Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología, Rosario (2006), volúmen especial número 1.

GEODESIA FÍSICA

Antonio INTROCASO

Boletín
del Instituto de
Fisiografía y Geología

Introcaso A., 2006. Geodesia Física. [*Physical Geodesy*]. *Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología,* Volúmen especial número 1, pp. 1 - 128. Rosario, 10-06-2006. ISSN 1666-115X.

Resúmen. El objetivo de esta publicación es mostrar cómo se pueden obtener, a partir de ondulaciones del geoide, empleando una amplia y adecuada metodología, las características corticales y el estado isostático de estructuras geológicas por un camino diferente al tradicional. Los conceptos que apuntan a cumplir el objetivo señalado se desarrollan en siete capítulos. En el Capítulo 1 se realiza una pequeña reseña histórica de las sucesivas descripciones del campo gravitatorio terrestre, hasta llegar a la explicación Einsteniana sobre su génesis y sus características. El Capítulo 2 trata el campo gravitatorio externo desde las ecuaciones básicas (ecuación de Laplace) y el campo interior a la masa terrestre (ecuación de Poisson). Se enfatizan las relaciones entre el potencial, la gravedad y las ondulaciones del geoide y se describe la geometría del campo externo (líneas de fuerza**,** equipotenciales). A partir de los cálculos del potencial de simple y doble capa se marca el camino que conduce a las fórmulas de Green. Finalmente, se trata el desarrollo del potencial tanto en armónicos esféricos como en serie de Fourier, y la utilidad práctica de cada representación. El Capítulo 3 es muy breve, aunque fundamental. Trata sobre la forma de la Tierra y el modelo de referencia regular que a través de la comparación con el caso real permite obtener tanto anomalías de gravedad como ondulaciones del geoide. En el Capítulo 4, luego de pasar revista a las bien conocidas anomalías de gravedad (aire libre, Bouguer e isostáticas), se introduce el concepto de efecto indirecto en las fluctuaciones del geoide ante cambios de masa, y se describe una forma de minimizar sus efectos (condensación de Helmert) para lograr resultados confiables. Luego se presentan las anomalías que utiliza preponderantemente la Geodesia (anomalías de Faye) para obtener las ondulaciones del geoide. Finalmente, en este capítulo se tratan las ondulaciones del geoide que originan los modelos de comparación perfectamente compensados (Airy, Pratt) para obtener a partir de ellas el grado de balance isostático (Capítulo 7). El Capítulo 5 se introduce en la definición de alturas tanto brutas (obtenidas como resultado de una nivelación geométrica, por ejemplo de alta precisión) como refinadas (con correcciones por la distorsión del campo de gravedad). Se nota aquí la importancia del geoide como superficie de referencia y las distintas formas de obtenerlo. En el Capítulo 6 se ven diferentes métodos para la obtención del geoide (es decir la ondulación N) a partir de anomalías de aire libre, con énfasis en las técnicas de fuentes equivalentes (FE) y de Stokes plana (SP) resuelta numéricamente. Ambos métodos son perfectamente compatibles con los objetivos planteados en esta publicación. Se destaca además que el muy moderno y en principio sencillo método de obtener N a partir de h (altitud sobre el elipsoide con GPS) y H (altitud sobre el geoide) puede ser combinado con FE como técnica de interpolación. El Capítulo 7 comienza tratando los siempre ambiguos métodos de separación de diferentes longitudes de onda del geoide, para luego centrarse en la obtención de las características corticales (espesor, isostasia, probable génesis y probable evolución) a partir de una metodología análoga a la utilizada en investigaciones tradicionales de '*g*' que involucran modelado. Se hace notar, por último, que trabajando con una densa fuente de datos $N = h - H$ no se necesitan anomalías de '*g*', y así el empleo de N resuelve la investigación geológica estructural por otro camino.

Abstract. The aim of this publication is to show that geological structures, crustal features and isostatic balance can be studied using geoid undulations methods in a non-traditional way. The subject is developed in seven chapters. Chapter 1 presents a brief historical review of the terrestrial gravity field descriptions until Einstein's explanation about its genesis and characteristics. Chapter 2 deals with the gravity field from basic relationships: the external one (Laplace's equation) and the internal one (Poisson's equation). Potential, gravity and geoid undulation links are emphasized, and external field geometry is described (equipotential contours). From simple layer and double layer potential computations, Green's formulae can be explained. Finally, spherical armonic and Fourier series representations of the potential function are discussed. Chapter 3 is concise and important, and concerns to the Earth's shape and regular reference model which being compared with the real case allows to obtain either gravity anomalies or geoid undulations. In Chapter 4, after reviewing the well known gravity anomalies subject (free air, Bouguer and isostatic ones), indirect effect in geoid fluctuations as a result of masses changes is introduced, also describing a way of reducing its influence (Helmert condensation) to reach trustable results. Then, Faye anomalies are presented, since they are the most useful ones in Geodesy. Finally, completely balanced model's geoid undulations are considered, to obtain the isostatic state level. Chapter 5 treats either rough or refined hights (the former ones obtained as a result of geometric levelling, and the latter ones with gravity field distort corrections). Geoid as a reference surface and the different ways of obtaining it are put in evidence. Different ways for obtaining geoid undulation N from free air anomalies, are shown in Chapter 6, emphasizing equivalent source techniques, and numerical resolution of planar Stokes' integral. Both methods fit the aims of this publication. Besides, the modern and simple method of obtaining N from h (altitude over ellipsoidal surface with GPS) and H (altitude over the geoid) can be combined with equivalent sources as an interpolation method. Chapter 7 begins focusing the ambiguous methods for separating different geoid wavelengths, then on the characteristics of the crust (thickness, isostasy, probable genesis and evolution) using a similar methodology to the one used for '*g*' traditional modeling. Finally, it must be noted that a dense data source $N = h - H$ makes '*g*' anomalies unnecessary, and so the use of N solves the geological research in another way.

Antonio Introcaso [geofisic@fceia.unr.edu.ar]: Gabinete de Geofísica, FCEIA, Universidad Nacional de Rosario & CONICET, Pellegrini 250, 2000 Rosario, Argentina.

Manuscrito recibido: 12/04/2005
aceptado: 03/12/2005.

CONTENIDO

1. BREVE HISTORIA SOBRE EL CAMPO GRAVITATORIO TERRESTRE

En su *Discorsi*, Galileo Galilei afirmó que sería ocioso e inútil discutir las teorías causales de la gravedad propuestas por sus contemporáneos y predecesores, dado que "nadie sabe qué es la gravedad, que no es más que un nombre, y que más vale contentarse con establecer las leyes matemáticas de la caída". Luego, Isaac Newton, en su *Principia*, admitió que hasta el momento no había sido capaz de descubrir la causa de las propiedades de la gravedad, y más adelante afirmó que no presentaba hipótesis explicativas "debido a que las hipótesis no tienen lugar en la filosofía experimental". De modo que ambos en sus respectivas épocas describieron en forma cuantitativa, simple e inequívoca los fenómenos gravitatorios, sin aludir a explicaciones causales.

Hacia fines del siglo XIX la Física ya conocía las maravillosas ecuaciones de Maxwell, pilares del electromagnetismo, y asistía a la llegada de notables hechos experimentales. Por ejemplo, la velocidad de la luz presentaba un valor constante independiente del movimiento del observador. Por el contrario, la masa - constante a bajas velocidades- variaba a elevadas velocidades. En 1905, un joven físico alemán de 26 años, Albert Einstein, presentó su Teoría Restringida de la Relatividad, o Teoría de la Relatividad Especial (T.R.E.), válida para sistemas inerciales, justificando así los hechos observados en el marco de una concepción audaz y rigurosa. Por entonces, no obstante, continuaba sin explicación la naturaleza de la gravedad. Luego de 11 años, es decir en 1916, Einstein apoyado en experiencias conceptuales y en una apropiada matemática encontró en el espacio curvo una explicación inesperada sobre la causa de la gravedad.

La concepción Einsteniana sobre el campo de gravedad ha sido fundamental en diferentes disciplinas. Por ejemplo, se sabe que una meta fundamental para la Astronomía y para la Geodesia es establecer sistemas de referencia o ternas de ejes coordenados y su materialización (marco de referencia).

En un sistema clásico, tradicionalmente, un sistema euclídeo resultaba adecuado debido a la escasa precisión lograda en las observaciones. Sin embargo hoy sabemos que el sistema de coordenadas está dominado por la curvatura que posee el campo gravitatorio galáctico, y más allá de él, por la curvatura que producen la masa y la energía distribuidas en el Universo. Esto nos lleva a considerar un sistema de referencia dinámico. La diferencia entre los movimientos de los planetas referidos a un sistema relativista y a un sistema clásico es del orden de 10^{-8}.

