complicar su esquema con algún postulado acerca de la direccionalidad del tiempo y sencillamente lo omitió. Tal como quedó su modelo, tiene la propiedad de ser reversible, de tal suerte que de acuerdo con él, el movimiento de los cuerpos materiales, en principio, puede ocurrir del futuro al pasado.

Contra todo lo que pudiera pensarse, al hacer la mecánica reversible, no la convirtió Newton en una teoría débil sino que ocurrió todo lo contrario. El hecho de permitir que su esquema teórico fuese reversible echó las bases para que los científicos pudieran remontarse al pasado y comprender con aquellos hechos ocurridos muchas veces hace millones y millones de años, lo que sucede hoy, o lo que va a ocurrir en el futuro. Hacer su teoría reversible fue la más grande chispa de su genialidad.

V.3. LOS OBSERVADORES

Y por supuesto, si el tiempo es lo que se mide con un reloj y en la mecánica hay que referir el movimiento de los cuerpos materiales al tiempo, entonces, para estudiar este tema es necesario estar provisto de un reloj. Es algo como cuando se desea cocinar un rico caldo de pollo; para poderlo hacer se necesita antes que nada un pollo. También, si de lo que trata la mecánica es del movimiento de los cuerpos materiales en el espacio, hay que encontrar algún modo de ubicar con exactitud las posiciones sucesivas que van ocupando durante su movimiento y una forma de medir las distancias a las que se encuentran de cierto punto en cada instante.

Ambas cosas: ubicar posiciones y medir distancias, se consiguen en una forma estupenda mediante un "sistema de coordenadas". Un sistema de coordenadas es un concepto muy simple y muy útil para ubicar y medir distancias en el espacio. Para construir un sistema de coordenadas se requiere de tres reglas de medir; por ejemplo, tres de esas tiras de madera bien pulidas y rectas que tienen grabada una escala métrica, que los sastres y modistos usan para su trabajo. Así como se muestra en la figura V.8, se colocan las tres tiras de medir de manera que cada una de ellas apunte en una dirección diferente; las tres direcciones ortogonales (a 90°) de la longitud, la dirección de la altura y la dirección del espesor. Se hace coincidir uno de los extremos de las reglas; aquel donde comienza la escala graduada de cada una de ellas y... ¡ya está! Se tiene un sistema de coordenadas.

Ahora bien, cualquier punto en el espacio, como el punto *P* de la figura V.8 se puede situar sin lugar a dudas con respecto al origen común *O* mediante el sencillo procedimiento de medir las distancias desde P hasta *O* como sigue: Primero se traza una línea vertical desde P hasta tocar el piso en el punto *A.* En seguida se trazan dos segmentos de líneas rectas; uno en la dirección de la longitud, hasta llegar a la regla del "espesor" y otro segmento de recta, en la dirección del espesor hasta intersecar la regla de la "longitud". Al punto donde la línea horizontal toca a la regla de los espesores se le ha denotado por *B;* en tanto que al punto donde la línea del espesor toca a la regla de las longitudes se la ha denotado por *C* en la figura V.9. Finalmente, regresando al punto *P,* se traza una línea recta auxiliar, horizontalmente hasta intersecar con la regla de las "alturas" en el punto *D.* Los puntos *B, C y D* marcan las "proyecciones" de P sobre cada una de las tres reglas perpendiculares. A partir del origen *O,* se miden ahora las distancias hasta las proyecciones de *P:* de *O* hasta *B* se mide la llamada "abscisa"; esto es, la longitud del segmento *OB.* De *O* hasta C se mide la "ordenada"; o sea la longitud del segmento *OC* y desde *O* hasta *D* se mide la "cota"; la longitud del segmento *OD.* Las tres medidas así obtenidas; la abscisa, la ordenada y la cota del punto P son sus "coordenadas". Las coordenadas de cada punto en el espacio se pueden obtener de la misma manera, hallando primero las proyecciones sobre las tres direcciones ortogonales y luego, encontrando la abscisa, la ordenada y la cota, se obtienen tales coordenadas. Con ellas, se tiene la ubicación precisa de ese punto, con respecto al origen *O.*

De hecho, en vez de poner cada vez las tres reglas o escalas de medir, para construir un sistema de coordenadas se puede simplificar el procedimiento y dibujar tres líneas rectas perpendiculares entre si, como se muestra en la figura V.9. Con una punta de flecha en el extremo de cada segmento de recta se indica el sentido en que hay que hacer las medidas a partir del origen *O.* Cada línea dirigida se llama un *eje coordenado* y se denotan con las últimas tres letras del alfabeto: x para el eje de las abscisas; y para el eje de las ordenadas y z para el eje de las cotas. Nuevamente, para ubicar la posición de cualquier punto en el espacio euclídeo de tres dimensiones con respecto al origen *O* de este sistema coordenado, hay que seguir los mismos pasos que para el caso anterior, cuando se tenían las tres reglas perpendiculares, a saber, trazar las tres pro-

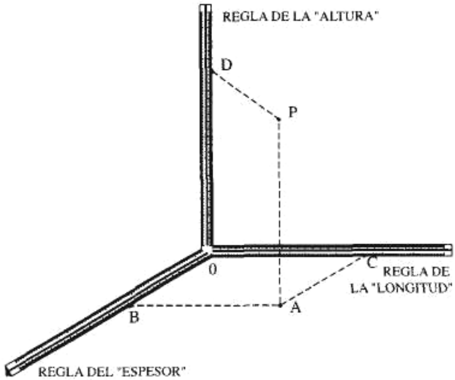

Figura V.l. Un sistema de coordenadas se construye con tres reglas de medir, colocadas ortogonalmente entre sí (formando ángulos de 90°), con un origen común O.

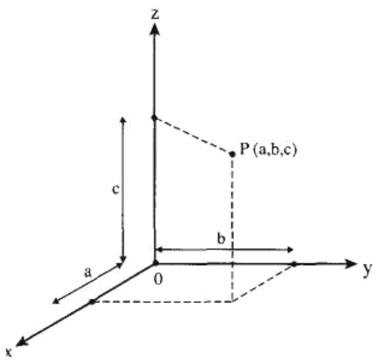

Figura V.2. Sistema de coordenadas, empleando ahora los ejes de abscisas, ordenadas y cotas en vez de las reglas.

yecciones del punto P sobre los ejes coordenados y luego medir desde O las distancias a ellas; éstas son las coordenadas de P respecto a O.

Si la abscisa de P mide "a"; su ordenada "b", y su cota "c", entonces las coordenadas de este punto con respecto a O son los números (a, b, c). Se acostumbra escribirlos así, en orden, comenzando por la abscisa y terminando por la cota, separados por las comas y encerrados en un paréntesis. Y para saber de qué punto del espacio se trata, se tiene la costumbre de denotarla como P (a, b, c).

Un sistema de coordenadas es indispensable cuando se tiene que observar la posición de objetos en el espacio, Así como sus movimientos. Siempre que se desee hacer un estudio acerca del movimiento habrá que referirlo a cierto marco y nada mejor que hacerlo con un sistema coordenado como éste que aquí se describe. El capitán de un barco que va en alta mar tiene la necesidad de referirse a las cosas de su nave de acuerdo con una regla parecida a ésta. Todo mundo sabe allí, por ejemplo que la punta delantera del barco es la proa y la parte posterior es la popa. Entre proa y popa hay una línea que divide imaginariamente al navío en dos partes; esa línea puede identificarse con el eje de las abscisas de un sistema coordenado y la proa es como la punta de la flecha que señala la dirección de crecimiento de esa coordenada. Parado en el puente de mando, el capitán ve hacia adelante, hacia la proa; hacia el distante punto donde desembarcará. Hacia su derecha está la dirección del "babor" y a la izquierda el "estribor" del barco. Nuevamente, entre babor y estribor hay una línea invisible que pasa por el puente de mando y que señala una dirección perpendicular a aquélla en la que se mueve el barco. La línea babor-estribor es como el eje de las ordenadas de un sistema coordenado cuyo origen está en el puente de mando, donde se halla el capitán. La tercera dimensión es la línea que parte del piso donde se halla el capitán en el puente de mando y que asciende verticalmente hacia el cénit. Esta es la línea o el eje de las cotas. Así, un barco navegando en alta mar puede considerarse también como provisto de un sistema de coordenadas móvil, respecto del cual se hacen observaciones para ubicar en todo punto de su travesía a la nave.

Todo individuo que observa los fenómenos naturales es en sí mismo un sistema de coordenadas con sus tres ejes, el de las abscisas, que se puede imaginar como una línea que apunta al frente, y que lo atraviesa de atrás a adelante. Su eje de las ordenadas puede ser la línea que va de su derecha a su izquierda y el eje de las cotas es la línea vertical que parte de sus pies y va hacia la cabeza. El punto donde se cruzan los tres ejes es el origen de ese sistema de coordenadas. Tal sistema representa el marco de referencia que cada individuo lleva consigo a todas partes y que le sirve para ubicar los fenómenos naturales que observa, en relación a él.

Así, al ver un objeto en el espacio se le puede referir a su sistema de coordenadas propio y afirmar que el cuerpo se encuentra, por ejemplo, al frente de él, a su derecha y a una altura por encima de sus ojos, etc. Así, ubica al objeto.

Marcos de referencia o sistemas de coordenadas se pueden construir en todas partes: en la punta de una montaña, en el fondo del mar, en una estación espacial que órbita la Tierra, en la Luna, o aun en otra galaxia, si se pudiera viajar allá. Marcos de referencia los hay de hecho, en todos lados; a troche y moche, a granel y a destajo; el Universo puede estar plagado de ellos y todos sirven a un mismo propósito; observar, ubicar y medir. Observar a los cuerpos grandes y pequeños, ubicar su localización y medir sus posiciones sucesivas al través del tiempo y del espacio.

V.4. El movimiento

Cuando un cuerpo se mueve, su movimiento se observa como una sucesión de posiciones que ocupa en el espacio, al transcurrir el tiempo. En cada instante el objeto de estudio pasa de una posición a otra y luego a otra, en forma continua e ininterrumpida. Es posible tomar una gran cantidad de diapositivas del cuerpo que se mueve, y luego proyectarlas, una a una, en el orden que fueron tomadas. Si esto se hace con suficiente rapidez, se tendrá la idea del movimiento de ese cuerpo ¡esto es el cine!, un conjunto de fotos instantáneas que, después de reveladas, se proyectan una a una y dan la ilusión del movimiento. Pero ahora imagínese el lector que todas las diapositivas se proyectaran simultáneamente. Entonces se vería en la pantalla una mancha borrosa que es la imagen del cuerpo en sus distintas posiciones. En particular, si se fija la atención en un punto particular del cuerpo; una esquina, una mancha o cualquier detalle de él que sobresalga, que resalte sobre todos los demás, se podrá observar que ese punto ha generado una línea más o menos continua en el espacio. Esa es la trayectoria de ese punto del cuerpo. Por ejemplo, una joven que va en bicicleta a lo largo de una calle bien pavimentada y nivelada, como se muestra en la figura V.3, viaja de izquierda a derecha, con un movimiento uniforme. Si se observa en particular el prendedor que lleva en su cabeza para detener su cabello, es fácil imaginar que va siguiendo una trayectoria que es prácticamente una línea recta horizontal, tal como se dibujó en esa misma figura.

Por otra parte, si ahora se piensa en un borrachito que va caminando por la calle en forma zigzagueante, trastabillando a cada paso, como se ve en la figura V.4 y se fija la atención en un punto de él; por ejemplo en la parte más alta de su cabeza, entonces se verá que nuevamente, se tiene una línea: la trayectoria de ese punto de la persona. Sólo que ahora es una línea curva, cortada, sinuosa. Ambas; la trayectoria de la joven ciclista, como la del borrachito son líneas con las cuales es posible tener idea del movimiento de todo el cuerpo. En el primer caso, se habla de una trayectoria rectilínea, en tanto que en el segundo es curvilínea. Como su nombre lo indica, la trayectoria rectilínea significa que el cuerpo se mueve en línea recta, mientras que la trayectoria curvilínea se refiere a un

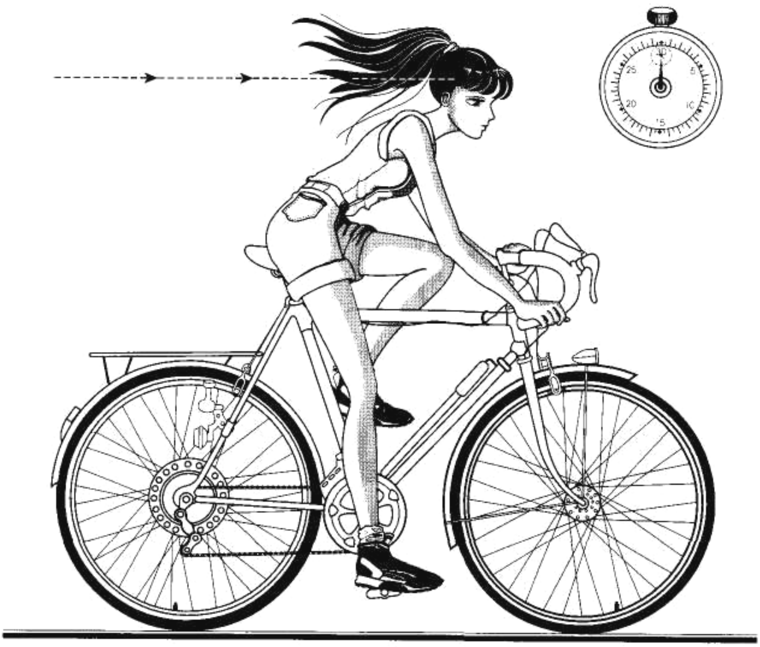

Figura V.3. Una ciclista se desplaza de izquierda a derecha uniformemente; cada punto de este objeto compuesto describe una trayectoria que es recta y horizontal, como se muestra.

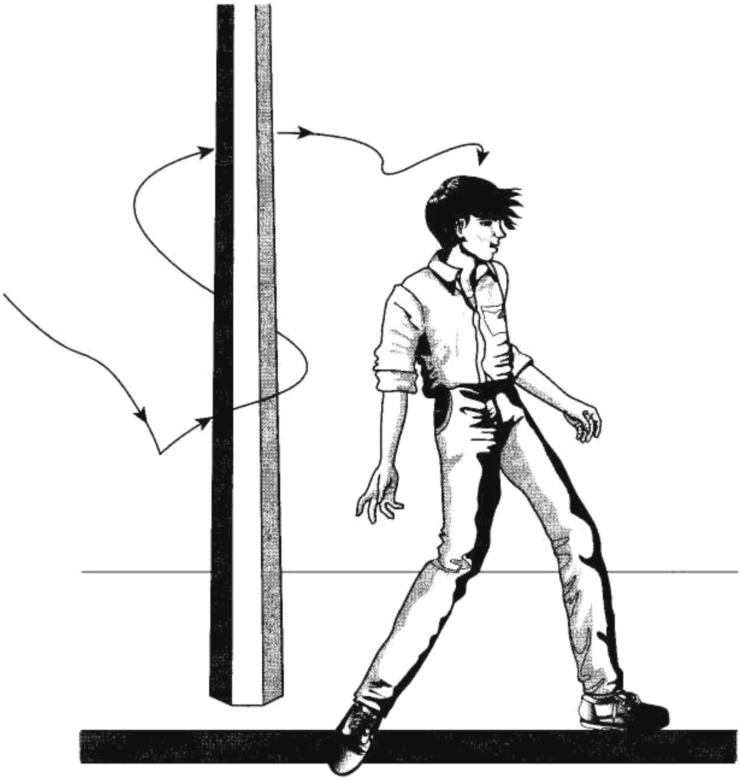

Figura V.4. Un borrachito se desplaza en una forma errática y zigzagueante; cada uno de los puntos de este cuerpo describe una trayectoria curva y no uniforme.

objeto —el borrachito en este caso— que se desplaza siguiendo un sendero curvo.

Dibujar las trayectorias en el espacio y referirlas a un sistema de coordenadas es interesante, pues, en primer lugar, permite visualizar la historia del movimiento de un objeto; en un segundo término, se puede pronosticar qué camino va a seguir en el futuro; esto es, cuáles serán los puntos del espacio que va a ocupar ese cuerpo en los instantes que vendrán. Así, en el caso de la ciclista, viendo su trayectoria rectilínea, se puede predecir que continuará de la misma manera, con un movimiento a la derecha, rectilíneo y uniforme. El otro, el caso del borrachito es más complicado. Se ve en la figura V. 12 que la línea que fue dibujando en el espacio con su andar obnubilado fue en el pasado inmediato, muy llena de vuelcos y torceduras. Llegó desde la izquierda; dio una vuelta al poste de alumbrado, después de haberse caído y luego dando traspiés continuó hacia la derecha. ¿Qué va a hacer después? Ni él mismo lo sabe. No es posible predecir con certeza hacia adonde caminará en el instante siguiente; puede ser que continúe como va, intentando dar una segunda vuelta al poste, en una suerte de entrada en órbita, como satélite de ese poderoso centro de atracción, o puede que vire repentinamente para proseguir su alienado andar hacia la derecha, alejándose del poste, buscando el próximo. No es posible hacer un vaticinio confiable. Desde luego, los movimientos rectilíneos son siempre más fáciles que los curvilíneos. Hay otras características del movimiento de los cuerpos que se pueden conocer a partir de las trayectorias. Por ejemplo, volviendo al caso de la ciclista, si se mide la distancia que recorrió desde que apareció por la izquierda de la figura, hasta que se perdió en la parte de la derecha y se toma el tiempo que le llevó hacer ese recorrido, entonces es posible saber cuál ha sido la rapidez con la que viaja. Así, si recorrió tres metros y lo hizo en tres segundos, entonces, dividiendo la distancia recorrida entre el tiempo que le llevó recorrerla se tiene que:

$$\frac{3 \text{ metros}}{3 \text{ segundos}} = \frac{m}{S}$$

ésta es su rapidez: un metro en cada segundo; o, para decirlo como se acostumbra: un metro por segundo. Si su movimiento continuara así, a lo largo de una hora habría recorrido 3600 m o sea que, suponiendo que esa misma cadencia del movimiento se conservara, la muchacha viajará 3.6 km en una hora; su rapidez es, pues de 3.6 (km/h). Pero hay más que se debe estudiar de este mismo ejemplo: Se puede hablar ahora de la velocidad. La velocidad de la ciclista se puede representar por medio de una flecha, tal como se hace en la figura V.5. Justo adelante de su nariz se ha dibujado el "vector" velocidad que representa las características más importantes de este concepto. Realmente el haber dibujado el vector enfrente de la nariz de la ciclista no tiene importancia alguna; igualmente pudo haberse dibujado en el eje de la rueda delantera o en el centro del cuadro de la bicicleta; eso no importa, el vector velocidad se puede poner donde sea. Lo importante, en cambio son tres cualidades: el tamaño de la flecha; esto es, la magnitud del vector debe hacerse con cuidado para que represente la rapidez, que en este ejemplo es de 3.6 (km/h) 0 un metro por segundo, que es lo mismo. Así, al dibujarlo, se tuvo que tomar en cuenta una escala, de tal modo que al medir su magnitud, el vector velocidad da un tamaño de 3.6 en esa escala. La dirección del vector también es importante. En la figura V.5 se muestra que la ciclista no asciende, ni cae, sino que viaja en la "dirección" derecha-izquierda; sobre la horizontal. Finalmente, el vector velocidad tiene en uno de sus extremos una punta de flecha, que indica su "sentido". En este caso el sentido es hacia la derecha. Magnitud, dirección y sentido son las tres características básicas de todo vector. El vector velocidad para la ciclista es pues una flecha con una magnitud igual a la rapidez con que viaja; en la dirección horizontal y con el sentido hacia la derecha. De hecho como la ciclista viaja así uniformemente, el mismo vector velocidad describirá su viaje en todo punto de la trayectoria.

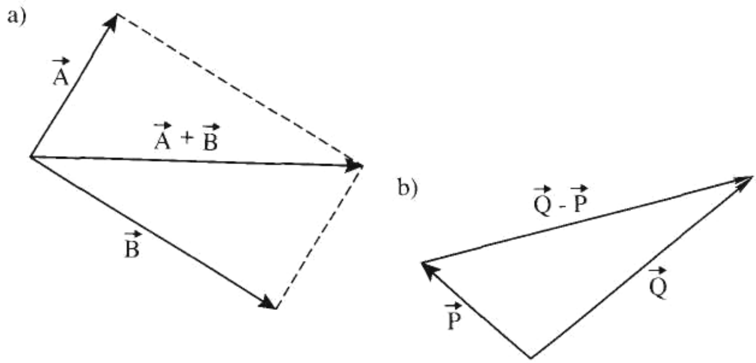

Figura V. 5. *a)* Para sumar dos vectores se sigue la regla del paralelogramo: se trazan dos líneas auxiliares paralelas a ambos vectores y se une el extemo común de ellos con el punto de intesección de las líneas, *b)* Para restar dos vectores se traza una línea desde la punta de uno hasta la punta del otro. El sentido del vector diferencia es el del minuendo.

El caso del borrachito es muy distinto. Su velocidad no es uniforme sino que cambia de un instante a otro, el vector velocidad para el borrachito no es el mismo que para la ciclista. Ni siquiera es el mismo si se calcula al principio de su trayectoria que al final. Como ha venido dando traspiés, a veces avanza más rápido y a veces se detiene o cambia de sentido; a veces su cuerpo cae pesadamente y otras se levanta. En realidad, en cada punto de su trayectoria lleva una velocidad diferente

El borrachito tiene una velocidad no uniforme, en contraste con

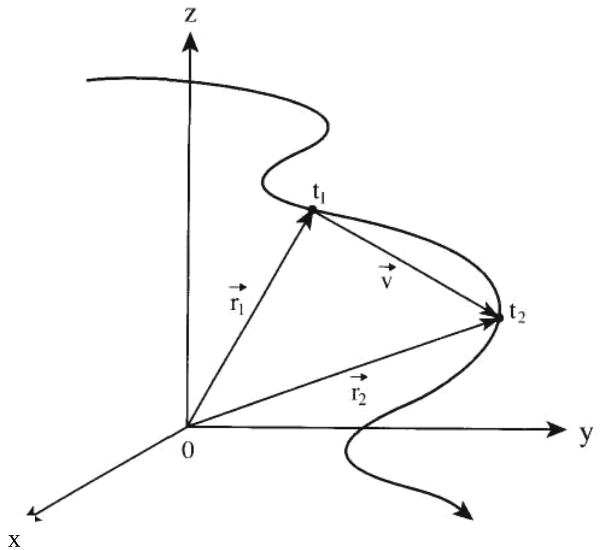

Figura V.6. El vector velocidad media, $\vec{v}$, se obtiene al comparar las posiciones sucesivas del cuerpo al desplazarse en el espacio y dividirlas entre el intervalo t_1 y t_2.

la velocidad uniforme de la ciclista, pues en tanto que aquél va cambiando su magnitud (esto es, su rapidez), su dirección y su sentido, ella, mantiene las tres características prácticamente iguales a lo largo de su movimiento. Así pues, las velocidades que tienen los cuerpos son vectores y éstas pueden ser uniformes o no.

En general, para calcular la velocidad con que se mueve un cuerpo, hay que comparar las posiciones sucesivas que ocupa ese cuerpo en el espacio, en dos instantes sucesivos. Tomando la diferencia de las posiciones ocupadas y dividiendo esa diferencia entre el tiempo transcurrido entre esos dos instantes, se tiene "la velocidad media" con que se mueve ese cuerpo. La posición del cuerpo en un instante puede ubicarse desde el origen *O* de un sistema de coordenadas mediante un vector *r* hasta el cuerpo. En la figura V.7 se muestra la trayectoria de un cuerpo y se ve como dos vectores r_1 y r_2 apuntan a sendas posiciones del cuerpo en los instantes t_1 y t_2. El vector velocidad se obtiene uniendo la posición en t_1 con la posición en t_2 y dividiendo entre el intervalo $t_2 - t_1$. De acuerdo con la regla de sustracción de vectores que se vio anteriormente, el vector velocidad media queda definido como la diferencia de los vectores $\vec{r}_1$ y $\vec{r}_2$, dividida entre la diferencia de los instantes t_1 y t_2 esto es:

$$\vec{V} = \frac{\vec{r} - \vec{r}}{t_2 - t_1} \cdot$$

La magnitud de este vector es la rapidez media del cuerpo. Las unidades en que se mide la velocidad son metros entre segundos (m/s), así que, cuando se mencione una velocidad particular a la que se mueve un objeto en el espacio, hay que añadir que son tantos "metros por segundo". Así no cabe duda que se está mencionando una velocidad.1

Tomando de nuevo los ejemplos de la ciclista y el borrachito, es de verse que la velocidad de la primera se mantuvo a lo largo de su trayectoria, tanto en magnitud, en dirección, como en sentido de modo que al comparar su velocidad en un instante cualquiera, con la velocidad que llevaba al siguiente instante no hay cambio. Si la velocidad no cambia entonces se dice que ese cuerpo no está acelerado, o que su aceleración es cero. Por su parte, la velocidad del borrachito si cambia; al medir su movimiento en un instante se ve que es diferente al que lleva, un instante después. Cambia tanto en su rapidez (magnitud), como en su dirección y sentido, así que en estas circunstancias se afirma que el borrachito se mueve con aceleración.

Para calcular la aceleración de un cuerpo cualquiera que se mueva en el espacio, es necesario medir su velocidad en un instante inicial, luego, hay que hacer lo mismo en un instante posterior; una vez que se tienen estas dos medidas, hay que tomar la diferencia de la velocidad, medida en el segundo instante, menos la que se había tomado al principio, en el instante inicial. Esta diferencia de velocidades hay que dividirla entre la diferencia de los instantes correspondientes. Lo que se obtiene es la llamada aceleración media de ese cuerpo. Así, la aceleración es la relación que hay entre la diferencia de las velocidades de un cuerpo en dos instantes sucesivos y la diferencia de esos dos instantes. Si $\vec{v}_2$ es la velocidad de un cuerpo en el segundo instante t_2 y $\vec{v}_1$ es la velocidad de ese cuerpo en el primer instante t_1, entonces la aceleración media que tiene ese mismo cuerpo dentro del lapso entre t_1 y t_2 es:

$$\vec{a} = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{t_2 - t_1} \cdot$$

Como se ha dividido la diferencia de velocidades entre el lapso transcurrido, entonces la aceleración tiene el significado de un cambio de la velocidad en la unidad de tiempo. Por lo tanto, debe tener unidades de velocidad entre tiempo, o sea (m/s^2). Siempre que se hable de la aceleración de un cuerpo y en particular, de la magnitud de este vector, habrá que mencionar las unidades. Por ejemplo, si la magnitud del vector aceleración de un cuerpo es de diez, habrá que especificar que son diez metros sobre segundo al cuadrado, para que sepa que es, en efecto, una aceleración.

Tal vez el ejemplo más simple de un movimiento sea el que se denomina *movimiento rectilíneo uniforme*. Como su nombre indica, se trata de un cuerpo que viaja por el espacio en una trayectoria rectilínea, con una velocidad constante; esto es que su rapidez no cambia y tampoco su dirección y su sentido. La aceleración de un cuerpo en movimiento rectilíneo uniforme (MRU) es cero en consecuencia.

Realmente el MRU, es un movimiento muy raro en la naturaleza, pues casi todos los cuerpos poseen cierta aceleración. Al mirar a través de un telescopio, los cuerpos celestes casi siempre se observa que llevan un movimiento no rectilíneo, es decir, acelerado. Sin embargo, en un laboratorio es posible crear ciertas condiciones experimentales de tal suerte que los objetos que se observan allí se ven en MRU, al menos por lapsos breves. Para crear esas condiciones tan especiales es necesario eliminar la fricción y la resistencia del aire. Una forma de conseguir lo primero es usar mesas cubiertas de hielo y sobre ellas empujar objetos de metal perfectamente pulidos.

Para lograr lo segundo, se puede introducir la mesa completa en una cámara hermética al vacío. Así, al darle un impulso inicial a un objeto, se observa un movimiento en línea recta y con aceleración nula.

Siendo la aceleración igual a cero, esto significa que el cuerpo recorre distancias uniformemente iguales en tiempos iguales. Y si su velocidad es v (m/s), entonces, en el primer segundo de su recorrido cubre una distancia que es igual a la magnitud del vector v, en la dirección y el mismo sentido que éste. En el segundo, la distancia recorrida es del doble de $|v|$, y así sucesivamente, de manera que, considerando la dirección y el sentido del movimiento fijos y constantes, la distancia recorrida por un cuerpo animado de movimiento rectilíneo uniforme es:

$$l = vt$$

esto es igual al producto de la rapidez por el tiempo. Así por ejemplo, si un objeto se mueve en movimiento rectilíneo uniforme en alguna dirección y con cierto sentido bien definidos con una rapidez de 60 (km/h), entonces, expresada en [m/s] su rapidez es de 16.67 [m/s]. En un lapso de 60 (s), el objeto habrá recorrido, entonces, una distancia que se calcula con la fórmula:

$$l = 16.7 \left[\frac{m}{s}\right] \times 60[s] = 1000[m]$$

Otro tipo de movimiento muy simple es aquel que se conoce como la "caída libre". Galileo Galilei fue quien realizó experimentos con cuerpos a los que dejaba caer de cierta altura. El fue quien, por primera vez se percató de que un cuerpo cualquiera, al caer, aumenta su rapidez en forma uniforme, sin cambiar ni su dirección, ni su sentido. Como se recordará, el célebre toscano del siglo XVII solía realizar experimentos con cuerpos simples, para demostrar la falsedad de las aseveraciones aristotélicas y aunque parece que no fue cierto, dícese que en alguna ocasión subió a lo alto de la famosa torre inclinada de Pisa, con el objeto de dejar caer objetos diversos y asentar de una vez por todas demostrado que todos los cuerpos —él los llamaba "los graves"— caen con la misma forma, independientemente de su composición y, en segundo lugar, para estudiar el fenómeno de la aceleración que hasta entonces no estaba muy claramente definido.

Galileo observó que al dejar caer un cuerpo desde cierta altura, la rapidez con que cae aumenta en forma proporcional al tiempo transcurrido. Así por ejemplo, si en el primer segundo de su caída, el objeto ha alcanzado una velocidad de 35.5 km/h, al segundo tendrá 71 km/h y al tercero 106.5 km/h. La rapidez se ha duplicado, o triplicado, en la misma proporción que el tiempo. Y aunque el vector velocidad de este objeto vaya siempre en la misma dirección y apunte en el mismo sentido, debido al cambio que ha sufrido en su magnitud, hay una aceleración. Comparando dos vectores velocidad es posible percatarse cómo la aceleración es un vector que va en la misma dirección que el vector velocidad y en el mismo sentido.

Curiosamente, al tomar la diferencia entre dos vectores velocidad sucesivos; la de $\vec{v}_2 - \vec{v}_1$ o la de $\vec{v}_3 - \vec{v}_2$, o la de $\vec{v}_4 - \vec{v}_3$ Galileo pudo observar que siempre dio como resultado un vector cuya magnitud es la misma: 9.81 (m/s). Por lo tanto, concluyó que la aceleración con que caen los cuerpos es un vector que apunta hacia el centro de la Tierra y que tiene una magnitud constante de 9.81 (m/s^2). Este es el valor de la llamada "constante de aceleración de la gravedad terrestre" al nivel del mar. Se acostumbra denotar a esta constante como *g*, al lado de su valor:

$$g \quad g = 19.81 \left[\frac{m}{s^2}\right].$$

Haciendo el experimento de caída libre con muchos cuerpos cada vez, Galileo pudo llegar a otro resultado experimental muy importante, a saber, que todo cuerpo que cae libremente, no importando de qué material está hecho, no importando tampoco si es grande o pequeño, cae con la misma aceleración y la magnitud del vector, en cualquier caso siempre es *"g"*. Con este resultado, Galileo pudo demostrar, sin lugar a dudas, que aquel viejo argumento aristotélico que afirmaba que los cuerpos más pesados caen con mayor rapidez que los ligeros es falso. Este mismo resultado le sirvió a Newton para estructurar su teoría, muchos años después.

Por lo pronto, dos importantes conclusiones se pueden sacar de estos resultados: en primer lugar, si la magnitud de la aceleración tiene siempre el mismo valor $g = 9.81$ (m/s^2) en todos los puntos de la tierra a nivel del mar, entonces la rapidez del cuerpo al caer debe crecer proporcionalmente a este valor constante. Así, en el primer segundo de la caída, llevará una rapidez de 9.81 (m/s) y en el siguiente instante, cuando hayan transcurrido dos segundos, la rapidez se habrá duplicado a 19.62 (m/s), en el tercero se triplicará a 29.43 (m/s), etc. de tal modo que al comparar la tercera con la segunda, o la segunda con la primera, siempre se tenga el mismo valor *"g"*. En forma matemática este resultado se escribe así:

$$|v| = gt,$$

la magnitud del vector velocidad (la rapidez) se ha escrito encerrando al vector v entre dos barritas verticales; éste es el símbolo para "magnitud". Al otro lado del signo de igualdad (=) se ha escrito *gt* para significar la multiplicación del factor *g* de aceleración de la gravedad terrestre, por el tiempo *t*. El producto de "*g*" por "*t*" debe dar, de acuerdo con esta expresión simbólica, la rapidez que lleva el cuerpo al caer libremente, en cualquier instante *t*. Así por ejemplo, si se desea saber cual será la rapidez del cuerpo cuando haya transcurrido dos y medio segundos desde que se soltó, basta con multiplicar:

$$9.81 \times 2.5 = 24.53 \left[\frac{m}{s}\right]$$

de manera que en ese lapso, el objeto habrá adquirido una rapidez de 24.53 (m/s) o lo que es lo mismo, 88.29 (km/h).

En segundo lugar, si la aceleración con que cae un cuerpo es constante, e igual a 9.81 (m/s^2) y la rapidez de caída aumenta en forma proporcional al tiempo que transcurre, entonces la distancia que recorre en cada segundo es cada vez mayor.

Tal vez la forma más simple y útil de estudiar el movimiento de un cuerpo, como el que ahora se ha tratado es mediante gráficas. Para hacer una gráfica hay que trazar dos líneas perpendiculares, como se muestra en la figura V.19. Supóngase por ejemplo que el eje horizontal representa al tiempo que transcurre desde un instante inicial en *O,* y va tomando valores cada vez mayores hacia la derecha: 1 segundo, 2 segundos, 3 segundos, etc. Estos valores se representan mediante marcas equidistantes en ese eje. En el eje vertical se ha escrito |v| que es el valor de la rapidez. Nuevamente, la flecha vertical indica el sentido en que crece la rapidez. Partiendo del valor 0 (cero), se han dibujado marcas en el eje vertical, a intervalos regulares, indicando valores crecientes de la rapidez. Aquí se ha escogido una escala de 10 en 10 unidades de la rapidez, 10 (m/s), 20 (m/s), etc. El cuerpo que cae desde lo alto, como en el problema de Galileo, y que va aumentando gradualmente, su rapidez se puede representar muy simplemente en un diagrama de |v| vs. *t* como el de la figura V.19. Así por ejemplo, en el instante original t= 0 (s) el cuerpo estaba en reposo con |v| = 0 (m/s); esto se representa con un punto en *O.* Luego, en el instante t_1 = 1 el cuerpo había adquirido una $|v_1|$ = 9.81 (m/s). Este estado de movimiento se representa en el diagrama mediante un punto cuya ubicación es (1, 9.81).

Al instante t_2 = 2(s), el cuerpo alcanza una rapidez $|v_2|$ = 19.62 (m/s). Se representa este nuevo estado de movimiento mediante otro punto, cuyas coordenadas en este mismo diagrama son (2, 19.62).

