

| | |
|---|-----------|
| 1. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL CONOCIMIENTO DE LA TIERRA | 2 |
| 1.1. LOS PRECURSORES DE COPÉRNICO..... | 3 |
| 1.1.1. HERÁCLIDES DEL PONTO Y LA ROTACIÓN DE LA TIERRA. | 3 |
| 1.1.2. ARISTARCO, EL COPÉRNICO DE LA ANTIGÜEDAD..... | 3 |
| 1.1.3. LA ESCUELA DE ALEJANDRÍA. EL SISTEMA DE LOS EPICICLOS O SISTEMA DE PTOLOMEO... | 3 |
| 1.1.4. EL TAMAÑO DE LA TIERRA ENTRE LOS GRIEGOS..... | 4 |
| 1.2. COPÉRNICO (1473-1543)..... | 4 |
| 1.3. JOHANNES KEPLER (1571-1630) | 6 |
| 1.4. GALILEO GALILEI | 8 |
| 1.5. ISAAC NEWTON..... | 11 |
| 1.6. ALBERT EINSTEIN..... | 15 |

1. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL CONOCIMIENTO DE LA TIERRA

La Geodesia en su definición más elemental es la ciencia que estudia la Forma y Dimensiones de la Tierra, y fueron en efecto los griegos los verdaderos padres de las ciencias de la tierra y los primeros que intentaron satisfacer estas inquietudes milenarias.

El primer gran paso de la astronomía fue reconocer la Tierra como un cuerpo celeste.

Anaximandro, el más interesante de los filósofos jónicos, nos ofrece muchos progresos fundamentales. Para él, la Tierra es cilíndrica, tres veces más ancha que profunda y únicamente con la parte superior habitada. Pero la Tierra está *aislada en el espacio* y el cielo es una *esfera completa* en el centro de la cual se sostiene, sin soportes, nuestro cilindro. Encontrándose la Tierra a igual distancia de todos los puntos del cielo, Anaximandro no veía ninguna razón para caer hacia uno de ellos. Los jónicos han supuesto, más tarde, que la Tierra estaba en el corazón de un torbellino y sostenida por él. Según Anaximandro, los astros pertenecen a ruedas tubulares opacas que contienen fuego y en las cuales, en ciertos puntos, un agujero deja ver este fuego. Estas ruedas, diversamente inclinadas sobre el eje del cilindro terrestre, giran alrededor de él; este es, sin duda, el advenimiento del *círculo* en cosmología. En su obra, por último, se encuentra la primera alusión a las distancias precisas: colocaba a las estrellas más cerca que la Luna y el Sol. Por lo tanto, en su época, jamás se había observado todavía, una ocultación de estrellas por la Luna!. La rueda de las estrellas, con sus millares de agujeros (?) tiene por radio interno nueve diámetros terrestres; la rueda de la Luna dieciocho diámetros; la rueda del Sol, veintisiete diámetros. El orificio del Sol es igual a la Tierra. Los eclipses y las fases de la Luna resultan de la obturación de sus respectivos agujeros. En tanto florecía la escuela Jónica, surgía en el otro extremo del mundo griego, en Italia meridional (Crotona), hacia el fin del siglo VI, la escuela Pitagórica, que debía tener, durante dos siglos, una importancia de primer plano. Pitágoras mismo es una figura en gran parte legendaria, de la cual sabemos muy poco. Por deferencia, se tiene la costumbre de atribuirle casi todos los descubrimientos posteriores de la Escuela y el sistema cosmogónico que lleva su nombre, presenta todas las características de lo apócrifo (en particular importa una clasificación de los planetas muy posterior en Grecia) y que no encontramos entre los pitagóricos, de quienes poseemos sus escritos. La Escuela formaba una especie de secta mística, muy aristocrática, que se mezclaba con la política y estuvo en lucha contra los demócratas que acabaron destruyendo sus focos. Los pitagóricos eran devotos de la ciencia, sobre todo de las matemáticas. Para ellos el *número* lo era todo: regía la música, el curso y el orden de los astros; las especulaciones sobre la "armonía de las esferas" frecuentaron los espíritus, desde Pitágoras hasta Képler. Es en el ambiente pitagórico, en el comienzo del siglo V y fuera de cualquier base experimental, es donde nace la idea de una Tierra esférica, por razones de belleza geométrica, de perfección, de analogía con la esfera celeste; razones muy discutibles. Parménides fue sin duda el primero en publicar esta esfericidad y quizá la propusiera, puesto que ella convenía a su sistema, en el que el Universo estaba dispuesto en capas concéntricas.