En 1991, el grupo de trabajo sobre sistemas de referencia de la Unión Astronómica Internacional recomendó introducir la teoría de la relatividad general (T.R.G.) como marco teórico para la definición de un sistema de referencia espacio-temporal. Hoy, el tan en boga sistema G.P.S. (Global Positioning System) utiliza, para lograr los mejores resultados, ambas teorías: T.R.E. y T.R.G. Por todo ello, y porque además la relatividad permite dar una explicación sobre la génesis de la gravedad, luego de recorrer a grandes pasos los antecedentes del tema y los estudios de Galileo y de Newton entre otros haremos referencia, en forma breve, a la teoría de Einstein.

Comencemos ubicándonos en la era precristiana. Aristóteles, dos siglos antes de nuestra era, basándose sólo en el sentido común (de la época), sostuvo que los cuerpos más pesados, librados a sí mismos, caían más rápidamente que los cuerpos más livianos. Aseguró también que la caída libre era tan rápida que era imposible medirla. Tal vez por ello no intentó realizar alguna verificación práctica.

Esta concepción aristotélica fue luego refutada, entre otros, por Galileo. Pese a no haber sido el primero en rechazarla, Galileo fue sin duda quien más profundamente exploró el problema y quien mejores y más amplias conclusiones obtuvo a partir de su asombroso genio y de sus experiencias.

Aristóteles fue sistemáticamente criticado ya desde la física alejandrina y bizantina de la última época. Lo mismo podemos decir del pensamiento científico islámico y latino medieval. Hasta el Dante criticaba a Aristóteles, que aparecía como un blanco constante y obligado.

Pese a haber sido el destinatario de todo tipo de críticas, debemos decir que Aristóteles fue un notable pensador. Fue el fundador de la biología como ciencia, sostuvo en ese campo la importancia del método de observación controlada y de las clasificaciones. Hoy se leen con admiración sus escritos sobre economía y sobre política. No hay filósofo que no se detenga con reverencia ante sus trabajos sobre ética y sobre metafísica. Formuló también, por primera vez, el silogismo como razonamiento deductivo. Abordó además el concepto de inducción. Nada debe llevarnos, en consecuencia, a pensar que fue un filósofo más. Nos preguntamos entonces: ¿dónde se equivocó Aristóteles?. Él no sometió muchas de sus hipótesis a la experimentación, acumulando así frecuentes errores. Recordemos que sostuvo, sin las mínimas verificaciones, que los hombres tienen mayor número de piezas dentales que las mujeres; que si se concibe un bebé mientras sopla el viento norte, sin duda será varón; que la Tierra está fija y ocupa el centro de una serie de esferas concéntricas en cuyos ecuadores están fijos los distintos planetas; creyó que estas esferas giraban con diferentes períodos y con distintas orientaciones. Finalmente digamos que Aristóteles se equivocó respecto de su ya comentada concepción sobre la caída de los cuerpos.

Antes de Galileo, Joanes Filopomus (ó Juan el Gramático) sostenía que la experiencia contradice las opiniones usuales sobre la caída de los cuerpos. Afirmaba que las observaciones superaban a las argumentaciones verbales. Sus informes y opiniones circularon por Europa desde 1536 en adelante.

Por otro lado Simón Stevin, matemático, ingeniero y físico flamenco, realizó en 1586 una experiencia de caída libre. Arrojó, desde la misma altura, dos esferas de plomo de distinto peso, comprobando que llegaban sincrónicamente al suelo, refutando sin más a Aristóteles.

Galileo, algún tiempo después, realizó una serie de experiencias con mayor cuidado y amplitud que las de Stevin, y obtuvo, a través de su singular genio, inesperadas y novedosas consecuencias.

Se dice que Galileo recomendaba a sus alumnos y discípulos medir todo lo que fuera directamente medible, y lo que

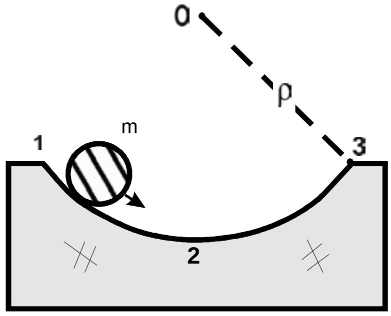

Figura 1.1. Una esfera de masa *m* lanzada en 1, se desliza en caída por el camino *S* (de radio de curvatura constante ρ). Esta caída es similar a la de la masa de un péndulo de longitud ρ.

no: "hacerlo" medible. Con esta idea, lentificó los movimientos de caída utilizando tanto péndulos como planos inclinados. Él y sus discípulos prepararon péndulos con diferentes longitudes y la misma masa y los pusieron en movimiento, observando sus comportamientos. Galileo sabía que las masas pendulares "caían" aunque estaban obligadas a seguir un camino circular. El fenómeno se repetía espontáneamente diez veces, cincuenta veces, cien veces y podía ser atentamente observado y controlado.

Masas de diferentes pesos sujetas por cuerdas de la misma longitud l, "caían" al mismo tiempo; los períodos se repetían. "Si a esas mismas masas se dijo las dejamos caer libremente (eliminando las cuerdas) desde un mismo nivel, en condiciones ideales llegarán todas al mismo tiempo al suelo". El dogma aristotélico, antes cuestionado por Filopomus y Stevin, recibía de parte de Galileo el golpe de gracia. No obstante, los estudios sobre el movimiento de este gran precursor recién comenzaban.

Se dice que por entonces realizó una experiencia histórica, arrojando simultáneamente, desde la Torre Inclinada de su Pisa natal, masas de distintas substancias y de distintos pesos. Sus testigos, estudiantes, discípulos, filósofos y amigos, verificaron asombrados la llegada sincrónica de las masas al suelo. En realidad se duda que tal experiencia se haya realizado. Fue tal vez Viviani, uno de sus más fieles discípulos, quien tras su muerte describió imaginariamente lo que es hoy tal vez la más célebre anécdota de Galileo.

Galileo, al mismo tiempo -para avanzar en sus estudios sobre el movimiento- realizó experimentos utilizando planos de diferentes inclinaciones. Él pensó, por ejemplo, que la caída de las masas pendulares desde los puntos más altos al umbral más bajo, era semejante al movimiento descendente de una masa esférica sobre una superficie cóncava cuyo radio de curvatura igualaba a la longitud de la cuerda (Fig. 1).

Para completar sus estudios utilizó planos inclinados con diferentes ángulos. En el límite, cuando el plano era vertical, se volvía al caso de caída libre. Al variar la inclinación desde ángulos pequeños a ángulos cada vez mayores, el movimiento se hacía más y más rápido. La esfera partía con cierta lentitud y luego su velocidad crecía. Pero el tipo de movimiento era siempre el mismo.

Sus mediciones, cuidadosamente repetidas, lo convencieron de que el movimiento era uniformemente acelerado. Trabajando con péndulos de longitudes diferentes, por ejemplo l_1 y l_2, encontró que las relaciones entre las longitudes l_1 y l_2 igualaban a la relación entre el cuadrado de los tiempos (de oscilación) T_1 y T_2, ó $(l_1/T_1^2) = (l_2/T_2^2)$ que son dimensionalmente aceleraciones.

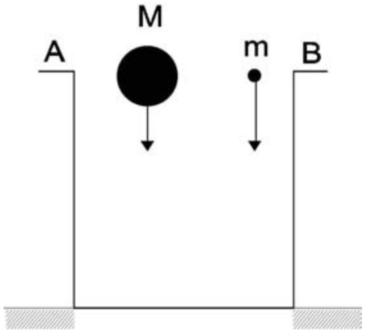

Figura 1.2. Lanzamiento sincrónico de dos masas *M* y *m* con *M* >> *m* desde A y B. La masa M, decía Galileo, opone mayor resistencia a moverse que *m*.

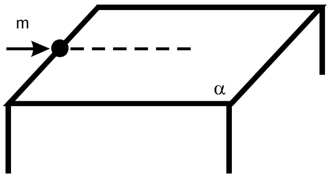

Figura 1.3. Un objeto *m* desplazado con fuerte movimiento rectilíneo y uniforme sobre un plano, seguirá en línea recta hasta los límites del plano. Si el plano se extiende, el movimiento también se extenderá en ausencia de otras fuerzas.