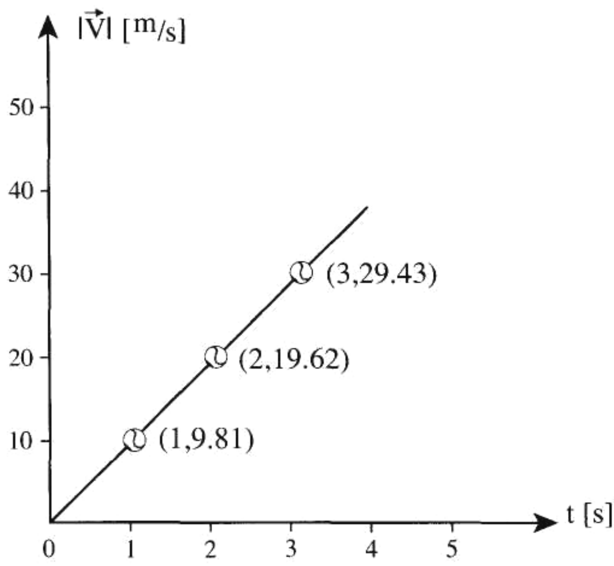

Figura V.7. Diagrama $|\vec{v}|$ vs. *t* en el que se muestra la gráfica del movimiento de caída libre de un cuerpo; se trata de una línea continua que parte de *O,* hacia arriba y a la derecha.

Y así sucesivamente, luego, es conveniente unir los puntos mediante una línea continua. Lo que se obtiene es la gráfica de la rapidez contra el tiempo. Se puede ver a golpe de vista que el cuerpo va más rápido cada segundo, de modo que si no llegara a tocar tierra alguna vez, continuaría aumentando indefinidamente su rapidez. Una propiedad muy interesante de los diagramas de |v| vs. t es que el área por debajo de la gráfica de la rapidez contra el tiempo tiene un significado preciso. Cortando la gráfica en el instante t3, = 3(s), se ve en este ejemplo particular cómo se genera un triángulo rectángulo por debajo de ella. Este triángulo tiene por área lo que es el semiproducto de la base por la altura. Que es la bien conocida formula para hallar el área de un triángulo rectángulo. En el caso que aquí se trata, el área es 1/2 (3 X 29.43) = 44.15. Este resultado no es casual; se trata ni más ni menos que la distancia recorrida. O mejor dicho, la altura que ha recorrido el cuerpo desde el instante original t = 0 (s) hasta t_3 = 3(s); ¡ En esos tres segundos, cayó 44.15 (m) exactamente!

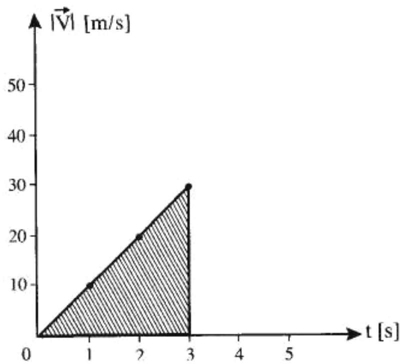

Figura V.8. El área bajo la gráfica de la rapidez contra el tiempo es un triángulo rectángulo para el caso de un cuerpo que cae libremente. El área se calcula con la fórmula h= 1/2 $|\vec{a}|\ t^2$.

De muy poco serviría un diagrama como éste que se ha mostrado, si sólo sirviera para resolver un problema particular. De hecho, este tipo de ayuda gráfica es una formidable herramienta para resolver problemas de movimiento de cuerpos. Si se piensa un momento, se verá que siempre que se tenga un movimiento uniformemente acelerado; esto es, que la aceleración que tenga el cuerpo sea constante, entonces la rapidez |v| se podrá escribir como:

$$v = a \times t$$

donde "a" es la magnitud (constante) del vector aceleración y *t* es el tiempo. Ahora bien, siempre que ocurra este hecho, la gráfica de la rapidez de ese cuerpo contra el tiempo, será una línea recta oblicua del mismo tipo que la mostrada en la figura V.7. Si esto es así, entonces la distancia recorrida por el cuerpo, en un lapso cualquiera *t* (s) será numéricamente igual al área del triángulo rectángulo subtendido por esa línea oblicua. Si se denota por *"h"* a la distancia recorrida, medida en metros, (m), entonces:

$$h = \frac{1}{2}\ (v\ x\ t)$$

O bien, recordando que la rapidez |v| es a su vez igual al producto de la magnitud "a" por el tiempo "í", entonces:

$$h = \left|\frac{1}{2}\right|\ (v\ x\ t^2)$$

La expresión anterior permite calcular la distancia recorrida por un cuerpo cualquiera que partió del reposo en un instante original y se movió con una aceleración constante, cuya magnitud es "a".
Regresando al caso anterior, si por ejemplo se deseara saber la distancia que recorrió el cuerpo que se dejó caer desde lo alto de una torre, cuando transcurrió un segundo y medio, con ayuda de la fórmula se puede calcular de inmediato:

$$h = \left|\frac{1}{2}\right|\ (9.81 \times (1.5)^2 = 11.04[m]$$

El resultado muestra que un segundo y medio después de haber iniciado su caída, un cuerpo ha recorrido 11.04 (m).

Otro movimiento interesante que merece la pena estudiarse, brevemente, es el "movimiento circular uniforme". Este se da siempre que un cuerpo gire alrededor de un centro, dando vueltas uniformemente, como en el caso de una honda, en cuyo extremo un niño puso una piedra y la hace dar vueltas por encima de su cabeza, o como la Luna cuando órbita alrededor de la Tierra en un movimiento que describe un círculo cada 28.4 días, o como un satélite artificial alrededor de la misma.

Es un caso en verdad interesante, pues aquí la rapidez con que se mueve el cuerpo es siempre la misma |v|; sin embargo, la dirección y el sentido del vector velocidad cambian a cada instante. Esto significa que hay una aceleración. Para encontrar el vector aceleración que imprime a la partícula este movimiento, se comparan los vectores velocidad en dos instantes sucesivos y se divide esta diferencia por el tiempo, tal como se mencionó al principio de este capítulo. Esto se puede hacer gráficamente tal como se muestra a continuación:

Primero se dibujan con cuidado los vectores velocidad $\vec{v}$ del cuerpo que describe la trayectoria circular, en dos posiciones sucesivas próximas. Luego, con cuidado, se traslada el segundo vector paralelamente a sí mismo, hasta que su extremo inferior esté en contacto con el extremo inferior del primer vector velocidad. Entonces se obtiene gráficamente su diferencia, cuidando de restar el primero del segundo, en ese orden. El vector diferencia así obtenido se divide ahora por el lapso transcurrido entre las dos posiciones sucesivas; ésta es la aceleración media. Finalmente, dibújese el vector aceleración media justo en el punto medio entre las dos posiciones sucesivas del cuerpo sobre su trayectoria. Lo que se obtiene es un vector que parte de la trayectoria y apunta siempre hacia el centro del círculo. No importa cuál haya sido el par de posiciones sucesivas que se escogió. El vector aceleración media, en el caso de un movimiento circular uniforme, como el que aquí se analiza, siempre conserva su misma magnitud, pero su dirección y su sentido cambian en cada instante, de tal suerte, que siempre apunta al centro del movimiento.

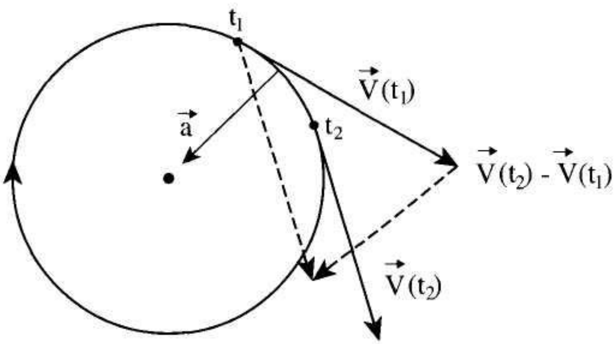

Figura V.9. Se comparan los vectores velocidad $\vec{v}$ (t_1) $\vec{v}$ (t_2) y luego se divide esa diferencia entre $t_2 — t_1$; el resultado es el vector aceleración centrípeta.

Por esta razón se le ha dado a este, vector el nombre de "aceleración centrípeta", que significa justamente, que se trata de una aceleración dirigida hacia el centro del movimiento circular.[2]

[2] Aquellos lectores que no estén avezados en el manejo del álgebra pueden omitir la siguiente exposición sobre la magnitud de la aceleración, sin ningún problema.

Para evaluar la magnitud del vector aceleración centrípeta, se procede en una forma diferente. Obsérvese la figura V.8. En ella se ha dibujado un sector de la trayectoria circular de algún cuerpo. En la cúspide del círculo se ha trazado, la magnitud del vector velocidad (la rapidez), multiplicada por el tiempo t_2 - t_1 entre dos posiciones sucesivas del cuerpo.

$$\vec{v} \cdot (t_2 - t_1).$$

Este producto da como resultado la distancia que recorrería esa partícula horizontalmente, si no estuviera urgida por la aceleración centrípeta. Con esta distancia recorrida hipotéticamente por la partícula se puede construir un cateto de un triángulo rectángulo, como se muestra en la figura V.8. El otro cateto es el radio R de la trayectoria circular uniforme. La hipotenusa del triángulo, como se ve en la figura, es un segmento de línea recta que une los extremos de los catetos y cuya longitud es $R+ h$, siendo h la distancia que ha "caído", el cuerpo en ese lapso, desviándose de su trayectoria rectilínea. Esa distancia h se puede entender como el intervalo espacial que ha recorrido la partícula hacia el centro de su trayectoria, como consecuencia de la aceleración centrípeta que la obliga a ello. La distancia h debe dar información sobre la magnitud de la aceleración centrípeta, pues será tanto mayor cuanto más intensa sea la aceleración y viceversa.

Recordando el teorema de Pitágoras visto en el Capítulo IV, se pueden deducir algunas propiedades interesantes de este movimiento. En efecto, y tomando en cuenta dicho teorema, se tiene que:

$$R + h = \sqrt{R^2 + v^2 (t_2 - t_1)^2}.$$

O bien sacando del factor común a R^2 en el radical del miembro de la derecha en la igualdad anterior y extrayéndole la raíz cuadrada, se obtiene:

$$R + h = R\sqrt{1 + \frac{v^2 (t_2 - t_1)}{R^2}}.$$

Supóngase ahora, para hacer más sencillo este razonamiento, que el instante t_1 sea el momento inicial, cuando comienza la cuenta del tiempo; esto es:

$$t_1 = 0[\mathrm{s}].$$

Supóngase, adicionalmente, que el cateto construido con la rapidez |v| y el tiempo sea muy pequeño, en comparación con el

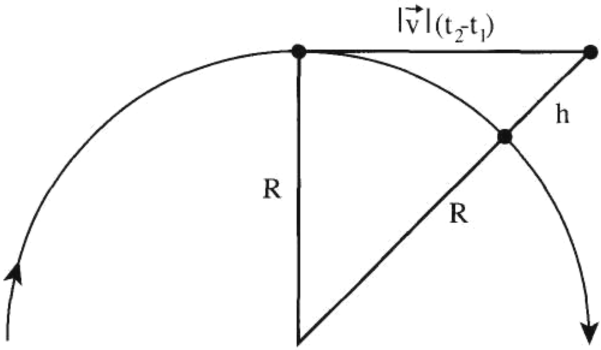

Figura V.10. Sobre la trayectoria circular uniforme se ha dibujado un triángulo rectángulo. Un cateto es el radio *R* de la trayectoria, el otro es la distancia que recorrerá el cuerpo si fuera en línea recta y velocidad constante: $|v|\ (t_2 - t_1)$- La hipotenusa esta compuesta del radio, más una "distancia de caída" *h*.

otro cateto del triángulo; aquél que se construyó con el radio *R*. Esto se logra si el cuerpo viaja con una rapidez pequeña y el lapso t_2 es breve. En tales circunstancias el radical se puede escribir en forma aproximada de la siguiente forma:

$$\sqrt{1 + \frac{v^2\ (t_2 - t_1)^2}{R^2}} \approx 1 + \frac{v^2\ (t_2 - t_1)^2}{2R^2}$$

en donde se ha omitido el índice 2 en t_2 porque ya no es necesario. Ahora, regresando a la expresión original que surgió del teorema de Pitágoras, se tiene que:

$$\mathrm{R} + \mathrm{h} \approx \mathrm{R} + \frac{1}{2R}\ v^2\ t^2$$

así que la altura h resulta ser igual a:

$$\mathrm{h} \approx \frac{1}{2}\ \frac{v^2}{R}\ \mathrm{t}^2$$

Pero ahora, recordando aquel resultado que se obtuvo cuando se calculó la distancia que cae un cuerpo al soltarlo de cierta altura *h,* y comparando esa fórmula con la que se dedujo ahora para el movimiento circular uniforme, se ve que en ambos la altura es igual a un medio de t_2 por la magnitud de la aceleración, si se identifica en esta expresión matemática.

Ésta es precisamente la magnitud de la aceleración centrípeta. La igualdad indica que esa magnitud es proporcional al cuadrado de la rapidez con que se mueve el cuerpo e inversamente proporcional a la distancia a la que se encuentra del centro, es decir, que mientras más alejado del centro gire ese objeto, más lentamente se mueve y viceversa.

Así pues, el movimiento circular uniforme está caracterizado por una rapidez constante, pero con un vector velocidad que cambia de dirección y sentido en forma uniforme. Se trata de un movimiento con aceleración; la aceleración centrípeta hacia el centro del giro y cuya magnitud es proporcional al cuadrado de la rapidez e inversamente proporcional a la distancia que separa al cuerpo, del centro de giro.

Desde luego, en la naturaleza se dan muchos casos distintos de movimiento; algunos sencillos y otros extraordinariamente complicados. Aquí no se analizarán por el momento, más posibilidades; baste con éstas, para que el propósito de comprender el significado de velocidad y aceleración se haya cumplido.

V.5. MATERIA Y MASA

Newton requería de otros ingredientes más, para completar su juego de axiomas más básicos, esenciales a su teoría. El espacio, el tiempo, los sistemas de coordenadas y los observadores tuvieron que ser definidos y postulados de manera clara y precisa para construir el modelo teórico conocido como Mecánica Clásica, pero se hizo necesario establecer dos conceptos más. El primero de ellos tiene que ver con la definición de materia y su propiedad, la masa, y el segundo, tal vez el más difícil de todos, con el postulado acerca de las fuerzas.

A finales del siglo XIX se decía que todo lo que llena al espacio físico, todo aquello que le da sentido, son dos cosas distintas: la materia y la radiación. Se afirmaba que el Universo en su totalidad esta constituido por dos y solamente dos clases de cosas. Las cosas materiales, aquellas que se pueden ver, que se pueden medir y conocer su extensión y aquéllas que por el contrario, no se les puede dar una ubicación limitada en el espacio, que incluyen a la luz, visible, a la radiación infrarroja, a los rayos ultravioleta, los rayos X, descubiertos en 1895 por Konrad Röntgen (1845-1923), o la radiación gamma que emana de los núcleos atómicos. En particular, la más profunda diferencia entre materia y radiación, lo que distingue estas dos entidades físicas de manera clara es una propiedad que está presente en la materia pero no la tiene la radiación. Esa propiedad es la masa.

La verdad es que aquella fenomenal división del Universo en materia y radiación fue muy simplista, muy bella. Por virtud de ella solamente se puede dar alguna de las dos y entonces se puede hacer el estudio de cada una de ellas por separado en dominios del conocimiento hasta cierto punto independientes. Desafortunadamente los paraísos terrenales se crean para perderse. No bien se estableció esa división cuando apareció, de quien sabe donde, un joven melenudo, enemigo de usar calcetines y que detrás de su aspecto bonachón y hasta un tanto estúpido, escondía una inteligencia como muy pocas, casi tanta como la del propio Newton y una capacidad de síntesis sin paralelo en la historia de la ciencia, que dio al traste con la dicotomía materia - radiación del universo. Desde luego la alusión se ha hecho al gigante de la física del siglo XX, Albert Einstein (1879-1955), de quien se hablará nuevamente y en forma más detallada más adelante en este libro. Sin entrar en demasiados detalles, porque el origen de esta cuestión no viene al caso en este libro, el hecho es que Einstein un día llegó a la conclusión de que la materia y la radiación en realidad son dos manifestaciones de una misma cosa: la energía —de la cual también se hablará más tarde—. Y así como el 6 de agosto de 1945 a las 8:00 de la mañana, la más diabólica mente jamás nacida dio prueba, incontrovertible de que la materia, en efecto puede convertirse en radiación pura, con la cual un par de centenas de miles de individuos fueron enviados sin mayor trámite a recibir sus alas y sus clases gratuitas de arpa; así se ha podido demostrar, también rotundamente, aunque en forma pacífica que la radiación puede materializarse en pares de corpúsculos materiales.

Con una simplísima fórmula, que se ha vuelto universalmente conocida, las dos parcelas del Universo quedaron, de una vez y para siempre identificadas con esa fórmula. Einstein estableció que la energía E, ese elusivo concepto perteneciente a todas las cosas; la única materia prima de que está hecha la radiación y la masa M; la más esencial de todas las propiedades de los cuerpos materiales, son proporcionales entre sí, a través de una constante c^2, que es el cuadrado de la rapidez con que viaja la luz y en general toda forma de radiación en el espacio. Así, mediante esta fórmula, energía y masa quedaron para siempre identificadas, y con ello las sustancias del Universo ya no fueron dos sino solamente una:

$$E\text{-}Mc^2$$

Lo anterior ha sido muchas veces probado y comprobado, como se decía, a través de infinidad de experimentos y observaciones, así que ya no cabe duda acerca de su validez y exactitud. No obstante, ha sido demostrado también que trasmutar masa en energía pura y viceversa no es fácil. Muy especiales, muy particulares deben ser las condiciones para que ello ocurra. Tan especiales que hasta ahora se ha podido llevar a cabo ese fenómeno de trasmutación, sólo en los enormes aceleradores de partículas que se han construido para ese propósito en algunos países del mundo como EUA o de la Comunidad Económica Europea, también se ha podido detectar el fenómeno de creación o aniquilación de materia en la radiación cósmica y por supuesto, en las explosiones nucleares que algunos estúpidos siguen realizando aún hoy en día en el mundo, tratando de optimizar los medios para obliterar al mayor número de personas, al menor costo, sin parar mientes en que los efectos, los residuos inevitables de estas explosiones, eventualmente se revertirán hacia ellos mismos, fatalmente.

Así pues, para los fines de la mecánica clásica, aquella vieja división del Universo en dos parcelas distintas no fue después de todo tan mala y la Masa de los cuerpos puede muy bien seguirse considerando como su propiedad básica e inalterable, tal como la supusieron todos los científicos desde Newton hasta estos días.

Todo mundo tiene casi de nacimiento el concepto intuitivo, la noción de masa. Todo mundo ha sentido esa propiedad de los cuerpos que al levantarlos, al moverlos, se manifiesta, pero es un concepto difícil de proponer claramente. Muchísimas personas confunden y tergiversan el concepto de masa con otro, el concepto de peso. Si bien masa y peso son propiedades muy íntimamente relacionadas, hay que decir desde ahora que ellas son distintas, pues el peso, como se vio, es el efecto de la gravedad de la Tierra, o en general, de otros cuerpos masivos sobre un objeto dado, en tanto que la masa es, como se decía, una propiedad intrínseca de ellos, que no guarda relación con otros para su definición.

La masa de los cuerpos se puede definir como una resistencia que presentan a ser movidos, a cambiar de estado de movimiento, a pasar del reposo al movimiento o viceversa. Cuando un cuerpo se halla en reposo no es posible percibir su masa. Esta se hace presente sólo al tratarlo de mover, al intentar levantarlo. Tampoco es posible percatarse de la masa de un objeto material cuando se mueve uniformemente y en línea recta; solamente al tratar de hacerlo cambiar de rapidez o de dirección de movimiento, o ambas cosas, se manifiesta la masa. Es como si los cuerpos en el Universo tuvieran todos una suerte de laxitud, de modorra; como si detestaran ser cambiados de su ubicación o su estado de movimiento. Por supuesto esto no puede ser así; los cuerpos, los inanimados, carecen de conciencia, así que es absurdo dotarlos de cualquier cualidad como éstas que les dé poder de decisión. Se han usado tales expresiones tan sólo como una forma metafórica de describir a la masa, con el objeto de hacer más claro el concepto.

Dentro del contexto de este libro, la masa de un cuerpo se va a definir como la resistencia que presenta a cambiar su estado de movimiento. Se ha convenido internacionalmente en designar como "el kilogramo" a la unidad de masa; se le abrevia como (kg) y se ha definido como la propiedad de inercia que presenta un patrón primario, en la forma de un cilindro de una aleación de platino, cuidadosamente guardado en el Bureau Internationale des Poids et Mesures (Oficina Internacional de Pesas y Medidas), que se encuentra en un suburbio de París, en Francia. Casi todos los países del mundo han hecho réplicas de ese kilogramo patrón y, las guardan en forma igualmente celosa en sus propias oficinas de pesas y medidas, con el objeto de que, a partir de ellas, se construyan pesas o se calibren los instrumentos para medir la masa en sus territorios.

Una forma práctica, aunque poco precisa de conseguir un kilogramo es construir un recipiente que tenga una capacidad de 1 000 centímetros cúbicos; es decir, un litro y llenarlo de agua. La masa de un litro de agua destilada es precisamente de un kilogramo; la desventaja de este "patrón" es que el agua normalmente trae sales y aun destilada una vez, puede traer ciertas impurezas; por otra parte, el agua se evapora, así que el "patrón" pierde materia, sin embargo, si no se requiere de gran precisión, este método sirve bastante bien para hacerse de un kilogramo de referencia.

VI. Las leyes de la mecánica

VI. 1. EL PRINCIPIO DE RELATIVIDAD DE GALILEO

ARMADO con los postulados básicos acerca de la estructura del espacio, del tiempo y los sistemas de coordenadas y provisto de una definición operacional de la masa de un cuerpo. Newton estuvo en posición de atacar un aspecto muy importante de su teoría.

Todo esquema teórico, toda teoría que pretende dar explicación a una clase de fenómenos naturales debe ser una herramienta de que se valga la gente para predecir, para confirmar conjeturas acerca de ellos. Gente cualquiera, en cualquier parte del mundo, gente de hoy o de mañana; todo mundo debe poder tener acceso a las leyes a las fórmulas a los teoremas de esa teoría para cumplir su propósito. Una teoría que solamente puede ser utilizada por unos cuantos, en situaciones restringidas y difíciles es de muy poca o nula utilidad. La ciencia sirve solo en la medida que se universaliza; mientras más ampliamente se pueda usar mientras mayor sea el número de personas en todas partes, a todas horas, en cualquier circunstancia que puedan usar y servirse de una teoría dada tanto mejor. Una teoría universalmente utilizable, se dice que cumple con el principio de relatividad de Galileo.

El principio de relatividad de Galileo, es aquel que establece que para que una teoría sea válida científicamente, debe ser de uso universal y sus resultados deben poseer exactamente el mismo sentido y el mismo contenido físico para todos los observadores, sin importar en qué lugar, en qué tiempo o en que condiciones dinámicas haya realizado sus observaciones.

Aunque parezca sencillo, el asunto de la universidad de una teoría, no lo es en forma alguna. Una piedra que cae es, ni más ni menos que una piedra que cae para todo observador que mire ese fenómeno en tierra firme parado sobre sus piernas, pero para alguien que esté parado de manos, tal vez una piedra que cae adquiera un significado distinto; tal vez se entienda este acontecimiento como el de una piedra que "sube". Para un astronauta que flota allá en el espacio, libremente, sin saber cuál es la vertical o qué sentido tiene el "abajo" y el "arriba", puede ser que la caída de un cuerpo se observe de manera diferente también.

Decir, por otra parte, que en el amanecer, el Sol "nace" al oriente y al atardecer "se pone" en el poniente, tampoco es algo que tenga el mismo significado físico para todos; y aunque se acostumbra usar estas formas de expresión, es bien sabido desde la época de Copérnico que no es en verdad que el Sol "nazca" y "se ponga", sino que la Tierra, el asiento de la vida es el que viaja y gira sobre su eje de simetría.

De hecho, en su forma más general el principio de relatividad de Galileo es totalmente imposible de satisfacer. En realidad, por más universal que sea una teoría, se puede ver que existirá siempre, una clase de observadores para los cuales no será posible compatibilizar los resultados de observaciones y experimentos. Para mostrar esto considérese la siguiente anécdota:

Se han formado dos equipos de científicos cuya labor será observar cada día durante un mes al Sol. Van a tratar de deducir, a partir de sus observaciones, una fórmula matemática con la cual puedan describir la posición del astro rey en su tránsito aparente por la bóveda celeste, con referencia a la Tierra. Para cumplir con su cometido, cada equipo cuenta con lo más moderno para esos menesteres:

telescopios computarizados, relojes electrónicos, etc. Cada equipo ha decidido hacer sus mediciones y observaciones en puntos distintos de México. El primer equipo de científicos hará sus observaciones desde un campamento llamado Tonatiuh I, en medio de los famosos volcanes: el Popocatépetl y el Iztaccíhuatl a unos cincuenta kilómetros de la capital. Eligen ese sitio por su atmósfera limpia, su aire transparente y libre del smog y porque desde ese punto podrán observar al Sol desde su orto a su ocaso sin obstáculo natural alguno. Así que, después de una emocionante excursión, llegan al sitio exacto y establecen su campamento, el Tonatiuh I. Con gran celeridad, desempacan los pesados equipos que llevaban a cuestas e instalan su observatorio. En pocos minutos, inician sus primeras observaciones del Sol.

El segundo equipo, por su parte, decidió ir a Acapulco, subirse con todo y equipo a una balsa, dejarse arrastrar mar adentro por una lancha y una vez lejos de la vista de la costa, dejarse ir a la deriva, sin motor, sin remo y sin velamen y realizar allí, en medio de ninguna parte sus observaciones. Eligieron previamente la época del año más seca, para garantizar buen tiempo, cielos despejados y atmósfera transparente. El proyecto sirvió además, como un magnifico pretexto para liberarse de la ropa formal y pesada que deben usar en su centro de trabajo, en la Capital y ponerse sus pantaloncillos cortos, sus playeras ligeras y vistosas, sus anteojos obscuros y dejarse acariciar por la brisa y tostar sus amarillentas pieles de citadinos con el sol tropical, mientras estudian, observan y anotan su curso cuidadosamente con sus aparatos.

¡Pobres los que fueron a la montaña! —comentaban los de la balsa— el frío, el viento y la falta de oxígeno debido a la altura deben tenerlos lívidos. Deberán pasarse todo el tiempo enfundados en gruesos trajes y sin embargo, no dejarán de tiritar por el frío que allá, en las alturas debe hacer todo el tiempo... El equipo de la balsa se pone a trabajar tan luego como llegan al punto deseado y son soltados por la lancha que los remolcó mar afuera. Igual que sus pares allá en el centro de México, en medio de los volcanes, los científicos que optaron por el laboratorio marino desempacan sus instrumentos y con gran entusiasmo y eficiencia, en pocos minutos inician sus observaciones.

La balsa es una plataforma sólida, de unos 50 m^2, que descansa sobre varias hileras de tambos vacíos y cerrados que corren de un extremo a otro del cuerpo de la plataforma, para darle la flotabilidad que se requiere. Y aunque se trata de una estructura grande y pesada, con el oleaje, oscila y se bambolea sin cesar. No obstante que los instrumentos de observación y medida fueron colocados firmemente fijos al piso de la balsa, muy pronto se hace patente para los científicos la enorme dificultad que implica mantenerlos apuntados al Sol. Nunca hubieran imaginado que la simple tarea de observar las posiciones sucesivas del Sol, a lo largo de un día. se pudieran convertir en algo tan agotador, tan tremendamente laborioso y complicado. La imagen del astro rey parecía presa del mal de San Vito; aparecía y desaparecía de sus pantallas como si estuviera animado de esa terrible enfermedad que impide mantener a las víctimas de ella, sus manos sus cuerpos y su cabeza en reposo. Minuto a minuto anotaban los datos acerca de la posición del cuerpo celeste en sus cuadernos de registro y conforme avanzaba el día la desazón y el agotamiento fueron haciendo presa a los valientes y afanosos científicos. Al caer la tarde, casi a rastras, recogieron el equipo y se encaminaron al cobertizo que se halla en el centro de la balsa. Una vez adentro, limpiaron y guardaron cuidadosamente sus instrumentos y con mucha dedicación fueron dibujando en un mapa de la bóveda celeste, una a una, cada posición que habían anotado durante el día. Luego, unieron cada uno de los puntos en ese diagrama con segmentos de recta. El resultado fue una línea quebrada, irregular, que mostraba la trayectoria aparente del Sol, desde el amanecer en el horizonte, en la dirección Oriente hasta su puesta al Poniente.

No desmayaron por ese resultado tan confuso y complicado de sus observaciones, a la mañana siguiente repitieron la experiencia. Muy temprano, colocaron su equipo de trabajo y se pusieron a tomar datos. Tan pronto como despuntó el día y con intervalos de un minuto, fueron registrando y anotando las posiciones del Sol. Igual que el día anterior, volvieron a caer en la cuenta que su movimiento era totalmente irregular, zigzagueante, caótico. El Sol parecía dar tumbos sin ton ni son, de un lado a otro, a veces avanzando, a veces retrocediendo... Al final del día, recogieron de nuevo sus aparatos, los limpiaron cuidadosamente y los guardaron en sus estuches. Vertiendo los datos de sus registros en un gran pliego de papel sobre el cual se había dibujado una reproducción de la bóveda celeste, igual que el día anterior y nuevamente pudieron constatar que la trayectoria aparente del Astro Rey era un verdadero galimatías, del mismo tipo que les había aparecido antes. Pero este resultado era algo peor que aquel, porque en nada se parecía al primero, de modo que, aparte del hecho de que el Sol aparece en el Oriente y se pone en el Poniente, de ahí en adelante las curvas quebradas al ponerse un pliego de papel sobre el otro, no mostraban ningún punto de coincidencia.

En los días siguientes el ánimo del personal de la misión decayó más y más hasta convertirse en una absoluta derrota. Habían trabajado arduamente sin disfrutar de un solo minuto de descanso. La única vez que se zambulleron en el mar fue una mañana, cuando un golpe de mar estuvo a punto de voltear la balsa y los lanzó a todos fuera de la borda. Esa vez estuvieron a punto de perderlo todo, pues los instrumentos tan valiosos apenas si se mantuvieron sujetos de sus cuerdas y apoyos. Después de tantos días de agobio, emprendieron el regreso. Por radio se comunicaron con el puerto y a poco la lancha llegó para remolcar la balsa de vuelta a Acapulco. Él resultado de todos esos días de intenso trabajo fue una pila de pliegos de papel, conteniendo las trayectorias del Sol por la bóveda celeste; todas ellas diferentes, complicadas erráticas. Habrían deseado proponer una fórmula matemática que describiera ese movimiento, pero ello era punto menos que imposible. No había manera de reproducir matemáticamente aquella auténtica sopa de tallarines. Lo peor de todo, lo que había acabado con sus últimos arrestos de optimismo era que todos las trayectorias eran distintas entre sí, de tal suerte que aun en el supuesto caso de que se encontrara una fórmula que describiera una de las zigzagueantes curvas, no serviría para otras. En otras palabras, la expedición al Pacífico había sido un rotundo fracaso. Regresaron a México, a su instituto, derrotados tristes y exhaustos. Un malicioso pensamiento llevaban todos ellos en sus mentes, un sentimiento los mantenía aún con un dejo de interés. Sus colegas, aquellos que habían ido a las montañas, los integrantes del campamento Tonatiuh I debieron regresar igualmente derrotados y frustrados. En su imaginación los veían caminar arrastrando los pies, medio congelados por el intenso frío, con sus caras chamuscadas por el reflejo del Sol en la nieve, cargando a cuestas su equipo a lomo de investigador; llevando bajo el brazo pliegos como los que éstos habían llenado de puntos con las posiciones del Sol; trayectorias caóticas, aleatorias, imposibles de interpretar matemáticamente.

Cuál no sería su sorpresa cuando al llegar a la Universidad al trasponer la puerta del Instituto, encontraron a los miembros del Tonatiuh I radiantes de felicidad, celebrando el éxito de la misión.

En efecto, las cosas, para los integrantes de la expedición al punto medio entre el Popocatépetl y el Iztaccíhuatl, habían sido muy diferentes.

Desde el primer día allá en las alturas, iniciaron sus observaciones y sus registros de las posiciones del Sol a lo largo de su trayecto diurno. Minuto a minuto recogieron esas observaciones en sus libretas de notas y por la tarde cuando ya había empezado a caer la noche, se recogieron en su tienda de campaña y vertieron los datos en pliegos de papel idénticos a aquellos que llevaron al mar sus colegas de la balsa. Con gran esmero, fueron dibujando puntos sobre el esquema de la bóveda celeste y la trayectoria solar se fue revelan-do. A poco de haber iniciado su estudio, se volvió evidente para los investigadores que la trayectoria es un arco de circunferencia casi perfecto. El Sol despunta día a día por el oriente, en direcciones que van cambiando muy lentamente y dibuja sobre la bóveda celeste una línea perfecta, hasta ponerse en el Oeste.

Tan rotundo fue el éxito de la misión Tonatiuh, que después de unos cuantos días de registro y observación se decidió que era suficiente la evidencia y que estaban ya en condiciones de establecer una simple fórmula matemática para describir el movimiento del Sol. Después de ese hallazgo, empacaron los bártulos y organizaron una excursión por la ladera del Popocatépetl. Disfrutaron del paisaje, tomaron cientos de fotografías, retozaron en la nieve y regresaron al campamento felices y contentos. Al día siguiente cargaron el equipo y emprendieron el regreso a la ciudad de México.

¿Qué fue lo que pasó entonces con los pobres desafortunados que fueron al mar? ¿Por qué no tuvieron éxito? La respuesta es en verdad muy simple. El grave error de esta gente fue tratar de observar desde una plataforma en el mar. Es claro que el oleaje movió todo el tiempo a la balsa y con ella a todos los instrumentos a bordo. Al tratar de hacer sus observaciones, balsa, equipo y científicos se movían incesantemente y este hecho afectó los resultados. Desde ese muy particular sistema de coordenadas el Sol parecía estar todo el tiempo agitado, siguiendo un movimiento al azar. Es claro que el problema nunca fue el Sol, sino los observadores; aquel marco de referencia no fue apropiado para la tarea.

Para investigar a la Naturaleza, para hallar reglas, para interpretar sus conductas es preciso observar, medir, analizar la información, hacer la síntesis de ella; subir, en pocas palabras, por la escalera de la inducción, tal como se mencionó en el capítulo IV. Pero es necesario otro ingrediente adicional, si se quiere hacer las cosas fáciles. Hay que hacerlo desde un marco de referencia adecuado. Ese, el marco que eligieron los que fueron al mar fue tal vez, el peor de todos debido a su gran inestabilidad; en cambio, el marco de referencia de los montañistas fue excelente.

Pero hay algo más: el fracaso del equipo de la balsa pone de manifiesto que siempre existen ciertos observadores, ciertos marcos de referencia para los cuales carecen de sentido los asertos de otros. Por ejemplo, decir que el Sol describe una trayectoria aparente uniforme al través de la bóveda celeste y que esa trayectoria se repite día a día casi exactamente, es algo que puede comprobar cualquier observador, cualquier persona que tiene sus pies bien asentados sobre tierra firme, en el mundo entero. Sin embargo tal afirmación es inadmisible para otro que, como fue el caso de aquéllos que se fueron al mar, está situado en un marco de referencia inestable.

Así, con una historia como ésta, es posible afirmar que el principio de relatividad de Galileo, en su forma más universal y drástica no se puede cumplir, pues, por más general que sea una teoría, por más extendidos que puedan ser sus resultados, por más amplia que sea la aplicación de una fórmula matemática o una ley física, siempre existirá al menos un observador para el cual nada de esto tenga sentido, no puede comprobarlo desde su marco de referencia. Esto es lo que ocurrió con la expedición al mar.