Un siglo más tarde esta esfericidad podía apoyarse sobre varios argumentos exactos, enumerados por Aristóteles: aparición de los mástiles de los navíos lejanos antes que su quilla; variación del campo de las estrellas visibles con la latitud del lugar de observación y por último, la sombra de la Tierra en círculo sobre la Luna, en los eclipses de Luna. No obstante, durante mucho tiempo subsistieron en la ciencia griega demostraciones inconsistentes de la redondez de la Tierra. En el siglo segundo de nuestra era, el Almagesto de Claudio Ptolomeo, cumbre de la astronomía griega, procede todavía sobre este punto, en primer lugar,

por el sofisma de la enumeración incompleta: la Tierra no puede ser ni plana, ni ahuecada, ni poliédrica, ni cilíndrica; luego es esférica.

1.1. LOS PRECURSORES DE COPÉRNICO

1.1.1. HERÁCLIDES DEL PONTO Y LA ROTACIÓN DE LA TIERRA.

Heráclides, contemporáneo de Platón y de Aristóteles, vivió durante la mayor parte del siglo IV (desde el año 400 hasta el 300. Puede haber sido su alumno y parece haber frecuentado también a los pitagóricos. No sabemos casi nada de su vida y sus escritos están perdidos. Pero entre diversos comentaristas, numerosas alusiones (destinadas a menudo a denigrar su trabajo) muestran que Heráclides "hizo girar la Tierra sobre sí misma en veinticuatro horas mientras que el cielo está en reposo" (Simplicio); "mueve la Tierra como una peonza, de Oeste a Este alrededor de su propio centro" (Aetius. Se puede estar seguro que el libro de Heráclides fue publicado después de *De Coelo* de Aristóteles, puesto que éste no hubiera omitido discutir esta interesante hipótesis; la circunstancia de que no dice una sola palabra prueba que ningún filósofo, hasta alrededor del año 350, había propuesto la rotación de la Tierra.

Otro comentarista, Calcidio, acredita a Heráclides un segundo progreso esencial: "él hizo girar a Venus alrededor del Sol y no en torno a la Tierra; de este modo Venus se encuentra a veces más cerca, a veces más lejos de nosotros que el Sol". Esta es la primera alusión auténtica, en la historia, de un heliocentrismo parcial; todavía nadie había considerado que el Sol podía ser el centro de una órbita planetaria.

1.1.2. ARISTARCO, EL COPÉRNICO DE LA ANTIGÜEDAD.

Desconocemos las fechas en que transcurrió su vida. Solamente sabemos que observó el solsticio de verano en el año 281 a. C. en Alejandría. Nos ha llegado uno de sus libros, muy notable, que constituye el primer ensayo serio realizado para hallar las distancias al Sol y a la Luna.

Cuenta Plutarco que Aristarco estuvo a punto de ser acusado de impiedad por haber propuesto el doble movimiento de rotación y de traslación de la Tierra. Por último, ciertos comentaristas como Aetius, Estobeo y Galeno, están de acuerdo en decir que Aristarco hacía describir la Eclíptica por la Tierra, mientras el Sol tomaba el rango de estrella fija. He aquí, pues, un sabio que vivió diecisiete siglos adelantado sobre la humanidad. Nadie, antes de Aristarco, puso el Sol en el centro del sistema planetario, ni hizo circular a la Tierra en un año sobre una órbita. Nadie, después de Aristarco y hasta Copérnico, retomó esta audaz hipótesis.

1.1.3. LA ESCUELA DE ALEJANDRÍA. EL SISTEMA DE LOS EPICICLOS O SISTEMA DE PTOLOMEO.

A partir del año 250 a.C., la actividad científica griega se concentra en la parte sur de la cuenca mediterránea. Durante siglos, observadores asiduos, provistos de precisos instrumentos, acumularon datos astronómicos que, unidos a un rápido desarrollo de las matemáticas, permitieron tomar vuelo a la astronomía. Durante los cuatrocientos años que siguen a la época de Aristarco tres sabios tienen el primer puesto en astronomía: el primero, Apolonio, eminente matemático que no publicó ningún escrito astronómico; del

segundo, Hiparco, nos queda un escrito de su juventud, de poco valor. Por fortuna, del tercero, Ptolomeo, nos ha llegado la obra astronómica entera, bajo el nombre de Almagesto.

El Almagesto retoma y completa la obra de sus predecesores, pero raramente cita sus fuentes; es por medio de manuales de divulgación encontrados, que podemos rendir justicia a cada uno.

Es así que el sistema de los epiciclos mantuvo el favor de la humanidad durante diecisiete siglos.