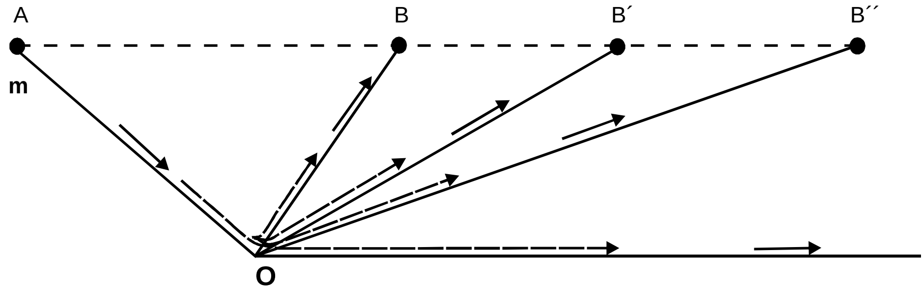

Figura 1.4. Lanzamiento de una bolita de masa *m* desde A. Galileo imaginó en esta experiencia conceptual que ella llegaría en cualquiera de los planos de la derecha al mismo nivel horizontal (B, B', B", ...) hasta que, si el plano desde O se mantuviera sin pendiente, la bolita se desplazaría con velocidad rectilínea y uniforme (la velocidad adquirida en O) ad infinitum. Como físico, Galileo se resistió a confiar en las experiencias mentales que no tuvieran verificación en experiencias reales.

Galileo realizó anuncios fundamentales, y sentó también las bases sobre las cuales Newton formularía el principio de inercia. Señalaremos algunos de sus estudios y reflexiones.

Al poner fin al dogma aristotélico sobre la caída de los cuerpos, Galileo comenzó a razonar desde las antípodas de Aristóteles. Si dos cuerpos de diferente peso caen al mismo tiempo, se dijo, algo habrá que compense la diferencia de peso (Fig. 2). Cuanto más pesado es un cuerpo, mayor será su resistencia a ser movido. Otras de sus experiencias mentales son esclarecedoras. Por ejemplo aquellas vinculadas con el principio de inercia. Galileo imaginó un móvil lanzado sobre un plano horizontal (por ejemplo la superficie lisa de una mesa) con movimiento rectilíneo y uniforme (Fig. 3). Al ir eliminando el roce entre el móvil y la superficie de la mesa, el movimiento persistía más y más, anunciando así que idealmente no se detendría. También imaginó, con su sorprendente ingenio, que un móvil *m*, lanzado desde un plano inclinado AO (Fig. 4) llega al mismo nivel en B, B', B"; es decir, en planos inclinados (a la derecha) con pendientes cada vez menores. En el límite, el plano sería horizontal y el móvil impulsado por la velocidad que tiene en O, se desplazaría “ad-infinitum” manteniendo siempre la misma velocidad.

Sin embargo, Galileo se negaba a realizar generalizaciones más allá de lo que pudiera tener comprobación experimental. Lo demás era considerado, en su mentalidad de experimentador, como metafísico y, por lo tanto, meramente especulativo. El primero en formular la ley de inercia tal cual la conocemos actualmente, fue Descartes. Aunque, enterado de la persecución que la Inquisición hiciera a Galileo, postergó la edición de sus textos evitando, en ese momento, su difusión. Posteriormente, cuando Newton formuló su ley de inercia, reconoció la importancia de los estudios anteriores de Galileo.

Utilizando un madero en forma de cuña, Galileo continuó sus notables avances sobre el conocimiento del movimiento (Fig. 5). Empujando una pequeña esfera de masa m horizontalmente en dirección a la arista “*a*” de la cuña, notó que la masa *m* “caía”, describiendo una parábola. Con esta experiencia Galileo intentó explicar el movimiento de los proyectiles y estableció que cuando ellos son lanzados como en Fig. 5, describen una curva: más precisamente una parábola. Su más brillante discípulo, Evangelista Torricelli, lo generalizó luego para un movimiento inicial cualquiera.

Su mente aguda le permitió comprender que un cuerpo puede tener simultáneamente una componente de velocidad horizontal uniforme y otra vertical uniformemente acelerada.

La componente horizontal es la tendencia que tiene un cuerpo a moverse en línea recta, con velocidad constante, es decir sin aceleración, conservando este movimiento con independencia de su origen. La componente vertical acelerada y la componente horizontal con velocidad constante, aparecen nítidas como consecuencia de los estudios de Galileo.

Al mismo tiempo las trayectorias curvas preocupaban a Galileo. Se preguntaba si no tendría algo que ver el movimiento de la pequeña masa *m* sobre la cuña con el movimiento de la luna alrededor de la Tierra, o con el movimiento de los planetas. Sin embargo, no dejó registro de sus reflexiones ya que en las escalas cósmicas Galileo no se desenvolvía con la misma facilidad que en la escala de sus experimentos locales terrestres.

Otra cuestión esencial: la relatividad de los movimientos, había sido advertida antes de Galileo, por ejemplo, por Copérnico, quien estableció que entre dos barcos que se mueven uno respecto del otro con movimientos rectilíneos y uniformes, es imposible establecer desde cada uno de ellos si se mueven o están en reposo.

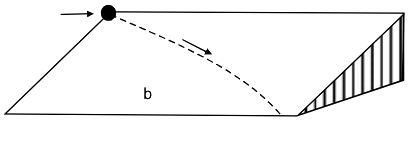

Figura 1.5. Lanzada la masa *m* horizontalmente, pronto comenzará a "caer" describiendo una parábola.

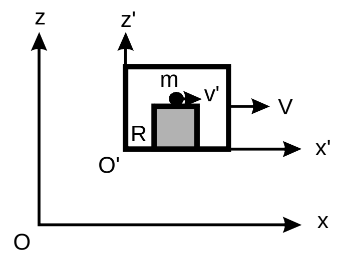

Figure 1.6. Movimientos de un recinto *R* y de una masa interior *m* relativos a un sistema fijo O (x,z).

Nuevamente fue Galileo quien estableció el principio de relatividad que hoy se conoce como sistema inercial o sistema que lleva su nombre. En estos sistemas que se desplazan con movimiento rectilíneo y uniforme, (a las velocidades usuales reconocidas por entonces), las leyes de la mecánica siguen siendo válidas. En ellos, las velocidades netas obedecen a su suma algebraica (Fig. 6).

Consideremos dos sistemas de coordenadas bidimensionales 2D, O(x,z) fijo y O'(x'z') que se mueve respecto de O, con velocidad rectilínea y uniforme *V*. Supongamos que en el recinto de O' una masa *m* se mueve con velocidad *v'* uniforme en la misma dirección que *V*. La velocidad general de *m* respecto de O será, de acuerdo con Galileo,

$$v = v' + V \qquad (1.1)$$

En sus "Diálogos sobre los dos sistemas del mundo", Galileo puso en boca del aristotélico Simplicio, que un objeto que cae desde el tope de un mástil de un barco en movimiento rectilíneo y uniforme, cae sobre la cubierta en un punto lejano al mástil, ubicado entre el mástil y la popa. Mientras Simplicio admitió no haber realizado la experiencia, Galileo afirmó que él sí la había realizado y que el objeto caía exactamente al pié del mástil, tanto con el barco detenido, como con el barco deslizándose con velocidad rectilínea y uniforme.

La Fig. 7 ilustra la descripción de Galileo. Un observador externo, ubicado por ejemplo en tierra firme, verá la caída tal cual se ve en Fig. 7, o como lo vemos nosotros frente al dibujo. Mientras que un observador ubicado sobre el barco en movimiento verá la caída como vertical. O bien como se vería en el barco detenido.

La caída del objeto aparece así ante los dos observadores (externo e interno al barco) como correspondientes a espacios diferentes. Para el observador interno la representación puede hacerse en un espacio unidimensional (la masa m cae en dirección de z, variando con el tiempo). En este caso, el observador del barco toma como referencia al mástil. En cambio, para el observador externo, el espacio es bidimensional. Él hace referencia o a un punto fijo de la costa o al barco fijo antes que comience a desplazarse. Cuando un cuerpo se mueve en el espacio, hacemos referencia siempre a otro cuerpo. Entonces, el espacio es relativo, y depende del observador ó de la referencia que él tome. Pero ni Galileo, ni Newton después, advirtieron la trascendencia de este concepto, que desafortunadamente pasaron por alto.

Como veremos luego, la medición de la velocidad de la luz es clave para entender la concepción física moderna. En épocas de Galileo, y por mucho tiempo, se asumió su propagación como instantánea (velocidad infinita). Galileo sin embargo debe haber sospechado que la velocidad de la luz, aunque notablemente rápida, tiene un valor finito. Prueba de ello es que planificó una forma de medirla colocando observadores nocturnos con linternas sobre colinas distantes. Desafortunadamente, esta forma rudimentaria de trabajar - y la falta de relojes precisos - determinó el fracaso de estos intentos.