Newton comprendió desde un principio que su teoría, la mecánica clásica, tampoco podría satisfacer el principio de relatividad de Galileo en su forma general. Se dio cuenta que por más que buscara una estructura lógica general para describir el movimiento de los cuerpos materiales, que pudiera ser aplicada igualmente por todo observador en el Universo, sin importar su ubicación o sus propias condiciones de movimiento, no podría satisfacerlo.

Por otra parte, no deseaba construir un esquema teórico que fuese de aplicación tan restringida que sólo un pequeño núcleo de personas, situados en marcos de referencia muy particulares, pudiera servirse de él. Esto no tiene interés científico y no tendría caso, siquiera echarse a cuestas el trabajo de hacer algo así. Debía hallar alguna manera, algún criterio suficientemente amplio y general para poder hacer su teoría útil y aplicable a la mayor cantidad de observadores que fuera posible. Tenía que satisfacer un Principio de relatividad restringido que, sin embargo fuese de uso para una clase general de observadores.

VI.2. La primera ley de la mecánica

Cavilando, pensando con esa brillantísima inteligencia, Newton llegó tras cierto período de meditación a una conclusión: su teoría, la mecánica clásica debería ser construida para una clase de observadores dotados con una característica común básica. De todos los posibles observadores, situados en un marco de referencia, él decidió que la Mecánica sería válida para aquéllos que vieran en reposo o al menos en movimiento uniforme rectilíneo a todo cuerpo libre de fuerzas. Dicho de otra manera, Newton propuso que todo observador que desde su marco de referencia ve en reposo o dotado de movimiento rectilíneo uniforme a un cuerpo sobre el cual no actúa agente externo alguno, es un observador inercial y su teoría será aplicable sólo por estos observadores. Igualmente, definió un marco de referencia inercial a aquel desde el cual un cuerpo libre de fuerzas describe un movimiento rectilíneo uniforme o está en reposo.

Claramente los investigadores que fueron al mar no pertenecen a la clase de los inerciales y la plataforma no es un marco de referencia inercial, porque allí, un cuerpo como el Sol se ve dotado de movimiento aleatorio cuando en realidad, nada le pasa.

Bueno a decir verdad, en un sentido riguroso, tampoco los miembros del Tonatiuh I son observadores inerciales, pues aunque se sabe que el Sol es el centro del sistema planetario, según pudo demostrar Copérnico y más tarde Kepler, la Tierra gira en torno a aquel igual que los demás planetas, desde aquí se ve como si fuera al revés: como si la Tierra estuviese en reposo y fuera el Sol mismo el que transitara alrededor de ella, siguiendo una trayectoria circular. Los miembros del campamento Tonatiuh I observaron un cuerpo al que nada le ocurre (el Sol), dotado de un movimiento circular. Es por ello que en esencia tampoco ellos son inerciales, sin embargo, haciendo comparaciones, se puede afirmar eufemísticamente que los del Tonatiuh I son "más" inerciales que los que fueron en una balsa al mar, o bien, para decirlo de otra manera, el campamento Tonatiuh I, allá en las inmediaciones del Popocatépetl y el Iztaccíhuatl, es un marco de referencia inercial local. Aquí la palabra "local" sirve para recalcar que ese marco sólo puede ser considerado como inercial si sus medidas no se toman en toda la extensión del horizonte, sino sólo en una región restringida del espacio y por un lapso pequeño.

En efecto, viendo solamente un pequeño intervalo de la trayectoria del Sol y haciendo los registros de sus posiciones, se puede apreciar como si fuera un segmento de línea recta y su movimiento fuese uniforme. Así, considerando un pequeño sector de la bóveda celeste, el Sol parece estar en un estado de movimiento rectilíneo y uniforme y quienes lo observan, son inerciales (localmente).

De hecho, un marco de referencia inercial absoluto es prácticamente imposible de encontrarse, porque en el Universo no existe un solo cuerpo que viaje en línea recta y rapidez constante; tampoco parece que exista el reposo. El Sol mismo se mueve describiendo una enorme elipse alrededor del centro de la Galaxia, la vía láctea, de manera que si se pudiera situar un marco de referencia en el centro de él, tampoco sería inercial, excepto para un sector del Universo y durante lapsos no demasiado largos. En gran escala, los efectos de la aceleración del propio Sol comenzarían a desvirtuar las observaciones que se hicieran desde él.

El centro de la Vía Láctea tampoco resolvería en forma global y definitiva el problema de ubicar un sistema de coordenadas que fuera un marco inercial, pues se sabe que la galaxia también se encuentra viajando por el espacio, con un movimiento acelerado. La Vía Láctea pertenece a un cúmulo de galaxias que se mueven revolucionando alrededor de algún centro, urgidas por las fuerzas gravitacionales. Así, pensar en un marco de referencia situado allí tampoco sería inercial, excepto en ciertos intervalos de tiempo y espacio, etcétera.

De estas consideraciones se desprenden dos conclusiones muy importantes para la teoría que construyó el genio de Inglaterra: en primer término, la mecánica clásica, tal como la construyó Newton, solamente tiene validez para una clase de observadores: los inerciales. Para ellos, rige en forma restringida, el principio de la relatividad de Galileo. En segundo término, el marco de referencia inercial absoluto; esto es, aquel que es inercial siempre y para todas las medidas que se hagan desde él, no existe, o, si existe, no es accesible al ser humano actual. En el mejor de los casos, se puede decir que aquí en la Tierra, es posible hallar sitios y construir allí marcos de referencia inerciales locales; esto es, que sean inerciales solamente en lapsos pequeños y haciendo medidas de tan solo un pequeño sector del Universo.

A estas alturas, la primera ley de la mecánica ha sido propuesta prácticamente. Tal como la enunció Isaac Newton, dice lo siguiente: "Todo cuerpo permanecerá en su estado de reposo o de movimiento rectilíneo y uniforme a menos que una fuerza actúe sobre él."

Debe ser claro para todo aquel que se interesa en estudiar a Newton y su mecánica que, detrás de su enunciado, la primera ley esconde varios conceptos e implicaciones que de manera alguna son triviales. En primera, la ley debe entenderse como el establecimiento del principio de Relatividad restringido de Galileo, que afirma que existe una clase de observadores, los inerciales (al menos localmente) para los cuales la mecánica clásica tiene pleno sentido. En segundo término da implícitamente la definición del marco de referencia inercial como aquél desde el cual a un cuerpo al que nada le ocurre, se le observa, bien sea en reposo, o en movimiento rectilíneo uniforme. Éstos, el reposo o el movimiento rectilíneo uniforme son los movimientos "patrón", por decirlo de alguna manera; esto es, son aquellos que se han de tomar como referencia, para atacar problemas que involucren otros más complejos. Ellos son la expresión del movimiento libre; aquél que ocurre sin interferencia, sin la concurrencia de agentes externos. Algunos autores ven en esta ley, así mismo, la definición de la "fuerza cero"; es decir de la no-fuerza. Finalmente, es necesario recalcar, que Newton identifica al reposo y al movimiento rectilíneo uniforme, como dos aspectos de la misma situación física. Así, reposo o movimiento rectilíneo uniforme son, bajo la perspectiva de un marco de referencia inercial, indistinguibles y equivalentes. Lo anterior es razonable si se piensa que el vector velocidad v puede tener distintas magnitudes;

las que se quiera, y en particular, el reposo se puede concebir como un movimiento rectilíneo uniforme con rapidez cero.

Como un corolario de la Primera Ley de la Mecánica, vale decir que si un cuerpo al que se sabe, nada le ocurre, se observa en un movimiento acelerado, entonces, sin lugar a dudas, el observador que ve ese cuerpo no es inercial. En otras palabras, la primera ley sirve a posteriori al propósito de clasificar marcos de referencia en inerciales o acelerados (no inerciales).

VI.3. La cantidad de movimiento

En México hay una manera un tanto alegórica de referirse a aquellas personas que van con seguridad en la vida y que nunca toman alguna decisión sin antes haber pensado profundamente en todas las implicaciones de ese acto. Se dice de ellas que "no dan paso sin huarache" (el huarache es un tipo de calzado, generalmente burdo, que usa la gente del campo, confeccionado con tiras de cuero y una suela). Pues bien, Newton era de ese tipo de individuo; no daba paso sin huarache. Se pasó veintiún años repasando sus ideas, revisando una y otra vez su teoría, proponiéndose pruebas destructivas y saliendo de ellas, hasta que estuvo absolutamente seguro que el modelo de la mecánica clásica había quedado perfecto, sin un resquicio, sin una fisura lógica por donde algún argumento contrario pudiera colarse. Si había algo que aborrecía, eso era las discusiones y el ridículo, así que pensó y repensó todo, hasta que no quedó el mínimo defecto. Entonces, con la ayuda de su amigo Halley, publicó su obra.

Llama la atención que al definir el movimiento rectilíneo uniforme matemáticamente, Newton no utilizó simplemente al vector velocidad v sino que, desde un principio definió un ente vectorial al que llamó "el ímpetu". El ímpetu es, a su vez un vector, que a lo largo del tiempo ha recibido varios nombres. Algunos autores le llaman "momentum", otros lo conocen como "momento lineal" y en este contexto será nombrado "la cantidad de movimiento". El vector cantidad de movimiento fue definido por Newton como el producto de la masa M del cuerpo, por el vector velocidad v; lo designó mediante la letra p y se escribe así:

$$\vec{p} = M\,\vec{v}$$

De su definición se ve que el vector cantidad de movimiento es en al menos dos de sus características, equivalente al vector velocidad, pues tiene la misma dirección que éste y su mismo sentido. En lo único que se diferencia de aquel es en su magnitud. En efecto, la magnitud del vector velocidad v es lo que aquí se definió como la rapidez, en tanto que la magnitud de $\vec{p}$ es el producto de la rapidez por la masa del cuerpo. Realmente podría parecer banal la distinción, sin embargo no lo es. Al multiplicar a la rapidez por la masa de un cuerpo se le da intensidad al movimiento. Si no, piénsese cuan distinto sería que un mosquito con una masa de unos cuantos miligramos se estrellará con una rapidez dada contra la cabeza de una persona y ahora considérese que una locomotora, con la misma rapidez del mosquito, pero con mil toneladas de masa se estrellara contra esa persona; es indudable que el efecto sería radicalmente diferente en ambos casos.

El movimiento rectilíneo uniforme, se puede definir ahora, matemáticamente, con la sencilla expresión.

$$\vec{p} = const;$$

Esto es, que la cantidad de movimiento $\vec{p}$ tiene magnitud, dirección y sentido inmutable a lo largo del movimiento. En particular, el estado de reposo se identifica con el vector cantidad de movimiento igual a cero, así que la constante en este caso es:

$$\vec{p} = 0$$

La primera ley de la mecánica se puede establecer entonces, matemáticamente afirmando que desde todo marco de referencia inercial, un cuerpo libre de fuerzas tiene una cantidad de movimiento constante; esto es, que si $\vec{F}$ = o (no hay fuerzas), entonces:

$$\vec{p} = const;$$

Este hecho en apariencia tan simple y trivial, puede dar información importante sobre algunos fenómenos físicos que no tienen nada de simples y triviales. Los romanos por ejemplo perfeccionaron el uso de los arietes para romper y perforar defensas enemigas. Si bien ellos desconocían la primera ley de la mecánica, pues ésta apareció dieciséis siglos mas tarde, en forma empírica sabían de ella y aprovechaban sus implicaciones.

Tratando de reducir a su mínima expresión el problema, el ariete; esa enorme viga que se hacía chocar de frente contra un pesado pórtico para romperlo, se puede ver como un cuerpo que se hace viajar en movimiento rectilíneo uniforme y luego de chocar contra el portón enemigo regresa como llegó, con un movimiento rectilíneo y uniforme pero en sentido opuesto al original. Si la cantidad de movimiento debe ser la misma antes y después de chocar contra el portón, suponiendo que no hay fuerza alguna, entonces fue necesario que la puerta haya absorbido el doble de esta cantidad. Así, si antes del choque se tenía una cantidad de movimiento *p* cuyo sentido, según se muestra en la figura VI. 1 era hacia la derecha y después del choque el ariete rebota con la misma cantidad de movimiento en magnitud que antes, pero ha cambiado de sentido, entonces tuvo que quedar en la puerta un vector z $\vec{p}$ hacia la derecha, de modo que al hacer:

$$2\,\vec{p} = \vec{p}$$

se obtiene el mismo vector antes del choque, tal como lo pronostica la primera ley de la mecánica, que dice que en ausencia de fuerzas este vector debe ser constante a lo largo de todo su movimiento. Así, soltando el ariete contra la puerta y haciéndolo rebotar, se consigue el efecto de transmitir a ese obstáculo el doble de la cantidad de movimiento que se le había impreso al ariete. Esto puede ser devastador.

VI.4. La segunda ley de la mecánica

El esquema de la mecánica aún es incompleto, hasta ahora se han revisado casi todos los conceptos, como el de espacio, tiempo y sistema de coordenadas pero aún faltan otros esenciales para la teoría. Tal vez de todos, el axioma más importante es el que involucra el concepto de fuerza.

La idea de fuerza se ha hecho presente en forma gradual en este libro, cuando al enunciar la primera ley se menciona el caso de cuerpos libres; esto es, no sujetos a fuerza alguna. Allí se puede entrever que cuando una fuerza está presente, un cuerpo ya no puede continuar con su estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme.

Pero hay que ir paso a paso en este desarrollo. A todo esto, ¿qué es lo que se debe entender por una fuerza? Esta pregunta ocupó algún tiempo del joven Newton y, posteriormente, ha ocupado el tiempo de un apreciable número de científicos después. De hecho, en aquellos tiempos, en los siglos XVI, XVII y XVIII, el término fuerza se usaba demasiado liberalmente y a menudo erróneo. Al mencionar la palabra "fuerza" *(kraft),* algunas veces se deseaba significar lo mismo que se entiende hoy en día, pero en otras ocasiones se usaba para denotar energía o potencia, que, son conceptos diferentes.

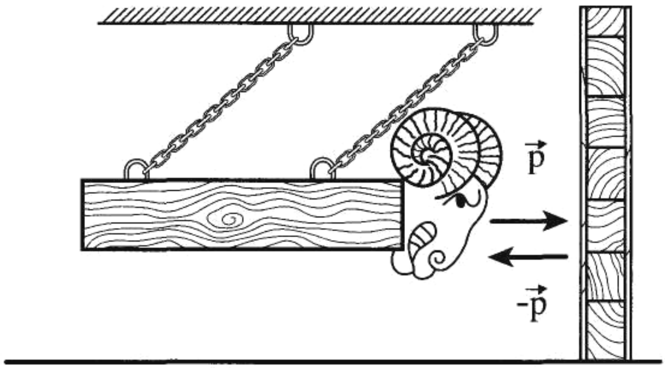

Figura VI. 1. Un ariete viaja hacia la derecha con una cantidad de movimiento *p.* Al rebotar contra el portón le trasmite el doble de esta cantidad.

Al golpear un objeto se le atiza con fuerza y para levantar un cuerpo pesado hay que hacer fuerza, o bien se escucha que tal o cual motor tiene tantos caballos de fuerza. De estos ejemplos citados, sólo el primero corresponde cabalmente al concepto fuerza.

Por otra parte, cuando se hacía alusión al concepto de fuerza, se restringía casi siempre al contacto de un cuerpo contra otro; bien que se hablara de golpear con un martillo un clavo, o bien que se tratara de un resorte que actúa sobre un cuerpo. Y si bien Kepler pareció comprender por primera vez que puede darse el caso de un cuerpo (el Sol) que ejerce una fuerza sobre otro (un planeta) sin que medie contacto físico entre ambos, sino que se trata de una acción a distancia, fue nuevamente Isaac Newton quien puso las ideas claras en relación a las fuerzas. Él sintetizó el mismo concepto de fuerza, en esencia, para una cuerda que tira de un cuerpo en un polipasto, que la gravitación que ejerce la Tierra sobre la Luna, a través del espacio vacío y a miles de kilómetros de distancia. Newton dio el mismo carácter de fuerza tanto al martillazo en un clavo, como a la gravitación que mantiene a los cuerpos celestes orbitando a otros mayores; tanto a la fuerza de tensión de los músculos de un levantador de pesas, como la que provoca que una aguja imantada apunte siempre al Polo Norte. La diferencia proviene de sus orígenes, pero, por lo que refiere a sus efectos sobre la materia, todas son lo mismo: fuerzas. Newton propuso como "fuerza" a la "intensidad con que un cuerpo se ve urgido". En esta definición, lo que urge a un cuerpo puede ser; nuevamente, el martillazo o la gravitación o el magnetismo y la intensidad con la cual se ve urgido el cuerpo, depende de varias características, tanto del cuerpo mismo, como del origen de la interacción.

Actualmente se reconocen cuatro tipos esencialmente diferentes de fuerzas en el Universo, de las cuales se derivan todas las demás que se pueden dar. La más intensa de todas es la fuerza nuclear, que es la que mantiene a las partículas más pequeñas de los núcleos atómicos reunidas a muy pequeñas distancias entre sí, a pesar del rechazo que se da entre ellas, debido a sus mismas cargas eléctricas. La segunda interacción que se reconoce, es precisamente esa, la que da por resultado atracciones o repulsiones entre las partículas cargadas eléctricamente. La tercera es mucho menos conocida que las otras dos; se trata de la llamada fuerza electrodébil. Esta interacción es, en efecto, mucho más débil que las anteriores. Es la que causa que una partícula, en el interior de un núcleo atómico se descomponga espontáneamente y expela un electrón, que sale disparado. Los electrones son pequeñísimas partículas elementales que normalmente orbitan los núcleos atómicos, pero como en este caso, pueden surgir de dentro de ellos por virtud de la llamada desintegración beta. La cuarta interacción la más débil de todas, es la fuerza gravitacional; ésta es la causante del Sistema Planetario, la que obliga a formarse a las galaxias y la que las urge a revolucionar en los cúmulos galácticos.

En honor a sir Isaac Newton que la definió, se ha acordado dar a la fuerza como unidad el "Newton". Un Newton es, por definición, la fuerza que es necesario aplicar a un kilogramo de materia para imprimirle una aceleración de un metro por segundo al cuadrado. La abreviatura que se usa para esta unidad es "N" y se escribe su equivalencia así:

$$1\ N = 1\ kg \times 1\ \frac{m}{s^2}$$

Hay una característica sumamente importante que Newton postuló acerca de las fuerzas y que hay que llevar en la memoria: la fuerza es un vector. Esto significa, nuevamente que no basta con asignarle solamente una magnitud, sino que, para definirla completamente es necesario darle también dirección y sentido.

Con la primera ley establecida, Newton sentó las bases fundamentales de su teoría; los conceptos de marco de referencia inercial y de movimiento patrón de un cuerpo libre, al que nada le ocurre fueron los ingredientes para el postulado. Ahora con la definición de fuerza como un vector que actúa sobre los cuerpos materiales, fue posible estudiar casos más complicados, movimientos con aceleración.

Si un cuerpo al que nada le ocurre describe una trayectoria rectilínea uniforme, sin aceleración, entonces, todo cuerpo sobre el cual actúa una o más fuerzas debe presentar un movimiento acelerado. Más precisamente, si un cuerpo es urgido por una o más fuerzas, debe abandonar aquel estado que tenía y cambiar su vector de cantidad de movimiento. Este es el contenido de la segunda ley de la mecánica: "Observado desde un marco de referencia inercial todo cuerpo material que experimenta una o más fuerzas, cualesquiera sea su naturaleza, responderá de inmediato cambiando su cantidad de movimiento."

Ahora bien, como la cantidad de movimiento se definió como el producto de la masa del cuerpo por su vector velocidad, el significado que encierra el cambio de la cantidad de movimiento no es único. En efecto, la cantidad de movimiento $\vec{p}$ puede cambiar en tres formas distintas: puede cambiar el vector velocidad, sin cambiar la masa *M;* puede cambiar la masa sin cambiar el vector velocidad o bien, pueden cambiar ambos, masa *M y* velocidad $\vec{\mathbf{v}}$ simultáneamente.

En efecto, hay algunos casos en los que la masa de un cuerpo cambia durante su movimiento; ejemplo de ello son los cohetes que al entrar en combustión sus componentes expelen materia. Este caso será tratado más tarde, dentro del tema de la Tercera Ley de la Mecánica. Sin embargo en una gran mayoría de los casos, la masa del cuerpo permanece inalterada a lo largo de su movimiento. En tales circunstancias el resultado; la respuesta del cuerpo ante la urgencia de fuerzas es únicamente un cambio en su vector velocidad v. Pero se vio en los párrafos precedentes que el cambio de la velocidad dividido por el tiempo, es el vector aceleración, así que finalmente se puede arribar a una fórmula matemática para la segunda ley de la mecánica:

$$\vec{F} = M\,\vec{a}$$

que afirma que a toda fuerza $\vec{F}$ el cuerpo de masa *M* responde de inmediato con una aceleración $\vec{a}$ Esta aceleración es un vector que tiene la misma dirección y el mismo sentido que la fuerza que le dio origen.

La segunda ley es la más importante de la mecánica; es la que establece que la única causa del cambio del estado de movimiento de un cuerpo es la fuerza. Además, propone que el cambio del estado de movimiento de los cuerpos, cuya masa no cambia, es la aceleración. Así, aunque la ley para describir el movimiento de los cuerpos es la segunda, de ninguna manera es segundona; de hecho es la primera en importancia. Lo que ocurre es que para postularla correctamente, Newton tuvo que hacer un conjunto de definiciones previas; éstas son las que se encuentran contenidas en la primera ley de la mecánica.

Un punto muy importante de la segunda ley es que debe ser compatible con la primera. Esto se obtiene de inmediato, si se piensa que para el caso de una fuerza nula; es decir $\vec{F} = 0$, de acuerdo con la segunda ley, el cambio de la cantidad de movimiento del cuerpo debe ser, a su vez, igual a cero. Pero si esto ocurre, significa que la cantidad de movimiento permanece constante; esto es $\vec{p} =$ *constante*. Lo anterior no es otra cosa que la expresión matemática de la primera ley de la mecánica. Del razonamiento anterior se infiere que ambas leyes, en efecto, son compatibles desde un marco inercial.

Por otra parte, se mencionó desde el principio que el objetivo de la mecánica es predecir el movimiento de los cuerpos materiales cuando actúen sobre ellos fuerzas de distinta naturaleza. La segunda ley de la mecánica es el medio para alcanzar ese objetivo, como se puede apreciar de su estructura:

$$\vec{F} = M\vec{a}$$

Así, si se proporciona como dato del problema, una expresión matemática para la fuerza $\vec{F}$, entonces, por virtud de la segunda ley, conociendo la masa del cuerpo se sabe cuál es la aceleración que tal fuerza ha provocado en él. Ahora bien, si la aceleración se conoce entonces se deduce cuál ha sido el cambio sufrido por la velocidad del cuerpo y de esta última se infiere a su vez cuáles han sido las posiciones sucesivas que ha ocupado ese cuerpo en el transcurso del tiempo. Estas, las posiciones sucesivas al través del tiempo, son los ingredientes para establecer la trayectoria. Como se dijo anteriormente, conocer la trayectoria es la finalidad de la mecánica clásica.

A modo de ejemplo, considérese un caso muy simple. Los cuerpos materiales, aquí en la Tierra, exhiben una propiedad común; tienen peso. El peso de los cuerpos es el resultado de la atracción gravitacional que ejerce el planeta sobre cada uno de ellos. Para medir el peso, se puede usar alguno de los medios bien conocidos, como por ejemplo, la balanza de resorte, conocida también como "romanita". Este artefacto mide la intensidad de la atracción gravitacional sobre el cuerpo e indica esa medida en una escala graduada. Sin entrar en mayores detalles cerca del funcionamiento de estos aparatos, para no distraer la atención del tema que aquí se desea exponer, se puede afirmar que todos los cuerpos, pesados de esta manera tienen por peso al producto de su masa, por un factor que es constante. Se acostumbra denotar por "g" ese factor y su valor, al nivel del mar es:

$$g = 9.81 \left[\frac{m}{s^2}\right]$$

se le define como la "aceleración de la gravedad" Tomando en cuenta que la Tierra atrae siempre hacia su centro a los cuerpos, el peso se puede ver como un vector cuya magnitud es igual a *"g"* cuya dirección es la de un radio terrestre y cuyo sentido es hacia el cen- $M\vec{g}$ el planeta. Llamando $M\vec{g}$ al peso, se obtiene ese vector. Se tra- ... efecto de una fuerza; la fuerza con quéjala la Tierra al objeto de masa *M*.

Entonces si ahora interesa saber cual es el efecto de la atracción de la Tierra sobre un cuerpo con masa *M [kg]*, hay que utilizar la segunda ley de la mecánica y en el lugar donde aparece $\vec{F}$ hay que escribir esta fuerza particular, el peso:

$$M\vec{g} = M\vec{a}$$

Salta a la vista un primer hecho importante, de la expresión anterior cancelando la masa *M* a ambos miembros, se obtiene

$$\vec{g} = \vec{a}$$

Esto significa que un cuerpo cualquiera que sea su masa, al dejarlo caer libremente bajo la acción de la gravedad terrestre, adquiere una aceleración que siempre es la misma, e igual a *g*. Este resultado comprueba lo que Galileo afirmaba, en contra del pensamiento aristotélico.

Por otra parte, si la aceleración que adquiere un cuerpo es siempre *g*, independientemente de su masa, entonces se trata de un movimiento que ya fue estudiado en el Capítulo IV. Se le llama "caída libre" y sus resultados son: 1) la rapidez que adquiere un cuerpo que cae libremente por la atracción terrestre es:

$$v=gt$$

la altura a la que se encuentra el cuerpo en un instante *t* de su caída es, de acuerdo con aquella fórmula genera, sustituyendo en vez de "a", la debida a la gravedad terrestre *"g"*:

$$h = h_0 - \frac{1}{2}gt^2$$

donde h_0 es la altura inicial a que se encontraba el objeto en el tiempo $t_o=O$.

Así a partir del peso, se ha dado solución al problema a partir de la segunda ley de la mecánica.

¿Y qué ocurre si en vez de soltar un cuerpo en caída libre desde cierta altura, como en el ejemplo anterior, se lanza desde el piso, verticalmente hacia arriba? ¿Cómo hay que manejar ahora las cosas para estudiar el movimiento ascendiente? Muy fácil. El "tiro vertical", como se conoce a este caso del movimiento, consiste nuevamente en plantear la ecuación $\vec{g} = \vec{a}$, puesto que se trata esencialmente del mismo caso: un cuerpo que se mueve sujeto a la acción de la gravedad.

Ahora bien, en este caso, el cuerpo sale disparado hacia arriba con una cierta rapidez $|v_0|$ y, en cuanto comienza a ascender, su rapidez va disminuyendo debido a "*g*". Entonces, en vez de que gane rapidez de acuerdo con la fórmula v = *gt* que se usó, la pierde; hay que restar ahora el mismo factor *gt* a la rapidez inicial.

$$v = v_0 - gt$$

Para el lector debe quedar claro que este caso sigue siendo compatible con la aceleración constante. Se ve de la fórmula anterior que en el instante inicial $t_0 = 0$ *[s]* la rapidez del cuerpo es v_0 y conforme marcha el tiempo, va disminuyendo hasta que llega un instante $t = T$ *[s]* donde la rapidez se hace cero; esto es:

$$V_0 - gt = O$$

El instante t = T [s] marca el punto de máxima altura para el cuerpo, pues es aquel en el cual disminuyó su rapidez hasta hacerse cero; de ahí en adelante, conforme el tiempo avance más, la rapidez volverá a aumentar gradualmente, pero el vector velocidad ahora habrá cambiado de sentido. El cuerpo ya no asciende, sino cae.

Por cierto que trazando una gráfica de rapidez contra tiempo de este movimiento, se observa que la rapidez disminuye gradualmente desde v0, en el instante original, hasta cero en el instante T [s], para descender después hasta alcanzar la rapidez inicial v0, cuando transcurre otro lapso igual T [s].

El lapso T [s] que transcurre entre la lanzada del objeto y que éste alcance el reposo está relacionado con la rapidez " v0" y con la aceleración de la gravedad g tal como se ve en la fórmula anterior. Entonces, haciendo algunos despejes elementales se consigue poner al lapso T [s] en términos de esos parámetros.

$$T = \frac{v_0}{g}$$

Así el tiempo de vuelo del proyectil depende directamente de la rapidez inicial del disparo; mientras más veloz salga, mayor será el tiempo que permanezca en vuelo y, ¡claro! la distancia que recorrerá también aumentará. Esto último se puede ver muy fácilmente en el diagrama *v* vs. *T*. Recordando que el área del triángulo rectángulo bajo la recta corresponde precisamente a la distancia recorrida por el cuerpo, se obtiene entonces que ésta es igual a:

$$h_0 = \frac{1}{2} v_0 T,$$

o bien, recordando que un resultado anterior vincula la rapidez v_0 con el tiempo de vuelo, se ve que la altura que alcanza el cuerpo es:

$$h_0 = \frac{1}{2} gT,$$

o equivalentemente, sustituyendo la expresión anteriormente encontrada:

$$h_0 = \frac{v_0^2}{2g}$$

Como se puede apreciar, de los razonamientos anteriores, siempre que se trate de un movimiento en una sola dimensión, donde el cuerpo presente una aceleración constante, la distancia recorrida se puede calcular mediante la fórmula matemática que es prácticamente la misma. De hecho, cuando el cuerpo alcanza su altura máxima h_0, en ese momento comienza a caer y entonces el problema se ha convertido en una caída libre. Para estudiar esta segunda parte del movimiento hay que usar ahora la fórmula (muy parecida a la anterior) para la caída libre de un cuerpo.

Para calcular la distancia que recorre el cuerpo en cualquier instante *t [s]*, se puede proceder gráficamente con un diagrama de vs. *t* nuevamente. Viendo el diagrama de la figura VI.2 se ha dibujado el área bajo la línea desde el instante original O, hasta el *t [s]*. Para calcular esta área se puede tomar primero el área del rectángulo v_0 *t* y restar a ésta el área del triángulo recto que queda por encima de la zona sombreada $\frac{1}{2}$ gt^2. Lo que resulta es la distancia recorrida en ese lapso $h_0 = v_0 t - \frac{1}{2} gt^2$ ésta es la fórmula para el tiro vertical en cualquier instante.

Para comprobar su utilidad, supóngase que un objeto se lanza verticalmente hacia arriba, con una rapidez inicial de 120 [km/hr]. ¿ A qué altura habrá llegado al tercer segundo de su movimiento y cuál será la altura máxima que alcance? Para contestar a lo primero, hay que usar la fórmula anterior. Una rapidez de 120 [km/h],

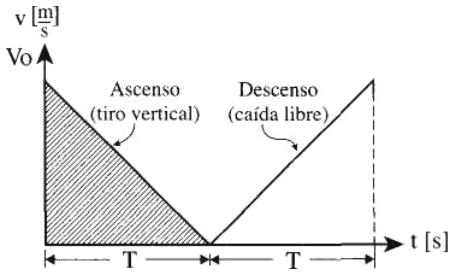

Figura II.2. Diagrama de rapidez vs. tiempo de un cuerpo que es lanzado inicialmente hacia arriba con rapidez inicial v0 y luego cae libremente.

traducida a metros sobre segundos es de 33.33 [m/s], así que sustituyendo valores se tiene:

$$h = (33.33)^2 - (0.5 \text{ X } 9.81 \text{ X } 9) = 58.85\ [m]$$

El cuerpo alcanza, al tercer segundo, una altura de 55.85 [m]. Ahora, para calcular la altura máxima se utiliza la fórmula que se halló antes para ese fin:

$$h_0 = \frac{(33.33)^2}{2(9.81} = 56.62\ [m]$$

así que el cuerpo alcanza una altura máxima de 56.62 [m], antes de iniciar su descenso.

En todo caso, el procedimiento es siempre el mismo, dada una expresión matemática para la fuerza; una fórmula se sustituye en la segunda ley de la mecánica, en el sitio donde está *F.* Al momento de hacer esta operación la célebre fórmula de Newton se ha convertido en una ecuación: una ecuación de las conocidas como "diferenciales". Ésta, se debe integrar; esto es hay que resolverla mediante el cálculo y el álgebra. Lo que se obtiene al final del proceso son fórmulas nuevamente, pero ahora, son aquéllas que expresan las posiciones del cuerpo que se estudia, en relación con el tiempo, del mismo tipo de la que se escribió en el párrafo anterior, y que expresa la altura h del cuerpo, como función del tiempo, en el ejemplo de la caída libre. En éste el movimiento es en una sola dimensión, así que una sola ecuación de movimiento fue necesaria para describirlo, pero en un ejemplo general de movimiento en tres dimensiones, habrá que obtener tres ecuaciones de movimiento; una para cada dimensión.

¡Claro! mientras más dimensiones tenga un movimiento, mayor complicación tendrá el aparato matemático para resolver ese problema. Como ejemplo de un problema así, considérese el caso de un proyectil que se dispara desde el suelo, con un ángulo como se muestra en la figura VII.3. El proyectil realiza un movimiento que, primero asciende y luego desciende, hasta llegar al nivel del piso. Además al mismo tiempo, se desplaza hacia la derecha. Tal combinación de movimientos; uno vertical y el otro horizontal, dan lugar a una trayectoria curva, como la mostrada en la figura VI.3, conocida como "tiro parabólico".

Para resolver este problema es necesario percatarse de varias cosas: en primer lugar hay que observar que éste es un movimiento en dos dimensiones. Por ello se ha usado en la figura VII.3 un sistema de coordenadas con tan solo dos ejes; el eje de las abscisas *Ox* y el de las ordenadas *Oy*. No hace falta el tercero.

En segundo lugar hay que darse cuenta que el movimiento se podrá resolver si se descompone en una parte horizontal y otra vertical, separadamente.

En tercer término hay que identificar a la fuerza que actúa en todo momento sobre el proyectil, desde que salió de la "boca del cañón", hasta que tocó el suelo. Ésta es la fuerza de gravedad; el peso del proyectil *Mg*, dirigida hacia abajo, hacia el centro de la Tierra; Es la única fuerza. ¡Pues si bien es cierto que hubo una poderosa fuerza que impulsó al proyectil por el tubo del cañón, debida a la combustión de la pólvora, también lo es que, en cuanto la bala salió de él, el efecto de la pólvora cesó y en adelante, su movimiento sólo fue afectado por la gravedad. En realidad, el aire ejerce una fuerza de fricción, de resistencia sobre el proyectil, sin embargo se puede hacer casi despreciable si se le da al cuerpo la forma de ojiva, así que tampoco se tiene que tomar en cuenta.

Ahora bien, la fuerza de gravedad; el peso del cuerpo, sólo actúa en la dirección de la vertical y por lo tanto sólo va a afectar la parte vertical del movimiento. Por su parte, la componente horizontal del vuelo del proyectil no está afectada por fuerza alguna. Así, lo que se tiene es una combinación de dos tipos de movimiento; dos casos que, incidentemente ya habían sido estudiados aquí en el capítulo V: el movimiento rectilíneo uniforme (horizontal) y el movimiento uniformemente acelerado (vertical).

Cabe en este punto una aclaración muy importante: si bien esta máquina de lógica y matemática solamente funciona cuando se le alimenta con una fórmula para la fuerza $\vec{F}$, también hay que señalar que tales expresiones matemáticas hay que buscarlas casi siempre fuera del contexto de la teoría misma. En otras palabras, la mecánica clásica de Newton no tiene manera de proveerse a sí misma de fórmulas para la fuerza. Para hacer funcionar esa maquinaria de papel y tinta es necesario buscar primero la fórmula, la expresión matemática requerida para el problema que se desea resolver. Así, si se trata de un problema que involucra cuerpos cargados eléctricamente y campos magnéticos, la fórmula para la fuerza hay que buscarla en la teoría conocida como "electromagnetismo". Dentro de aquel contexto hay una expresión matemática obtenida empíricamente (esto es, a partir de experimentos), llamada "fuerza de Lorentz" y que relaciona los campos eléctrico y magnético, con la carga eléctrica del cuerpo, entre otros parámetros. Con esta formula hay que echar a andar a la mecánica clásica en tales casos. Al concluir ese problema, el resultado expresará las posiciones sucesivas de ese cuerpo cargado eléctricamente que se estudia, al través del tiempo; las llamadas ecuaciones de movimiento.