1.1.4. EL TAMAÑO DE LA TIERRA ENTRE LOS GRIEGOS

La primera evaluación conocida de la circunferencia de la Tierra fue dada por Aristóteles: cuatrocientos mil estadios. Arquímedes da la segunda: trescientos mil estadios, sin indicar ninguna referencia. Pero era aplicable un solo principio: el que utilizó Eratóstenes en Alejandría hacia el año 230 a. C. Es muy simple: en Siena, el sol de mediodía el día del solsticio de verano, no da ninguna sombra, pues está en el cenit. Ese mismo día, midiendo a mediodía la sombra de un obelisco en Alejandría, Eratóstenes halla la distancia del Sol al cenit de Alejandría igual a un cincuentésimo de círculo; tal es la diferencia de las latitudes entre ambas ciudades. Ahora bien, la distancia de una ciudad a otra, medida sobre el terreno, es de cinco mil estadios y midiendo entonces la circunferencia terrestre, doscientos cincuenta mil estadios. Con un estadio de 157,50 metros, el diámetro terrestre polar así hallado es inferior solamente en 80 kilómetros al verdadero. Esta notable concordancia es accidental, puesto que Siena, no estando situada exactamente bajo el trópico, la diferencia en latitud no es exactamente un cincuentésimo, y después, porque los agrimensores midieron mal las distancias. No por esto dejaremos de considerar a Eratóstenes como el padre de la geodesia.

1.2. COPÉRNICO (1473-1543)

Nació en Thorn y fue estudiante en Cracovia desde 1491. Luego estuvo en Italia durante nueve años y frecuentó las universidades más célebres, Bologna, Roma, Padua. Volvió en 1506, a la edad de treinta años, dueño de todos los conocimientos humanos y considerado ya un astrónomo de gran valor. El resto de su vida, treinta y siete años, los pasó en la pequeña, ciudad de Frauenburg (mitad de camino entre Danzig y Königsberg) donde ejerció las funciones de canónigo. Allí, al borde de la laguna de Frisches Haff, entre las brumas del Báltico, persiguió tenazmente el ideal que se había fijado. Entre los antiguos, toda su admiración iba hacia Ptolomeo; deseaba fundar un sistema planetario tan completo como el de aquél y esperaba, gracias a un nuevo plan, sobrepasar al Almagesto, alcanzando el verdadero orden del Universo hasta entonces desconocido. Utilizando un material rudimentario, como malas reglas de madera que él mismo había toscamente dividido y bajo un clima desfavorable. Copérnico observó poco. Debía utilizar observaciones dudosas o inexactas que, no obstante sus heroicos esfuerzos, echaban a perder el valor práctico de su obra. Su trabajo, esencialmente intelectual, comienza desde su vuelta de Italia. Su obra fue terminada en 1531; las copias circularon desde 1532, pero Copérnico retocó su manuscrito hasta 1540 antes de decidirse a publicarlo. El libro *De las revoluciones de los cuerpos celestes*, impreso en Nuremberg, llegó a Copérnico, se dice, el día de su muerte. Este libro marca uno de los vuelcos esenciales del pensamiento; apenas podrían citarse otras dos o tres obras que hayan tenido repercusiones comparables en la humanidad. Con él se abren los tiempos modernos, no solo para la astronomía sino también para la filosofía. El capítulo décimo, en el cual Copérnico presenta su nuevo ordenamiento, constituye actualmente su gloria. En el centro del sistema, centro del mundo, se halla el Sol, fijo, y a su alrededor los planetas arrastrados en órbitas sólidas. La Tierra; móvil, gira sobre sí misma en veinticuatro horas y, como un planeta más, se traslada a lo largo de la eclíptica

alrededor del astro central, y recorre su trayectoria en un año. Por último, la esfera de las estrellas fijas, inmóvil, limita el Universo.

Repercusiones de la obra de Copérnico.

Sería superfluo insistir sobre el valor astronómico de la obra copernicana: la verdadera distribución de los cielos por fin descubierta, su simplicidad y su potente unidad; el orden de los planetas fijado en lo sucesivo; las distancias calculadas por primera vez. Sin embargo, en Alemania y en Italia encontró poca adhesión; únicamente ciertos entusiastas, como Mastlin, maestro de Képler, o Benedetti, maestro de Galileo, preservaron, ante todo del olvido, la nueva teoría. En Inglaterra los discípulos fueron más numerosos. La teoría conquistó todos los espíritus libres durante el siglo XVII, enriquecida por nuevas leyes y sostenida por los hechos descubiertos con el anteojo. El alcance filosófico de la obra es aún mucho mayor. Hasta Copérnico, las especulaciones humanas parten de la idea de que la Tierra está en el centro de un Universo hecho para ella; ¡orgullo desmesurado de la criatura vertical que, desde el trono inmutable en el cual se colocó, cree que el Sol y los astros están destinados a iluminar sus días y sus noches! Repentinamente, la Tierra pierde su situación central y su rol privilegiado. Privada de su augusta inmovilidad, aparece, como cualquier satélite del Sol, lanzada como un trompo que da vueltas entre sus hermanos los planetas. El choque de las ideas fue brutal; suscitó violentas reacciones. La iglesia católica condenó la teoría como contraria a las Escrituras: Josué detuvo al Sol y no a la Tierra. Puesto en el Index en el año 1616 el libro quedó allí durante dos siglos. En 1632 ocurre la condena del anciano Galileo y su triste humillación por haber sostenido, a pesar de la prohibición, la verdad científica.

Por otra parte, la misma oposición existió entre los protestantes de Alemania donde Lutero y Melanchton pidieron sanciones contra el “loco de Copérnico”.