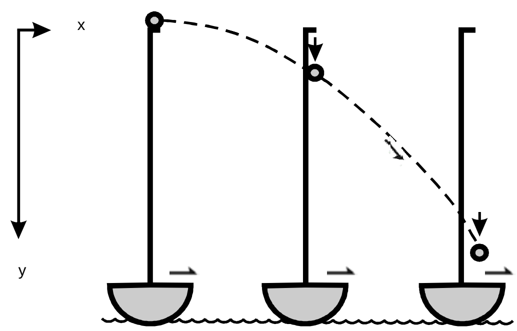

Figura 1.7. Caída de un objeto *m* desde la cima del mástil de un barco que se desplaza con movimiento rectilíneo y velocidad constante.

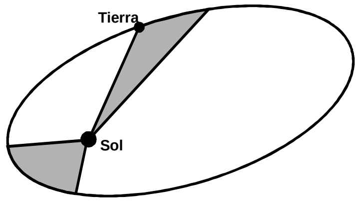

Figura 1.8. Figura que expresa las dos primeras leyes de Kepler.

En principio, según publicara en *Il Saggiatore* (1623), Galileo concibió una teoría corpuscular de la luz, compuesta por átomos indivisibles y velocidad infinita. Pero luego en sus *Discorsi* (1638) cambió de opinión, proponiendo que su velocidad era finita.

Durante mucho tiempo, Galileo y sus contemporáneos creyeron que los planetas describían órbitas circulares. Anteriormente Ptolomeo (90-168) y Copérnico (1473-1543) lo aseguraron también. Todos ellos se basaron en que la naturaleza actúa siempre con la mayor sencillez. Uno de los mayores aportes de Kepler (1575-1630), contemporáneo de Galileo, es haber encontrado mejores resultados para la descripción de las trayectorias de los planetas utilizando elipses. Kepler se basó en las observaciones de Thycho Brahe (1546-1601) considerado el reformador de las observaciones astronómicas simplistas. Para ello ideó instrumentos astronómicos de gran porte y cuidadosa construcción, aunque no dispuso de anteojos astronómicos. Ellos comenzaron a ser utilizados por Galileo pocos años después de la muerte de Thycho. Se dice también que Kepler nunca dispuso de un anteojo astronómico, ni de la forma de construirlo, pese a sus pedidos a Galileo. Sin embargo, otros autores sostienen que por el contrario Galileo le envió a Kepler una carta con explicaciones sobre su construcción y, como éste no pudo hacerlo, le hizo llegar un telescopio.

Copérnico, basándose en un cuidadoso análisis, encontró que reordenando las órbitas de los planetas y ubicando al sol en el centro, aparecía una sorprendente regularidad. El planeta más lento, Saturno, era el más alejado del sol, mientras Mercurio era el más rápido y el más cercano al sol. Tanto Kepler como Galileo aceptaron el sistema heliocéntrico, terminando así con la concepción de Ptolomeo de un Universo geocéntrico. Todos los estudios de Kepler referidos al sistema solar se basaron fundamentalmente en el material dejado por Thycho y en sus propias observaciones de Marte. Así, encontró sus dos primeras leyes que sostienen: (1) que las órbitas de los planetas son elípticas, con el sol en uno de sus focos; y (2) que las velocidades areales de los planetas son constantes. O dicho de otra manera: el radio vector sol-planeta barre áreas iguales en tiempos iguales. Cuanto más cerca del sol está el planeta, más rápidamente se mueve ó mayor es su velocidad lineal (Fig. 8).

Casi una década más tarde, y basándose en las observaciones de Brahe sobre los satélites de Júpiter, Kepler presentó su tercera ley. Ella relaciona la distancia *a* del planeta al sol con el período de revolución *T*, encontrando que: $a^3/T^2 = K$ (constante).

La primera ley de Kepler establece que las órbitas planetarias son elípticas, condenando al olvido a las órbitas circulares. La segunda ley señala que los movimientos de los planetas no son uniformes: su velocidad aumenta en las cercanías del sol. De la tercera ley, presentada nueve años más tarde, Kepler no parece haber sacado mayores conclusiones. Sí, en cambio, fue fundamental para Newton (ver expresión 1.6).

El 8 de enero de 1642, completamente ciego y condenado por la Inquisición a reclusión domiciliaria, en la villa de Arcadi, cerca de Florencia, moría Galileo. Casi un año después, el 5 de enero de 1643, nacía Newton (de acuerdo con el calendario que se considere 1643 o en 1642, en este útimo caso en el mismo año de la muerte de Galileo) para tomar la posta que dejara Galileo, avanzando hasta ofrecer la primera explicación coherente y fundamentada del funcionamiento del Universo.

Con anterioridad a Newton, Galileo y Kepler habían pensado que una fuerza central proveniente del sol mantiene en órbita a los diferentes planetas. Se había aludido en principio a fuerzas atractivas de origen magnético. Pero las enormes distancias entre los planetas, y más aún el hecho que cualquier objeto amagnético (por ejemplo de madera) fuera atraído, hicieron que pronto descartaran esta línea de pensamiento.

Veamos como construyó Newton su teoría de la gravitación. Inspirado en los estudios de Galileo presentó dos de

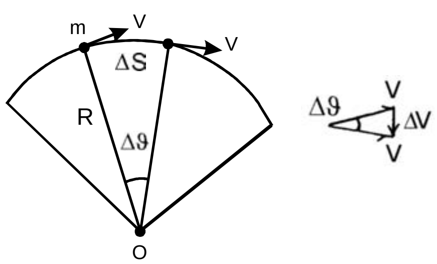

Figura 1.9. Movimiento circular aledeador de O (v = cte.).

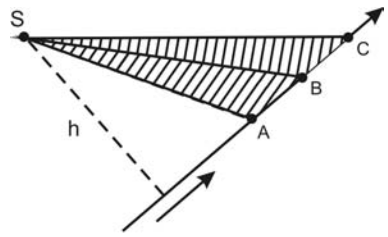

Figura 1.10. Movimiento puramente inercial. La masa m se desplaza con v = cte. AB=BC ... También las áreas son iguales SAB = SBC ... debido a que ellas tienen la misma base y altura h.

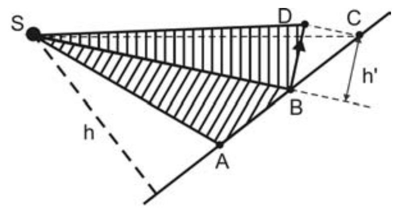

Figura 1.11. Ante una fuerza central Fc, la trayectoria es ahora ABD. La igualdad de las áreas se mantiene dado que: SBC = SBD (tienen la misma base SB y la misma altura h'). DC es paralela a SB.

las tres leyes que hoy llevan su nombre. La primera de estas leyes fue formulada diciendo que un cuerpo animado de una velocidad rectilínea constante, persistirá indefinidamente en ella, en ausencia de otras fuerzas que lo perturben.

Su segunda ley, en apariencia simple, era también fundamental. Al recibir una Fuerza *F*, un objeto adquiere una aceleración *a*. Esta es tanto mayor cuanto menor es la resistencia que opone el objeto al cambio. A esta resistencia la denominó masa *m*, y la consideró constante, e independiente del movimiento, de modo que:

$$F = ma \tag{1.2}$$

La tercera ley corresponde a las acciones recíprocas entre cuerpos, y es -sin duda- de enorme trascendencia. Es el principio de acción y reacción, que expresa las interacciones tanto entre los planetas como entre objetos cualesquiera.

Para avanzar en sus estudios Newton creó el análisis infinitesimal, abriendo un camino notable para la matemática e inaugurando al mismo tiempo una disputa histórica con Leibnitz (si se quiere ríspida y desleal por parte de Newton), sobre la paternidad de tan estupendo hallazgo, al cual es muy probable que ambos hayan llegado independiente y contemporáneamente.

Otro paso importante lo dió Newton al comprender que existe una fuerza central, llamada centrípeta, y al encontrar una expresión para la aceleración que se origina ante el cambio de dirección que experimenta un objeto en su movimiento circular: $a_c = v^2/R$.

Este estudio también originó una disputa, esta vez entre Newton, quien en este caso parece haber sido quien lo concibió primero, y Huygens, quien -no obstante- la publicó antes que Newton.