Si ahora se desea estudiar, por decir algo, el efecto de la fricción sobre un cuerpo que se mueve en un medio resistivo; esto es que impone resistencia, entonces hay que buscar otra fórmula; la fórmula para las fuerzas de fricción debida a un investigador de apellido Rayleigh, de quien muy poco se sabe, etc. Las fórmulas para las diversas fuerzas que hay en la naturaleza hay que construirlas o bien, obtenerlas en otros campos de la física, para usarlas en la mecánica, a fin de encontrar las ecuaciones de movimiento. La mecánica clásica las acepta a todas.

¿Y qué ocurre si de pronto, al tratar de resolver algún problema particular, se utiliza una fórmula que no es la que corresponde a ese caso, o bien, está equivocada? Muy fácil: los resultados estarán mal. Esto quiere decir que las ecuaciones de movimiento que se obtengan describirán trayectorias que no corresponden con la realidad. A la hora de hacer un experimento sobre esa situación, lo que se observará es que el cuerpo seguirá una trayectoria que no se ajusta a la predicha por la teoría. En tal caso, la respuesta es muy simple: la fórmula está equivocada, hay que buscar otra.

En la figura VI.5 se ha dibujado el vector velocidad v_0 con que sale disparado el proyectil por la boca del cañón. Como se ve, el vector v0 apunta en una dirección que forma un ángulo x con respecto a la horizontal. Al escribir el ángulo con α (alfa) se indica que puede ser cualquiera, de o° a 180°. Como se ve en esa figura, el vector velocidad $\overrightarrow{v_0}$ se puede dibujar como la suma vectorial de dos vectores; uno horizontal y otro vertical. Si se recuerda un poco acerca de las relaciones trigonométricas, se puede ver a la magnitud de $\overrightarrow{v_0}$ como la hipotenusa de un triángulo rectángulo, el cateto horizontal tiene como longitud, el producto de la hipotenusa por el coseno del ángulo que forma ésta con la horizontal. Así, el vector horizontal tiene una magnitud igual a:

$$v_0 \cos \alpha$$

ésta es la "componente" horizontal de la rapidez con que vuela el proyectil. Ahora bien, recordando que en su parte horizontal, este cuerpo no está sujeto a fuerza alguna, de acuerdo con la primera ley de la mecánica, su rapidez nunca va a cambiar en esta dirección; es decir, que en su componente horizontal, el cuerpo va a tener en todo instante un movimiento rectilíneo y uniforme. Esto se escribe así:

$$v_0 \cos \alpha = const$$

Siendo constante esta componente de la velocidad, la distancia que recorre el proyectil en un intervalo de tiempo t[s] es simplemente el producto de ella por éste. Sea *X* la distancia horizontal recorrida, en ese lapso; entonces

$$X = v_0 t \cos \alpha$$

Así, el cuerpo recorre en cada segundo una distancia constante; su movimiento horizontal es rectilíneo y uniforme.

Por otra parte, la componente vertical del movimiento es un tiro vertical; esto es, el cuerpo asciende con una rapidez

$$v = v_0 \operatorname{sen} \alpha - gt,$$

tal como se demostró en el caso anterior, solamente que ahora, la rapidez inicial es precisamente la componente vertical de la velocidad, que se mostró en el diagrama de la figura VI.8. Ahora, también de acuerdo con los resultados obtenidos para el caso del tiro vertical, se ve que la altura que alcanza el proyectil en cualquier instante *t[s]* es:

$$Y = v_0 t \operatorname{sen} \alpha \frac{1}{2} - gt^2$$

y la altura máxima es, por lo mismo:

$$h_0 = \frac{v_0}{2\,g} \operatorname{sen}^2 \alpha,$$

esto es, el cuadrado de la rapidez inicial en la dirección vertical, dividido por el doble de la aceleración de la gravedad.

El lapso *T[s]* que transcurre para que el proyectil alcance la máxima altura es, por el mismo:

$$T = \frac{v_0}{g} \operatorname{sen} \alpha$$

Ya casi para terminar con este problema, se puede utilizar la fórmula para el tiempo que le lleva al proyectil alcanzar la altura máxima, en aquella otra expresión matemática para la distancia horizontal recorrida. Sustituyendo ese lapso en ésta, se obtiene la distancia que ha recorrido horizontalmente el cuerpo, cuando alcanza su altura máxima. Haciendo esa sustitución se obtiene:

$$\frac{A}{2} = \frac{v_0^2}{g} \operatorname{sen} \alpha \cos \alpha$$

Ésta es, justo la mitad del "alcance" *A* del proyectil. En la figura VI.5 se han marcado estos parámetros.

Para terminar, tómese en cuenta el siguiente ejemplo: supóngase un disparo donde el proyectil sale de la boca del cañón con una rapidez de 2970 [km/h], o sea 825 [m/s], a un ángulo de 30° respecto del horizonte. ¿Cuál es la altura máxima que alcanza el obús y cuál es su alcance? En este ejemplo, sustituyendo los valores que se dieron, se obtienen las siguientes expresiones:

1) Distancia horizontal recorrida:

$$X = (825 \times \cos 30°)t = 412.5t$$

2) Distancia vertical recorrida:

$$Y = (825 \times \operatorname{sen} 30°)t - (0.5 \times 9.81)t^2 = 714.45t - 4.905t^2$$

3) Altura máxima:

$$h_0 = \frac{(825 \times \operatorname{sen} 35°)^2}{2\,(9.81)} = 8{,}672.59\ [m]$$

4) Tiempo total del vuelo:

$$2\ T = \frac{(2 \times 865 \ \times\ \operatorname{sen} 35°)^2}{(9.81)} = 84.10\ [s]$$

5) Alcance:

$$A = \frac{(2 \times 825^2 \ \times \operatorname{sen} 30° \times\ \cos 30°)}{(9.81)} = 60{,}085.48\ [s]$$

Con las expresiones matemáticas obtenidas en (1) y (2) es posible tabular los valores de las posiciones sucesivas del proyectil, tal como se muestra en la Tabla VI. 1 y con los valores así calculados, se puede hacer una gráfica del movimiento. Con estos resultados ha quedado totalmente resuelto el problema.

Cabe aclarar que en la tabla VI. 1 únicamente se tabularon los valores de la posición del proyectil en la primera mitad de su vuelo; esto es, desde el disparo en el instante original, hasta los 42 [s] que fue el tiempo que le llevó alcanzar la altura máxima. La segunda parte de la trayectoria; aquella que transcurre desde el punto de máxima altura, hasta tocar tierra, es una parte enteramente igual a la anterior; los valores de la altura van disminuyendo en los mismos intervalos que en la primera y los valores de las distancias unitarias recorridas aumentan de igual modo. Así, conocidos los datos de la primera etapa del vuelo, se conocen automáticamente los de la segunda. Es posible vertir esa información para dibujar la trayectoria en un sistema coordenado bidimensional.

TABLA VI. 1. Se hallan los valores de las distancias vertical y horizontal que alcanza un proyectil dispararlo a un ángulo de 30° y con una rapidez inicial de 825 [m/s]

	$t[s]$	$Y[m] = 412.5t-4.9t^2$	$x[m] = 714.47\ t$
1	0	0	0
2	3.5	1 383.66	2 500.65
3	7.0	2647.16	5 001.30
4	10.5	3 790.47	7501.95
5	14.0	4813.62	10 002.60
6	17.5	5 716.59	12503.23
7	21.0	6499.40	15003.87
8	24.5	7162.02	17504.52
9	28.0	7 704.48	20 005.16
10	31.5	8 428.87	22505.81
11	35.0	8 428.87	25 006.45
12	38.5	8610.81	27507.10
13	42.0	8672.58	30 007.74

VII Las leyes de la mecánica

VII.l. LA TERCERA LEY DE LA MECÁNICA

CON EL establecimiento de la primera ley de la mecánica Newton dio el marco de referencia conceptual para estudiar el movimiento de los cuerpos materiales. Impuso la condición fundamental para definir a un observador inercial y postuló que el estado más simple, el de una fuerza igual a cero, se contemplará desde el sistema de coordenadas de un observador inercial como el movimiento más simple del cuerpo: reposo, o a lo más, movimiento rectilíneo uniforme. La primera ley es, en pocas palabras, el postulado de las reglas básicas del juego de la mecánica que dice quiénes serán los participantes y cómo se debe iniciar.

Por otra parte la segunda ley especifica la respuesta que tienen los cuerpos, todos los cuerpos materiales del Universo, ante la acción de una fuerza; cualquiera que sea su naturaleza. Es la ley con la cual el juego de la mecánica puede ser jugado. Dada una expresión matemática para la fuerza que urge a un cuerpo particular, es posible conocer cuál será la trayectoria que éste va a seguir, como resultado de aquella.

Todo está hasta ahora muy bien, pero ¿no se puede decir algo acerca de las fuerzas mismas? ¿alguna peculiaridad de ellas que se pueda conocer, que se pueda observar, independientemente de los cuerpos sobre los que actúan? Newton se dio cuenta de esta necesidad y desde luego se aplicó a satisfacerla, para tener una teoría completa.

En las historias que se leen aquí y allá sobre los personajes de la ciencia y de las artes, muchas veces se saben hechos, datos, anécdotas que en verdad no ocurrieron. La historia de los grandes hombres y de las grandes mujeres de la humanidad, muchas veces presentan pasajes que son falsos.

Probablemente se trate de mentirijillas piadosas e inocentes que los biógrafos introdujeron en sus biografías con el fin de resaltar algún rasgo de la personalidad del personaje o atenuar algún defecto, algún pasaje ingrato de la vida real de aquél. Estos relatos fantaseados llegan eventualmente a incorporarse en todas las biografías que se hacen de ese individuo y en un momento dado adquieren verosimilitud global. Así pasó, para no citar más que un ejemplo, con Galileo y su famoso experimento de caída libre desde la torre inclinada de Pisa. Tal vez es de los pasajes más conocidos de la vida del ilustre toscano, que a últimas fechas ha sido puesto en duda, en tela de juicio por los modernos, porque parece que en realidad nunca ocurrió. Lo que pasó es que uno de sus primeros estudiosos lo puso en su biografía como resultado de una anécdota popular que ni se refería precisamente a Galileo, ni a la época, pero que le pareció muy típico de Galileo y sin más la incorporó.

De Isaac Newton también se han contado muchas cosas de dudosa exactitud. Una de esas anécdotas fantásticas que se han vuelto parte de la biografía de este genio inglés es aquella que dice que, estando un día soleado de verano, acostado bajo la sombra de un manzano, allá en la granja de la abuela en Woolsthorpe, contemplando la Luna que se veía por entre el follaje, de pronto vio como una manzana roja y madura se desprendió de su rama cayó justo a su lado. Cuentan que mientras mordía con fruición el obsequio gratuito de la Naturaleza, se puso a recapacitar sobre aquel acontecimiento, que para cualquier otro observador hubiera pasado totalmente inadvertido y de pronto, cayó en la cuenta de dos cuestiones profundas y fundamentales para la física: la primera fue que tanto la manzana, como la Luna se mueven en el espacio debido a la atracción que ejerce la Tierra sobre ellas; llegó a la conclusión que la Luna "cae" igual que lo hizo aquella manzana y de esa conclusión pudo obtener su famosa ley de la gravitación universal. Sobre este asunto de la manzana, la Luna y la Tierra habrá que volver en el siguiente capítulo, cuando se trate con detalle el tema de la gravitación. La otra conclusión a la que llegó Newton, en aquella supuesta siesta a la sombra de un manzano, es una de las propiedades más profundas, más sutiles que hayan podido descubrirse de la Naturaleza. Se dice que observando la Luna, llegó a la conclusión de que la Tierra jala de ella, con su fuerza de gravedad y la atrae hacia sí. Pero la Luna misma atrae a la Tierra hacia su centro, simultáneamente. No se trata entonces de la acción unilateral de la Tierra sobre la Luna, sino más propiamente, de la interacción entre ambos cuerpos. Igual cosa pasa con la manzana; no es sólo que el gran planeta azul tire de ella hacia su centro, sino que manzana y Tierra interactúan. Esto es más o menos fácil de comprender. Lo que ya no lo es, fue la conclusión a la que llegó Isaac Newton: que con la misma fuerza que atrae la Tierra a la Luna, ésta última atrae a la Tierra, en sentido opuesto. Y lo mismo para la manzana; la misma fuerza que ejerce la Tierra sobre la manzana, la realiza ésta, en sentido contrario hacia su propio centro sobre la Tierra.

¿Entonces, si la manzana atrae a la Tierra con la misma intensidad con que la Tierra atrae a la manzana, por qué no "cae" el planeta hacia la fruta; por qué no se percibe ese "tirón" hacia la manzana? La respuesta que dio Newton fue que en realidad la Tierra si cayó hacia la manzana, lo que ocurre es que ambos; Tierra y fruta cayeron una hacia la otra y se encontraron en un punto intermedio. Siendo la Tierra tan enorme, tan masiva, apenas si se desplazó, debido a su inercia, en tanto que la manzana, siendo ligera, se movió más.

Igual pasa con la Luna: Luna y Tierra se atraen con la misma intensidad y como una jala de la otra gravitacionalmente, la otra tira de la primera hacia su propio centro. Nuevamente, aunque el jalón gravitacional sea igualmente intenso en ambos sentidos, el efecto no es igual, pues siendo la Tierra más grande, más inerte que la Luna, se mueve menos que aquella. Ahora se sabe con mucha precisión que el satélite natural en verdad no gira alrededor de la Tierra, sino que ambos cuerpos celestes giran en torno a un punto que es el lugar donde están promediadas las masas de los dos; el "centro de masa" del sistema Tierra-Luna.

La anécdota del árbol y la manzana, definitivamente no fue cierta. Hoy se sabe que se trató, en efecto de un cuento que contó algún biógrafo del sabio inglés porque le pareció romántico y bello. La verdad fue que un día Newton le explicó a su amigo, Edmond Halley cómo debía ser la interacción entre los cuerpos y para aclarar su exposición, le pidió a su interlocutor que se imaginara una manzana que cae del árbol. Esa descripción le pareció tan clara a Halley que, cuando él mismo tuvo que explicar ese asunto, volvió a invocar al árbol de manzanas y a la caída del fruto como resultado de una interacción entre dos cuerpos. Por lo visto este relato, quizá un tanto deformado, llegó a oídos de alguno de sus biógrafos y entonces fue cuando se generó la fantasía de la granja de la abuela en Woolsthorpe, la siesta del genio y el manzano.

La que en cambio, es absolutamente cierta, es la idea sobre la acción de la Tierra sobre la manzana o la Luna y la reacción de estos cuerpos, en sentido opuesto, sobre la Tierra.

Más aún, haciendo uso de ese tremendo poder de síntesis, Newton generalizó su afirmación y la propuso, no nada más para la fuerza gravitacional, sino para cualquiera otra que se dé en la Naturaleza y entre cualquier pareja de cuerpos del Universo. El resultado de esa monumental síntesis es lo que se tiene por la Tercera Ley de la Mecánica: "A toda acción, corresponde una reacción igual y de sentido opuesto".

Cualquiera que sea el cuerpo, cualquiera que sea la fuerza que se ejerce sobre él, de cualquier naturaleza, el cuerpo mismo reacciona ante ese estímulo con una fuerza igual que aquella que lo urge, pero en sentido opuesto. Así, recordando que se ha establecido el carácter vectorial de las fuerzas, se puede visualizar la tercera ley de la mecánica, tal como se hace en la figura VII. 1 Allí se muestra cómo la Tierra atrae a la manzana con una fuerza que es un vector desde ésta, hacia el centro del planeta. Como respuesta, la manzana atrae a la Tierra de igual forma, con una fuerza que se ha dibujado como un vector que parte de ella y apunta en el sentido del centro de la manzana. Ambas, la fuerza de acción de la Tierra sobre la manzana y la de reacción de la manzana sobre la Tierra, son vectores con la misma magnitud, en la misma dirección pero apuntan en sentidos opuestos, de acuerdo con la Tercera Ley.

El significado de esta ley de la mecánica, escondido detrás de palabras muy simples y claras, es muy profundo. En primer lugar, afirma que en el Universo, en toda su extensión y complejidad, las fuerzas que se ejercen en su seno son siempre por parejas. Hay un número par de fuerzas y cada par apunta en dirección igual entre sí, pero con sentido opuesto. Haciendo uso de la regla para sumar fuerzas, se verá que al sumar la acción y la reacción, la resultante es siempre cero, de manera que se puede afirmar que la resultante neta de todas las fuerzas que se dan en el Universo es cero. Así, el Universo, entendido como un cuerpo inmensamente grande, no esta sujeto a fuerza neta alguna. Está libre de fuerza y por consiguiente, o está en reposo, o se mueve en línea recta y con velocidad constante en alguna dirección, que por cierto es irrelevante.

Hay quienes piensan que existen, no uno, sino muchos universos como éste. Puede ser, pero también es irrelevante la cuestión puesto que cada uno de ellos es independiente de los demás, sobre la base que no hay interacción de uno con el otro. Y si hubiera algún tipo de vínculo físico entre ellos, entonces, por definición, cada parte deja de ser Universo y se tiene que redefinir el concepto, involucrando a las demás.

Otro detalle que es importante en relación con la tercera ley de la mecánica, es que la acción y la reacción son, en efecto dos fuerzas de igual magnitud, de igual dirección y de sentido opuesto, y pueden ser colineales o no. En el primer caso se habla de las llamadas "fuerzas centrales"; esto es, pares de fuerza acción-reacción que, adicionalmente se aplican sobre la misma línea de acción. El caso de la Luna y la Tierra, o de la manzana y la Tierra, son fuerzas centrales. En este caso, si se dibuja una línea que va del centro de la Tierra al centro de la Luna, los dos vectores fuerza están sobre esa línea, apuntando en sentidos opuestos.

Pero puede ocurrir que las fuerzas de acción y reacción no estén sobre la misma línea que une a los dos cuerpos, con tal de que ambos vectores apunten en la misma dirección y, por supuesto tengan la misma magnitud. Éste sería el caso, por ejemplo de un actuador, de los que se usan en la ingeniería mecánica, como el que se muestra en la figura VII.l, que, cuando un objeto (un dedo de una mano) lo empuja en uno de los extremos, transmite la fuerza hasta el otro y así mueve otro cuerpo que está en contacto con el mecanismo. Para operarlo debidamente, es necesario que la acción (la fuerza) se ejerza en sentido opuesto al sentido del movimiento que se desea dar al objeto. Aquí la acción, representada por el vector $-\vec{F}$, ejercida por el dedo de una mano, tiene una reacción igual, pero de sentido opuesto $+\vec{F}$ en el otro extremo del actuador, que actúa sobre el carrito de juguete. Si bien a la fuerza del dedo se opone colinealmente la reacción de la leva y a la acción de ésta se opone la reac-

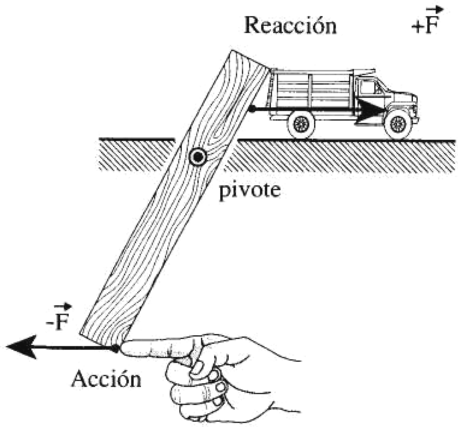

Figura VII.l. Con la punta de un dedo se ejerce una fuerza sobre un actuador; éste la transmite e impulsa al carrito, ejerciendo la misma fuerza en sentido contrario y no colineal con la acción.

ción del carrito en el otro extremo, el resultado final es de una acción y una reacción paralelas pero no lineales.

Finalmente, un detalle de suma importancia que lleva implícito la tercera ley de la mecánica, es que la acción y la reacción no se aplican sobre el mismo objeto. En efecto si un martillazo se da sobre un clavo, es el martillo el que ejerce su fuerza sobre el clavo para hundirlo en la madera. La reacción viene entonces del clavo sobre el martillo que lo golpeó. Si la Tierra ejerce una atracción gravitacional sobre la Luna, ésta reacciona, de acuerdo con la tercera ley, atrayendo a la Tierra. Acción y reacción no se realizan sobre el mismo objeto.

Ejemplos de acción y reacción se pueden hallar por todas partes. Así, el estrepitoso cohete; de esos que se lanzan en las festividades religiosas y que estallan en lo alto, asustando a los perros, debe su movimiento ascendente a la reacción que provocan los gases de la combustión de la pólvora, sobre el cohete mismo. Al ser disparadas hacia afuera del cohete los miles de pequeñas moléculas que resultan de la oxidación de la pólvora, provocan una reacción en el cuerpo del pequeño artefacto, disparándolo en su vuelo hasta el punto en que estalla.

En los aviones comerciales se usa también la tercera ley. En efecto, en los motores a reacción o de propulsión a chorro, como también se les conoce; esos que llevan bajo las alas, en forma de puro las aeronaves, una mezcla de gasolina y aire se enciende y los gases de esta combustión son expelidos por detrás del motor con gran fuerza. La reacción que provocan en el aeroplano es la fuerza que lo lanza hacia adelante y les permite alcanzar la velocidad para elevarse por el aire.

VII 2. LA PARADOJA DE LA MULA Y LA CARRETA

A veces ocurre en la ciencia que ciertos resultados, ciertos hallazgos experimentales o ciertas conclusiones obtenidas por el razonamiento lógico, desembocan en una paradoja; esto es, un resultado en apariencia contrarios a la razón, o contrarios a la teoría misma. Se ha dado el caso de que en un corolario contradiga la ley de donde surgió, como fue un caso muy sonado dentro de la mecánica de los fluidos, cuando alguien, aplicando el más puro de los procesos deductivos, demostró sin lugar a dudas que los abejorros, esos, insectos ventrudos y zumbadores que se ven en los campos libando el néctar de las flores, no pueden volar, de acuerdo con la aerodinámica. Ésta fue una paradoja que se planteó, pues a partir de cálculos precisos, tomando en cuenta el volumen y el peso del abejorro tomando así mismo en consideración la envergadura de sus alas y la rapidez con que las bate, no debe volar... Fue un resultado paradójico que dio muchísimos dolores de cabeza a los especialistas, pues contradice la experiencia. Después de mucho trabajo, alguien se percató que al establecer las ecuaciones para el vuelo del insecto, se había cometido una omisión insignificante en apariencia que condujo a tal paradoja, pero al tomarla en cuenta, todos los resultados finalmente quedaron de acuerdo con la experiencia; la paradoja desapareció. Alguien mencionó qué bueno es que los abejorros no saben aerodinámica, porque de haberla conocido, sencillamente nunca hubieran intentado volar. Como no saben física, vuelan.

Así mismo, en la mecánica clásica, la que aquí se ha venido presentando y en particular, dentro del contexto de la tercera ley hay ciertas conclusiones en apariencia paradójicas que vale la pena conocer. Para presentar en una forma simpática esos detalles contradictorios se hará a continuación una relación de un cuento que hoy por hoy aparece en casi todos los textos de física que tratan el problema de la mecánica. Probablemente el autor de este cuento fue un estupendo profesor y excelente hombre, que formó a muchas generaciones de físicos en la Universidad Nacional Autónoma de México, de nombre Juan de Oyarzabal. Con algunas modificaciones menores, el cuento, llamado "la Mula y la Carreta" es más o menos así:

Había una vez un granjero que adquirió una hermosa muía con la idea de usarla para tirar de un carretón en el que cargaría los productos de su granja para llevarlos a vender al pueblo en los días de mercado. El dueño anterior de aquel animal, quien había vendido la bestia, se había deshecho de ella a un precio verdaderamente bajo; diríase ridículamente bajo. La muía daba la apariencia de estar en perfectas condiciones: joven, sana, bien dotada para el trabajo, pero sin embargo el dueño anterior se había separado del animal casi con alegría, a pesar de que había recibido por él una bicoca. Al preguntar el granjero la razón de esa actitud, el antiguo dueño de la bruta sólo se limitó a decir que "Fogosa", muy a pesar de su nombre y no obstante su aspecto grande, musculoso y sano, había resultado ser una muía perezosa y en ocasiones rejega y respondona, lo cual llegó a exasperar de tal modo a su dueño original, que se había decidido a venderla por el precio que fuera.

Sin malicia alguna, el granjero había pagado de inmediato el precio acordado ¡Bajísimo precio, por cierto! y se había llevado a Fogosa, la muía, a su rancho, donde la bañó, la cepilló y la puso en el establo, en un lugar apartado del resto de los animales. Le puso paja seca y una cubeta llena de agua y la dejó descansar hasta el día siguiente, cuando tendría que ir al pueblo y comenzaría a trabajar jalando el carretón. La muía se quedó en el establo tranquilamente y el granjero salió de allí pensando que aquel había sido un espléndido negocio. Se sentía alegre y optimista, pues muy probablemente el dueño anterior del ungulado, o no tenía idea de lo que valía un animal como ése, o no había podido domesticar a la muía por ignorante, o estaba un poco chalado, cuando tomó la decisión de deshacerse de ella por un precio de risa.

Al día siguiente, muy de mañana, el granjero cargó su carretón con los productos que habría de vender en el mercado del pueblo ese día. Tenía que salir temprano, pues el camino era largo y había que llegar antes que los demás comerciantes pusieran sus puestos; antes que las amas de casa hicieran su aparición para regatear y hacer el mandado. Acomodó con cuidado las cajas con zanahorias, los jitomates y las cebollas; colocó arriba de éstas los huacales con las berenjenas, los mangos y las papayas y aseguró la carga con mecates a los extremos del carretón. Mientras tanto, la noble muía observaba la escena atenta, viendo con sus inteligentes y brillantes ojos cada movimiento, cada maniobra de su nuevo amo. Al concluir con los preparativos, el granjero alegre, aparejó a su muía y la acopló al carretón. A toda prisa trepó al vehículo y se dispuso a partir. Una y otra vez fustigó a la bestia para hacerla arrancar, pero Fogosa se negó hacerlo. Agitando su cabeza de un lado a otro, como en una negación, aguantó estoicamente el fuste sin dar un paso. El granjero, desesperado y con la angustia de que se estaba haciendo tarde, bajó de la carreta y se encaró a la muía. En jarras y con tono plañidero le habló:

—¿Qué pasa contigo Fogosa? ¿Por qué no quieres caminar? Mira que se nos hace tarde y tenemos que llegar al pueblo cuanto antes para vender todo en el mercado. Si nos retrasamos más podemos perder la venta y no vamos a tener para comer. No podré comprarte tu alfalfa y ponerte paja seca para que descanses no seas floja, camina, ¡ayúdame! ¡no me hagas desatinar más!

Nada, la muía escuchó atenta las palabras del granjero, como si entendiera todo lo que le dijo, pero no se movió. Cuando su amo volvió a trepar al carromato aquel y agitó de nuevo la rienda para impulsar a la muía a iniciar su camino, no hizo ni el menor intento; se quedó allí, parada, moviendo las orejas y la cola para espantar las moscas, pero no anduvo. El granjero se salió de sus casillas. Comenzó a lanzar todo género de improperios y a recordar a la muía cuánto dinero había pagado por ella, qué bien le había tratado y terminó entre ajos y cebollas, amenazándola con convertirla en mortadela.

De pronto, en una pausa que hizo el granjero para tomar aire y seguir con sus palabrotas, la muía volteó su cabeza y le habló:

—¡Cálmate! No me trates mal, no tienes por qué ponerte de esa manera ante una dama como yo. ¡Tranquilízate! No hay caso en que me esfuerce por jalar el carretón, no funcionará, ¿por qué mejor desistimos y nos vamos a dormir otro ratito ¿qué tal?

El granjero por un poco se va de espaldas. No podía dar crédito a lo que había escuchado. En una actitud de completo estupor, se quedó un rato viendo fijamente a la cara a Fogosa, hasta que acertó a decir:

—¡Cómo que no resultará! Lo único que tienes que hacer es echarte a caminar, la carreta irá detrás de ti y podremos llegar al pueblo...

—Te digo que no resultará —dijo la muía—. Lo que ocurre es que tú eres un granjero ignorante no conoces la tercera ley de Newton; esa que dice que a toda acción corresponde una reacción igual y de sentido opuesto.... ¿has oído de ella?

—No —dijo el granjero— pero siempre que he querido ir al pueblo lo he hecho , así pasó con Zulema, la otra muía que tenía; solo la uncía a la carreta y ella, sin más, pues ....jalaba. ¡Hay Zulema, por que te moriste!

—¡Eso es imposible! dijo Fogosa—. Te digo que la tercera ley lo pone muy claro; si yo trato de jalar del carretón, mi acción se verá de inmediato contrarrestada por la reacción de éste sobre mí, con la misma intensidad pero en sentido opuesto a mi intento, impidiendo todo movimiento, ¿así que para qué me tomo siquiera la molestia de intentarlo? ... ¡No! ¡No! y ¡No! Yo no me moveré de aquí.

El granjero quedó allí, con las riendas en la mano, hecho un estúpido, sin saber qué hacer.... En verdad que no recordaba la tercera ley de la mecánica; hacía ya tanto tiempo desde que presentó aquel examen extraordinario de física, en la secundaria, cuando la Srta. Monroy le había sugerido a su padre que no intentara más con su hijo hacerlo estudiar. Era muy bruto y jamás podría con los estudios, mejor debería ponerlo a trabajar en algo de provecho; cualquier cosa, mientras no tenga que usar su cabeza para otro fin que no sea poner sobre ella el sombrero. Así fue como había terminado su ilusión de convertirse en licenciado y tuvo que regresar a la granja de su padre a ayudarlo en las labores del campo. Allí se había quedado y cuando murió el viejo se hizo cargo por completo de la propiedad.

Ese día la cosecha del granjero no llegó al pueblo. Tampoco al día siguiente, ni al siguiente...; de hecho, la temporada pasó sin que apareciera el hombre con sus verduras. Quienes lo conocían se preguntaron qué le habría ocurrido, tal vez habría enfermado, comentaban.

No estaba enfermo. Lo que pasó es que después de aquel penoso episodio, cuando Fogosa, la muía le había hecho quedar en el más absoluto ridículo; cuando le sacó a colación su ignorancia en física, el granjero se metió a su casa. Los primeros días estuvo asustado; creía que se había vuelto loco y que aquella conversación con la gran muía nunca había existido; que todo había sido producto de su imaginación. Tal vez la noche anterior a aquel día había cenado de más y eso le había producido una indigestión que lo hizo alucinar... Pero no, después del segundo día tuvo que volver al establo; había que darle de comer a las vacas y desde luego, a Fogosa. Con angustia realizó su tarea, pretendiendo que nada ocurría y en efecto, nada ocurrió anormalmente, hasta que hubo llenado el comedero de la muía y cubierto el piso con paja fresca. Entonces, ya para salir, escuchó: "gracias". El granjero volvió a quedar helado, automáticamente dijo "de nada" y salió del establo con paso apresurado.

Sí, la muía, en efecto hablaba; esa había sido la razón por la que el dueño anterior se había deshecho de ella, al fin caía en la cuenta. Pensó en hacer lo mismo; en buscar algún incauto, como él lo había sido y vender al animal, pero él era de otro espíritu; él no era de esos hombres que se derrotan en la primera escaramuza; además, la canija mula lo había hecho quedar como un idiota con aquello de que era un ignorante que no sabía mecánica ¡faltaba más!, que un animal inferior lo reprobara a él. De mal talante había tolerado que aquella señorita Monroy, su maestra, la de las gafas de fondo de cenicero, le hubiera dicho que era un burro irredento, pero ésta era otra cosa; algo se tenía que hacer ahora. Las cosas no podían quedar así.

Los siguientes días los pasó el granjero estudiando física. Había subido al ático de su casa y había abierto un pesado baúl donde guardaba sus cosas de cuando era escolapio. Afortunadamente había encontrado un libro que decía Física. Lo sopló para quitarle el polvo y se lo llevó a su cuarto. Se puso a estudiar con entusiasmo; como nunca lo había hecho. Repasó aquellos conceptos que algún día había estudiado y, pronto comenzó a percibir una agradable sensación de paz, de tranquilidad. Descubrió que con la ayuda de la física, muchas cosas; de las que se ven a diario, de las que le ocurren a todo mundo cobraban sentido y se comprenden los porqués. Le encantó la mecánica y la halló simple lógica y bien estructurada; comprendió que sin duda, aquel que la había pensado por primera vez había sido un hombre excepcional. Aprendió la primera, la segunda y la tercera leyes de Newton. Era bellísima esa teoría, era volver simple, todas las cuestiones relativas al movimiento; no se tenía que trabajar demasiado, ni había que esforzarse para entender la mecánica de las cosas leyendo a aquel autor; era, en fin, una mecánica sin talachas...

Tras semanas de estudio, de intensa meditación, el granjero había aprendido física. En particular, con la ayuda de las leyes de la mecánica había atacado el problema de la carreta y la muía. Había trazado diagramas representando el carretón y la muía jalando de él y había dibujado la dirección y el sentido de las fuerzas de acción y de reacción mediante vectores, tal como se muestra en la figura VII.5. Finalmente, una noche, ya muy tarde se oyeron gritos dentro de la casa del granjero, eran como aullidos de coyote en celo, pero jubilosos. Al fin había encontrado la solución a la paradoja que le había puesto aquella muía parlante.

—¡Lo he encontrado! ¡Lo he encontrado! gritaba el granjero.

La muía estaba en el quinto sueño cuando la despertó de pronto el escándalo de la puerta del establo al abrirse y los gritos del amo al entrar apresuradamente.

—Me sorprendiste hace unos días —le dijo el granjero a Fogosa, encarándose a ella— porque ya se me había olvidado la mecánica. Te debo estar agradecido porque me has hecho estudiar de nuevo; me has hecho recordar lo bello que es el conocimiento, la seguridad que se tiene cuando se comprenden las cosas de la naturaleza. Quiero darte, en verdad las gracias por todo. Pero quiero decirte, muía del demonio, que tu juego terminó y no podrás confundirme nunca más con tus "dizque" conocimientos de física, para seguir con tu vida de baquetona y acomodaticia, así que mañana muy temprano, antes que amanezca, nos vamos al pueblo a vender las verduras, que ya se me están echando a perder. Y te advierto que no voy a tolerar más tus argumentos y si me vuelves a rezongar voy a cargar la carreta hasta el tope de puras piedras y te voy a poner a jalarla hasta que lleguemos al otro pueblo, para que se te quiten las ganas de volverme a ver la oreja.

—Pero, la tercera ley de la mecánica dice que a toda acción... —trató de responder Fogosa, medio dormida aún— ...no resultará, tu sabes mientras más jale yo de la carreta, más me jalará ella a mí y el resultado será que...

—¡Pamplinas! Gritó el granjero. Te has querido pasar de lista con tu acción y tu reacción y quizá te hayas reído de mí, pero ¡se acabó! La tercera ley está bien y no tiene falla: a toda acción se le opone una reacción igual y de sentido opuesto, pero tú vas a realizar no una, sino dos acciones simultáneamente: una va a ser sobre el carretón pero hay otra acción adicional y ésa es la que vas a realizar con tus patas, con tus pezuñas sobre el piso, empujando hacia atrás. La reacción del carretón, en efecto va a ser igual y de sentido opuesto a tu acción sobre él, pero así mismo habrá otra reacción: la del piso sobre ti, sobre tu cuerpo, sobre todo el sistema, incluyendo al carretón. Esa reacción es la que te hará moverte hacia adelante con todo y la carga.