Imperfecciones:

Ni el pensamiento de Copérnico ni su sistema tienen el carácter de racional que corrientemente se le atribuye:

- **Su Pensamiento:** Copérnico, como Aristóteles, considera al Universo como limitado por la esfera de estrellas fijas; como hemos visto, supone el movimiento circular como natural de los cuerpos esféricos; cree que los planetas son transportados por órbitas sólidas.
- **Su Sistema:** Estrictamente hablando, Copérnico no puede crear lo que llamamos “su sistema”. Después de haber colocado al Sol en el centro del Universo, donde tiene un papel óptico pero de ninguna manera dinámico (puesto que según él, no es el Sol el que mueve los planetas) y comete el error de no tomar al Sol como el centro de las órbitas planetarias, refiere los movimientos de los planetas no al Sol fijo, sino al centro de la órbita terrestre, que no coincide con el Sol.

De este modo, la Tierra tiene todavía en su obra un papel privilegiado. Esta falla fundamental introdujo en los movimientos planetarios diferencias que en vano se esforzó en corregir con gran refuerzo de epiciclos, echando a perder la bella simplicidad de su idea primitiva.

Por otra parte, Copérnico poseía pocos documentos. Cometió el error de tomar de los antiguos observaciones inexactas y seguirlas al pie de la letra. “El no reconoció absolutamente su riqueza, escribió Képler, y se esforzó, en primer lugar, en interpretar a Ptolomeo antes que a la naturaleza.” Para conciliar

todas las medidas que recogió, Copérnico introdujo diferencias totalmente imaginarias; por esta razón, en su trabajo, el centro de la Tierra describe una curva sinuosa alrededor del Sol. Los desarrollos matemáticos de su sistema colocan a Copérnico, ciertamente, en la categoría de los grandes astrónomos del pasado; los contemporáneos, también hostiles a su hipótesis, no se equivocaron. Sus tablas sirven tanto como las de Ptolomeo; en este aspecto, Copérnico realizó su ideal. Es verdad que sus tablas no son mejores. Nosotros vemos su gloria en otro aspecto; haciendo poco caso de las sutilezas de su trabajo, unimos su nombre a la doctrina de los movimientos de la Tierra, a la visión genial de un mundo donde el Sol está fijo, donde la movilidad de nuestro globo explica muy simplemente las principales apariencias y determina el rango y las distancias de los planetas. Copérnico ha tejido el cañamazo donde se bordan los pensamientos humanos.

1.3. JOHANNES KEPLER (1571-1630)

He aquí al romántico de la astronomía, por su riqueza creadora, por el estilo de sus escritos y por la proyección de sus estados anímicos en las obras más abstractas. Las páginas donde se exalta la alegría de sus descubrimientos son justamente célebres. Kepler nació en el ducado de Württemberg (Alemania) y fue estudiante desde 1589 en la Universidad de Tubingia. Su maestro Maestlin le enseñó el sistema de Copérnico. A la edad de veinticinco años, Kepler publicó su primer libro de cosmografía, el *Prodromus*, donde muestra las razones que puedan existir para preferir Copérnico a Ptolomeo. Pero antes, se destacó por un notable descubrimiento que merecería ser llamado su primera ley. Los planetas tienen sus planos orbitales próximos, pero no confundidos; el gran error de Copérnico, que falseó sus investigaciones, fue admitir que estos planos pasaban por el centro de la órbita terrestre. Kepler establece que estos planos pasaban por el Sol y que su inclinación sobre la eclíptica *constante*. Pero el objeto principal del *Prodromus* fue relacionar el sistema con los cinco poliedros regulares convexos de la geometría. Esta idea de su juventud domina toda la obra científica de Kepler; al fin de sus días todavía se sentía halagado por haber tenido esta magistral inspiración. Fue para apoyar con observaciones precisas su sistema de poliedros que solicitó el puesto de asistente junto a Tycho Brahe. Pretendiendo su vana geometrización, tuvo necesidad de los radios exactos de las órbitas, de las excentricidades correctas; deseó ligarlas a los períodos, a las velocidades y se entregó a cálculos engorrosos; de esta labor, continuada sin desmayos durante veinte años, surgirán las tres leyes que inmortalizarán su nombre.

Kepler, dotado de una rica imaginación, despliega con placer en sus obras las hipótesis más extravagantes, las especulaciones más absurdas; sin este entusiasmo por la idea pura, sin la persecución tenaz de sistemas a *priori*, jamás habría tenido valor en medio de las miserias de una vida difícil, para producir tanto trabajo engoroso. Pero Kepler unía a este arrebatado desenfrenado, la calidad necesaria para sacar partido: se inclinaba frente los hechos, abandonando toda pista que se apartaba de las observaciones, retocaba sus hipótesis hasta ajustarlas estrechamente a las tablas numéricas. Gran calculador, debió sus admirables éxitos a innumerables tentativas. Más feliz que Copérnico, tuvo la oportunidad de poder apoyarse en resúmenes de observaciones impecables, puesto que hereda, en 1601, los documentos del maravilloso observador que fue Tycho Brahe. Kepler siempre rindió justicia a este maestro a quien llamó el 'fénix Tycho'.