La Fig. 9 muestra un cuerpo de masa *m* que gira alrededor de O (a distancia *R* de *m*) con velocidad lineal de módulo constante *v*. En este movimiento, la velocidad lineal es:

$$V = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta S}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{R\,\Delta\theta}{\Delta t} = Rw, \text{ con } w = \frac{\partial\theta}{\partial t} : \text{velocidad angular}$$

A partir de aquí podemos calcular la aceleración centrípeta normal a_n debida al cambio *V* en la dirección de la velocidad *v*.

Así:

$$a_n = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} v \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} v \frac{\Delta\theta}{\Delta s} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{v^2}{R} = Rw^2 \tag{1.3}$$

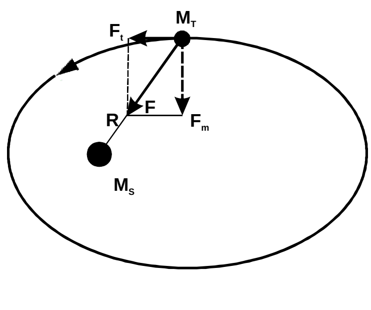

Figura 1.12. Atracción en el sistema Tierra-Sol.

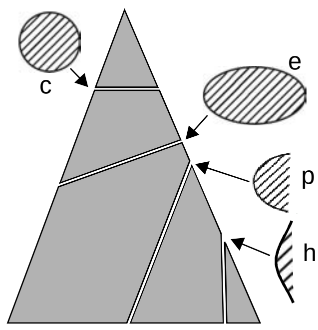

Figura 1.13. Secciones cónicas que representan las órbitas de los cuerpos celestes (e, p, h).

Debido a que el módulo de la velocidad v es constante, la otra aceleración (la aceleración tangencial) es cero.

Munido de estas herramientas, Newton comenzó a analizar las leyes de Kepler, tratando de encontrar para ellas un sentido físico. Hasta entonces se las consideraba sólo numerología. Las Figs. 10 y 11 muestran los resultados alcanzados.

Incorporando la fuerza central F_c hacia S, la trayectoria se quiebra siguiendo una sucesión de segmentos que si se hacen infinitamente pequeños conforman una curva.

Ante la sugerencia de Hooke, Newton trabajó sobre la idea de una atracción inversamente proporcional al cuadrado de la distancia ($1/d^2$). Con la llamada "prueba lunar" realizó una eficaz verificación. Sabía que sobre la superficie terrestre, distante un radio R del centro del planeta, un cuerpo cae recorriendo casi 5 metros en 1 segundo. La luna, distante unos 60 radios terrestres, caerá $1/60^2$ de 5 metros o sea unos 0.14 centimetros. Con los datos disponibles, Newton comprobó con suficiente aproximación este resultado, valiéndose de la suposición de un movimiento circular con velocidad uniforme para la luna (sin ser afectada por el sol) y su "caída" desde su posición tangencial (inercial) en un segundo.

Al llegar aquí, Newton disponía de todo lo necesario para encontrar la expresión correspondiente a la atracción universal.

Partió de su segunda ley, imaginando un planeta de masa m que se mueve sobre una órbita circular de radio R

$$F = ma_n = m\frac{v^2}{R} \tag{1.4}$$

Si T es el tiempo que necesita el planeta para dar una vuelta completa: $v=2\pi R/T$, y $F=m(2\pi R/T)^2 1/R$, ó bien:

$$F = \frac{4\pi^2 R}{T^2} m \tag{1.5}$$

Aquí introdujo la expresión encontrada para la tercera ley de Kepler: $K = R^3/T^2$, de donde:

$$F = m\frac{4\pi^2 K}{R^2} \tag{1.6}$$

Si multiplicamos y dividimos por M_s (la masa del sol) se tendrá:

$$F = \left(\frac{4\pi^2 K}{M_s}\right)\frac{M_s m}{R^2} = G\frac{M_s m}{R^2} \tag{1.7}$$

Debido a que esta ley es válida para todo objeto de la naturaleza:

$$F = G\frac{m\,m'}{d^2} \tag{1.8}$$

La Fig. 12 ilustra el caso para el sistema Tierra-Sol.

A partir de la ecuación de movimientos de Newton:

$$F = M_T \ddot{R} \tag{1.9}$$

y realizando una doble integración, se obtiene la posición del vector R.

Newton pronto se dió cuenta que las órbitas de los cuerpos celestes describen no sólo elipses sino, en general, secciones cónicas como parábolas o hipérbolas, con el sol ocupando uno de sus focos (Fig. 13).

Cuando la energía cinética que lleva el planeta en movimiento no es suficiente para llevarlo al infinito, su órbita

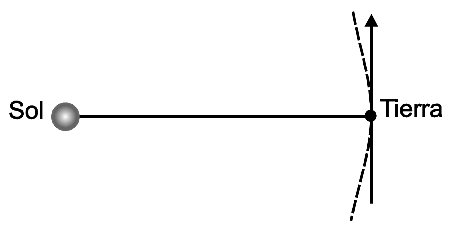

Figura 1.14. La Tierra como una nave espacial recibe la luz del sol en dirección perpendicular a su trayectoria. El movimiento de la Tierra durante el corto período que dura el experimento puede considerarse como rectilíneo y uniforme.

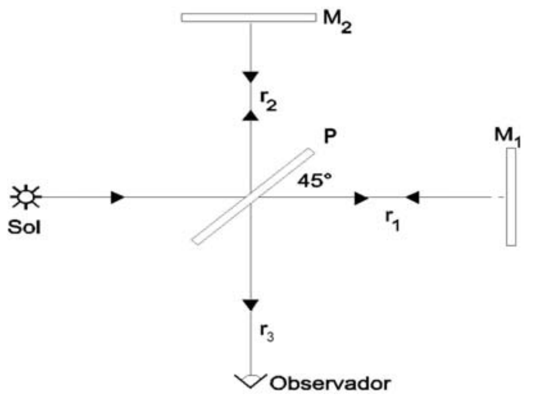

Figura 1.15. Esquema elemental del interferómetro de Michelson. La lámina P (a 45° respecto del haz del sol) con un delgado revestimiento de plata en la cara posterior, refleja la mitad del haz luminoso (rayo r_2) y transmite la otra mitad (rayo r_1). Los espejos M_1 y M_2 a exactamente la misma distancia d de P, son perpendiculares entre sí y devuelven los rayos hacia P, donde vuelven a reflejarse y refractarse parcialmente, de modo que en r_3 hay dos rayos superpuestos que pueden interferir entre sí. Si se hace girar el aparato (que puede moverse sobre una plataforma que flota sobre mercurio), las franjas de interferencia mantendrán una posición invariable si la velocidad de la luz es la misma en cualquier dirección. Esto fue exactamente lo que ocurrió en la experiencia conducida por Michelson.

será elíptica. Tanto la elipse como la circunferencia son las únicas secciones cónicas que dan lugar a movimientos recurrentes. Las órbitas elípticas de los planetas son casi circulares, en cambio muchos cometas se mueven en elipses sumamente alargadas. Si el objeto sigue una órbita parabólica o hiperbólica, pasará sólo una vez cerca del cuerpo atractivo alejándose luego de él para siempre.

En realidad, los planetas en el sistema solar interactúan entre sí. El sistema aislado Tierra-Sol es una abstracción o, si se quiere, una simplificación. Sólo en un sistema tal, la órbita sería estrictamente elíptica. De existir otros planetas, la órbita sufriría alteraciones. El problema matemático es de gran complejidad. Aún si consideramos el caso de sólo dos planetas y el sol, estaremos ante el problema de los tres cuerpos, aún no resuelto completamente. Sin embargo desde el punto de vista práctico tenemos suerte. Dada la gran masa del sol, mil veces superior a la masa de Júpiter, planeta que lo sigue, las órbitas se calculan suficientemente bien ignorando otros efectos (véase Fig. 12).

La teoría de Newton pronto se hizo fuerte, muy fuerte. Su capacidad predictiva, el éxito de sus validaciones, le acordaron un reconocimiento general y la admiración de físicos, de astrónomos y de toda la comunidad en general.

El alcance de la teoría de Newton es notable. Ella comprende a las leyes de Kepler y sus explicaciones físicas; al movimiento de los planetas y su forma (por ejemplo el achatamiento de la Tierra); al fenómeno de las mareas; a la precesión; a la predicción de eclipses; a la predicción de la existencia de nuevos planetas. También inspiró a Coulomb, quien propuso la conocida expresión de las cargas eléctricas, de notable analogía con la fórmula newtoniana.