Las pezuñas representan sobre el piso una fuerza de fricción muy grande y son las que, al empujar hacia atrás, reciben la reacción de éste en sentido opuesto y te impulsan adelante. Las ruedas del carretón descansan sobre el mismo piso pero, por su forma, no presentan gran resistencia al movimiento, así que prácticamente no hay reacción de éste sobre ellas en el sentido del movimiento. Así pues, la solución a la paradoja está en considerar la fuerza de fricción entre el piso y las pezuñas.

(Si se diera el caso en que la muía estuviera parada sobre hielo, por ejemplo, no se podría dar el movimiento porque al no haber fuerza de fricción entre las patas del animal y el hielo, no se daría la acción y por lo tanto tampoco la reacción. Quienquiera que haya tratado de caminar alguna vez sobre hielo o sobre un piso resbaloso sabe que por más que se muevan los pies, por más impulso que se desee dar al cuerpo no hay manera de avanzar, pues resbalan sin apenas recibir reacción alguna del piso sobre el cuerpo.)

Sobre una hoja de papel que había llevado enrollada bajo el brazo desplegándola sobre el piso y haciendo sobre ella algunos dibujos el granjero le explicó con todo cuidado a la muía el asunto de la acción y la reacción y la composición de las fuerzas. Al final, después de cerca de una hora, contestando algunas preguntas de Fogosa, concluyó su cátedra. La muía quedó pensativa y cabizbaja y después de un lapso que duró unos cuantos minutos, al fin expresó:

—Me has convencido. Realmente, para serte totalmente franca, ni yo misma me creí aquella afirmación que te hice hace días, pero debo confesarte que hasta ahora me dio resultado. Con el amo anterior mis argumentaciones funcionaron de maravilla. Pobre, casi se volvió loco cuando le mencioné la tercera ley de la mecánica. Igual que tú, se fue a estudiar como enajenado después que se le pasó el susto de escucharme hablar. También abrió una pila de libros de física y trató de rebatir mi punto con sesudos razonamientos que yo siempre eché abajo con los míos. Nunca me pudo ganar. De hecho, adquirió un complejo de inferioridad tan fuerte que al final yo le daba órdenes y lo tenía completamente a mi servicio, varias veces lo amenacé con hablar y contar toda la verdad: que es muy bruto, que no sabe física y que lo había llevado a un grado de derrota que hacía todo lo que yo le ordenaba. Yo disfruté de esa situación lindamente durante un tiempo, hasta que una vez se me pasó la mano con él; un día le dije que necesitaba que me rascara el lomo y me acariciara la crin mientras yo comía mi alfalfa. Creo que fue demasiado para él. Al día siguiente me vendió contigo. Tú, en cambio, cerraste todas mis salidas lógicas con tus conocimientos; me has demostrado que eres muy superior a mí, así que debo reconocerlo. Por ello te prometo, te doy mi palabra de muía, que de hoy en adelante trabajaré al parejo tuyo, te respetaré y procuraré que siempre te sientas satisfecho de mi servicio. Tú eres mi amo.

En efecto, la muía cumplió su palabra, fue de ahí en adelante el animal más trabajador, dócil y fiel que nadie hubiera visto jamás por la región. Nadie más que el granjero la oyó hablar y se cuenta por allí que al atardecer, cuando las faenas del campo habían terminado, el granjero y su muía se metían juntos al establo y una vez adentro, pasaban horas de charla deliciosas. El granjero se volvió culto y sabio, se aficionó a la lectura, vivió muy feliz por muchos años en compañía de Fogosa, su noble y fiel muía.

VII.3. Las trayectorias y las superficies del movimiento

Es necesario, llegado este momento, cambiar la línea de pensamiento que se había seguido. Es muy importante continuar el estudio del movimiento de los cuerpos pero ahora hay que hacerlo desde una perspectiva distinta.

Cuando se estableció la segunda ley de la mecánica, se vio con ella que es posible conocer el movimiento de los cuerpos materiales en el espacio físico. Dada la fuerza que actúa sobre el cuerpo, es posible determinar la velocidad con que se mueve en cada instante, así como la sucesión de posiciones que ocupa. La línea que va dibujando el cuerpo en su viaje por el espacio físico es la llamada trayectoria. Así pues, la finalidad que persigue la mecánica clásica es predecir las trayectorias de los cuerpos materiales.

La tercera ley por su parte, establece ciertas consideraciones de carácter muy general acerca de las fuerzas: se dan por parejas, a cada fuerza con que un cuerpo actúa sobre otro, le corresponde otra con la cual éste responde sobre aquél, con la misma intensidad que ella y en sentido opuesto.

Newton pensó entonces que hay algo más que se tiene que decir de las trayectorias mismas. Hasta ahora, lo único que se ha hecho en este sentido ha sido distinguir el movimiento rectilíneo uniforme con su trayectoria recta, de todos los demás. Sin embargo, es posible hacer una clasificación más fina de estas líneas en el espacio.

Para dar el siguiente paso en dirección de establecer una clasificación de las trayectorias es necesario percatarse que toda línea; recta o curva, siempre puede dibujarse sobre una superficie de dos dimensiones. En efecto, dada una línea en el espacio, es posible imaginar una superficie que la contiene completamente. En el caso de una línea recta, dicha superficie puede ser plana, como se muestra en la figura VII.2. De hecho, muchas líneas, aunque sean curvas, pueden ser dibujadas igualmente, en un plano. Sin embargo, hay otras, las llamadas curvas tridimensionales que no pueden ser embebidas en una superficie así. Éstas, requieren de otro tipo más complicado de superficie; una que a su vez sea curva, como la mostrada en la figura VII.3.

Por su parte, aquellas trayectorias que pueden ser dibujadas sobre una superficie plana, como la que se muestra en la figura VII.2, son llamadas consecuentemente "curvas planas".

Así pues, con estas consideraciones es posible ahora clasificar a las trayectorias como "planas" o "tridimensionales". En el primer caso, hay que recalcar que la superficie que las contiene es plana; en tanto que en el segundo caso es curva.

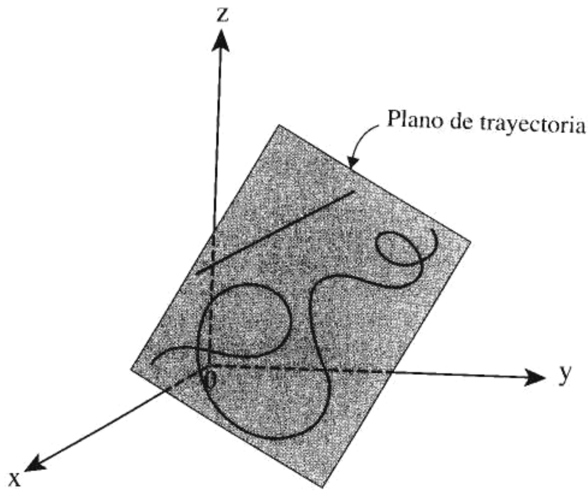

Figura VII.2. Curvas planas son todas aquellas, rectas o curvas que pueden dibujarse sobre una superficie plana. El plano de trayectoria es plano.

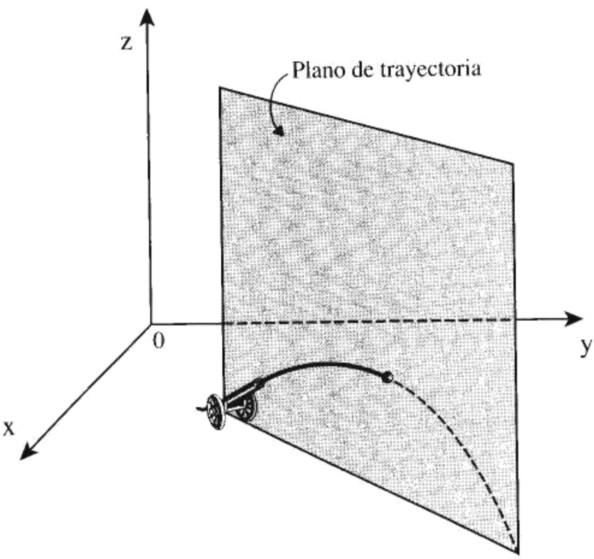

Figura VII.3. El tiro parabólico es un ejemplo de una trayectoria plana. El plano de trayectoria es plano. Esto significa que la torca que actúa sobre el cuerpo es nula.

Por cierto que a la superficie, plana o curva, que contiene a una o más trayectorias de partículas, se le nombra "plano de trayectoria". El plano de trayectoria puede ser una superficie plana o curvada, tal como se explicó.

Con ese pensamiento tan extraordinariamente sintético que lo caracterizó, Newton llegó a la conclusión de que, así como la trayectoria más simple de todas es la recta; así también, el plano de trayectoria más simple de todos es una superficie plana. Ahora, si la trayectoria más simple corresponde al caso dinámico más sencillo que es el de ausencia de fuerzas, o, para expresarlo con símbolos F= 0, entonces, pensó que igualmente, el plano de trayectorias más simple de todos; la superficie plana, debe corresponder a un caso dinámico elemental.

Entendiendo que las fuerzas obligan a los cuerpos a cambiar, a curvar sus trayectorias, Newton llegó a la conclusión de que debía existir un agente, un ente, cuyo efecto fuera el de torcer planos de trayectoria. Así, si un cuerpo originalmente se movía de tal forma que su trayectoria era plana, al aparecer este ente físico, el plano se curva y la trayectoria misma se convierte en una curva tridimensional.

A esos nuevos entes naturales, Newton los llamó torcas. Las torcas son, entonces, aquellos agentes que al actuar sobre los cuerpos tuercen sus planos de trayectoria. Las torcas convierten una trayectoria plana en tridimensional. Y así como las fuerzas fuerzan las trayectorias, las torcas tuercen los planos de trayectoria.

Continuando con esta línea de pensamiento, Newton estableció que, como la trayectoria patrón, la más simple de todas: la línea recta que describe un cuerpo en movimiento rectilíneo uniforme, se da cuando la fuerza que lo urge es cero, así también, el plano de trayectoria "patrón", el más elemental de todos: la superficie plana, debe darse cuando la torca que actúa sobre el cuerpo es igualmente cero. Una torca igual a cero, corresponde a plano de movimiento plano y una torca distinta de cero, debe asociarse con plano de movimiento curvo. Tanto más curvo, cuanto más intensa sea la torca.

Cuando un proyectil sale disparado de un cañón (como fue el caso del problema que se trató al final del capítulo VI), describe una trayectoria curva. Su movimiento es así, porque actúa en todo instante una fuerza sobre ese cuerpo; la fuerza de gravedad. Allí quedó demostrado sin lugar a dudas que la respuesta de un cuerpo ante una fuerza es abandonar el reposo o el movimiento uniforme rectilíneo y adquirir uno acelerado, no uniforme. Sin embargo, este caso corresponde a una trayectoria plana. En efecto, si el tiro parabólico se vuelve a dibujar, como en la figura VII.8, embebiendo la trayectoria en una superficie, esta es plana, como se muestra.

Viendo desde esta perspectiva el movimiento del cuerpo, es claro que no hay torca alguna actuando sobre él.

Lo mismo ocurre cuando, por ejemplo, un lanzador de béisbol dispara una bola. La trayectoria que describe, es un arco de parábola, desde su mano, hasta el bate del jugador contrario. La pelota de béisbol puede interpretarse, durante su vuelo, como un proyectil en tiro parabólico. Este, como en el caso del obús de artillería, es un movimiento con una trayectoria plana; es un ejemplo de torca igual a cero.

Si, por el contrario, un lanzador experimentado, dispara una pelota de béisbol contra su adversario al bate, el efecto que imprime a la bola hace que ésta describa una trayectoria curva. Estas son las famosas "curvas" en el interesante juego. Aunque muy probablemente los lanzadores lo ignoran, al darle a la bola un giro adicional con sus dedos y su muñeca justo al momento de lanzarla, le están aplicando a su proyectil una torca que obliga al plano de trayectoria a curvarse, tal como se muestra en la figura VII.5.

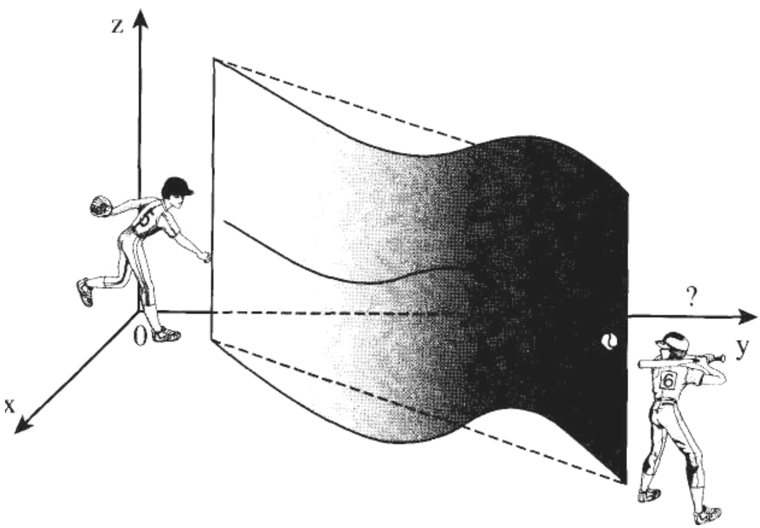

Figura VII.4. El lanzamiento de una bola con "efecto" es un ejemplo de una trayectoria tridimensional. El plano de trayectoria es curvo. La torca es distinta de cero.

Con la torca impresa en la pelota, además del movimiento parabólico adquiere otro; un movimiento lateral que convierte la trayectoria en tridimensional. Este efecto descontrola al oponente y lo hace errar su toletazo.

Un ejemplo estupendo de movimiento en un plano de trayectoria plano se puede observar en el sistema solar. Los planetas, como bien se sabe ahora, después de los brillantes descubrimientos y las formidables deducciones de Copérnico, de Kepler, de Tycho Brahe y del propio Isaac Newton, son cuerpos que describen órbitas elípticas alrededor del Sol. Las órbitas son la trayectorias de los planetas; son esas líneas imaginarias que van dibujando en su tránsito alrededor del gran astro rey. Se ha podido observar que estas órbitas son curvas planas; esto es, que el plano de la trayectoria de ellos es plano. Nuevamente, invocando al pensamiento del gran genio inglés, esto significa que sobre los planetas del sistema no actúa torca alguna.

VII.4. LAS TORCAS Y MOMENTO ANGULAR

Pero, a todo esto, ¿qué es la torca? ¿qué otras características tiene y cómo puede representarse matemáticamente? ¿en que forma se puede medir su efecto sobre los cuerpos? Hasta ahora lo único que se ha hecho es introducir el concepto cualitativamente, en términos de los efectos que provoca en los cuerpos. Sin embargo, para manejarlo dentro de la teoría, es necesario darle una caracterización matemática precisa.

Nuevamente, Newton se percató desde un principio de la necesidad de definir a la torca y sus efectos en los cuerpos. De nuevo puso en acción esa impresionante maquinaria de precisión que era su cerebro, analizando la esencia del movimiento, sintetizando aquellos hechos, aquellos rasgos esenciales de él, que le permitieran, con tres palabras; con una sola expresión matemática, de un plumazo, decir todo acerca de las torcas y su efecto en el movimiento de los cuerpos materiales.

No tardó en hacerlo. Muy pronto pudo encontrar un conjunto de razonamientos lógicos que lo condujeron a su meta. El punto de partida fueron nuevamente las cosas más simples: las superficies planas; los planos de trayectorias planos. Como se mencionó, los planos de trayectoria planos son aquellos que corresponden a un movimiento libre de torcas, en tanto que los otros, los planos de movimientos curvos son aquellos que contienen trayectorias sobre las cuales actúan torcas. Así que las torcas, en efecto, tienen la virtud de torcer planos. Newton imaginó entonces que las torcas son vectores que actúan sobre los planos, curvándolos, torciéndolos. Por lo tanto deben ser vectores con magnitud, dirección y sentido. Su magnitud tiene que ver con la intensidad con que la torca tuerce a los planos de trayectoria; así, una torca con una magnitud pequeña, curvará poco a un plano, en tanto que si el tamaño del vector es grande, su efecto también lo será, y la torcedura del plano será muy intensa. Por su parte, la dirección y el sentido de la torca dan al plano sobre el cual actúan, la correspondiente torcedura. Así pues, las torcas deben ser consideradas como vectores. Se acostumbra denotar al vector torca por la letra $\vec{M}$, con su flecha en la testa: $\vec{M}$ El lanzamiento de una bola de béisbol con "efecto", es uno de los ejemplos más notables de un movimiento con una torca. El lanzador, al momento de disparar la bola, le imprime un estado de giro con los dedos de su mano y este giro permite al proyectil sustentarse en el aire y dar cierta vuelta sobre su trayectoria original. Es precisamente el aire el que le imprime la torca con la cual la trayectoria se curva.

Con la identificación de las torcas, parecía que el modelo teórico; la mecánica clásica de Newton estaba completo. Con estas herramientas lógicas se puede, en principio atacar todo problema que tenga que ver con el movimiento de los cuerpos materiales. Así, la trayectoria plana de un objeto que se mueve en el espacio, se desarrolla y evoluciona debido a la fuerza que actúa sobre ese cuerpo, en tanto que el plano de movimiento, esa superficie que contiene a la trayectoria misma, se tuerce por efecto de la torca que lo urge. Total, que el movimiento de toda partícula en el espacio, por más complicado que pueda parecer, se puede concebir como la superposición de dos causas; dos agentes que lo producen: las fuerzas y las torcas. Y aunque el cuadro de la mecánica parecía haber quedado completo, aún había algo que preocupaba al hombre de Woolthorpe, allá en Inglaterra.

Aquello que le quitó el sueño algunos días más era una cuestión de veras profunda acerca de la naturaleza de las cosas: según sus propias consideraciones, en el Universo hay dos tipos distintos de interacciones físicas sobre los cuerpos materiales, que dan lugar a todos los tipos posibles de movimiento: fuerzas y torcas. Las fuerzas alteran trayectorias y las torcas alteran planos de trayectorias. Todo esto parece a primera vista muy bien, pero.... ¿no es verdad que al alterar un plano de trayectoria se está alterando con ello a la trayectoria misma del cuerpo? Si en ausencia de torca alguna, un cuerpo viaja en el espacio de acuerdo con las fuerzas que lo urgen, dibujando una línea imaginaria sobre su también imaginario plano de trayectoria plano y luego, si al actuar sobre él alguna torca, su plano se tuerce, ¿no es esto equivalente a haber cambiado su trayectoria?

La respuesta es "sí". En efecto, cambiar el plano de trayectoria implica necesariamente cambiar la trayectoria misma, luego las torcas no deben ser algo ajeno a las fuerzas, las torcas, por el contrario, deben estar muy fuertemente, muy íntimamente relacionadas con las fuerzas. Deben ser, en realidad, otra manifestación de las fuerzas, de modo que en el Universo, en realidad no hay dos, sino una y solamente una causa del movimiento: la fuerza, pero se manifiesta de dos maneras diferentes: como tal; esto es, como fuerza o como torca.

En realidad la torca es el efecto de giro que tiene una fuerza dada, al aplicarse sobre un cuerpo.

El punto sutil de todo este razonamiento es que la esencia de ambas; fuerzas y torcas, es la misma, pero las últimas dan información sobre el giro que producen en el objeto sobre el cual actúan las fuerzas. Solamente que para hablar de giro es necesario referirlo a un centro, a un eje, a un pivote, con respecto al cual ocurre. No tiene sentido el concepto mismo de giro, si no hace referencia a ello. Entonces la torca debe contener la información; debe llevar el concepto de fuerza y debe referirla a un pivote; un punto que, al menos instantáneamente sirve como centro de giro del cuerpo. Así, si un objeto material está sujeto a una fuerza cuya magnitud sea *F*, a lo largo de cierta dirección y con sentido dado, entonces la torca aplicada a ese cuerpo, "con respecto a un punto *O*", tal como se muestra en la figura VII.5, tiene por magnitud:

$$M – r\,F \text{ sen } \alpha$$

Siendo a el ángulo que se forma con la línea que va de *O* al cuerpo y con la línea del vector fuerza F, cuya magnitud es *F*. La letra "*r*" significa la distancia radial desde O hasta el cuerpo.

Para hallar la dirección y el sentido de la torca *M*, se ha establecido la llamada "regla de la mano derecha" que consiste en situar la palma de esta mano en la misma dirección que el radio "r", hacia el cuerpo; luego doblar los dedos de esa mano en la dirección de la fuerza *F* de tal suerte que las puntas tengan el mismo sentido que la punta de esa flecha. Así la mano derecha está doblada siguiendo la dirección de *r* y la del vector *F*. Finalmente se extiende el pulgar, apuntando en la dirección perpendicular a la mano, tal como se muestra en la figura VII.6. Ésta es la misma dirección que tiene el vector torca $\vec{M}$, la punta del pulgar señala, además, el sentido del vector.

La regla de la mano derecha permite conocer rápidamente al vector torca $\vec{M}$, siempre que se conozca a la fuerza *F* que actúa sobre el cuerpo y se haya dibujado también, al radio r desde el origen del sistema de coordenadas hasta el cuerpo mismo. La torca forma un ángulo de 90 grados con el plano formado por *r* y *F*.

Por supuesto, en el caso en que la fuerza F tenga la misma dirección que el radio r, entonces la torca debe ser igual a cero, puesto

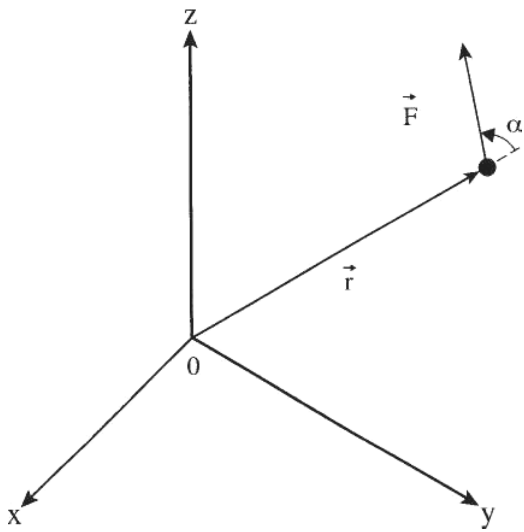

Figura VII.5. Un cuerpo esta actuado por la fuerza . La intensidad de la torca debida a esa fuerza con respecto al punto *O*, es M= r F sen α. Esta cantidad da el efecto de giro de esa fuerza, tomando a O como pivote.

que el ángulo que forman r y *F* es de cero o de ciento ochenta grados, entre sí. En este caso, el seno de ese ángulo es cero.

Muchas veces ocurre que la fuerza .*F* está en la dirección de *r*. Por ejemplo, en el Sistema Solar, tomando en cuenta el modelo heliocéntrico de Copérnico y Kepler, se puede situar al Sol en el origen de un gigantesco sistema de coordenadas cuyos ejes de abscisas y de ordenadas parten de él en dos direcciones perpendiculares, de tal forma que el plano que generan es precisamente el plano del ecuador solar. El eje *OZ;* el de las cotas va entonces en la dirección de los polos solares; de polo sur a polo norte. De esta manera queda completo ese imaginario sistema de coordenadas solar.

Ahora bien, en este ejemplo del Sistema Solar, la fuerza que actúa sobre los planetas, obligándolos a viajar alrededor del Sol, describiendo sus órbitas, es la gravitación. La gravitación es una fuerza que atrae a esos cuerpos hacia el Sol, como se verá con más detalle en el capítulo VIII. Así que el vector fuerza se puede imaginar apuntando siempre del planeta al Sol, en la misma dirección que el radio r. Por lo tanto, la torca es igual a cero.

Éste es un resultado extraordinariamente simple ahora que ya es conocido el concepto de torca. Si el ángulo que forman la fuerza *F* (la fuerza gravitacional) y el radio; es decir esa línea que va del cen-

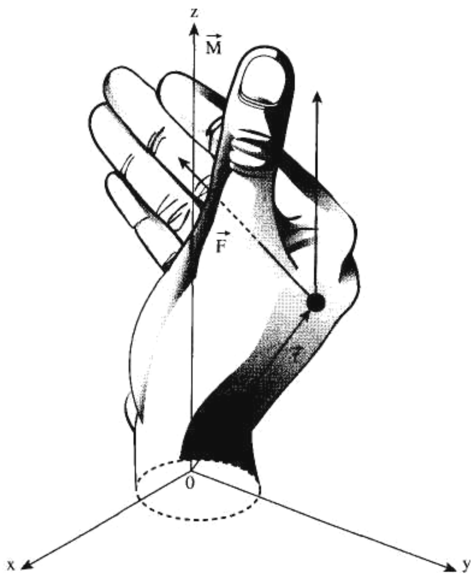

Figura VII.6. La regla de la mano derecha para hallar la dirección y el sentido de la torca . Dirigiendo la mano en la misma que el radio r y los dedos en la dirección y el sentido de la fuerza *F;* entonces el pulgar extendido indica la dirección y el sentido de *M.*

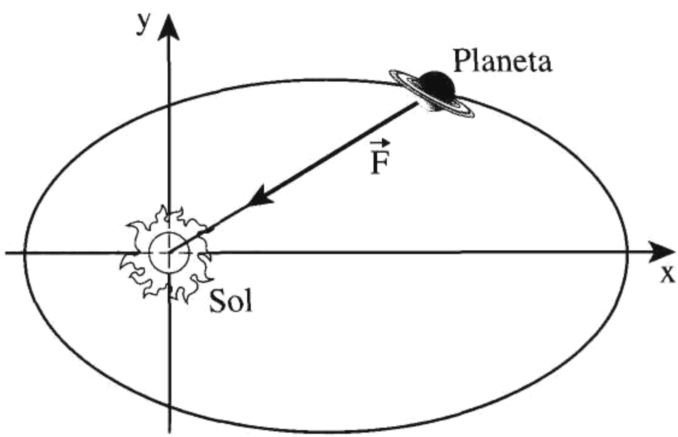

Figura VIL 7. La fuerza gravitacional que ejerce el Sol sobre los planetas es en la misma dirección que el radio. Por lo tanto la torca es cero. Esto significa que el plano de trayectoria de los planetas es plano.

tro del Sol al centro del planeta, es cero, entonces debido a la fórmula anterior, la torca es igual a cero.

Pero si la torca es nula, entonces el plano de trayectoria del planeta es plano. ¡Así de fácil! Basta con percatarse que en el Sistema Solar, todos los planetas, desde Mercurio hasta el lejano Plutón, la fuerza que los ata al Sol es "central"; en otras palabras, va siempre y en todo momento dirigida en la misma línea del radio, para saber que las órbitas; esas elipses que descubrió Kepler a principios del siglo xvii, son trayectorias planas.

VIII. Una mecánica sin talachas

VII. 1 Gravitación

Ahora sí, con la introducción de las torcas, la teoría quedó completa. El estudio del movimiento de los cuerpos materiales se podía hacer con la ayuda de este modelo. Por fin, el objetivo de predecir la forma como van a evolucionar los objetos en el espacio, a consecuencia de las fuerzas que los urgen, quedó al alcance de todos. Con las tres leyes de la mecánica cualquier interacción con uno o más cuerpos se puede estudiar y resolver. La estrategia para atacar un problema cualquiera de mecánica es siempre la misma: hay que proponer la fórmula para la fuerza que actúa sobre el o los cuerpos. Esa fórmula hay que escribirla allí donde dice "F", en la segunda ley de la mecánica. Lo que se obtiene es una ecuación que vincula a la aceleración con la fuerza particular que se estudia. Esta ecuación se resuelve y al hacerlo se hallan las expresiones matemáticas para la velocidad, como una función que depende del tiempo y que permite conocer, instante a instante las velocidades sucesivas de aquel cuerpo que se investiga. Luego es necesario manipular matemáticamente esa ecuación para la velocidad, a fin de encontrar la ecuación para la trayectoria. Esta, de nuevo, es una expresión matemática en función del tiempo, con la cual, en cada instante se puede ubicar la posición de la partícula en el espacio. Dibujada en una hoja de papel o como una imagen de un monitor de computadora, la trayectoria del cuerpo aparece como una línea continua, referida a un sistema de coordenadas. Aquí acaba el problema de la mecánica, su objetivo se ha cumplido.

¡Claro! Como reza aquel dicho popular: "para preparar un buen caldo de gallina, lo primero que se necesita es una buena gallina".

En el caso de la mecánica clásica, el dicho es no menos cierto: si se desea predecir la trayectoria en el espacio, de un cuerpo que se mueve bajo la influencia de una fuerza, lo primero que hay que hacer para resolver ese problema es, ni más ni menos, tener una formula para esa fuerza. Sin fórmula no funciona la mecánica.

Pero he aquí que las fórmulas para la fuerza no las da la mecánica. La mecánica clásica puede ayudar a calcular las trayectorias, las velocidades y una buena colección de parámetros relativos al movimiento de los cuerpos. La estrategia que propone esta teoría es general, vale siempre, pero para funcionar necesita que se le alimente con el combustible necesario y éste es una fórmula para la fuerza.

Para obtener una fórmula para la fuerza es necesario, antes que nada, hacerse de un laboratorio, de un observatorio o alguna otra instalación que permita estudiar interacciones; aquéllas que son el objeto de estudio, el tema de interés para el investigador. Así, si lo que se desea es hallar una fórmula para la fuerza de atracción o de repulsión entre dos cuerpos cargados de electricidad, hay que realizar una gran cantidad de experimentos con distintos tipos de cuerpos, con distintas cargas eléctricas, en diferentes situaciones, hasta poder sintetizar una fórmula que describa esta conducta de los cuerpos cargados, en forma general y unificada. Esto es lo que hizo Charles Augustin de Coulomb (1736-1806) en su laboratorio. Con experiencias cuidadosas y prolijas, este señor pudo proponer, en 1785, la fórmula bien conocida hoy en día:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{qQ}{R^2}\ \vec{n}.$$

Que contiene reunidos en ella todos los aspectos de la interacción entre dos cuerpos cargados, uno con una carga Q otro con una carga eléctrica q, separados una distancia r entre sí, en un medio con propiedades dieléctricas; esto es, aislante de la electricidad, caracterizado por una constante; la llamada "permitividad eléctrica" y representada en la fórmula por V (épsilon). Finalmente, esta fórmula hallada por Coulomb, propone que la fuerza entre esas dos cargas eléctricas (¿y q sea un vector que hay que dibujar en la misma línea, que une a ambos cuerpos y que tiene el sentido de atracción o de repulsión, según sea el signo de las cargas eléctricas que se consideran: atracción si los cuerpos poseen cargas de signo contrario y repulsión en el caso en que sus cargas eléctricas sean de igual signo. La dirección y el sentido de la fuerza de Coulomb queda determinado por el vector n que se escribe al final de la fórmula. Este es un vector, con una magnitud igual a uno y que apunta en la dirección y con el sentido de la interacción.

Charles Augustin Coulomb construyó la fórmula que lleva hoy su nombre experimentado en su laboratorio. Cuando finalmente la obtuvo, se pudo investigar el movimiento de los cuerpos eléctricamente cargados que se ven actuados por fuerzas como la de Coulomb. La fórmula se sustituyó en la segunda ley de la mecánica, en el sitio correspondiente y siguiendo la estrategia general, se obtuvieron las ecuaciones para las trayectorias. Los resultados fueron un éxito rotundo. Las trayectorias calculadas con esta fórmula se ajustaron exactamente a las observadas. Al final la mecánica clásica de Newton pudo extenderle a Coulomb un certificado de confiabilidad, pues su fórmula resultó acertada.

No todo el que ha buscado una fórmula para la fuerza ha tenido éxito. Aunque cualquiera, armado con un laboratorio aceptablemente equipado, con ideas suficientemente buenas para diseñar experimentos y con una inteligencia moderadamente despierta para deducir hechos y sintetizar características comunes de aquel campo que investiga, tenga la capacidad para estructurar una fórmula matemática. Aunque todo esto se tenga, no siempre se puede conseguir el objetivo. De hecho, después que Isaac Newton hubo hecho pública su teoría en sus libros: *Principios matemáticos de la filosofía natural y* sus *Sistemas del mundo,* publicados por primera vez el 5 de julio de 1686, después de que el mundo supo de la formidable herramienta para calcular trayectorias, estructuradas por este genio, cundió en toda Europa el furor, la moda de inventar, de proponer fórmulas para la fuerza. Todo mundo deseaba volverse famoso al haber develado el misterio de tal o cual interacción natural entre los cuerpos, mediante una fórmula compacta y universal. Muchos lo intentaron. Muchos lo han intentado desde entonces, pero sólo unos cuantos lo consiguieron.

De hecho, Coulomb fue el primero, después del propio Newton que tuvo éxito al proponer su fórmula y lo hizo casi cien años después de la aparición de los *"Principios"*. Después de Coulomb, pasaron otros cien años para que Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) sacara su propia fórmula para la interacción magnética. Otro par de mamíferos muy escasamente conocidos, cuyos apellidos fueron Lennard y el otro Jones , propusieron en la segunda mitad del siglo xx una fórmula para la interacción entre moléculas, con resultados aceptables. Un japonés de apellido Yukawa, también hizo sus pininos en 1932, con una formulilla empírica para describir a aquéllas, las más intensas fuerzas del Universo, las que mantienen los núcleos atómicos, con resultados sumamente pobres. De ahí en fuera, nadie ha podido encontrar otra expresión matemática buena y confiable.

Hay un caso que merece la pena comentar, de un científico que durante cerca de cuarenta años estuvo tras una fórmula para describir una interacción particular y jamás tuvo éxito. No obstante, su fracaso es uno de los más brillantes y positivos para el conocimiento humano. Se trata del hombre de ciencia y erudito francés llamado Jean le Rond D'Alembert (1717-1783).

Se cuenta que en un suburbio de París, una madrugada de noviembre de 1717, de pronto, despertó la mujer de un humilde zapatero al escuchar el llanto de un recién nacido. El matrimonio de aquel remendón y su esposa, no había tenido hijos, así que el llanto del bebé resultó ser extraño y sobresaltó a la humilde señora. Rápidamente se echó encima un raído cobertor, se calzó sus babuchas y salió a averiguar de dónde procedía aquel ruido. Cuál no sería su sorpresa, cuando al abrir la puerta de su casa, justo allí, en el piso, bajo el quicio, había un cesto de mimbre, de esos que llaman moisés y en su interior, envuelto en unos finos cobertorcitos de lana y bajo una pequeña sábana de seda azul, estaba un bebé. Junto a él, adherido a la sábana con un alfiler de seguridad, había un sobre con un recado en su interior.

La mujer gritó al descubrir aquel paquete y con sus gritos despertó al zapatero, quien acudió presuroso a ver cuál era el motivo de aquel escándalo que lo había hecho interrumpir su sueño. Al llegar a la puerta vio el envoltorio, lo levantó y lo metió a la casa. A esa hora de la madrugada hacía un frío endiablado y una fina llovizna caía afuera. Antes de cerrar la puerta, el zapatero miró a uno y otro lado para ver si alguna persona, algún carruaje andaba por allí; algún indicio de quién había dejado aquel paquete, algún testigo, al menos, que hubiera presenciado la entrega, pero nada, la calle a esa hora estaba totalmente desierta. Una vez adentro de la casa, abrieron las cobijitas del cesto y sacaron con cuidado al bebé. A esas horas lloraba de hambre y de frío. La mujer fue rápidamente a la cocina y calentó un poco de leche para darle al recién nacido.

Mientras tanto, el zapatero había descubierto el sobre, había sacado su contenido y estaba leyendo el mensaje, que decía más o menos lo siguiente: "aquí está el fruto de mi amor; un amor prohibido que me impide retenerlo conmigo, criarlo y mimarlo como desearía. Sé que ustedes son buenas personas y que no han podido tener hijos; sé que son jóvenes, trabajadores y honrados. Les pido que cuiden a mi hijo, que lo alimenten bien y, llegado el momento, lo envíen a la escuela para hacer de él un hombre de provecho. Yo les haré llegar mensualmente el dinero con el cual no le faltará nada, ni a mi hijo, ni a ustedes. ¡Que Dios los bendiga! "Firmaba esa nota con una inicial *Mme.* T.