Sin dudas, en tiempos de GPS, este fantástico astrónomo hubiera sido capaz, de poseer los medios técnicos, de poner en órbita la constelación que hoy deslumbra a la humanidad. Kepler enunció lo que hoy la NASA aplica.

Las tres Leyes de Kepler

Las dos primeras leyes, descubiertas en 1604-1605 como lo demuestra la correspondencia de Kepler, fueron publicadas en agosto de 1609 en su *Astronomía Nueva*, obra consagrada al planeta Marte.

- **Primera Ley (naturaleza de las órbitas):** Los planetas describen elipses en las cuales el Sol ocupa uno de los focos.
- **Segunda ley (ley de las áreas):** El radio vector que une el planeta con el Sol barre áreas iguales en tiempos iguales.

La tercera ley cuesta a Kepler largos años de investigaciones; la publica en 1618 en su *Armonías del Mundo*. Esta ley relaciona los tiempos de recorrido a las dimensiones de las órbitas planetarias; establece el primer vínculo entre las trayectorias de los diversos planetas y armoniza el sistema entero.

- **Tercera ley (ley armónica):** Los cuadrados de los tiempos de las revoluciones son proporcionales a los cubos de las distancias medias de los planetas al Sol.

Designando por (T) la revolución sideral y por (a) la distancia media de un planeta (semieje eje mayor de su elipse), tenemos:

$$\frac{T^2}{a^3} \text{ es constante para todos los planetas.}$$

En su *Epítome*, Kepler comprueba que su ley se aplica a los cuatro satélites de Júpiter (la constante no es más la misma. Esta célebre relación revistió una importancia que Kepler no había previsto: permite “*pesar los astros*”, toda vez que la constante es proporcional a la masa del cuerpo central.

Reflexiones sobre los descubrimientos de Kepler

- Papel que puede tener en la ciencia la conquista de un decimal. El progreso puramente cuantitativo de las medidas, con Tycho Brahe, determina un cambio cualitativo de las concepciones: el círculo desaparece de la astronomía reemplazado por la elipse. Este salto evoca las *mutaciones* de los organismos vivos desde los *cambios de estado* del mundo físico, donde un continuado descenso de la temperatura, por ejemplo, transforma repentinamente el agua en hielo.
- Un progreso técnico muy considerable hubiera impedido el descubrimiento. Si Kepler hubiera podido decir de ocho segundos lo que dijo de ocho minutos, que un semejante error era imposible en Tycho, las perturbaciones de Marte, que zigzaguea en realidad alrededor de su posición teórica, hubiesen ocultado la simple trayectoria elíptica y desalentado al mismo Kepler.
- En la antigüedad, los hombres imaginaron curvas que respondían a leyes simples (círculo, elipse, hipérbola) y estudiaron sus propiedades. Veinte siglos más tarde, nos damos cuenta que estas curvas representan con gran aproximación las trayectorias de los satélites con referencia al astro central. “Los trabajos de Kepler muestran que el conocimiento no puede derivar únicamente de la

experiencia: es necesaria la comparación de lo que el espíritu ha concebido con lo que ha observado” (Einstein).

- Dos circunstancias favorecieron el descubrimiento de la elipse: a) la órbita terrestre es muy parecida a un círculo; el círculo elegido por Kepler introduce errores inferiores a los errores de observación de Tycho; b) la elección de Marte fue feliz como objeto de estudio: Mercurio aparte, su elipse es la más achatada.

1.4. GALILEO GALILEI

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.

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. 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 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”

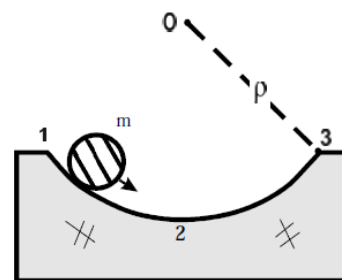


Figura 1: Una esfera de masa m lanzada en 1, se desliza en caída por el camino S (de radio de curvatura constante r). Esta caída es similar a la de la masa de un péndulo de longitud r .

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”.

Se dice que por entonces realizó una experiencia histórica, arrojando simultáneamente, desde la Torre Inclinada de su Pisa natal, masas de distintas sustancias 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

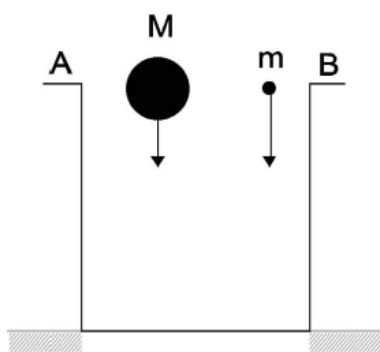


Figura 2: Lanzamiento sincrónico de dos masas M y m con $M \gg m$ desde A y B. La masa M , decía Galileo, opone mayor resistencia a moverse que m .