Newton, prosiguiendo a Kepler y a Galileo, contribuyó decididamente al éxito de la doctrina de Copérnico. Su ley de gravedad controla tanto al movimiento de una manzana, como al movimiento de la luna alrededor de la Tierra, y de ésta alrededor del sol. Su obra fundamental “Los Principios” (1687) comprende todos los conocimientos anteriores y gran parte de las bases de todos los posteriores. En él explicó los conceptos de masa, peso y fuerza. Formuló las tres leyes del movimiento y la ley de gravedad, dándole carácter de universal. Newton ha sido considerado por no pocos como el padre de la astronomía moderna, de la matemática y de la física.

Al mismo tiempo que Leibnitz creó el cálculo diferencial e integral, y también el espectro solar a partir del análisis de la luz natural.

Edmundo Halley, editor de “Los Principios”, pronosticó el regreso, luego de 65 años, del cometa bautizado con su nombre. Claireaut calculó luego, en base a perturbaciones de Júpiter y Saturno, una órbita más exacta de aproximadamente 76 años. U.J.J. Leverrier en 1846, a partir de las perturbaciones de Urano, descubrió a Neptuno. De un modo similar, P. Lowell descubrió en 1930 a Plutón.

En 1798, Enrique Cavendish realizó la primera comprobación experimental de (1.8) cuando determinó en laboratorio la constante de gravitación universal *G*.

Sin embargo la teoría, no obstante su reconocida fortaleza, no pudo explicar fundamentalmente dos cosas: ni la naturaleza de la gravedad, ni el corrimiento del perihelio de la órbita de Mercurio de casi 43" por siglo.

Agregamos a ello que la teoría, al ser netamente mecanicista, no explica los cambios que se producen en el interior de la materia, imprescindibles hoy para comprender las mutaciones del Universo.

La teoría de Newton supone: masas constantes, efectos atractivos de propagación instantánea, un espacio absoluto y un tiempo absoluto.

Le teoría newtoniana resistió algo más de 200 años. Al llegar a fines del siglo XIX y principios del siglo XX, una serie de hechos inesperados, de descubrimientos físicos asombrosos, comenzaron a poner en aprietos a la teoría y a su base filosófica.

Las admirables ecuaciones de Maxwell no reconocen la acción a distancia y señalan que el tiempo no es absoluto.

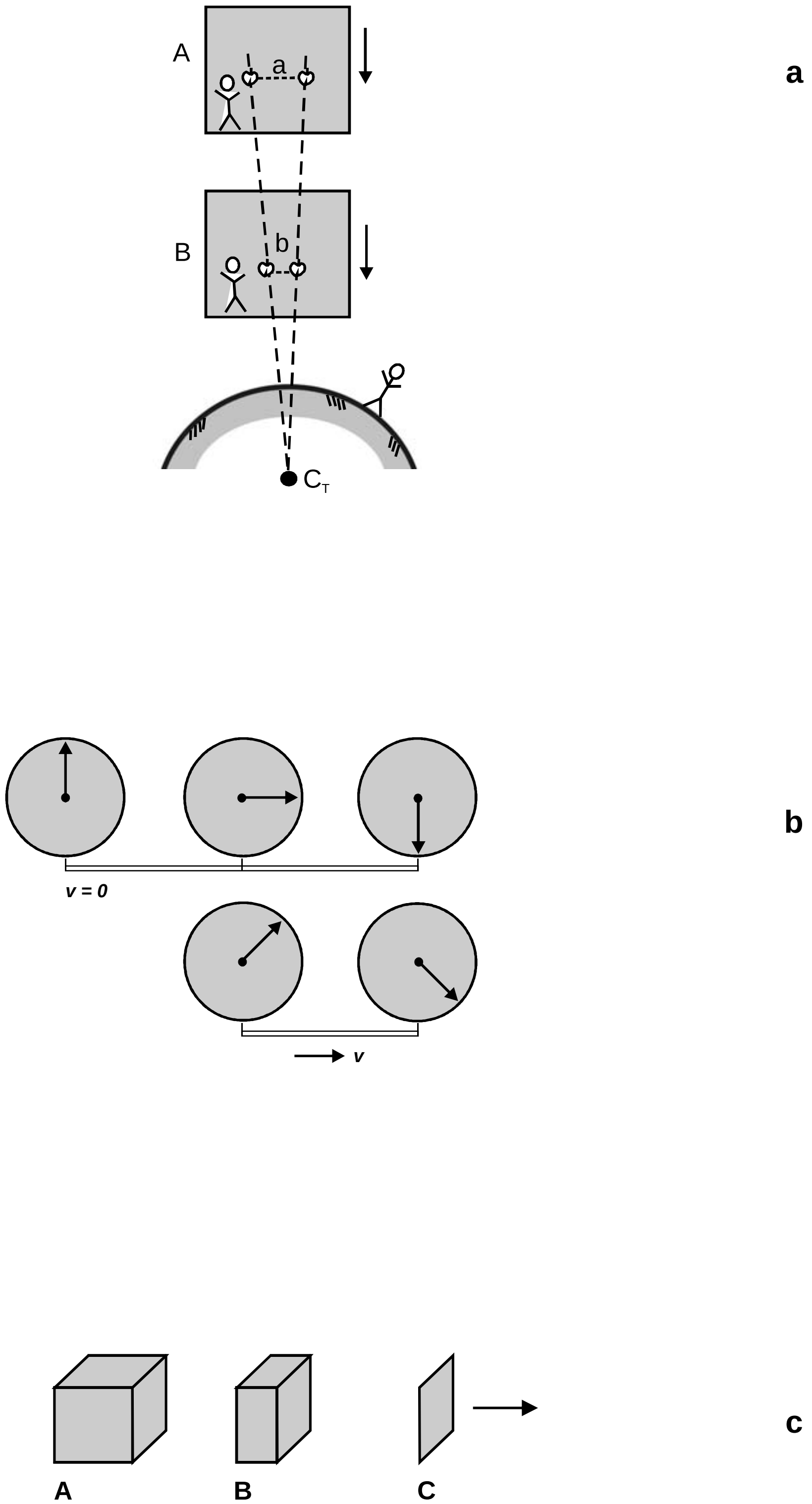

Figura 1.16. a. Experiencia conceptual de Eddington que demuestra que los movimientos son relativos. El observador interior creerá que las manzanas se atraen (b < a) sin cambiar su nivel, cuando el recinto cae de A a B. Por el contrario, el observador externo verá que las masas se deslizan hacia el centro de la Tierra.**b.** Cambio de marcha de los relojes de un sistema en movimiento (abajo) respecto de los relojes de un sistema inmóvil (arriba). **c.** Contracción del espacio. A: cubo en reposo. B: cubo que se contrae en un 60 % en dirección del movimiento con velocidad v = 240000 km/s. C: el cubo alcanza la velocidad máxima de 300.000 km/s (máxima contracción).

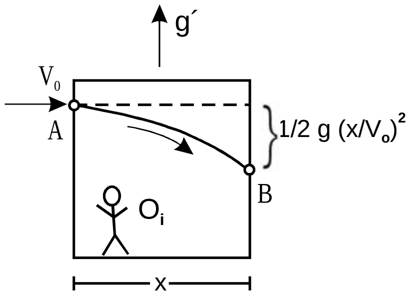

Figura 1.17. Experiencia mental de Einstein.

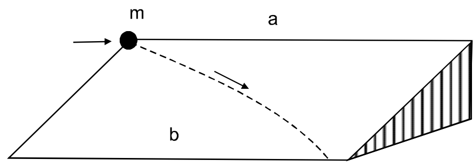

Figura 1.18. Experiencia de Galileo.

Ellas tienen exactamente la misma forma, cualquiera sea el sistema móvil en que se formulen, y llevan impresas en su concepción a la teoría de la relatividad, que luego a principios del siglo XX formulara Einstein.

Los físicos descubrieron que los electrones emitidos por las substancias radioactivas se desplazaban a grandes velocidades, por entonces inimaginables, de 15000 km/s. Las velocidades consideradas antes eran enormemente más bajas. Pensemos que una locomotora de entonces no llegaba a recorrer 50 m en 1 s.

Además se descubrió que los electrones a tan altas velocidades alteraban su masa y esto contradecía a Newton, quien había sostenido que la masa era constante respecto del movimiento.

Las mediciones precisas, cuidadosas, de Michelson encontraron que la velocidad de la luz tenía un valor c = 300.000 km/s, y además revelaron un hecho sorprendente. Su valor era independiente de la velocidad del observador (hoy se admite para c el valor 299.792,458 km/s).