Bajo las mantas, el zapatero encontró después una bolsita de seda azul, con jaretas y en su interior veinte monedas de oro... Ya no pudo seguir durmiendo; rápidamente se puso a acondicionar un lugar para el niño en un rincón del cuarto, al lado de la cama, para que su mujer estuviera próxima a la creatura cuando llorara. Sacó todas las cosas de un cajón y decidió que ese sería exclusivo para la ropita del bebé de ahí en adelante. Mientras tanto, su mujer comenzó a dar de comer al bebé.

Los padres adoptivos no la pasaron mal. Se podría decir que aquel encarguito los sacó de la pobreza, pues con el dinero que mes con mes recibieron de la misteriosa *Madame* T. El zapatero pudo ampliar y mejorar el negocio. Pudo conseguir empleados y él se dedicó a administrar su zapatería. Al niño no dudaron demasiado en llamarlo Juan o para escribirlo en francés, Jean. Fue el primer nombre que les vino a la cabeza cuando tuvieron que registrarlo. Creció sano y rollizo, un poco demasiado rollizo, tanto que se le quedó de por vida el sobrenombre de "el redondo"; o "le Rond", y así asistió a la escuela, como Jean le Rond. A instancias de su auténtica madre, la misteriosa *Madame* T., lo mandaron a una escuela religiosa; donde aprendió de todo. Allí comenzó a destacar por su inteligencia, su ingenio y su extraordinaria habilidad para las matemáticas.

Siendo Juan un jovencito, el esposo de *Madame* T. murió, dejando a la viuda aún joven y con una inmensa fortuna. Ella, la que había cometido años atrás un desliz con un noble de nombre Chevalier Destouches, el auténtico padre del muchacho, decidió arreglar las cosas y se casó con él; así pudieron finalmente rescatar a su hijo y darle la legitimidad que merecía. Ella, la madre, tenía por apellido de soltera Tencin, pero conservó toda la vida el apellido de su difunto esposo D'Alembert; ése fue el que le pusieron a Juan el Redondo. Así, al concluir sus estudios y graduarse con honores aquel muchacho cuya vida se había iniciado en forma inconfesable y cuya infancia transcurrió en una modesta casa de un humilde matrimonio, se convirtió en Jean le Rond, marqués de D'Alembert.

Estudió leyes, pero se graduó en medicina. Nunca la ejerció porque se dedicó a la física, a la filosofía y a las matemáticas. Se convirtió en un auténtico erudito; sabía de todo y lo sabía bien, a profundidad. En 1759 colaboró con Diderot en la escritura de la primera *enciclopedia;* allí escribió D'Alembert sobre física, sobre astronomía y una gran variedad adicional de temas. Estudió las órbitas de los planetas y desarrolló un método matemático para calcular las perturbaciones que un planeta o más ejercen sobre otro del sistema solar, obligándolo a apartarse de su órbita kepleriana para realizar movimientos "raros" o anómalos.

Pero el trabajo de su vida, el que más lo apasionó, aquel al que dedicó 40 años, fue la búsqueda de una fórmula que permitiera calcular el efecto de una fuerza muy especial. Ésa era la llamada "fuerza muerta". Se trata de una fuerza que siempre esta presente. Siempre que se aplica una fuerza a un cuerpo, éste a su vez responde con otra, que de acuerdo con la tercera ley de Newton, es de igual intensidad, pero de sentido contrario. Se trata de una fuerza de reacción y si se piensa un poco, es aquella que en vez de provocar el movimiento, o mejor dicho, el cambio en el estado de movimiento de un cuerpo, tiende a impedirlo. De allí que a las fuerzas de reacción se les llamara en aquellos ayeres "fuerzas muertas", para distinguirlas de las "fuerzas vivas" que son las aplicadas, las que tienden a cambiar el estado de reposo o de movimiento de los cuerpos.

Pues bien, D'Alembert se dedicó a investigar las fuerzas muertas; las fuerzas de reacción. Experimentó con muchos tipos de ellas; igual esa fuerza que al estar un individuo parado, en reposo, se opone a su peso; esa fuerza de reacción del piso sobre el cuerpo que le impide caer hacia el centro de la Tierra, que aquella otra fuerza la de tensión que permite el movimiento de la lenteja de un péndulo siempre a una distancia constante del fulcro. Estudió todas y propuso cientos de fórmulas generales para caracterizarlas. Nunca lo logró.

Después de cuarenta años de intento, Jean le Rond D'Alembert se rindió. Tuvo que llegar a la triste conclusión que para las fuerzas muertas, para las fuerzas de reacción, no se puede hallar una fórmula general. No existe fórmula así.

Así pasó este personaje a engrosar las dilatadas filas de los que han fracasado en el intento. Así pasó a agregar uno más en la galería de retratos de los que han pasado por este azul planeta sin aportar un conocimiento nuevo a la humanidad. Bueno, casi pasó a añadir su retrato a la galería de los casi veinte mil millones de seres inútiles que han nacido, vivido y han muerto sin apenas dejar rastro de su paso por el mundo. Casi, porque en realidad su obra, su conocimiento quedó plasmado en la enciclopedia de Diderot, pero, adicionalmente, su fracaso ha sido el más brillante, el más revelador de todos. Si bien, no llegó a encontrar la fórmula deseada, con su aguda observación, con su afilada inteligencia pudo, en cambio hacer una afirmación de orden general acerca de las fuerzas de reacción. El estableció lo que hasta la fecha se conoce como *El Principio de D'Alembert.* Este principio afirma que "todas las fuerzas de reacción tienen la característica de que no realizan trabajo". Este principio ha resultado ser uno de los más brillantes y útiles para la mecánica. En particular, esa rama del conocimiento aplicado, que hoy por hoy se conoce como ingeniería mecánica, se ha servido del principio de D'Alembert estupendamente para hacer sus diseños y sus cálculos.

D'Alembert murió el 29 de octubre de 1783.

De todos los que lo intentaron, solamente ha habido un individuo que ha propuesto dos fórmulas válidas para la fuerza. Realmente no hay que adivinar su nombre; nuevamente se trata de Isaac Newton. Para él, proponer una o dos fórmulas para la fuerza era asunto de vital importancia, pues se trataba de hacer funcionar su modelo, su teoría y mostrar la manera como lo hace. Para ello fue absolutamente necesario contar con al menos una expresión matemática empírica, con la cual se pudiera calcular las trayectorias de cuerpos en el espacio sujetos a la acción de esa fuerza. Tenía que ser una fórmula simple, acerca de una interacción muy conocida por todo el mundo y cuyos resultados fueran espectaculares al momento de poner a funcionar la máquina de la mecánica clásica.

Como ya se sospechará, escogió el problema de la gravitación, esa fuerza que atrae a los cuerpos según sus masas; esa fuerza que mantiene a los planetas girando alrededor del Sol en órbitas elípticas, de acuerdo con la primera ley de Kepler. Es esa misma, la fuerza que obliga al satélite natural de la Tierra a dar una vuelta completa alrededor de ella cada 28 días aproximadamente. Es, en fin, la fuerza que mantiene a todos los seres vivos aquí, débilmente pegados al suelo; que hace que los objetos caigan en forma espontánea cuando se les suelta desde cierta altura. Se trata de la fuerza más remotamente identificada por el ser humano, pues se sabe de estudios relativos a la gravitación desde el siglo V a.c. Es la misma que estudió Ptolomeo y Copérnico y por supuesto, Kepler y Tycho Brahe.

De hecho, Newton se sirvió precisamente de las observaciones de Brahe y de los resultados de Kepler para proponer su fórmula. Estudiando las órbitas de los planetas en los reportes del gran astrónomo alemán, Newton pudo deducir cuatro características fundamentales de la gravitación que hubo de incorporar en su famosa fórmula.

La primera característica fundamental de la gravitación es que se trata de una fuerza atractiva; en otras palabras, siempre es una atracción la que ejerce un cuerpo sobre otro. Jamás se ha observado en parte alguna del Universo, evidencia que siquiera remotamente haga sospechar la existencia de una fuerza de repulsión gravitacional. Y aunque se ha buscado hasta la actualidad, con todos los medios técnicos más precisos y potentes, nunca se ha registrado repulsión alguna entre dos cuerpos masivos. Se ha especulado, se ha teorizado sobre las consecuencias que se podrían derivar de una interacción entre cuerpos que fuera de rechazo, en vez, de atracción pero esto no ha dejado de ser un mero juego intelectual, académico, sin sustento experimental. Así pues, Newton tuvo que incorporar este hecho en su fórmula. Este hecho se manifiesta matemáticamente, haciendo que la fuerza sea siempre negativa; esto es que el valor numérico de la interacción gravitacional sea un número negativo.

La segunda característica básica de la gravitación es que es tanto más intensa, cuanto mayor sea la masa de los cuerpos que intervienen en esa interacción y viceversa. La fuerza debe depender directamente de la masa de cada una de los dos cuerpos que se atraen. Así, si se denota por la letra *"m"* la masa de un cuerpo y por *"ni"* la masa del otro, la fuerza gravitacional entre ellos es directamente proporcional a cada una de ellas. Matemáticamente esto se escribe así:

$$F \approx m; F \approx m'$$

y se lee *F* (la fuerza gravitacional), es directamente proporcional a *m* (la masa de un cuerpo) y directamente proporcional a *m'* (la masa del otro cuerpo). Pero, se sabe que si alguna incógnita, como *F*, es proporcional a dos variables simultáneamente, entonces es proporcional a su producto; esto es:

$$F \approx mm'$$

o dicho en palabras: la fuerza gravitacional es proporcional al producto de las masas de los cuerpos que interactúan.

El tercer hecho básico que consideró Newton, en realidad ya había sido expresado, aunque en forma cualitativa, por Johannes Kepler, a saber que la fuerza de gravitación disminuye con la distancia de alejamiento entre los cuerpos. De hecho, si Kepler hubiera sabido un poco más de matemáticas, tal vez hubiera podido llegar a la misma conclusión que Newton, a partir de la tercera ley; la que relaciona los cuadrados de los periodos de tránsito de los planetas alrededor del Sol, con los cubos de las distancias medias entre éstos. Como se sabe, la tercera ley de Kepler se puede escribir así:

$$T^2 = Cr^3$$

donde *T* es el periodo de rotación del planeta alrededor del Sol, *r* es la distancia media entre el centro del planeta y el centro del Sol y *C* es una constante de proporcionalidad que tiene algún valor fijo; el mismo para todos los planetas del Sistema Solar.

Newton consideró que la distancia r podría tomarse como el promedio de todos los valores de las distancias del Sol al planeta. Esto significa que, si bien es sabido que las órbitas no son en general circulares, se puede imaginar para efecto del cálculo que lo son; que el Sol está en el centro y que el planeta se mueve alrededor de él con un movimiento circular uniforme.

El error que se comete al hacer ésta su posición no es serio, sobre todo tomando en cuenta que en la realidad, las órbitas son "casi circulares", pues son elipses con una excentricidad muy pequeña. Así las cosas, Newton pensó que un planeta, en una órbita circular, viajando con una rapidez constante "v_0", debe recorrer toda la circunferencia de su trayectoria en un periodo T. Por lo tanto, su rapidez debe ser igual a la circunferencia, 2nr, dividida por el periodo *T*; o sea

$$v_o = \frac{2\pi r}{T}$$

Además, puesto que se trata de un movimiento circular unidorme, la aceleración centrípeta del planeta es, como ya se dedujo en el Capítulo 6, cuando se estudió este tipo de movimiento, el cuadrado de la rapidez dividido entre el radio, así que, la aceleración *a* es:

$$a = \frac{v_0^2}{r} = = \frac{4\pi r^2}{Tr^2}$$

como se puede demostrar fácilmente si la fórmula para la velocidad uv" del planeta se eleva al cuadrado y se divide por "*r*".

Pero ahora, tomando en cuenta la tercera ley de Kepler, sustituyendo el valor del cuadrado del periodo, T^2 en la expresión para la aceleración centrípeta, se obtiene de inmediato:

$$a = \frac{4\pi^2}{Cr^2}$$

esto es, que la aceleración que un planeta en órbita alrededor del Sol experimenta hacia el centro, es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que lo separa de él.

Ahora bien, la segunda ley de la mecánica afirma que, cuando un cuerpo con una masa fija *m*' experimenta una fuerza cuya magnitud es *F*, entonces, su respuesta a ella será una aceleración "*a*", tal que la fuerza *F* es. igual al producto de su masa *m*' por la magnitud de la aceleración "*a*".

$$F=m'a$$

así que sustituyendo en esta expresión de la segunda ley de Newton el resultado que se obtuvo para la aceleración centrípeta, se obtiene que:

$$F = \frac{4\pi^2 m'}{Cr^2}$$

esto es, que la magnitud de la fuerza es, tal como se había propuesto, directamente proporcional a la masa del planeta *m*' e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que lo separa del Sol.

Si en este punto del proceso deductivo se toma en cuenta el primer resultado al que llegó Newton; esto es, que la fuerza es proporcional, al producto de las masas de los cuerpos que experimentan la interacción gravitacional, entonces no hay más remedio que suponer que, a su vez, las constantes que aparecen en la fórmula anterior son directamente proporcionales a la masa m del cuerpo; es decir:

$$\frac{4\pi r^2}{C} = Gm$$

siendo G la constante de proporcionalidad, entonces se obtiene que la magnitud de la fuerza gravitacional entre dos cuerpos, con masas *m* y *m*' respectivamente, alejados entre sí a una distancia *r*, es igual al producto de las masas de ambos, dividido por el cuadrado de la distancia multiplicado todo esto por una constante *G*. Matemáticamente este resultado se escribe así:

$$F = -G\frac{mm'}{r^2}$$

La cuarta y última característica de la fuerza gravitacional, según la consideró Newton, es que se trata de un vector que está justo en la línea que une a ambos cuerpos y apunta en el sentido de uno al otro, puesto que se trata de una atracción. Entonces, si se usa nuevamente al vector unitario n que apunta del Sol al planeta y cuya magnitud, como su nombre indica, es igual a uno.

Entonces se tiene completa la expresión matemática de la fuerza gravitacional entre dos cuerpos. La fórmula que halló Newton es la siguiente:

$$\vec{F} = -G\frac{mm'}{r^2}\vec{n}$$

Cabe aclarar que la posición del vector unitario depende del cuerpo que se estudia. Así, si lo que se desea estudiar es el movimiento del planeta bajo la atracción gravitacional del Sol, entonces hay que situar a n justo en el centro del gran astro, dirigido hacia el planeta. Si por el contrario, se deseara adoptar la posición donde el planeta se supone en reposo y se quiere contemplar al Sol en su movimiento respecto de éste, entonces habrá que dibujar al vector $\vec{n}$ en el centro del planeta, con su punta dirigida hacia el Sol.

La constante G se propuso originalmente como aquella muy particular que hay que evaluar para los planetas del Sistema Solar orbitando alrededor del Sol, sin embargo, se pudo extender posteriormente como una constante universal que sirve igualmente para el sistema solar, que para la Luna y la Tierra, que para las órbitas de los satélites de Júpiter o Saturno, que para la galaxia de Andrómeda. El valor de la constante *G* fue obtenido por primera vez en 1798 por Henry Cavendish (1731-1810), mediante un ingenioso arreglo experimental llamado balanza de torsión. Colgando de un fino hilo de cuarzo una mancuerna con dos masas iguales a sus extremos y luego, acercándole dos grandes masas se observa el giro de aquellas hasta que llegan a una nueva posición de equilibrio donde se contrarresta la atracción gravitacional que sufre la mancuerna por la presencia de las grandes masas *M*, con la fuerza restitutiva del hilo de cuarzo, que, intenta regresar a su situación original de equilibrio. Midiendo el ángulo a de torsión, se puede conocer con exactitud la fuerza gravitacional y luego, sustituyendo los valores de las masas y la distancia de separación entre ellas se infiere en forma indirecta el valor de la constante de gravitación universal *G*. Según Cavendish, ese valor es:

$$G = 6.67 \times 10^{-11}\left[\frac{m^3}{kg\, s^2}\right]$$

esto es, se trata de un valor pequeñísimo, pues es un cero y después del punto decimal son diez ceros y en la posición número once, doce y trece los números 6, 6 y 7 respectivamente.

$$G = 0.0000000000667\left[\frac{m^3}{kg\, s^2}\right]$$

Esta pequeñez en el valor de *G* da idea de la extraordinaria debilidad de la atracción gravitacional. Por ello es que sólo con masas tan enormes como el Sol, los planetas y sus satélites, se vuelve apreciable esta interacción.

Ahora bien, si la fuerza gravitacional dada por la fórmula de Newton describe una atracción entre los cuerpos, como un vector que va del centro de uno al centro del otro, tratando de acercarlos más hasta que eventualmente se unan, ¿Por qué los planetas no caen hacia el Sol? ¿Por qué la Luna no choca contra la Tierra? Aquel cuento del joven Newton reposando bajo la sombra de un manzano y mirando a través del follaje la Luna, describe cómo llegó a la conclusión de que, tanto la manzana, como la Luna caen hacia la Tierra, sin embargo es claro que hay una enorme diferencia entre una y otra. La manzana evidentemente cae, se precipita hacia la Tierra, pero pensar que la Luna cae ya no es tan evidente. Nuevamente este hombre taciturno receloso y mal humorado tuvo

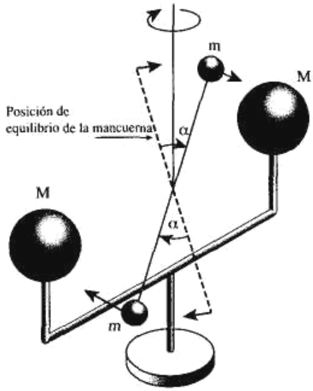

Figura VIII.1. Balanza de torsión de Cavendish. Dos grandes masas *M*, fijas, atraen a dos pequeñas masitas m en una mancuerna que puede girar torciendo un hilo de cuarzo vertical. Midiendo el ángulo a que giró la mancuerna, Cavendish encontró el valor de la constante *G*.

razón; en efecto, cuando la Luna viaja alrededor de la Tierra, siguiendo su órbita, ejecuta una suerte de caída sin fin.

Para comprender mejor este aserto considérese el siguiente relato: supóngase que el gran Galileo Galilei en efecto hubiera subido alguna vez a lo alto de la torre inclinada de Pisa. Imagínese que llegó hasta el mirador de la torre, cargando a cuestas un costal con varias pelotas de goma, listo para realizar un experimento sobre la llamada "caída de los graves". Una vez arriba, el gran toscano acomodó muy bien el costal y sacó la primera bola de hule, se acercó al borde del barandal y con cuidado dejó caer la pelota, soltándola simplemente. La trayectoria se puede ver muy fácilmente, fue una línea recta, en la misma dirección de la plomada. La pelota cayó siguiendo esa línea, atraída por la gravedad terrestre.

Una segunda bola salió del costal, Galileo la tomó, se volvió a acercar a la baranda del mirador, pero ahora, en vez de simplemente soltar al cuerpo para que cayera libremente, lo lanzó horizontalmente hacia adelante. Esta vez, la bola ejecutó un movimiento menos simple; de hecho, describió medio segmento de parábola. Desde que abandonó la mano de Galileo inició su viaje horizontal y su caída libre, simultáneamente. Como se vio en el ejemplo del tiro de artillería, en el capítulo VI, la composición de los dos movimientos; uno horizontal, rectilíneo uniforme y otro vertical, de caída libre, uniformemente acelerado, dan como resultado precisamente un arco de parábola. Tomando en cuenta el vigor, la fuerza de aquel corpulento pelirrojo que fue Galileo, al lanzar la pelota, quizá le dio un alcance de unos cuarenta metros. A esa distancia de la torre fue a tocar tierra ese proyectil.

Dando mayor fuerza cada vez a sus disparos horizontales, Galileo logra alcances mayores. En este experimento ficticio se pudo demostrar que la curvatura de la Tierra no se aprecia, mientras se trate de lanzamientos con poca fuerza en el disparo. Las bolas caen un poco más allá cada vez. Sin embargo, al aumentar el impulso inicial, los proyectiles aumentan su alcance y en un momento, dado la curvatura terrestre comienza a volverse apreciable. Llega el momento en que la bola cae tan lejos que se ve oculta por la Tierra al caer.

Si se incrementa aún más el impulso inicial, ocurre de pronto, que si bien el cuerpo cae, igual que antes, la trayectoria ya no toca tierra pues su caída va curvándose con la misma curvatura que tiene el planeta. En este momento, la pelota ha entrado en órbita y aunque sigue cayendo lo seguirá haciendo eternamente sin llegar a alcanzar el piso jamás.

Así, con un impulso inicial, es como se ponen en órbita los satélites artificiales que hoy por hoy, por millares circundan la Tierra. En su caso, en vez de llevarlos a lo alto de una torre y lanzarlos horizontalmente, se hacen volar hacia arriba, en el interior de un cohete portador, en una trayectoria que se va curvando, hasta que, al alcanzar cierta altura, se les libera volando horizontalmente, tal como Galileo lo hizo en este cuento. Otras veces, en vez de una torre inclinada, se usa un transbordador espacial que está en órbita y desde él se lanza al satélite artificial para colocarlo en aquella trayectoria particular que se desea.

Algunos astrónomos piensan que la Luna, el satélite natural de la Tierra, alguna vez salió disparado desde este planeta, a consecuencia de un cataclismo, entró en órbita y desde entonces gira alrededor de él en una órbita casi circular, con un periodo de traslación de un poco más de veintiocho días. Cualquiera que haya sido el origen de este fenómeno, el hecho es que la Luna en efecto cae hacia la Tierra, en una caída sin fin, de acuerdo con la fórmula de Newon para la fuerza gravitacional.

Con esa famosa expresión para describir la atracción entre cuerpos masivos fue posible, de una vez por todas, comprender con precisión el movimiento de todos los planetas del sistema solar. Las órbitas, las distancias medias, los periodos de revolución de todos, quedaron calculados y los cálculos a su vez fueron corroborados por las observaciones. Con esa fórmula, toda la mecánica celeste quedó comprendida.

No nada más el modelo planetario de Copérnico y Kepler fue confirmado. Estudiando los movimientos de Saturno el gigantesco señor de los anillos, muy pronto se notó que a veces parece adelantarse sobre la órbita predicha por los cálculos y a veces se retrasa. Son muy leves alteraciones de su comportamiento con respecto a la teoría, sin embargo los astrónomos se preocuparon. Pensar en la posibilidad de que la fórmula de Newton contuviera un error los desazonaba, sobre todo, después de los éxitos que habían logrado con ella, tanto que parecía que ya no habría en adelante duda alguna sobre la mecánica del Cosmos. Los cometas, comenzando por el más famoso de todos, el de Halley, habían sido calculados y sus apariciones periódicas habían sido predichas con gran exactitud. Las mareas terrestres, ese periódico aumento del nivel del mar y su consecuente disminución habían sido también calculadas y comprendidas sobre la base de la atracción de la Luna. Todos habían sido triunfos rotundos; pero entonces, al observar al planeta Saturno y comparar los valores de sus posiciones sucesivas en el firmamento, con las predicciones teóricas, las cosas no marcharon ya tan bien como antes.

Una noche, en el año de 1781; cincuenta y cuatro años después de la muerte de Newton, un astrónomo amateur, observando el cielo con un telescopio de tres metros de longitud, construido en casa, descubrió de pronto un punto luminoso, en un sitio donde antes no se había reportado estrella alguna. Al principio pensó que se trataría de un cometa, pero, con el paso de las noches pudo constatar que se movía en una órbita muy lejana; casi al doble de la distancia del Sol a Saturno y que por sus características, debería tener una masa enorme; cerca de cien veces mayor que la Tierra. Así fue descubierto el séptimo planeta del sistema solar. Su descubridor un músico profesional de nombre William Herschel (1738-1822), lo bautizó con el nombre de Urano, en honor a la novena musa, Urania, la musa de la astronomía.

Las pequeñas variaciones en la órbita de Saturno pudieron entonces explicarse como perturbaciones debidas a la presencia de aquel gigante, Urano, que al acercarse, jalaba gravitacionalmente de Saturno y lo atrasaba o lo adelantaba un poco sobre su propia órbita.

Tiempo después, en 1830, con telescopios mucho más perfectos y refinados, pudo comprobarse que a su vez, Urano sufre alteraciones en su distante órbita, sin que éstas pudieran achacarse a la presencia de Júpiter o de Saturno mismo. Así se empezó a sospechar la existencia de un octavo planeta; un cuerpo aún más lejano que Urano, causante de esas anomalías en la órbita de éste. Esta vez ya no se dudaba de la exactitud de la fórmula de Newton, así que aquel temor aquella sospecha de que la ley de gravitación no fuera del todo confiable para distancias astronómicas mayores ya no se tomó en cuenta; se había descartado con el descubrimiento de Urano. Un joven matemático inglés se puso a calcular la posición del octavo planeta, usando la teoría de Newton, su ley de gravitación y los valores reportados sobre las posiciones de Urano, por el observatorio de Greenwich, que a la sazón ya era el más importante del mundo. Dos años le llevó hacer los cálculos. Cuando concluyó, pidió al director de ese observatorio que apuntaran uno de sus telescopios en la dirección que él indicaba, para localizar al cuerpo celeste que causa las perturbaciones en la órbita de Urano. El joven astrónomo se llamaba John C. Adams y el director del observatorio ni siquiera se dignó estudiar la proposición de él; no consideró distraer su valioso tiempo y mucho menos parar las observaciones que se hacían en aquellos momentos, para reorientar un telescopio y buscar en el cielo un punto que aquel mocoso imberbe aseguraba, era la ubicación de un nuevo planeta. No hizo caso.

Meses después, en Francia otro joven astrónomo de nombre Urbano Juan Jacobo Leverrier publicó también el resultado de sus propios cálculos, haciendo uso de la fórmula de Newton, donde aseguraba, al igual que Adams, que había un planeta aún no descubierto y señalaba con sus deducciones y resultados, el lugar exacto en el cielo donde debería encontrarse. Leverrier envió una carta al Observatorio de Berlín, indicando las coordenadas a donde debería apuntarse el telescopio. El mismo día en que recibieron la carta del francés, apuntaron sus telescopios en aquella dirección. Esa noche descubrieron Neptuno, el octavo planeta. Fue éste el gran triunfo de la gravitación newtoniana.

El último de los planetas del sistema Plutón, fue descubierto hasta 1930 desde el telescopio de Monte Wilson. Realmente este descubrimiento no revistió la misma importancia de los anteriores, pues no fue como resultado de cálculos y predicciones teóricas con base en la mecánica de Newton y su ley de la gravitación, sino, en buena medida por pura suerte. Y si bien un astrónomo de apellido Pickering había pronosticado en 1909 la existencia de este nuevo cuerpo del sistema solar, nadie hizo mayor cosa por encontrarlo. De hecho, su descubrimiento se hizo de manera accidental, cuando se revisaron unas placas fotográficas que habían sido tomadas años atrás, en 1919 y encontraron el planeta.

En los años noventa ha habido de vez en cuando noticias acerca del descubrimiento de un nuevo planeta. Hasta ahora parece que aún no se ha confirmado. Pero en todo caso, este descubrimiento habría sido nuevamente accidental. La enorme distancia a la que se encuentra Plutón y su satélite natural Caronte hace muy difícil detectar cualquier anomalía en su movimiento orbital, de modo que aplicar la mecánica de Newton resulta ya inútil.

De cualquier manera, la mecánica del Sistema Solar ha quedado, hoy en día, totalmente conocida y comprendida. Con la mecánica clásica ha sido posible calcular por adelantado las trayectorias de los miles de satélites artificiales que han sido puestos en órbita alrededor de la Tierra, con precisión increíble. Con esa teoría, en los años 60 y 70 fueron enviadas a la Luna varias misiones tripuladas por seres humanos, con éxito total. Con ese esquema teórico se han lanzado varias sondas especiales que han explorado hasta sus confines todo el sistema, sus lunas, los asteroides y el Sol.

La segunda fórmula para la fuerza que desarrolló Newton, fue, nuevamente, para describir el fenómeno de la gravedad. Pero se trata de la gravedad terrestre y solamente es válida cuando los cuerpos que se estudian, se encuentran a poca altura sobre su superficie. De hecho, esta fórmula se deduce de la original como un caso particular, como una aproximación.

En efecto, considérese el caso de la Tierra, con una masa que se denotará por *M y* un pequeño cuerpo con masa *m*, que se mueve muy cerca de la superficie terrestre. Si este es el caso, entonces la distancia del centro de la Tierra al objeto es, aproximadamente igual al radio terrestre, que es: $r = 6370\ km$.

Entonces, observando con cuidado la fórmula de la gravitación universal de Newton para este caso, se tiene que la fuerza que actúa sobre el cuerpo debida a la masa de la Tierra es:

$$\vec{F} = -\left(\frac{GM}{r^2}\right) m\, \vec{n}$$

Se trata de la misma fórmula que dedujo Newton, solamente que aquí se han encerrado entre paréntesis la constante universal *G*, la masa de la Tierra y el cuadrado de la distancia, porque todas estas cantidades pueden ser tomadas con sus valores constantes. Aparte se han escrito, la masa *m* del cuerpo que se estudia y el vector unitario *n* que apunta del centro de la Tierra al cuerpo. Ahora, considerando que la masa terrestre es igual a:

$$M = 5.97 \times 10^{24}\ \text{kg}$$

el producto de estas tres cantidades encerradas entre paréntesis en la expresión anterior da como resultado:

$$\frac{MG}{r^2} = \frac{(5.97 \times 10^{24})(6.67 \times 10^{-11})}{(6.37 \times 10^{6})^2} = 9.81\left[\frac{m}{s^2}\right]$$

¡Este es precisamente el valor que se conoce para la aceleración de la gravedad terrestre al nivel del mar! Así, el producto de la masa M de la Tierra, por la constante G y dividido por el cuadrado de su radio da como resultado el valor numérico de "g" que se utilizó en el capítulo VI:

$$g = 9.81\left[\frac{m}{s^2}\right]$$

Regresando a la fórmula original de Newton para la atracción gravitacional entre dos cuerpos, uno con masa *M* y otro pequeño, con masa m y que se mueve cerca de la superficie terrestre, se puede escribir como:

$$\vec{F} = -mg\,\vec{n}$$

El vector, nuevamente, es unitario (su tamaño es uno) y apunta en la dirección de la vertical, hacia arriba; hacia el cénit terrestre.

Con esta fórmula, el movimiento de todos los cuerpos que se encuentran cerca de la superficie terrestre puede ser estudiado. Al producto de la masa, por la constante de la aceleración de la Tierra se le llama el "peso" del cuerpo cuya masa es *m*.

VIII.2. EL TROMPO

La mecánica clásica de Newton abrió las puertas al progreso en su más amplia acepción. Con ella, comenzaron a aparecer por todas partes inventos, mecanismos de todo género. Los perfeccionaron como resultado de la demanda para llevar registro cuidadoso y detallado del tiempo. Máquinas de muchos tipos y con funciones diversas fueron construidas. La invención llegó a los confines del espacio con el desarrollo de nuevos y más poderosos telescopios. La guerra también lucró con la mecánica clásica, al permitir diseños de barcos más grandes y pesados nuevas armas con mecanismos de repetición se crearon, con la muy "sana" idea de matar a los más con el menor esfuerzo, el menor riesgo y al más bajo costo.

La teoría misma fue objeto de investigación y desarrollo. Aparte de la búsqueda de nuevas fórmulas para la fuerza, se investigaron nuevos métodos matemáticos para resolver las difíciles ecuaciones que con frecuencia aparecen en la mecánica. Se atacaron muchos problemas relacionados con el movimiento de los cuerpos. Problemas que ni se sospechaba su solución antes de Newton, pero que, con el modelo teórico se hacia accesible e inteligible. La búsqueda no ha cesado hasta hoy en día; es tan vasto el campo de aplicaciones, que pasarán aún muchos años antes de que se pueda dar por agotado el tema.

En particular hubo dos vertientes de la mecánica clásica de Newton que despertaron profundo interés de los hombres de ciencia en los finales del siglo XVIII y principios del XIX. Uno de esos problemas fue describir el movimiento del trompo; ese precioso juguete que ha sido el deleite, el pasatiempo preferido de gran parte de los niños, en casi todo el mundo, desde hace muchísimos años. El trompo presenta dos aspectos que lo hacen especialmente interesante para su estudio: el primero es su inefable belleza, desde el punto de vista físico y matemático. Su gracia, sus movimientos han sido fascinación de chicos y grandes; a veces parece como si flotara en el aire y otras, cuando da la impresión de que va a caer, se levanta graciosamente y realiza sus cabeceos y precesiones. Se trata de un problema de mecánica que tiene fuerzas y torcas, y un movimiento general, complicado de expresarse matemáticamente. La solución de las ecuaciones a que da lugar el trompo son todo menos sencillas. Mucho talento, mucho ingenio se tuvo que desplegar para hallar soluciones matemáticas al problema.

El otro aspecto importante del estudio del trompo es que se trata de un mecanismo simple con el cual se pueden desarrollar instrumentos de precisión para orientarse en viajes largos. Una propiedad muy interesante propicia esto: el trompo tiende a preservar una misma orientación en el espacio. Al girar, al moverse con rapidez alrededor de su eje de simetría, el trompo apunta siempre en una dirección particular. Esta cualidad se ha usado muy ampliamente en la construcción de los llamados giróscopos, para servir como un medio para orientarse. Los barcos y los aviones se han servido de este invento desde hace muchos años.

Al lanzar un trompo, se observa que ejecuta dos movimientos simultáneamente: el primero es un giro veloz con su punta sobre el piso. El segundo es una traslación, un desplazamiento, bailando de un lugar a otro. Quien primero desglosó el movimiento del trompo como la superposición de una rotación y una traslación fue un matemático francés de nombre Michel Chasles (1793-1,880) que fue profesor en la célebre Universidad de la Sorbonne en París. Chasles publicó su trabajo como un teorema; el que hoy lleva su nombre.

Anteriormente un brillante físico y matemático suizo llamado Leonhard Euler (1707-1783) y considerado como uno de los más grandes genios del siglo XVIII, había propuesto un método simple y elegante para describir matemáticamente el movimiento de rotación del trompo. El fue quien al descomponer ese movimiento en tres rotaciones simples, echó las bases para resolver el problema del

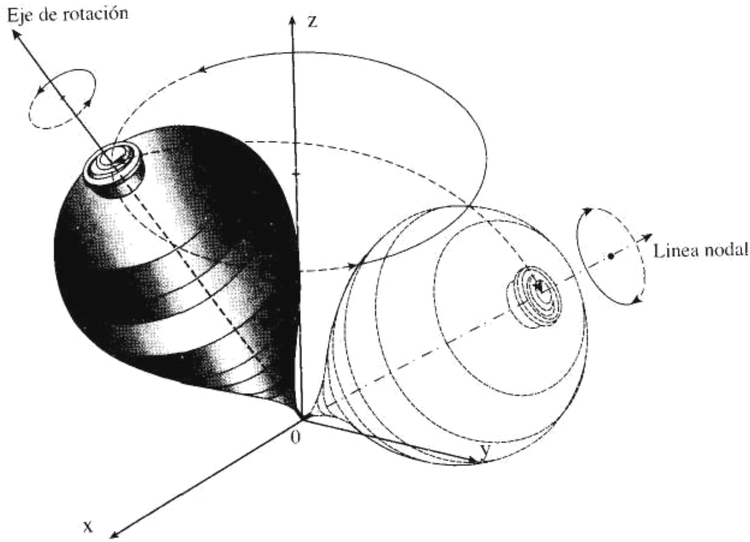

Figura VIII.2. El trompo bailando. El movimiento del trompo se desglosa en tres tipos de rotación: la rotación alrededor del eje del trompo, la precesión alrededor de la línea vertical y la nutación o cabeceo, alrededor de la línea nodal del trompo.

giro de este interesante juguete. Euler propuso que el giro del trompo se puede ver como la superposición de una rotación de ese cuerpo alrededor de su propio eje de simetría, con una rotación alrededor de la vertical, llamada movimiento de precesión y con otra semirrotación del trompo, hacia abajo y hacia arriba, llamada cabeceo o nutación. En la figura VIII.2 se muestra un trompo girando con su punta sobre el origen de un sistema de coordenadas. Se ha supuesto que el cuerpo gira sobre ese punto sin trasladarse, para poder hacer la descripción de los tres tipos de rotación más fácilmente. En esa figura se han dibujado, aparte de los tres ejes coordenados, dos líneas rectas más: una es el eje de rotación del trompo; es su eje de simetría, alrededor del cual gira, con el primero de los movimientos descrito por Euler. El otro eje adicional se llama "línea de nodos" o "línea nodal". Éste es un eje que sirve como pivote del trompo; al darle vuelta en un sentido y en el otro, tal como se muestra en la figura, se origina el movimiento de rotación hacia abajo y hacia arriba del trompo cuando cabecea; cuando ñuta. El movimiento de precesión, el tercero de los movimientos de rotación de que se compone el giro de un trompo, es aquel que se observa en este juguete, cuando da vuelta alrededor de la dirección vertical, con todo el cuerpo. Rotación, precesión y nutación son las tres rotaciones de que se compone el giro de un trompo.