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 y T' . 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.

Si dos cuerpos de diferente peso caen al mismo tiempo, se dijo, 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 (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

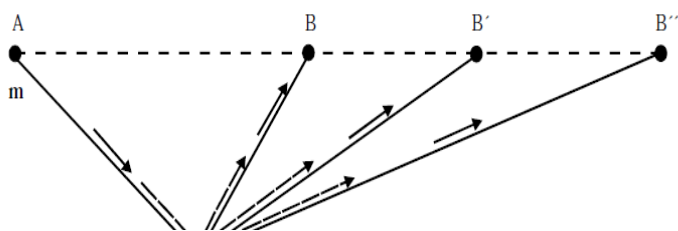


Figura 4: Lanzamiento de una bolita de masa m desde A. Galileo imaginó en esta experiencia conceptual que ella llegaría en cualquiera de los planos de la derecha al mismo nivel horizontal (B, B', B'', ...) hasta que, si el plano desde O se mantuviera sin pendiente, la bolita se desplazaría con velocidad 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.

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).

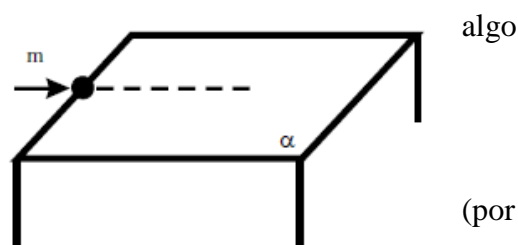


Figura 3: Un objeto m desplazado con fuerte movimiento rectilíneo y uniforme sobre un plano, seguirá en línea recta hasta los límites del plano. Si el plano se extiende, el movimiento también se extenderá en ausencia de otras fuerzas.

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.

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.

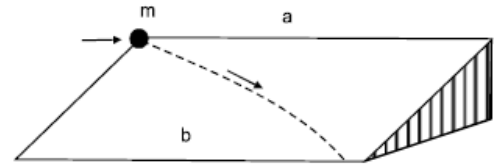


Figura 5: Lanzada la masa m horizontalmente, pronto comenzará a "caer" describiendo una parábola.

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.

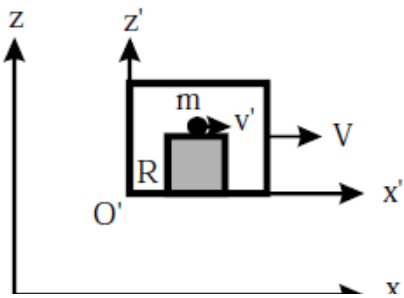


Figura 6: Movimientos de un recinto R y de una masa interior m relativos a un sistema fijo $O(x,z)$.

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. 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:

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

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 pie 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.

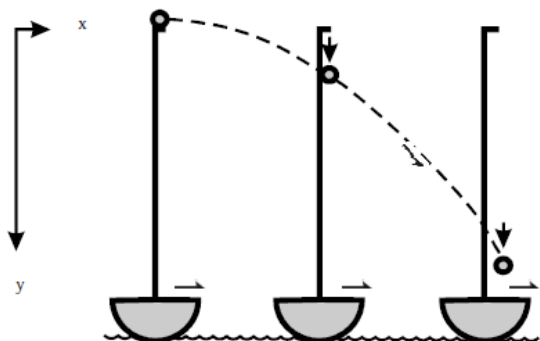


Figura 7: Caída de un objeto m desde la cima del mástil de un barco que se desplaza con movimiento rectilíneo y velocidad constante.

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.

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.

1.5. ISAAC NEWTON

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 último 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 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 perturbe.

$$F = m.a$$

(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.

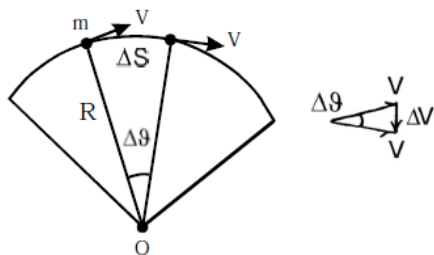


Figura 8: Movimiento circular alrededor de O (v constante)

Otro paso importante lo dio 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: $a = v^2/R$.

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. 10 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:

$$V = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R \cdot \Delta \theta}{\Delta t} = R \cdot \omega; \text{ con } \omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \frac{\partial \theta}{\partial t}: \text{ velocidad angular} \quad (1.3)$$

A partir de aquí podemos calcular la aceleración a. Debido a que el módulo de la velocidad v es constante, la aceleración tangencial es cero; por lo tanto la aceleración tiene sólo componente centrípeta (o normal) a_n .