Antes Galileo había sospechado que su propagación no era instantánea; y luego un contemporáneo de Newton, Röemer, astrónomo danés, encontró un valor finito para c en 1676. Él tomó como referencia el ocultamiento del satélite más cercano a Júpiter y advirtió que las predicciones de los eclipses se atrasaban más y más a medida que la Tierra se alejaba de Júpiter. Esto es debido a que la luz recorría cada vez mayor camino. La propagación de la luz no es instantánea, se dijo, y con los valores de distancias de entonces obtuvo para c un valor de 220.000 km/s. Digamos de paso que esta ingeniosa determinación de la velocidad de la luz constituye otra prueba a favor del sistema copernicano.

A mediados del siglo XIX, operando con ruedas dentadas y con espejos, con nuevos experimentos se obtuvieron valores de casi 300.000 km/s. Años más tarde y como ya lo señaláramos Michelson, en experiencias que le llevaron toda su vida, trabajando con un interferómetro por él diseñado, encontró para la velocidad de la luz un valor de 300.000 km/s y, asombrosamente, aseguró que este valor era independiente del movimiento del observador.

Hasta ese momento los físicos admitían que el desplazamiento de la luz necesitaba del éter, una trama tenue, ideal, completamente fluida, perfectamente elástica e imponderable, sin peso, de modo tal que esta trama sutil hacía posible transportar a través de millones de kilómetros a las radiaciones ondulatorias sin hacer decrecer su energía inicial. ¿No sería un hábito mental que nos exigía un soporte? Del mismo modo, en épocas lejanas se creía que era imprescindible que hubiera soportes para la Tierra porque de lo contrario caería en el espacio. Debido a las dudas sobre la presencia del éter, Michelson se empeñó en comprobar su existencia. Él debía frenar en alguna forma a la luz. Para comprender cómo el éter debería ofrecer un obstáculo, un freno al pasaje de la luz, reparemos en la siguiente analogía: los pescadores del río Paraná saben que se tarda más en remar aguas arriba una distancia D en dirección de la corriente y volver al punto de partida, que en recorrer una distancia igual D transversalmente a la corriente ida y vuelta. Al apelar a esta analogía, Michelson pensó que el éter fijo (sistema de referencia fijo) retardaría menos a la luz si los rayos se propagan perpendicularmente al movimiento de la Tierra alrededor del sol, que si lo hicieran en el espacio en la misma dirección que aquélla. De no existir el éter no importaría cual

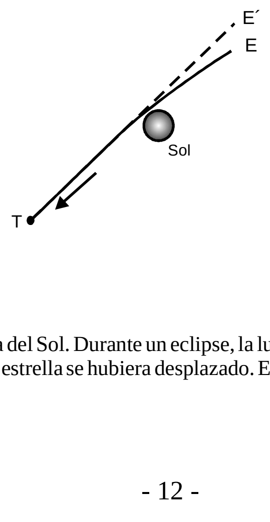

Figura 1.19. Curvatura de un rayo luminoso al pasar cerca del Sol. Durante un eclipse, la luz de una estrella E, que pasa cerca de la superficie del Sol, se verá desde la Tierra como proveniente de E', es decir como si la estrella se hubiera desplazado. Este desplazamiento aparente es pequeño.

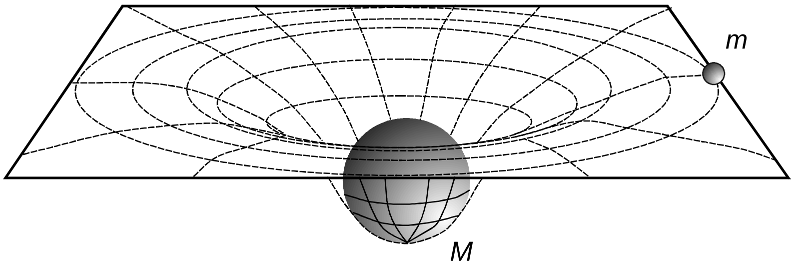

Figura 1.20. La presencia de una masa *M* deforma el campo, curvándolo. Un símil no riguroso podría ser una lámina (de hule por ejemplo) que se deforma (se deprime) al soportar a la masa *M*. Pero en este caso debemos ser cuidadosos. No es la masa *M* la que atrae o determina el movimiento de *m*, sino el espacio curvo el que da forma a la trayectoria que siguen los objetos.

fuera la dirección de los rayos de luz. Michelson consideró que la Tierra era una nave espacial que gira alrededor del sol con respecto al éter inmutable (sistema de referencia fijo). El plan trazado consistía en enviar un rayo de luz sobre una distancia conocida en dirección al sol y en dirección perpendicular a él, recorriendo la misma distancia. Ambos rayos deberían ser emitidos en el mismo instante y luego de ser reflejados y de recorrer la misma distancia, deberían regresar al punto de partida. Los resultados fueron asombrosos. Michelson probó que la luz se propagaba con la misma velocidad en todas direcciones, independientemente del desplazamiento del Observador. Todo ocurría como si la Tierra estuviera siempre inmóvil (Figs. 14 y 15).

Al realizar los experimentos, Michelson pensó en la composición de velocidades de Galileo (1.1). Pero la experiencia contradecía estas ecuaciones: las dos mitades del haz de luz dividido retornaban virtualmente en el mismo instante.

La forma de solucionar estos hechos exigiría admitir: $c \to \infty$, pero *c* era finita. El físico irlandés Fitzgerald propuso que una varilla viajando en la misma dirección que la luz debía contraerse. Pero se sabe que la resistencia eléctrica de un alambre depende de su longitud y puesto en movimiento el alambre su resistencia no cambia.

Hacia 1905 Einstein dijo: entre un sistema de cuerpos que se mueven unos respecto de otros con movimiento rectilíneo y uniforme, puede suponerse en reposo a cualquiera de ellos, debido a que ningún experimento, ni óptico ni eléctrico ni mecánico, revelará la más mínima diferencia de comportamiento.

Recordemos el caso ya comentado en el que Galileo razonó en base a dos barcos, uno fijo y otro móvil (con velocidad rectilínea constante) ó bien pensemos en un tren desplazándose con *v* constante. Si hacemos rebotar verticalmente en el piso del tren una pelota de tenis, ésta regresará a la misma posición del piso, mientras para un observador exterior, luego de botar una vez, la pelota se desplazaría unos 40 m, o sea la distancia recorrida por el tren entre los dos botes. No existe pues, como ya señaláramos, una posición absoluta o bien un reposo absoluto o espacio absoluto. No tenemos forma de preferir uno u otro observador como bien puede verse en otra experiencia conceptual, debida a Eddington (Fig. 16a). El espacio es relativo al observador, al sistema de referencia que adopte, y debido a que la velocidad *c* es constante e independiente del observador, el tiempo deberá también variar con el observador para garantizar la constancia de *c*. Las ecuaciones de Maxwell señalaban ya que el tiempo no es absoluto. En otras palabras, cada observador debe tener su propia medida del tiempo, que es precisamente la del reloj que se mueve junto con él. Idénticos relojes moviéndose con observadores que se desplazan a velocidades diferentes no tienen por qué coincidir.

Einstein demostró que:

1) el tiempo es relativo: se dilata en un sistema de referencia en movimiento. Por ejemplo, si un vehículo pudiera desplazarse a 240000 km/s, los relojes en su interior marcarían 0.6 s, cuando en un sistema en reposo los relojes marquen 1 s (Fig. 16b).
2) el espacio es también relativo: se contrae en la dirección de su movimiento. La Fig. 16c señala la contracción espacial. El cubo en reposo (A) se contrae en un 60 % al alcanzar la velocidad de 240000 km/s (B).

Tanto las contracciones mutuas de las longitudes como el atraso mutuo de los relojes son muy semejantes a los efectos de la perspectiva. Por ejemplo, si dos personas de la misma altura se alejan, se detienen y se vuelven para mirarse, cada una pensará que la otra ha disminuido de tamaño. Sin embargo, esta contracción mutua no nos parece extraña, simplemente porque nos hemos acostumbrado a ella.

El tiempo y el espacio son pues cantidades dinámicas, mientras *c* es la constante central. Debido a este carácter dinámico de ambos, debemos hablar de una entidad: el espacio-tiempo.