Claro que la descripción dada anteriormente es la más general que se puede presentar al hacer bailar un trompo sobre un punto fijo sobre el piso. Un trompo "dormido", es un ejemplo de un caso particular, cuando el cuerpo ni precede, ni cabecea; solamente gira alrededor de su propio eje de simetría y éste está parado verticalmente. En orden de complejidad, el segundo caso es el de un trompo que gira alrededor de su propio eje y precede alrededor de la vertical, sin cabeceo. Aquí, sólo dos de las tres rotaciones aparecen: rotación alrededor del eje de simetría y precesión. Los tres movimientos se dan generalmente cuando el trompo ha perdido velocidad debido a la fricción contra el piso, o bien cuando se lanzó con poca fuerza. En estas circunstancias, este cuerpo en forma de ojiva ejecuta todos: gira sobre si, precede y se nota adicionalmente el cabeceo o nutación. Entonces, el trompo parece caer y cuando alcanza cierta inclinación máxima se recupera y se levanta nuevamente. Al llegar arriba su eje de rotación, vuelve a caer y luego vuelve a recuperarse, haciendo esta sucesión de movimientos varias veces, hasta que toca, por su costado al piso. En ese momento termina el baile del trompo. Lo último que hace es rodar sobre el piso, aprovechando el impulso que aún llevaba, hasta detenerse.

El tratamiento matemático completo de un trompo que gira alrededor de un punto fijo, fue realizado muchos años después de la muerte de Euler, en Alemania, en la segunda mitad del siglo xix por una hermosa, cuanto inteligente mujer: Sophie (o Sonja) Wassilievna Kowalevskaia, nacida en Moscú, el 15 de enero de 1850. Esta bella creatura fue hija de un general de artillería ruso, de apellido Korvina Krukowsky, quien le dio una educación liberal, en contra de las costumbres de aquella época, que impedían que a la mujer se le diera instrucción escolar superior. Sonja terminó con gran éxito sus estudios medios superiores y entonces se propuso realizar una carrera profesional en el área de la física aplicada y las matemáticas. No pudo hacerlo en Rusia. Entonces tuvo que viajar a Alemania que a la sazón era un país con conceptos un poco más adelantados y modernos acerca del rol de la mujer en la sociedad; sin embargo, para poder abandonar su país tuvo que contraer nupcias, pues no se permitía en Rusia que una mujer soltera viajara sola.

La inteligente chica convenció entonces a uno de sus compañeros de estudio, un joven paleontólogo de nombre Vladimir Kowalevski para que se prestara a ser oficialmente su esposo en un matrimonio de pura formalidad y que ambos viajaran a Alemania a proseguir sus estudios.[1] El paleontólogo accedió y así fue como Sonja se convirtió en la señora de Kowalevski, o, como se acostumbra en Rusia: Sonja Kowalevskaia. Viajaron a Europa occidental y allí cada quien hizo su vida por separado.

Sophie se presentó con un gran matemático alemán: Karl Theodor Wilhelm Weierstrass (1815-1897) en Berlín, donde éste fungía como profesor de análisis matemático y a quien convenció de aceptarla como estudiante. Tampoco en Alemania se permitía que las mujeres asistieran a cursos superiores, así que Weierstrass tuvo que prepararla académicamente en privado. Se trataba de una mujer en verdad inteligente, así que pronto cobró renombre en el medio científico, realizó una tesis tan brillante sobre ecuaciones diferenciales parciales, que la Universidad de Gotinga accedió a otorgarle un "doctorado in absentia", en 1874.

Regresó a Rusia, pero fue por poco tiempo, pues muy pronto recibió una invitación desde Suecia, para ocupar el puesto de profesora en la Universidad de Estocolmo. Aceptó de inmediato la invitación y no bien acababa de establecerse en su patria, cuando tuvo que hacer nuevamente su equipaje. En 1889 se le confirió el grado de profesor.

Desde su época de estudiante en Alemania se comenzó a dar a conocer por sus extraordinarios dotes para las matemáticas. De hecho, mientras fue alumna de Weierstrass asombró a muchos de sus condiscípulos, tanto por su belleza física, cuanto por su habilidad para resolver complicados problemas matemáticos. En 1888 alcanzó su mayor éxito científico, cuando la Academia Francesa le otorgó, a pesar de su condición de extranjera y de ser mujer, el premio Borodin por su trabajo sobre el estudio de la rotación de un cuerpo rígido, alrededor de un punto fijo en el espacio. Tan notable fue su trabajo que la Academia decidió duplicar el monto del premio. Aquel fue bien otorgado si se tomasen en cuenta que para entonces, el problema del trompo ya era viejo a pesar de que había sido atacado en repetidas ocasiones por los gigantes del pensamiento; empezando por Euler y terminando con Weierstrass. Ella, Sonja Kowalevskaia, fue un poco más allá, no se concentró específicamente en resolver el problema del trompo, sino que atacó el más general de un cuerpo rígido cualquiera, pivoteando sobre un punto. Hay que percatarse que un trompo es, en efecto, un cuerpo rígido, pero es uno muy simétrico. Ella se interesó en el movimiento general de un cuerpo rígido y pudo plantear métodos de solución

[1] Si bien el matrimonio se concertó por razones puramente burocráticas, tiempo después dio como fruto una niña ; la única hija de Sofía Kowalewskya.

para ese problema. Esa fue la razón por la cual el monto del premio fue duplicado.

Desde aquella difícil época, cuando comenzó sus estudios de posgrado con Weierstrass, conoció a un joven matemático sueco de nombre Lagnuss Gosta Mittag-Leffler (1846-1927), que también era alumno del profesor. Muy pronto, la inteligencia, la simpatía y la belleza de Sonja dieron lugar a un profundo afecto de Miltag hacia la Kowalevskaia. De hecho, fue gracias a las instancias de este sueco que la Universidad de Estocolmo le ofreciera el grado de profesora. A la sazón, cuando Sonja llegó a Suecia, Miltag-Leffler ya era un docente de renombre por allá. No puede dejarse al soslayo que al haberle creado una plaza como profesora en Estocolmo, el matemático pudo tenerla cerca.

En la prestigiada Universidad de Estocolmo trabajaba en esa época en que llegó la Kowalevskaia a ejercer su grado de profesora otro personaje muy conocido: Alfred Bernhard Nobel (1833-1896), hombre tímido, misántropo aunque afable y por lo visto, creyente de la grandeza del espíritu humano, que había hecho una gran fortuna al inventar y comercializar la dinamita. Nobel fue quien ya próximo a morir, viajó a Roma, Italia para crear una fundación la Fundación Nobel que año con año otorga premios en cinco áreas del conocimiento, a aquellas personas que se hayan destacado, con un trabajo que represente un avance para la humanidad. Alfredo Nobel nunca se casó, así que ya viejo y sin herederos decidió dejar su fortuna en aquel fondo para premiar el talento, la dedicación y el progreso.

Pues bien, por los pasillos y corredores de la vieja Universidad de Estocolmo aún se cuenta, de vez en cuando, como un mero chisme que no tiene mayor verosimilitud, que el ya maduro profesor Nobel sucumbió a los encantos y el genio de Sonja Kowalevskaia. Así, dentro del claustro universitario de pronto se formó un triángulo amoroso entre la bella moscovita y los dos suecos que agravó las diferencias que ya de por sí existían entre Nobel y Miltag-Leffler. Incluso se ha propalado la especie de que aquella enemistad entre ambos, acentuada por la pasión —quizá nunca confesada— hacia Sonja, hizo nacer y generalizarse una aversión profunda de Nobel hacia los matemáticos, a tal punto que a la hora de crear la fundación que lleva su nombre, dejó instrucciones precisas para que jamás se otorgara el premio Nobel a un matemático.

Hasta la fecha, los premios que otorga la Fundación Nobel son en las áreas de física, de química, de medicina y fisiología, de literatura y de la paz, pero no existe premio para las matemáticas. No pudo tratarse de una simple e involuntaria omisión, haber dejado fuera a los más lógicos de la especie humana. Incluso, después de haber solicitado la apertura de una partida económica de la Fundación Nobel para el área de matemáticas y haber sido rechazada la solicitud, un brillante matemático y profesor de la Universidad de Toronto, John Charles Fields (1863-1932), creó una fundación paralela a la Nobel para premiar exclusivamente a los matemáticos y así estimular también, año con año, al talento y la creatividad en esta área.

Pero volviendo al relato original sobre la vida y la obra científica de Sonja Kowalevskaia, no se puede omitir que incursionó, también con mucho éxito en la literatura. Esta bella e inquieta mujer escribió varias novelas dentro del género costumbrista que describen la vida de la clase media rusa de aquella época. Dos de sus mejores obras aún se pueden obtener en las librerías: *La hermana Rajevski* y *Vera Worontzoff.*

A principios del año 1891, viajó para tomar unas buenas vacaciones en la Riviera Francesa, después del intenso trabajo que había desarrollado en Estocolmo. Allí pescó un fuerte resfriado que no se cuidó. Sintiéndose muy mal, viajó a pesar de los consejos de sus amistades de regreso al frío de Estocolmo. Su gripe devino en neumonía y el 10 de febrero de 1891 murió. Estaba en la cúspide de la fama. De hecho, aquellas, trágicas vacaciones a la Riviera habían sido decididas cuando recibió un segundo y no menos importante premio. La Academia de Ciencias de San Petersburgo se lo había conferido por su brillante trayectoria científica.

VIII.3. LAS FUERZAS FICTICIAS

Todas las teorías son necesariamente limitadas. Por más luchas que se hagan para dar a una teoría un carácter universal, es imposible. Al momento de proponer los axiomas básicos, las piedras fundamentales sobre las que habrá de construirse un modelo teórico con el cual se desea dar explicación a cierto sector de la naturaleza, se están imponiendo simultáneamente un conjunto de restricciones esenciales.

La Mecánica Clásica no es la excepción. Desde sus más tempranas proposiciones, Newton introdujo en esta teoría muy fuertes limitantes. De todas, las que tal vez represente el más serio impedimento, es aquella que se estableció con la Primera Ley de la Mecánica, cuando propone la descripción del movimiento más simple de todos: el reposo o el movimiento rectilíneo uniforme, como consecuencia pareja del estado dinámico trivial; que es ausencia de fuerzas.

Como ya se vio en el capítulo VI, el postulado que subyace en las entrañas de la primera ley es que existe una clase de observadores para los cuales esta aseveración es correcta. Ésa es la clase de los observadores llamados "inerciales". De hecho, la existencia de este tipo de observadores y la primera ley de la mecánica son dos proposiciones inextricablemente vinculadas una a la otra, hasta tal punto que para postular la primera ley es necesario proponer axiomáticamente la existencia de observadores inerciales, pero éstos sólo pueden definirse en términos de la primera ley de la mecánica. No es posible desbaratar este vínculo tautológico; pues derogando uno, se invalida *ipso facto* el otro.

Sin embargo, siguiendo nuevamente la línea de pensamiento que se siguió en el propio capítulo VI, se puede apreciar que los observadores inerciales, al menos en su más estricta y general acepción, no existen. Un marco de referencia, cualquier marco que se construya sobre la superficie terrestre, es no inercial, pues, debido a la rotación del planeta alrededor de su eje se encuentra sujeto a la acción de la aceleración centrípeta que imposibilita ¡a primera ley. Así, cuando se observan las placas fotográficas, con los registros tomados a través de un telescopio, de alguna región del firmamento nocturno, se observan de pronto las trazas luminosas dejadas por algún cuerpo: un asteroide o un meteorito que pasó en vuelo libre por el espacio, muy lejos de la Tierra. Para todo fin práctico se puede afirmar que ese cuerpo viajaba libre de fuerza alguna. No obstante, su trayectoria se aprecia curva; como si viajara animado por alguna fuerza desconocida que lo obligó a curvar su camino. La verdad de las cosas es que no hay tal fuerza desconocida, lo que ocurre es que durante el tiempo en que esa placa fotográfica estuvo expuesta a la tenue luz del espacio, la Tierra se movió; giró debido a su incesante rotación alrededor del eje que va del Polo Norte al Polo Sur y por consecuencia, en el mismo tiempo en que se observó al cuerpo celeste, el ángulo desde el cual se miraba cambió, dando como resultado una línea luminosa curva en la placa.

Suponiendo que un marco de referencia se situara, por decir, en el Polo Norte, encima de un sistema de suspensión que conservara la misma orientación, independientemente de la rotación terrestre, tampoco sería, en un sentido riguroso, un marco de referencia inercial, puesto que la Tierra se desplaza por el espacio siguiendo una trayectoria curva: su órbita alrededor del Sol, que como se vio es una gigantesca elipse.

¡Total, que el asunto aquel de cumplir con el primer axioma de Newton que se refiere a los observadores inerciales, no puede ser satisfecho por un solo individuo en todo el mundo!

Bueno, el hecho es que, contrario a lo que ocurre con una mujer que no puede estar un poquito embarazada, el caso de los observadores si permite que alguno de ellos sea "medio inercial" o "casi inercial". Así aunque un laboratorio terrestre está sujeto a la aceleración centrípeta debida al giro del planeta en torno a su eje, ésta es suficientemente leve como para que el efecto de su no inercialidad sea muy pequeño; tanto más pequeño, cuanto más breves son los lapsos durante los cuales se observa el movimiento de los cuerpos, de modo que si un objeto material, como aquel aerolito que se mencionó antes, se registra en una placa fotográfica con un tiempo de exposición suficientemente breve se apreciará una trayectoria "casi rectilínea y uniforme". Dentro de esas limitaciones, la mecánica clásica ha mostrado ser estupenda.

Sin embargo, no deja de desazonar el hecho de que la teoría se vuelve inadecuada para aquellos casos de movimientos que forzosamente deben observarse en intervalos de tiempo grandes desde la Tierra. Aún peor es cuando las observaciones habrán de hacerse en un marco totalmente no-inercial, como es un satélite artificial tripulado, en órbita terrestre o todavía peor, desde un barco en altamar. Allí, definitivamente no funcionan las leyes de la mecánica, al menos como las especificó Newton.

Este problema fue nuevamente, motivo de preocupación para los científicos que usaron del modelo de Newton y que pronto se enfrentaron a resultados engañosos e inexactos de sus cálculos con respecto a las observaciones.

Nuevamente, éste fue un reto que se superó eventualmente. El físico francés Gaspard de Coriolis (1792-1843) lo enfrentó y lo resolvió definitivamente. Para hacerlo Coriolis encontró una forma matemática con la cual se pueden traducir las observaciones hechas desde un marco de referencia acelerado, a otro marco ideal, inercial y viceversa. Esa forma matemática se conoce como una "transformación de coordenadas". Así, una vez que un observador, situado en un marco de referencia acelerado, realiza sus propias observaciones sobre la trayectoria y las velocidades de un cuerpo cualquiera, mediante la transformación de coordenadas puede pasar el resultado de sus medidas a otro observador situado en un marco de referencia inercial. Es una forma de traducir datos de un marco a otro. De esta manera, aunque la mecánica clásica fue construida pensando en los marcos inerciales únicamente, por virtud de este método desarrollado por Coriolis, se convirtió de golpe y porrazo en un modelo susceptible de ser utilizado casi por quienquiera.

Al realizar el proceso de traducción de un marco de referencia acelerado a uno inercial, mediante la transformación de coordenadas de Coriolis, se vuelve aparente la presencia de ciertas aceleraciones "ficticias" del cuerpo. Por ejemplo, al dejar caer un objeto desde lo alto de una torre, la fuerza de la gravedad jala de ese cuerpo con una intensidad dada por la fórmula de Newton y la dirección y sentido hacia el centro de la Tierra. Así, la trayectoria que debe tener en su caída, es una línea recta con esa dirección y ese sentido. Sin embargo, cuando se ha hecho ese experimento, en realidad, no se observa la trayectoria que predice la mecánica clásica. Un individuo parado en lo alto, observará que el objeto, al ir cayendo, desvía su trayecto hacia el poniente; siempre hacia el poniente, como si además de la aceleración impresa al cuerpo por la gravedad terrestre, hubiera otra, una aceleración que obliga al cuerpo a salirse de su trayectoria rectilínea. El fenómeno no es muy apreciable ciertamente; por ejemplo, un cuerpo al que se deja caer libremente desde una altura de 200 m, que corresponde a un edificio de 55 pisos, al llegar al suelo habrá desviado su trayectoria de la línea de la plomada (hacia el centro de la Tierra), aproximadamente 0.45 m hacia el poniente, si este experimento se llevó a cabo a 19° de latitud norte, que es la ubicación de la ciudad de México.

De acuerdo con la mecánica, por cada aceleración impresa a un cuerpo hay una fuerza, así que el movimiento acelerado hacia el poniente que presentan todos los cuerpos en caída libre debe ser atribuido a alguna fuerza; a algún agente externo a ellos, que los obliga a apartar su camino de la línea de la plomada. En honor al físico francés que las estudió, se han llamado a éstas, las "fuerzas de Coriolis".

Pues bien, las fuerzas de Coriolis no existen; son fuerzas ficticias, o como se acostumbra clasificarlas en general "fuerzas inerciales". La verdad de las cosas es que al caer libremente un cuerpo cualquiera, bajo la acción de la gravedad terrestre, lo hace verticalmente estrictamente, sin alejarse ni un ápice de la plomada, tal como lo prevé Newton con su fórmula. Lo que ocurre en realidad es que mientras un cuerpo cae; mientras va en vuelo aceleradamente hacia abajo, la Tierra gira con ese movimiento de rotación incesante, alrededor de su eje y junto con el planeta, gira el edificio desde cuya altura se soltó el cuerpo y gira también el observador. Así, cuando el cuerpo toca el suelo, la Tierra se desplazó un poquitín hacia el Oriente, hacia el Este, de modo que dio la impresión de que el objeto desvió su trayectoria en sentido contrario, hacia el Oeste. El observador que vio esa caída, se encuentra fijo a un marco de referencia que no es inercial y por ello es que observa cosas que no corresponden a fuerzas reales. La fuerza de Corioles, es entonces una fuerza que en realidad no existe, pero que da la impresión de ser auténtica y real porque quien observa el movimiento no es un observador inercial.

Al hacer una transformación de coordenadas desde el marco de referencia (acelerado) del observador parado en lo alto del edificio donde se hizo el experimento de caída libre, a uno inercial, la aceleración debida a la fuerza de Coriolis desaparece. Un astronauta que estuviera dentro de una nave espacial, inerte, observando con un telescopio el mismo experimento de caída libre se podría percatar de que, por una parte, la caída fue, en efecto, totalmente apegada a lo que marca la fuerza de la gravitación de Newton; y por la otra, que el observador terrestre, junto con la Tierra, se desplazó un poco hacia el Este durante el lapso que duró la caída. El astronauta viene a ser el observador inercial.

Pero no se vaya a pensar que la fuerza de Coriolis, al ser una fuerza inercial que no existe de veras, no hay que tomarla en cuenta. Todo lo contrario. Cuando un artillero dispara un cañón de largo alcance debe incluir en sus cálculos, una corrección debida a ella, de modo que el disparo dé en el blanco. De lo contrario, un obús disparado a una gran distancia, errará el blanco por mucho. Nuevamente, lo que ocurre es que mientras el proyectil va en vuelo, el planeta se mueve hacia el Este, así que al tocar tierra, hay un desplazamiento importante del blanco en esa dirección, dando la impresión que la bala desvió su curso hacia el Poniente.

Más aún, la fuerza de Coriolis, al no estar alineada con el radio terrestre que va del centro hasta el cuerpo, presenta otro importante efecto: genera una torca, una tendencia al giro del cuerpo. El giro se vuelve muy notable en las grandes masas de nubes que cubren el planeta en la época de verano, cuando la evaporación es mayor. Entonces se observa como la nubosidad comienza a girar, cada vez más rápido, hasta convertirse en un ciclón. Dependiendo de la rapidez con que giran, los ciclones pasan de ser tormentas tropicales a huracanes.

Como se sabe, la capacidad destructiva de un huracán es enorme. Se trata de la energía que han acumulado las nubes en su movimiento de giro, y que se descarga al tocar tierra firme, contra los edificios, los autos y las personas.

Otro caso de fuerzas ficticias o inerciales es el de la llamada "fuerza centrífuga". Como su nombre lo indica, es una fuerza que tiende a alejar al cuerpo del centro. Es el caso opuesto a otra, la fuerza centrípeta, que tiende a atraer al objeto que la percibe hacia el centro. Pero, en tanto que la fuerza centrípeta es perfectamente real y mensurable desde un marco de referencia inercial, su opuesta, la centrífuga no lo es.

Cuando un auto muy veloz toma una curva cerrada hacia la izquierda, el pasajero que viaja al lado del conductor (aquí se consideran los automóviles con el volante de mando del lado izquierdo, sin embargo el ejemplo puede darse para los autos con el volante a la derecha, tomando una curva velozmente a ese mismo lado), experimenta una fuerza que trata de lanzarlo del auto normalmente hacia afuera. Esta es la fuerza centrífuga.

Se trata, nuevamente de un fenómeno debido a un marco de referencia no-inercial. En este ejemplo, el pasajero que viaja al lado del conductor lleva consigo un marco de referencia; pero dada su situación, al tomar una curva, no es inercial; es acelerado. Por lo tanto, la mecánica de Newton no se aplica tal como se estructuró al principio.

De acuerdo con Coriolis, desde un marco así habrá que tomar en cuenta a las fuerzas inerciales que se manifiestan por virtud de su propio estado de movimiento acelerado.

Para mostrar que la fuerza centrífuga no existe realmente, se pueden hacer las siguientes consideraciones: en primer lugar hay que darse cuenta que el pasajero, como todo cuerpo dotado de movimiento, tiende a preservar el mismo estado siempre; esto es, tiende a seguir una trayectoria rectilínea y uniforme. El auto, al tomar la curva, impide al pasajero seguir en esa misma dirección. Por decirlo de algún modo, es el auto el que se opone con su fuerza centrípeta al pasajero. Así pues, no es éste quien tiende a salir disparado del auto, sino el auto quien va al encuentro del pasajero, impidiéndole continuar con su movimiento libre. Sin embargo, desde su propio marco de referencia, esta persona siente una fuerza que lo impele hacia afuera y lo obliga a presionar la portezuela desde el interior, como tratando de dispararlo radialmente hacia afuera del auto.

Por otra parte, si se diese el caso que justo al tomar la curva, la portezuela del automóvil del lado del pasajero, de pronto desapareciera; se cayera al perder sus goznes y su cerradura, entonces el desafortunado acompañante, en efecto, saldría a toda velocidad del vehículo, pero he aquí que de ninguna manera lo hará disparado radialmente hacia afuera, sino tangencialmente, en la misma dirección y con el mismo sentido que llevaba el auto al perder su puerta. Para abundar aún más: el infeliz pasajero, al abandonar el auto se mueve en línea recta y con velocidad constante (despreciando la resistencia que opone el aire al movimiento), de tal suerte que no está sujeto a fuerza alguna. Así pues, nunca hubo en realidad tal fuerza.

El anterior es un ejemplo similar al del tiro con una honda. El proyectil, situado en el extremo de la honda, después de dar varias vueltas en círculo, en un movimiento acelerado, de pronto es liberado y sale disparado a gran velocidad. Aquí de nuevo, el disparo no ocurre radialmente hacia afuera del centro de la honda; sino tangente al círculo.

La centrífuga y la de Coriolis son dos casos; tal vez los más conocidos, de fuerzas inerciales, cuya existencia se debe a una "inadecuada" elección de un marco de referencia. Con el procedimiento implementado en la primera mitad del siglo XIX por Gaspard de Coriolis, fue posible incluir a los observadores acelerados dentro del marco de la teoría.

VIII.4. LAS NUEVAS MECÁNICAS

La segunda limitación de la mecánica clásica de Newton proviene de la definición del tiempo. Tal como lo estableció, el tiempo es un parámetro absoluto, monótono e independiente de quien lo observa. Así, un segundo es idéntico a cualquier otro y cada segundo transcurre a un mismo ritmo, a una misma tasa, en una cadencia que es exactamente la misma para todos los observadores, sin importar su ubicación en el espacio o su estado de movimiento. Definido de esta forma, el tiempo tiene la gran virtud de ser el parámetro respecto del cual se refiere el movimiento de los cuerpos, así, la rapidez es la razón de la distancia recorrida, con respecto al tiempo; la aceleración, por su parte, establece el cambio de la velocidad, referida al tiempo, etc. El tiempo es en la mecánica clásica, el parámetro universal.

Algo ocurrió a finales del siglo XIX, que comenzó a mover toda la estructura de la magnífica construcción de Newton. Después de cerca de 200 años de éxitos y logros espectaculares, comenzaron a aparecer aquí y allá evidencias de que ciertos elementos constitutivos de la mecánica clásica no estaban del todo bien. La inmensa utilidad del esquema newtoniano había quedado más que demostrada y por supuesto, no era cosa de borrar del mapa a la teoría. Todo ese grandioso edificio, esa obra intelectual tendría que seguir adelante, sirviendo como hasta entonces, para avanzar en el conocimiento de los cuerpos y sus conductas, pero había que hacer una revisión de fondo a sus bases, a sus cimientos para adecuarlos a las recientes e inquietantes evidencias experimentales.

El más dramático de todos fue un resultado que comenzó a aparecer por todas partes; tanto en la física teórica como en la experimentación acerca de la naturaleza de la luz. En la teoría electromagnética, en la óptica, de pronto, aparece una y otra vez un mismo hecho: la luz se desplaza en el vacío siempre con la misma rapidez.

$$c = 299{,}729.458 \left[\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}}\right]$$

esto es, recorre en cada segundo cerca de trescientos mil kilómetros. Lo espectacular no es, sin embargo, su enorme rapidez, sino el hecho de que independientemente del observador que haga la medida; independientemente de que se halle en reposo o se mueva en alguna dirección del espacio con la velocidad que sea; siempre, el valor que se obtiene para la rapidez de la luz es el mismo: c (la letra c se usa para significar los casi trescientos mil kilómetros por segundo).

Este hecho resulta asombroso y hasta chocante con la experiencia diaria y el sentido común, pues es casi trivial que si, por ejemplo, un auto pasa enfrente de un observador que se encuentra parado en una esquina y lo mira desplazarse con una rapidez de 100 [km/h], esta medida es relativa sólo a esa clase de observadores, es decir, a aquéllos que, al igual que él, se encuentran parados, enfrente del auto que pasa velozmente. La medida es relativa, puesto que otro automovilista que va con su carro paralelamente al primero, con una rapidez igual a la de éste, de 100 [km/h], entonces al mirarlo, observará que en relación con él, está en reposo. ¡Claro!, como ambos se desplazan en la misma dirección y con la misma rapidez respecto del piso, entonces relativo al otro cada automovilista está en reposo. O sea que el concepto de rapidez es relativo a un marco de referencia.

Pues la luz se desplaza a la rapidez c sin importar en relación con qué marco de referencia se mida. Un observador en reposo al hacer su medida de la velocidad de la luz encontrará que se desplaza con una rapidez c. Otro observador, que se mueve en la misma dirección y con el mismo sentido que un rayo luminoso, al hacer su medida de la rapidez, encontrará c. Aunque viajara también a la velocidad de la luz.

Y bien, pero ¿qué tiene que ver este resultado con la mecánica clásica? Parece una curiosidad esto de la luz y daría la impresión de que en nada podría afectar a la teoría. ¡Todo lo contrario! Este resultado es uno de los más trascendentales para la ciencia.

Baste con recordar que la rapidez es la relación entre la distancia recorrida por un objeto, y el tiempo que le lleva recorrerla. Así, en el caso de la luz, se puede escribir que si recorre una distancia x en un lapso t, entonces:

$$x = ct$$

Con esta sencilla expresión se muestra ahora, que distancia y tiempo son proporcionales. La constante de proporcionalidad es c. De pronto, el tiempo ha dejado de ser un parámetro independiente; se ha convertido en una variable. Una variable más, igual que el largo, el ancho o el espesor; igual que las tres dimensiones. ¡El tiempo es una dimensión más!

Por virtud de la relación anterior, distancia y tiempo son dos cosas equivalentes, ahora, por ejemplo, se puede medir una distancia con un reloj, o se puede poner a tiempo otro con una regla para medir longitudes.

En efecto, si se tiene una fuente luminosa o una distancia desconocida de un aparato detector de luz, como una celdilla fotoeléctrica de esas que tienen ahora las calculadoras de bolsillo, es posible medir esa distancia con un reloj; solamente es cosa de tomar el tiempo desde que se hizo un destello luminoso, hasta que lo registra el detector, en el otro extremo del espacio. Conociendo el lapso t y multiplicándolo por la rapidez de la luz c, se obtiene la distancia que separa a la fuente del detector luminoso. Este fue el método que se empleó para medir con gran precisión la distancia que separa a la Tierra de la Luna. En alguna de las misiones Apolo que llegaron al satélite natural de la Tierra, se colocó un espejo; luego, desde acá se lanzó un destello luminoso en dirección de la Luna y se tomó el tiempo en que ese rayo de luz salió y regresó, éste fue de dos segundos y medio casi exactamente (2.5104[s]). Así, pudo determinarse con toda exactitud la distancia que media entre la superficie terrestre y la lunar: 376287 [km]. Sumándole a esta longitud los radios de la Tierra (6371 [km]) y de la Luna (1735 [km]) se obtuvo la distancia que hay entre el centro del planeta y el centro del satélite: *384393 [km]*.

De hecho, al mirar a través de un telescopio, cuando se observa una estrella o una galaxia, en realidad se está viendo el pasado, porque la luz que se ve, la imagen que queda impresa en una fotografía de un cuerpo celeste, es en realidad luz que partió de ese objeto mucho tiempo atrás; miles o tal vez millones de años atrás. Esa luz, viajando con su rapidez característica c, a través del vacío interestelar, durante mucho tiempo, llega finalmente a la Tierra, pasa a través del telescopio y hiere la retina de quien observa o imprime una fotografía en una emulsión sensible de una cámara. La imagen que se ve entonces no muestra cómo es esa estrella o esa galaxia en la actualidad, sino como fue en el instante aquel en que emitió la luz que hoy, a millones de años, se observa. Vistas las cosas desde esta perspectiva, un telescopio es un aparato que sirve para mirar en el pasado, y mientras más poderoso es el aparato, el viaje a través del tiempo, al pasado remoto se puede realizar mejor.

Actualmente los telescopios más avanzados en el mundo están hurgando tan lejos en el espacio; tan atrás en el tiempo, que comienzan a captar las imágenes del Universo más primitivo; el Universo de hace unos quince mil millones de años, cuando según algunos prestigiados hombres de ciencia aseguran que el Universo nació en una soberbia explosión que nadie pudo ver, el llamado "Big Bang", en inglés.

Todo lo que se ha podido conocer del Universo está basado, en última instancia en el hecho de que la luz viaja al través del tiempo, cruzando el espacio, a una rapidez uniforme, sin importar desde qué marco de referencia se observe. Con ello, el tiempo ha dejado su cómodo nicho de parámetro universal y absoluto, para entrar a formar parte de las dimensiones; del llamado *espacio-tiempo*, que es, por lo visto, el espacio de cuatro dimensiones en el que se halla todo. Ya no se trata, pues, de un espacio de tres dimensiones —el espacio físico— y un parámetro temporal, sino de un espacio-tiempo de cuatro dimensiones, el escenario de los acontecimientos naturales. Los objetos físicos, no tienen nada más una longitud, una altura y un espesor, sino que adicionalmente poseen una dimensión temporal: un tiempo. Un hombre, por ejemplo, puede ser medido, como siempre, por su estatura, y su talla, que da cuenta de su ancho y su espesor, pero además, debe ser medido temporalmente. Su edad es su cuarta dimensión.

En 1905, un joven físico teórico de origen alemán llamado Albert Einstein (1879-1955), propuso un nuevo modelo teórico para atacar y resolver los problemas que involucran cuerpos materiales en movimiento. Su teoría se conoce mundialmente como la *relatividad restringida* y se trata de un esquema parecido a la mecánica clásica de Newton, excepto porque desde un principio propone que el espacio físico es de cuatro dimensiones; un espacio-tiempo, donde los cuerpos pueden moverse, urgidos por fuerzas, en cualquier dimensión. Esta teoría es capaz de dar explicación a los fenómenos dinámicos; los mismos que puede resolver Newton con la vieja mecánica clásica, pero al liberar al tiempo como una dimensión original, le quita aquella atadura que limitaba al modelo antiguo y abre la posibilidad de explicar muchos otros más.

Con la mecánica clásica fue posible hacer un estudio unificado de las fuerzas que actúan sobre cuerpos materiales, tanto sobre la superficie terrestre, como en el espacio. Igual fue posible tratar el problema de una catapulta que dispara piedras o flechas, que el del movimiento de los planetas alrededor del Sol.

La relatividad restringida fue mucho más allá: pudo dar explicación al movimiento de los cuerpos que viajan al través del espacio y el tiempo, animados con una rapidez cercana a la de la luz. Pero tal vez el aspecto más importante de esta teoría fue que unificó de golpe y porrazo varios campos de la física, que a fines del siglo XIX se hallaban separados independientes y hasta opuestos en algunos aspectos. Einstein, con su relatividad restringida, unificó a la mecánica, con el electromagnetismo y con la óptica. Después de esta teoría, los fenómenos naturales que tienen relación con los cuerpos cargados eléctricamente, con los materiales magnéticos; con los campos que generan y con todos los fenómenos donde interviene la luz, pudieron ser tratados con la misma herramienta conceptual, con la misma matemática que los hechos naturales donde aparecen cuerpos en movimiento. La relatividad restringida fue en cierto sentido, una nueva mecánica; más poderosa, más extensa, basada en la original de Newton, con la cual el conocimiento humano dio un portentoso salto hacia adelante en el entendimiento del Universo.

Sin embargo, tampoco la relatividad restringida quedó libre de limitaciones. Como su nombre indica, se trata de una teoría restringida, limitada. De nacimiento fue estructurada siguiendo la misma estrategia que usó Newton para hacer la mecánica clásica y se le dio validez únicamente para aquellos observadores que fueran inerciales. Al hacerlo, la relatividad restringida se enfrentó al mismo problema de su predecesor: en un sentido riguroso no hay en el mundo ni un solo observador inercial, de modo que esta teoría no puede ser empleada, excepto que se use siempre como una aproximación, en marcos de referencia "un poco inerciales".