Entonces:

$$a_n = a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (1.4)$$

Como se ve en la Figura 8, la componente normal de la aceleración media es:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{V \cdot \text{sen } \Delta \theta}{\Delta t} \approx \frac{V \cdot \Delta \theta}{\Delta t}$$

Y en consecuencia

$$a_n = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{V \Delta \theta}{\Delta t} = V \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \theta}{\Delta t} = V \cdot \omega = \frac{V^2}{R} \quad (1.5)$$

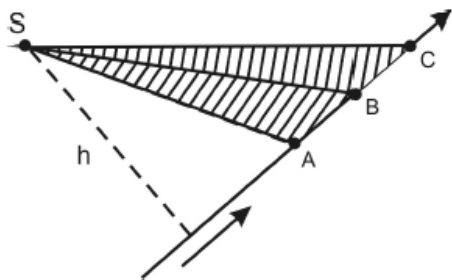


Figura 9: Movimiento puramente inercial. La masa m se desplaza con $v = \text{cte}$. $AB=BC \dots$ También las áreas son iguales $SAB = SBC \dots$ debido a que ellas tienen la misma base y altura h.

Muñido 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. 9 y 10 muestran los resultados alcanzados.

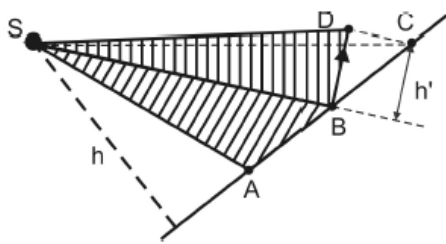


Figura 10: Ante una fuerza central F_c , la trayectoria es ahora ABD. La igualdad de las áreas se mantiene dado que: $SBC = SBD$ (tienen la misma base SB y la misma altura h'). DC es paralela a SB.

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 ($\frac{1}{d^2}$).

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 centímetros. 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 alrededor del sol sobre una órbita circular de radio R

$$F = m \cdot a = \frac{m \cdot V^2}{R} \quad (1.6)$$

Si T es el tiempo que necesita el planeta para dar una vuelta completa $V = \frac{2\pi R}{T}$, y por lo tanto

$$F = \frac{m \cdot \left(\frac{2\pi R}{T}\right)^2}{R} = \frac{4\pi^2 R}{T^2} m \quad (1.7)$$

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

$$F = m \frac{4\pi^2 K}{R^2} \quad (1.8)$$

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

$$F = \frac{4\pi^2 K}{M_s} \cdot \frac{m \cdot M_s}{R^2} = G \cdot \frac{m \cdot M_s}{R^2} \quad (1.9)$$

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

$$F = G \cdot \frac{m \cdot m'}{d^2} \quad (1.10)$$

Newton pronto se dio 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. Cuando la energía cinética que lleva el planeta en movimiento no es suficiente para llevarlo al infinito, su órbita será elíptica. La figura 11 ilustra el caso de la tierra y el sol.

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.

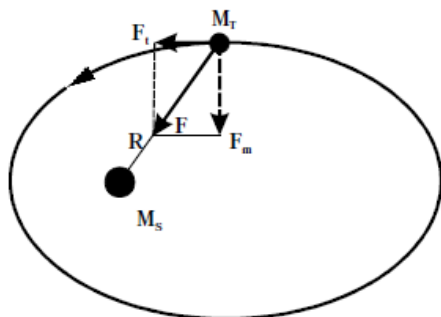


Figura 11: Atracción en el sistema Tierra-Sol.

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. 11). 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 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.

1.6. ALBERT EINSTEIN

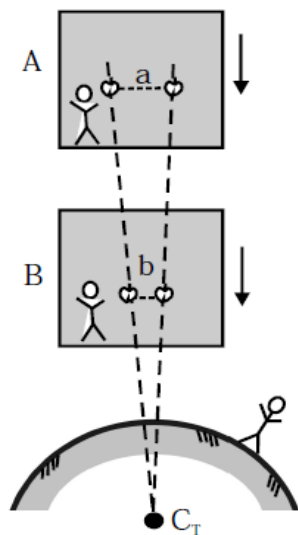


Figura 12: Experiencia conceptual de Eddington que demuestra que los movimientos son relativos. El observador interior creará que las manzanas se atraen ($b < a$) sin cambiar su nivel, cuando el recinto cae de A a B. Por el contrario, el observador externo verá que las masas se deslizan hacia el centro de la Tierra

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. 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.

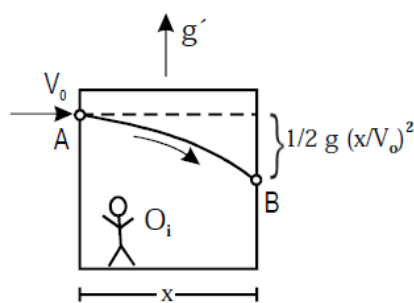


Figura 14: Experiencia mental de Einstein

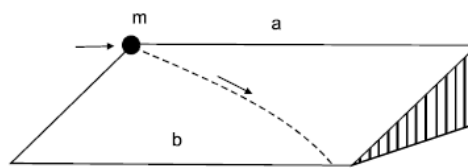


Figura 13: Experiencia de Galileo.