Consecuencia cinemática

Si un tren se mueve respecto de la vía con velocidad *v*, y dentro del tren un móvil se desplaza con velocidad *u* respecto del tren, la velocidad del móvil respecto de la vía no será $u+v$ como viéramos en (1.1) sino:

$$w = \frac{u+v}{1+\frac{uv}{c^2}} \qquad (1.10)$$

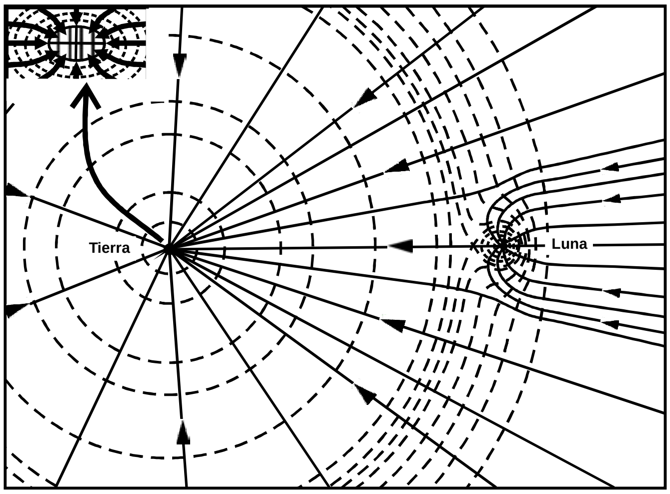

Figura 1.21. Campo gravitatorio del sistema Tierra-Luna (arriba izquierda, detalle). Las líneas de trazos son las equipotenciales y las flechas en líneas sólidas las líneas de fuerza.

con c: velocidad de la luz.

Consecuencias dinámicas

Otra cuestión importante encontrada por Einstein fue la equivalencia entre masa y energía de acuerdo con una sencilla ecuación:

$$E = mc^2 \tag{1.11}$$

con E: energía y m: masa. La masa varía con la velocidad v de acuerdo con:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}} \tag{1.12}$$

con m_0: masa en reposo

Es decir, si la masa m inicialmente en reposo se mueve respecto del observador con velocidad v, ella aumentará según la expresión (1.12).

Once años después de haber presentado su teoría de relatividad restringida, válida para movimientos rectilíneos y uniformes, Einstein generalizó su teoría haciéndola válida para movimientos cualesquiera. Una experiencia conceptual lo puso en el camino de la solución. Volvamos al recinto de Fig. 17 y pensemos que está ahora en un campo hipotéticamente ingrávido. Si de pronto empujamos el recinto imprimiéndole un movimiento uniformemente acelerado g hacia arriba, el observador interior percibiría que los objetos "caen" exactamente de la misma forma que si estuviéramos en el campo gravitatorio conocido. Si se colocan masas de diferentes pesos y de diferentes substancias, todas caerían en la misma forma, tal como lo comprobara Galileo. Llegó así a la conclusión que en cada punto del espacio no es posible determinar si hay un movimiento uniformemente acelerado sin campo gravitatorio o si en realidad hay un campo gravitatorio newtoniano. Este es su famoso principio de equivalencia.

Luego de largas y profundas reflexiones, Einstein pensó que la explicación sobre la gravitación estaba en el espacio mismo. Lejos de mantener el espacio euclídeo, sostuvo que el espacio es curvo.

Los físicos del siglo pasado edificaron toda la física en base al concepto de materia. Hoy se conciben dos conceptos: materia y campo, con enormes depósitos de energía para la primera y menor energía para el campo que envuelve a la materia.

Volvamos al recinto en movimiento hacia arriba con aceleración $-\vec{g}$ (o - lo que es lo mismo - ubicado en un campo gravitatorio $\vec{g}$). En un campo tal, una pequeña bolita es lanzada horizontalmente desde A (Fig. 17) con velocidad constante v_0 en la pared de la izquierda. Del mismo modo que en el caso de la composición de los dos movimientos analizada por Galileo (Figs. 5 y 18), la bolita describirá una curva e interceptará a la pared de la derecha en B. La trayectoria para un observador interior Oi se presentará como una curva.

Einstein no se limitó a considerar casos sólo mecánicos como fuera descripto, sino que extendió estos conceptos a todo tipo de experimentos. Por ejemplo, sabemos que la luz es una propagación electromagnética. Ella se comporta como onda y como partícula y por supuesto propaga energía. Es fácil imaginar que la bolita de las Figs. 17 y 18 puede ser reemplazada por la luz. Y así, la luz se curva al atravesar un campo gravitatorio (Fig. 19). Como ya lo señaláramos, Einstein se dio cuenta que la explicación del origen del campo gravitatorio estaba en el espacio mismo. Abandonó entonces la propagación rectilínea del espacio euclideo, concibiendo un espacio curvo donde los efectos son locales y no remotos como lo creyera Newton. Einstein vio en la trayectoria de nuestro planeta la prueba evidente de la naturaleza no euclidea del espacio. En realidad no existe ninguna fuerza atractiva desde el sol. Lo que ocurre es que el espacio de 3 dimensiones que rodea al sol es curvo, y sólo significativamente lejos de toda masa gravitacional puede considerarse euclideo. Además, ante la curvatura del espacio tenemos la curvatura del tiempo. Él transcurre más lentamente cuanto mayor es el campo gravitacional. En síntesis, la gravitación es la manifestación del espacio-tiempo. Así, la existencia de masa como podemos ver en las Figs. 19 y 20, origina el espacio curvo. En la Fig. 21, la presencia de la masa lunar modifica el campo distante de la Tierra. Ambas masas, la de la Tierra y la de la Luna, originan en sus respectivos entornos campos curvos. La fuerza gravitatoria no depende directamente de las masas en juego, pero sí se manifiesta por la curvatura del espacio-tiempo. La teoría de la relatividad general retiene el principio de inercia, pero para un espacio curvo.

Recapitulando, para Einstein no hay fuerza de gravedad, ni éter. No hay necesidad de ellos dado que los planetas siguen los caminos de mínima distancia (las geodésicas) en el espacio curvo. Al llegar aquí debemos señalar que las órbitas de los planetas serían líneas geodésicas en el espacio tridimensional. En la imagen einsteniana el espacio mismo resulta curvo, mientras los planetas se mueven según líneas geodésicas, es decir geodésicas de este espacio tetradimensional (Fig. 22) que denominamos *l*. Debido a que en la figura las escalas horizontal y vertical no guardan relación real, debemos señalar que la geodésica *l* está realmente tan estirada que se aparta muy poco de una línea recta.

Es el espacio el que se curva, dijo Einstein. Recordemos que es el recinto acelerado (Fig.17) el que “curva” el espacio. En realidad el rayo de luz que lo atraviesa sigue siendo recto. Si reemplazamos el recinto móvil por un campo masivo, podremos asegurar que donde exista masa, ella determina un espacio curvo a su alrededor, es decir, localmente. Si nos referimos a la masa de nuestro planeta, ella origina un espacio cóncavo y por él se desplaza la luna, de la misma forma que se mueve una bola por las paredes curvadas del plato de una ruleta (Fig. 20). En suma, la gravitación se describe ahora como la curvatura del espacio en presencia de materia. Ahora podemos comprender tanto la naturaleza del campo de gravedad como la recomendación de la Unión Astronómica Internacional, hoy en plena vigencia, de introducir la teoría general de la relatividad para la definición de un sistema de referencia espacio-temporal. Al existir una densidad cósmica, el Universo como un todo se curva, ya no es euclideo, está determinado por la distribución de materia y por su velocidad.

Ambas teorías, la de la relatividad especial (T.R.E.) y la de la relatividad general (T.R.G.), han sido bien verificadas

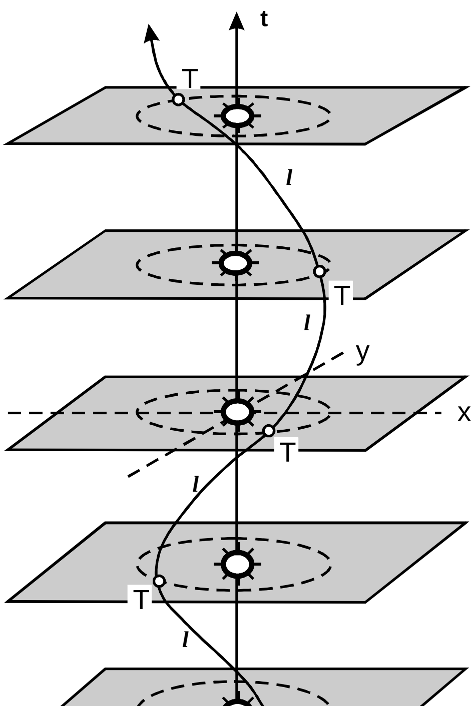

Figura 1.22. La línea helicoidal de la Tierra *l* es una geodésica en un espacio-tiempo (x,y,t).