No debe entenderse de lo anterior que la relatividad restringida no sirve. Al igual que la mecánica clásica, dentro de un ámbito muchísimo mayor que ésta, ha servido para resolver infinidad de problemas con una precisión asombrosa. Tanto así que a la fecha; a casi un siglo de haber visto la primera luz, no se ha encontrado un resultado de la relatividad restringida que siquiera ponga en duda a la teoría. Ni una sola evidencia experimental de entre los miles de experimentos y observaciones que se han hecho, ha planteado, ni remotamente, una duda razonable sobre el modelo de Einstein, dentro de su propio ámbito de aplicaciones. Lo que ocurre, es que tiene una fuerte limitación de principio, de base que impide generalizar los resultados a cualquier escala espacio-temporal y a cualquier clase de observadores.

El propio Einstein se encargó de quitar a la relatividad, las ataduras de los marcos de referencia inerciales. Doce años después de la primera parte apareció la *relatividad generalizada.* Como su nombre sugiere, se trata de una teoría que contiene los mismos elementos constitutivos de la restringida; esto es que se trata de un modelo para un espacio-tiempo de cuatro dimensiones, donde la rapidez con que se desplaza la luz por el vacío es siempre c para cualquier observador, pero ahora, haciendo uso de un poderoso aparato matemático, construye su modelo para cualquier observador, inercial o no inercial. Con un truco genial del pensamiento, Einstein consiguió la generalización deseada: curvando el espacio-tiempo.

En efecto, todos, desde Arquímedes hasta Newton, pasando por Ptolomeo, Copérnico y Kepler, dieron por hecho que el espacio físico; ese escenario de todos los acontecimientos naturales es plano; es decir, es el espacio que un día Euclides construyó a partir del más puro razonamiento. Es en resumen, aquel espacio en el cual dos líneas paralelas no se cruzan jamás; es el recinto donde los ángulos interiores de un triángulo cualquiera suman siempre 180°; es el lugar donde, en fin, un rayo de luz genera de todas a todas, una trayectoria absolutamente recta, sin importar la dirección en la que se lance.

De pronto, por virtud de su intuición, Einstein comienza a pensar que el espacio plano, o mejor dicho, el espacio-tiempo plano debe ser considerado como la más sencilla de todas las posibilidades; como el espacio-tiempo patrón; el que corresponde al caso más simple; aquel en el que no haya materia. Así, siguiendo nuevamente la huella de Newton, Einstein asocia casos simples a hechos dinámicos simples y así como lo hizo el inglés de la manzana, este judío-alemán, nacionalizado suizo y naturalizado norteamericano, el de la melena alborotada el hombre que nunca usó calcetines, asocia el espacio-tiempo más conocido y más simple, a la ausencia de materia. Esta vendría a ser la ley física anterior a la primera ley de la mecánica; como una *ley cero de la mecánica*, que establece, antes que las trayectorias, el escenario patrón; la base desde la cual las demás leyes se establecen.

Así, en un espacio-tiempo llano, una pequeña partícula no urgida por fuerza alguna, continúa indefinidamente con su movimiento uniforme rectilíneo. Pero ahora, la trayectoria patrón puede sufrir dos tipos de afecciones: la primera es la misma que previo Newton; aquella debida a la presencia de fuerzas, a saber, que la trayectoria curva su rumbo. En este caso, el espacio-tiempo continúa plano y es la partícula la que se acelera, gira y tuerce su camino. La mecánica es esencialmente la misma que la original de Newton, excepto porque ahora hay que hacer los cálculos en un espacio-tiempo de cuatro dimensiones.

La segunda forma como una masa puede afectar su trayectoria es cuando el mismo espacio-tiempo se curva. Aunque no exista fuerza alguna que actúe sobre ella, la partícula seguirá la curvatura propia del escenario en el que se mueve. En un sentido estricto, su movimiento es libre; sin aceleraciones, pues no hay interacción alguna que la obligue a alterar su estado de movimiento; sin embargo su trayectoria no será rectilínea. Ahora seguirá una "geodésica"; esto es, aquel sendero que, siendo la distancia mínima entre dos puntos, no es una recta.

El golpe maestro de Einstein fue asociar la curvatura del espacio-tiempo a la masa. Según su punto de vista, las masas; los cuerpos muy masivos cómo las estrellas, o los planetas curvan el espacio-tiempo a su alrededor, como se muestra en la figura VIII.3, obligando a los pequeños cuerpos que se encuentran en su proximidad a alterar sus trayectorias.

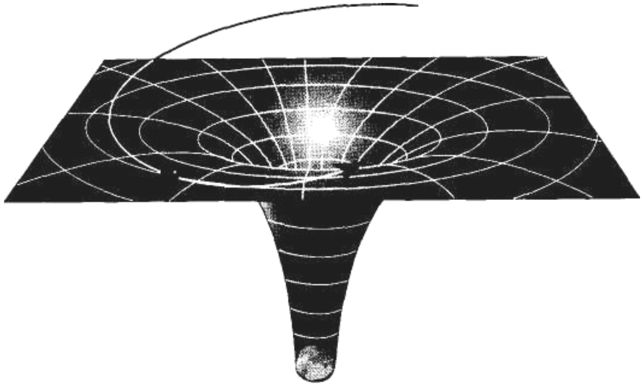

Figura VIII.3. Una gran masa *M* curva el espacio-tiempo alrededor de ella. Un pequeño cuerpo que viaja en la proximidad de la masa M sigue una trayectoria curva; una geodésica.

Para Einstein no existe en la realidad la llamada fuerza gravitacional, la que estudió Newton y con la cual dio explicación al Sistema heliocéntrico de Copérnico y Kepler. Para Einstein esa atracción entre los cuerpos es en realidad un efecto de la geometría. Un cuerpo que viaja por el espacio y el tiempo, al pasar cerca de una gran masa, experimenta una aceleración, curva su trayectoria original y es posible que "caiga" hacia el cuerpo que provoca este fenómeno o bien que entre en órbita alrededor de él; sin embargo, no existe fuerza alguna; el cuerpo solamente sigue la geodésica del espacio-tiempo en el que se encuentra.

Así, la aceleración de un objeto, puede asociarse a una cierta curvatura del espacio-tiempo de cuatro dimensiones, y ésta a la presencia de un cuerpo dotado de una gran masa, que afecta la geometría en su proximidad. Un observador no inercial puede concebirse ahora, como si estuviera libre de fuerzas pero inmerso en un espacio-tiempo curvo, siguiendo una trayectoria a lo largo de una geodésica. Así, por virtud de este truco del intelecto, los observadores inerciales y buena parte de los que antes no lo eran, pasan a ser ahora miembros de una clase mucho más amplia; de aquéllos que no estando sujetos a fuerza alguna, se mueven con un marco de referencia propio, aceleradamente, en un espacio-tiempo curvo.

Con estas proposiciones la relatividad pudo generalizarse y tratar un universo de fenómenos más dilatado que aquel que trataba la vieja mecánica clásica: movimientos de cuerpos con cualesquiera rapideces; desde el reposo, hasta la de la luz; cuerpos menudos a masivos; tan masivos como una estrella o aun una galaxia; los fenómenos electromagnéticos y la óptica, todos ellos, desde la perspectiva de un observador inercial o bien, de un observador acelerado en un espacio-tiempo curvo de cuatro dimensiones.

Con la relatividad generalizada fue posible, en particular, dar solución a tres problemas sutiles, muy finos de la gravitación que no había sido posible resolverlos, ni con la mecánica de Newton, ni con las teorías existentes hasta entonces. El primero de ellos se conoce como *el corrimiento del perihelio de Mercurio*.

El problema surgió cuando al analizar con cuidado la órbita de Mercurio, el planeta más cercano al Sol en el sistema, se descubrió que, en contra de lo que predice la mecánica newtoniana, haciendo uso de la fórmula para la atracción gravitacional que el propio Isaac Newton estableció, no lleva una trayectoria estrictamente elíptica, sino que a cada revolución completa alrededor del Sol, el perihelio parece adelantar un poco, de modo que el pequeño planeta no cierra su órbita, tal como se muestra en la figura VIII.4. La figura que realmente traza este planeta en el espacio es la de una roseta.

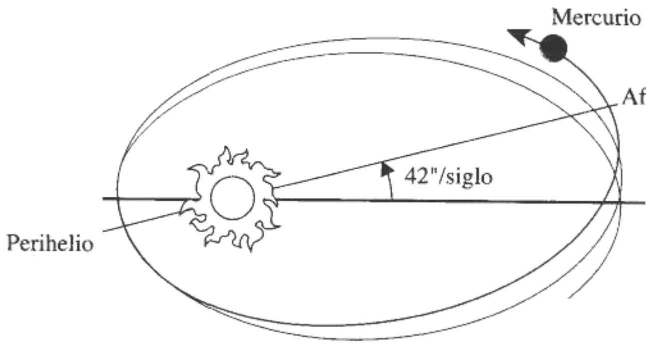

Figura VIII.4 Mercurio precede en su órbita. El perihelio barre un ángulo de 42 segundos cada siglo terrestre.

Ahora bien, el corrimiento es extraordinariamente pequeño, pues observando a Mercurio a lo largo de cien años terrestres, apenas es de cuarenta y dos segundos el ángulo barrido por su perihelio. Calculando con la mecánica clásica, este efecto de ninguna manera podía explicarse; ni siquiera tomando en cuenta las perturbaciones gravitacionales de los demás cuerpos del sistema solar. Hubo alguien que se atrevió a sugerir la existencia de un planeta más; un pequeño planeta que girara en una órbita muy próxima al Sol; tanto que ni con los poderosos telescopios se puede ver, pues la luminosidad del astro rey impide su observación. Calcularon la masa de ese planeta que supuestamente afecta con su presencia a

Mercurio, obligándolo a ejecutar esa precesión de su perihelio, estimaron su distancia al Sol; su periodo de traslación; en fin, todos sus parámetros. Incluso lo llamaron por un nombre: Vulcano, pero por más esfuerzos que se hicieron para hallarlo, la búsqueda fue siempre infructuosa.

Einstein, haciendo uso de la relatividad generalizada, considerando a la gravitación del Sol como una curvatura del espacio-tiempo y con la ayuda de su inseparable alumno Karl Schwarzschild (1873-1916), halló la solución de manera casi exacta, espectacularmente. Los 42 segundos de arco por siglo terrestre, para la precesión del perihelio de Mercurio surgieron impecablemente de su teoría. Fue un resultado crucial.

El segundo fenómeno fino de la gravitación es un pequeñísimo efecto de espejismo que se da en el cielo y que se hace aparente en los eclipses totales de Sol. En efecto, cuando la Luna se interpone entre el Sol y la Tierra, el disco solar se ve obscurecido, oculto, por el satélite natural de la Tierra. En pleno día se hace de noche, como aquel inolvidable 11 de julio de 1991; los pájaros vuelan a las ramas de los árboles a toda prisa, para dormir después de un día extrañamente corto; los gallos cantan desconcertados y los perros se van a echar a sus lugares de costumbre para pasar la noche. Muy pronto, sin embargo, la noche pasa, el Sol vuelve a brillar y la vida se reanuda a los pocos minutos.

Pues bien, durante esos breves minutos de total ocultamiento del disco solar de pronto se observa por encima del resplandor de la corona, el brillo de una estrella. Lo inusitado de este fenómeno es que tal estrella parece estar en un sitio del firmamento en el que en la realidad no está. Su imagen aparece por arriba o por debajo de su situación real, tal como se ve en la figura VIII.5. Es una suerte de espejismo cósmico, donde los rayos luminosos de la estrella, al pasar cerca del Sol sufren una curvatura, de tal modo que al llegar a la Tierra parecen provenir de una ubicación equivocada. El fenómeno de deflexión de los rayos de luz es muy pequeño; un rayo rasante a la corona solar sufre una curvatura de no más de dos segundos de arco, así que solamente en condiciones muy especiales se puede ver.

Lo extraño de este fenómeno, es que la luz no tiene masa, así que desde el punto de vista de la gravitación newtoniana, no hay modo como el Sol pueda atraer a un rayo luminoso y por lo tanto no se puede explicar, con base a esta teoría, la curvatura que sufre la luz al pasar cerca de un cuerpo masivo como el Sol. Si carece de masa, no hay atracción, así que debería continuar con su trayectoria absolutamente rectilínea.

Einstein, con la relatividad generalizada vuelve a adjudicarse un

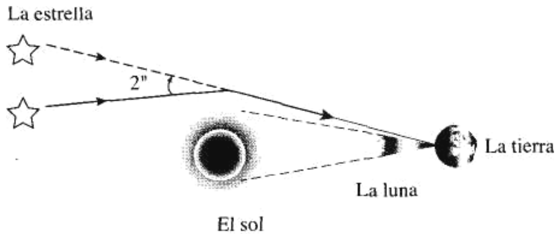

Figura VIII.5. Durante un eclipse total de Sol, una estrella parece estar en un lugar distinto al real. Los rayos de la estrella al pasar cerca del Sol se curvan 2 segundos, dando el efecto de espejismo.

triunfo. De acuerdo con este modelo, la luz, en efecto, no percibe la atracción gravitacional del Sol; simplemente viaja con su misma rapidez *c* siguiendo el contorno del espacio-tiempo en el que está. Al pasar cerca del Sol, el espacio-tiempo se curva apreciablemente por la presencia de este enorme cuerpo celeste y la luz sencillamente sigue esa curvatura, dando el efecto de espejismo a los observadores lejanos; a los terrícolas que miran por sus telescopios. Haciendo cálculos, Einstein obtuvo casi exactamente los dos segundos de ángulo de deflexión, tal como se observa.

El tercer efecto fino de la gravitación es un poco más sutil que los otros. Tiene que ver con el llamado "espectro" de la luz. Cualquier tipo de luz, al pasar por un prisma de vidrio pulido, se descompone en colores; aquellos colores que forman en conjunto la luz. Así por ejemplo la luz blanca del Sol se descompone en todos los colores del arco iris. Comenzando por el rojo, el anaranjado, el amarillo, el verde, el azul, el índigo y finalmente el violeta. Cada elemento de la tabla periódica tiene su propio espectro; son sus colores componentes básicos. El espectro de los elementos es único para cada elemento, es como la huella digital que lo distingue de todos los demás.

Por ejemplo, el sodio al ponerse en combustión despide una luz muy característica. Esta luz, al hacerse pasar por un prisma triangular de vidrio da como resultado, el espectro del sodio que consiste en un conjunto de rayas luminosas; las más importantes son amarillas, ocupando sólo una pequeña parte del espectro total de colores de la luz blanca.

Pues bien, se ha observado que la luz que proviene del Sol o de otros cuerpos celestes de gran masa contiene los mismos rasgos característicos de la luz aquí en la Tierra excepto por un detalle: el espectro de la luz que proviene de los cuerpos masivos esta corrido hacia el rojo; tanto más, cuanto más masivo sea el cuerpo que dio origen a esa luz. Comparando los espectros de luz del Sol con el de la luz blanca en la Tierra, tal como se verá contienen los mismos signos; las mismas líneas pero en posiciones recorridas todas hacia el rojo. Nuevamente aquí se tiene un problema que la mecánica clásica de Newton es incapaz de resolver. Nuevamente, la gravitación newtoniana no puede considerar que exista atracción gravitacional sobre la luz, porque ésta no posee masa.

De nueva cuenta la relatividad generalizada de Einstein, basándose en la idea de un espacio-tiempo curvo, fue capaz de dar solución exacta al problema.

Hoy por hoy, pocas personas dudan de la validez de la teoría de la relatividad de Einstein. El cúmulo de resultados correctos que ha proporcionado a la ciencia es impresionante. Einstein murió en 1955, y no tuvo oportunidad de comprobar una de las más importantes predicciones de su teoría: los "hoyos negros". Estos son curvaturas brutales del espacio-tiempo, causadas por concentraciones inmensas de masa en un cierto volumen del espacio. Son tan pronunciadas estas curvaturas que cualquier cuerpo que se halle en su vecindad "cae" al hoyo negro irremisiblemente. Los hoyos negros vienen a ser como los sumideros de materia en el Universo; los sitios donde los cuerpos son arrastrados y caen debido a la intensa fuerza de atracción gravitatoria. Recientemente han aparecido evidencias en placas fotográficas impresas con la ayuda de poderosos telescopios, donde se ve a la materia circundante girar en velocísimos torbellinos, como precipitándose hacia un cierto lugar al centro de ellos. Todo parece indicar que, en efecto, en el Universo existe una buena dotación de estas singularidades del espacio-tiempo donde todo desaparece y nada, ni la luz puede emerger de ellos. En nuestra propia galaxia; la Vía Láctea, parece ser que en su centro, existe un poderosísimo hoyo negro que traga estrellas y sistemas planetarios, pero que, al mismo tiempo, regula el movimiento de todos los demás cuerpos de este enorme conglomerado de estrellas.

Finalmente, existe otra fortísima limitación para la mecánica clásica que es necesario mencionar. No se trata en realidad de alguna restricción que haya surgido como resultado de sus postulados fundamentales acerca de la estructura del espacio o del tiempo. Tampoco tiene que ver con la idea de sistema de coordenadas o marco de referencia inercial. Esta limitación proviene de la forma como se ha conceptuado al observador mismo; a ese ente que está siempre presente en la teoría, al establecerla, al desarrollarla y al aplicar sus leyes y teoremas a la resolución de problemas particulares.

El observador en la mecánica clásica es una presencia que observa todo cuanto ocurre en el espacio y en el transcurso del tiempo, mide distancias, velocidades, lapsos, energías y torcas, acomodado siempre en el origen de un sistema coordenado, en una especie de actitud contemplativa, sin interactuar en forma alguna con el cuerpo o los cuerpos que observa. De hecho, aunque nunca se le menciona, el observador forma parte importante del concepto de marco de referencia, pues no nada más hay que tener un sistema de coordenadas, una regla de medir y un reloj para jugar el juego de la mecánica clásica; también es importante quién va a ver, a observar, a medir, a pensar. Ese es el observador.

Ahora, por más pasivo que sea, por más ajeno a los acontecimientos que observa, hay un aspecto indudable de su labor que es necesario reconocerle a éste casi insignificante personaje. Para ver, para poder observar y medir, es necesario alumbrar a los objetos que se estudian. Iluminarlos con luz visible, o con algún otro tipo de radiación que al rebotar en los objetos, llegue a la retina del observador, o a los aparatos de medida, o bien imprima alguna placa fotográfica, para poder proseguir con su estudio. Este asunto es obvio y no tiene mayor importancia si se trata de grandes objetos materiales cuyo movimiento se analiza. Sin embargo, tratándose de cuerpos muy pequeños; de aquellos minúsculos corpúsculos que se encuentran en el extremo inferior de la escala, como son las llamadas "partículas elementales": los electrones, los protones, neutrones, mesones y todo ese microuniverso que es el constitutivo último de la materia; para todos estos pequeñísimos individuos materiales, el hecho de alumbrarlos para verlos, constituye todo un reto. Aquí la simple labor de observar se torna en una operación harto complicada.

Como se sabe, la luz puede considerarse como una onda que viaja por el espacio con rapidez *c*. Es una onda; una oscilación que se propaga. Ahora, cuando la luz llega ante un objeto material, rebota en su superficie y emprende el camino de regreso hasta llegar, por ejemplo al ojo de un observador. Rebotar es alumbrar; así que hablar de que a cierto objeto se le ilumina, significa lanzarle rayos de luz (ondas luminosas) y hacer que estos reboten en el objeto. Al rebotar la luz, hace visible al cuerpo.

Ahora bien, aunque la luz carece de masa, posee sin embargo, cierta cantidad de movimiento. Haciendo mucha experimentación sobre diferentes tipos de luz se sabe hoy en día que la cantidad de movimiento de un rayo luminoso cualquiera es un vector cuya magnitud es inversamente proporcional al período de la onda (baste con recordar que el periodo es el lapso que transcurre entre una cresta de una onda y la siguiente cresta, tal como se ve en la figura VIII.6). La constante de proporcionalidad es igual a la relación entre la llamada "constante de Planck" h, y la rapidez de la luz *c*, de tal suerte que la magnitud de la cantidad de movimiento de la luz se puede escribir como:

$P = \dfrac{h}{c\,T}$, donde, el valor numérico de la constante de Planck es:

$$h = 6.6262 \text{ X } 10^{-34}[j.\text{s}]$$

Tal como se vio en el Capítulo 6, cuando un objeto rebota contra otro, le comunica a éste el doble de su cantidad de movimiento; éste es el principio en el que se basa el ariete; esa brutal arma para romper puertas y barreras que usaron los ejércitos de la antigüedad. El mismo principio se aplica a la luz al rebotar contra el objeto que ilumina, así que cada rayo luminoso, al momento del rebote le deja al cuerpo una cantidad de movimiento del orden de:

$$2p = \frac{4.4250 \times 10^{42}}{T} \left[\frac{kg\ m}{s}\right]$$

Tomando el periodo de un rayo de luz violeta que es aproximadamente de:

$$T = 1.334 \text{ X } 10^{-15}[s],$$

se obtiene la cantidad de movimiento que un rayo de este color comunica a un cuerpo cada vez que rebota de él:

$$2\,p = 3.31 \times 10^{-27} \left(\frac{kg\ m}{s}\right)$$

Esta cantidad, tratándose de un cuerpo macroscópico cualquiera, resulta absolutamente despreciable, así que alumbrando objetos, la acción que realiza un observador es casi nula, si el cuerpo es suficientemente grande. Pero ahora, pensando en un electrón cuya masa en estado de reposo es:

$$m_e = 9.11 \text{ X } 10^{-31}[\text{kg}],$$

resulta que cada vez que un rayito de luz visible impacta contra él, ¡le imprime una rapidez de 3 600 [m/s]; o sea de tres veces la velocidad del sonido en el aire!

En otras palabras, si alguien desea ver un electrón, aunque tuviera para hacerlo el microscopio más poderoso del Universo, capaz de distinguir los cabellitos de un electrón, no podría verlo en verdad, pues al momento de alumbrarlo con luz, le estaría dando una soberbia nalgada que lo sacaría del campo visual instantáneamente, a Mach 3 de velocidad.[2]

[2] El número de Mach indica la rapidez del sonido en el aire. Mach 3 quiere decir que se trata de un cuerpo que se mueve a tres veces la rapidez del sonido.

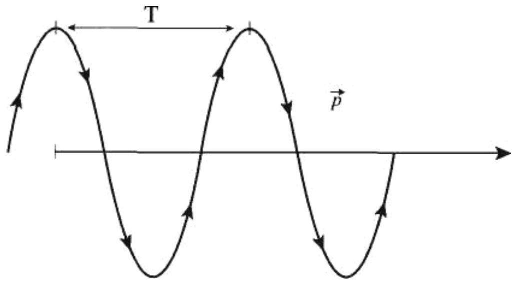

Figura VIII.6. Una onda se propaga de izquierda a derecha con una cantidad de movimiento p, cuya magnitud es proporcional al inverso del periodo T. Este, a su vez, es el lapso entre una cresta y la siguiente.

Así, el más elemental acto de observar, se convierte en una tarea imposible de realizar, de modo que, aunque el modelo de la mecánica clásica sea excelente, aunque sus leyes y postulados básicos sean ciertos, el hecho es que, tratándose del mundo de las partículas submicroscópicas; los corpúsculos constitutivos de la materia macroscópica; tratándose, en fin de electrones, protones y átomos, la mecánica clásica es impracticable.

También en este sentido se planteó un reto que a la postre fue superado en forma admirable.

Dos físicos europeos, uno suizo, Erwin Schródinger (1887-1961) y el otro alemán, Werner Heisenberg (1901-1976), fueron quienes superaron los obstáculos planteados al problema de la observación de los cuerpos pequeños, en forma genial.

La mecánica clásica es una teoría de las llamadas "deterministas"; esto es, que, describe el movimiento de los cuerpos materiales con precisión absoluta, prediciendo sus posiciones exactas en el espacio y de igual manera, sus velocidades y todos los demás parámetros que sirven a tal descripción. Si por virtud de su pequenez extrema un cuerpo deja de ser absolutamente ubicable en el espacio y en el tiempo, entonces el problema es fundamental, hay que cambiarlo todo, desde sus cimientos; hay que construir una mecánica de lo indeterminado; que ya no tome en consideración la absoluta precisión de una medida, sino que, en cambio, parta precisamente del hecho opuesto: que dar la ubicación de los cuerpos es, en el mejor de los casos probable, pero no cierta.

Esta fue la base de la llamada *mecánica cuántica.*

Para estructurar su teoría, ese par de físicos plantearon tres proposiciones fundamentales. La primera de ellas fue que la naturaleza se rige por el llamado "Principio de Incertidumbre", que afirma que es imposible medir de un objeto, cualquiera su posición, y su cantidad de movimiento con una precisión absoluta y en forma simultánea; pues a medida que se precisa más y más la medida de una de estas cantidades físicas, se pierde más y más la certidumbre sobre la otra. Con este principio, Schródinger y Heisenberg establecieron el carácter indeterminista de su teoría.

Una consecuencia de lo anterior se refleja en la segunda proposición que establecieron para la mecánica cuántica sus autores: ellos decidieron que toda su teoría debería estructurarse sobre las bases de la probabilidad y, en vez de predecir con toda certeza la ubicación, o la velocidad, o cualquier otro parámetro físico relevante a los cuerpos materiales, sus resultados deberían darse en términos de la probabilidad de que el cuerpo estuviese en tal o cual parte en un cierto instante, o que una partícula se moviese con una velocidad que probablemente fuera de tantos por ciento, etc. Esta es, en suma, la proposición que dice que la mecánica cuántica es probabilista y no determinista como la anterior; la mecánica clásica.

La tercera proposición básica que establecieron para construir su mecánica cuántica estos personajes, es la que se conoce como el "principio de correspondencia". Éste afirma que todas las cantidades probabilísticas que maneja la mecánica cuántica y que se refieren a propiedades físicas de los cuerpos materiales deben corresponder siempre a las cantidades físicas que maneja la mecánica clásica, de tal modo que cuando los cuerpos que se estudian son suficientemente grandes, las variables probabilistas de la mecánica cuántica y las variables deterministas de la mecánica clásica coinciden, una a una. Con este postulado garantizaron que su teoría condujera a los mismos resultados que la mecánica de Newton en el caso de cuerpos grandes, y al mismo tiempo, que ambas, mecánica clásica y mecánica cuántica pudieran entenderse como extensiones, una de la otra, ampliando con ello el ámbito de problemas y fenómenos relacionados con la descripción y el vaticinio del movimiento de los cuerpos materiales por el espacio.

Muy pronto, las bondades de este modelo comenzaron a darse. En la primera mitad del siglo XX, la física de los átomos simples quedó entendida. Durante la segunda mitad, los enlaces entre átomos se comprendieron a nivel fundamental; la física de las moléculas y con ella la química, se vieron fundamentadas.

La inquietud del ser humano por conocer más y más no tiene límites. Una vez que quedó estructurada la mecánica cuántica, de Schródinger y Heisenberg, en 1924, no tardó en presentarse a la comunidad internacional un modelo teórico aún más avanzado: la mecánica cuántica relativista, que generaliza la estructura para comprender el sub-universo de lo ultra pequeño y ultra rápido. La segunda cuantización fue el paso siguiente que se dio al incluir los fenómenos de radiación.

La mecánica se ha visto así extendida, superada en sus alcances, enriquecida y generalizada. Éste es el espíritu del ser humano de buscar cada vez logros más y más ambiciosos.

Relatividad restringida, relatividad generalizada, mecánica cuántica, Mecánica cuántica relativista y segunda cuantización han sido los cinco modelos teóricos con los cuales se ha llegado a entender casi toda la naturaleza. Así, desde lo ultra pequeño; el mundo de los fotones (la luz) y los electrones, hasta las más gigantescas galaxias que pueblan el universo, han sido comprendidos en buena medida. Desde los objetos más lentos e inertes hasta lo más veloz; el movimiento se puede predecir y cuantificar con pasmosa exactitud. El electromagnetismo y la óptica han quedado integrados a ese gran cuerpo del conocimiento científico que es la física.

A partir de las modestas deducciones teóricas que hicieron unos cuantos hombres geniales hace casi dos mil quinientos años; consideraciones sobre los números; sobre la forma de la Tierra, sobre la naturaleza del movimiento de los planetas, el conocimiento fue integrándose, llevando a resultados cada vez más poderosos, más generales, hasta que, en la segunda mitad del siglo XVII ese hombre extraordinario, dotado de una mente, de un intelecto único, pudo realizar la primera gran síntesis del conocimiento científico en un modelo; una teoría que contuvo, con una sola formulación todo lo relativo al movimiento de los cuerpos materiales que se conocía hasta esos tiempos. Así, por virtud de la mecánica clásica de Newton, los objetos móviles de aquí, de la Tierra sujetos a las fuerzas de contacto directas; como aquéllas que se desarrollan al lanzar un pedrusco o al empujar un carretón, se pudieron comprender y prever sus conductos de igual modo como se comprendió el movimiento de los astros: planetas, cometas, satélites y asteroides sujetos a la acción de fuerzas a distancia; fuerzas que actúan a través del vacío a enormes distancias. Todo, con el simple uso de alguna fórmula para la fuerza adecuada.

Los logros alcanzados por la inteligencia humana son pasmosos. No menos impresionante ha sido el acortamiento de los lapsos entre un logro científico y el siguiente. De Arquímedes de Siracusa o de Eratóstenes de Alejandría o Kepler y Newton transcurrieron cerca de 1 800 años, ese fue el tiempo que llevó dar el enorme paso de la conciencia de ser pensante en un mundo físico, hasta ubicar al ser humano en el sistema solar heliocéntrico. De Newton a Einstein, Schródinger y Heisenberg transcurrieron menos de 300 años. De allí a las teorías unificadoras, escasamente 30 años.

El genio del ser humano ha sido prácticamente el mismo; lo que ha impreso esa gran rapidez al desarrollo teórico ha sido la cada vez mayor abundancia de conocimientos: la precisión y refinamiento de los aparatos de medición y observación y los estupendos logros para la vida sobre este planeta bellísimo. Pero la simiente, la semilla de esta explosión del genio y el talento sólo pudo darse con la estrategia genial de Isaac Newton y su mecánica clásica. Una auténtica mecánica sin talachas.

ÍNDICE

ISAAC SCHIFTER

La ciencia del caos

En años recientes, parte de la comunidad científica en todo el mundo ha comenzado a hablar incesantemente de caos, desorden, para explicar muchos fenómenos que suceden en la naturaleza y en experimentos controlados de laboratorio, que se ca-racterizan por tener un comportamiento que no puede ser descrito por leyes matemáticas sencillas.

Los meteorólogos señalan que bajo ciertas circunstancias el flujo del aire se comporta en forma *obediente y* se le pueden aplicar ecuaciones que los describen rigurosamente, pero, en otras situaciones su movimiento es *caótico y* no se sabe que pasará. El desorden es el personaje principal de esta obra. ¿Por qué existe este caos? ¿Cómo interviene en nuestra vida cotidiana y cuáles son sus consecuencias?

A la pregunta del lector respecto a qué es lo que lo causa Schifter responde que ¡nada! Siempre ha existido y hoy en día sabemos que su presencia en muchos fenómenos es más común de lo que pensábamos hace algunos años.

LA CIENCIA PARA TODOS #142
coedición de la SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
el CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
y el FONDO DE CULTURA ECONÓMICA

1ª edición, 1996; 112 pp.: ilus.; 21 x 13.7 cm

ISBN 968-16-4438-7

JAVIER BRACHO

¿En qué espacio vivimos'?

Se dice con frecuencia que las matemáticas se ocupan del número y de la forma; ésta es una manera muy esquemática de describir sus preocupaciones más importantes. En realidad, desde hace dos siglos los matemáticos crean y estudian espacios geométricos que después son utilizados por el resto de los científicos en el desarrollo de las más variadas teorías.

En este libro el autor no sólo aclara la noción moderna de espacio, sino que invita al lector a vivir una serie de experiencias relacionadas con los varios mundos posibles que tienen base en un tema tan amplio; experiencias que al principio parecen fantásticas y que nos hacen entrar, sin proponérnoslo, en contacto con la geometría actual.

Al profano le sorprenderá esta idea pues, en general, el concepto más extendido de espacio es el del espacio que nos rodea, al que concebimos amorfo y único.

LA CIENCIA PARA TODOS # 77

coedición de la SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
el CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
y el FONDO DE CULTURA ECONÓMICA

1ª edición, 1989; 4ª reimpresión, 1995; 2ª edición, 1999

ISBN 968-16-5928-7

VICENTE TALANQUER

Fractus, fracta, fractal.
Fractales, de laberintos y espejos

Hace unos 15 años se acuñó el término fractal para describir ciertas formas geométricas cuya estructura se repite en cada una de sus partes, y en las partes de sus partes. Hoy en día aparecen en la distribución de las estrellas de nuestra galaxia, en las irregularidades de una costa y en el latir de un corazón. Pero, ¿qué es realmente un fractal?, ¿cuáles son sus propiedades?, ¿cómo y dónde podemos identificarlo o construirlo? Estas son algunas preguntas que Vicente Talanquer responde en este texto utilizando ejemplos sencillos de las áreas de la física, la química y las matemáticas.

Una marca fractal señala la distribución de los epicentros de los temblores, la repetición de las palabras de un texto e incluso las fluctuaciones de precios en el mercado.

El libro no sólo pretende que el lector descubra el mundo de los fractales, sino también que aprenda a recrearlo. Se incluyen algunos experimentos sencillos y la descripción de programas de computadora (en BASIC) que permiten reproducir la mayoría de las ilustracioners del texto, de tal suerte que servirá de guía para que el lector cree sus propios fractales.

LA CIENCIA PARA TODOS #147

coedición de la SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
el CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
y el FONDO DE CULTURA ECONÓMICA

1ª edición, 1996

ISBN 968-16-4372-0

LUIS MONTEJANO PEIMBERT

La cara oculta de las esferas

Entre los objetos geométricos que a todos nos llaman poderosamente la atención están las esferas y los círculos.

Con *La cara oculta de las esferas* Luis Montejano ha escrito un texto de matemáticas en el que esas figuras geométricas son analizadas lo mismo conceptualmente que en cuanto a su configuración, ya sea como objetos reales o como representaciones imaginarias, con el comportamiento que a cada cual corresponde en la investigación y en la vida ordinaria.

En este libro, el lector se sorprenderá de la naturalidad con la que los resultados aparecen y se eslabonan; sin embargo, hay que aclarar que esto es producto del trabajo del autor y su manera de ver el quehacer matemático. Para él, las matemáticas son algo de lo que todos podemos disfrutar, de la misma manera que los matemáticos lo hacen cuando se plantean, piensan y discuten entre ellos los problemas. Difícilmente el lector encontrará en cualquier otro idioma un libro que como éste le haga sentir qué es la matemática.

LA CIENCIA PARA TODOS # 75

coedición de la SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
el CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
y el FONDO DE CULTURA ECONÓMICA

1ª edición, 1989; 3ª reimpresión, 1995; 2ª edición, 1999

ISBN 968-16-5231-2

Vivimos en un mundo en el que los adelantos tecnológicos son cosa de todos los días. Tan es así, que ya ni siquiera nos sorprendemos ante el invento más avanzado o el descubrimiento más deslumbrante. Por lo general ignoramos que tras esos adelantos está la ciencia, y la corona de esa maravillosa estructura llamada ciencia es la mecánica, sin la cual no habría podido ser todo lo que vino después: química, electricidad, física cuántica y nuclear. Éste es un libro sobre mecánica, escrito por quien ha impartido esa disciplina durante los últimos treinta años, y pretende mostrar, a vuelo de pájaro, su génesis y desarrollo.

Fermín Viniegra Heberlein ha sido profesor del Instituto Politécnico Nacional y actualmente lo es en la Facultad de Ciencias de la UNAM, donde también realizó sus estudios. Su área de investigación incluye la física matemática, la teoría clásica de campos y la mecánica de medios continuos.

LA CIENCIA PARA TODOS

7

www.fondodeculturaeconomica.com

SEP
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

9 789681 663087