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.

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.14b).

- 2) El espacio es también relativo: se contrae en la dirección de su movimiento. La Fig. 14c 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:

$$w = \frac{u + v}{1 + \frac{uv}{c^2}} \quad (1.11)$$

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:

$$E = mc^2 \quad (1.12)$$

con E : energía y m : masa.

Si m_0 es la masa en reposo, la masa varía con la velocidad v de acuerdo con:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad (1.13)$$

Es decir, si la masa m inicialmente en reposo se mueve respecto del observador con velocidad v , ella aumentará según la expresión (1.13).

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. 15 y pensemos que está ahora en un campo hipotéticamente ingrávito. 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 sustancias, todas caerían en la misma forma, tal como lo comprobó Galileo. Llegó así a la conclusión que en cada punto del espacio no es posible determinar si hay

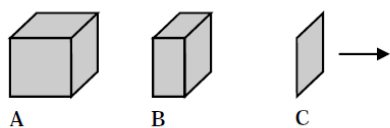


Figura 15: Contracción del espacio. A: cubo en reposo. B: cubo que se contrae en un 60 % en dirección del movimiento con velocidad $v = 240000$ km/s. C: el cubo alcanza la velocidad máxima de 300.000 km/s (máxima contracción).

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. 14) 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. 15), la bolita describirá una curva e interceptará a la pared de la derecha en B. La trayectoria para un observador interior O_i se presentará como una curva. Einstein no se limitó a considerar casos sólo mecánicos como fuera descrito, 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. 14 y 15 puede ser reemplazada por la luz. Y así, la luz se curva al atravesar un campo gravitatorio. 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 euclídeo, 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 euclídea 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 euclídeo. 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. Las masas 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.17) 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.

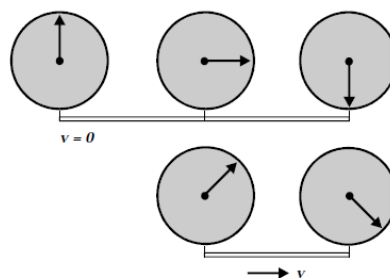


Figura 16: Cambio de marcha de los relojes de un sistema en movimiento (abajo) respecto de los relojes de un sistema inmóvil (arriba).

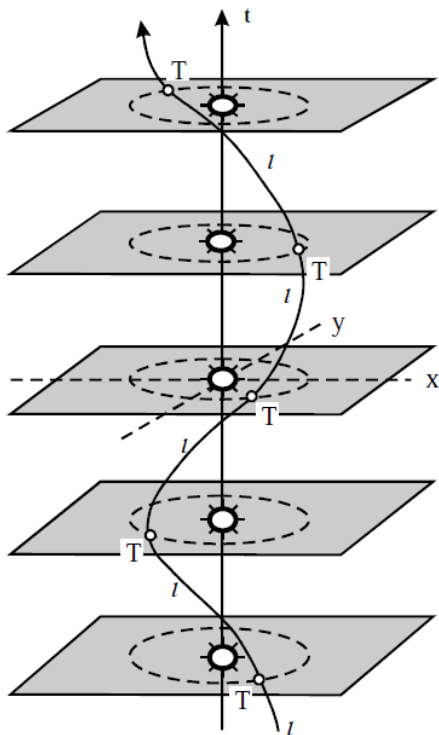


Figura 17: La línea helicoidal de la Tierra l es una geodésica en un espacio- tiempo (x,y,t) .

avances técnicos y teóricos en áreas tales como la astronomía, la geodesia, la astrofísica, y principalmente en áreas significativas de la física. Por ejemplo, es sabido que la T.R.E. es el edificio conceptual de toda la física de partículas elementales y de sus metodologías experimentales. O tro tanto ocurre con la T.R.E. En efecto, hacia 1939-1940, Einstein, Infeld y Hoffmann trataron con relatividad general el problema de N cuerpos, encontrando ecuaciones que describen tanto su geometría como su evolución. Ellas son usadas en el análisis de órbitas planetarias de nuestro sistema solar. Por ejemplo, el Caltech Jet Propulsion Laboratory las utiliza, convenientemente modificadas, para calcular las efemérides con las cuales observan los planetas y las naves espaciales.

También la dilatación del tiempo en la T.R.E. fue confirmada utilizando relojes atómicos con precisión de un billonésimo de segundo, al igual que las marchas más lentas de los relojes originadas por la gravedad en las proximidades de una gran masa. Esta dilatación, junto con los efectos del movimiento orbital, deben ser consideradas en la programación del sistema G.P.S., notable tecnología moderna. A los tres tests clásicos: el corrimiento del perihelio de la órbita de Mercurio, el desvío de la luz en las cercanías del Sol, y el atraso de los relojes en campos gravitacionales, R.A. Hulse y J.H. Taylor, ambos galardonados con el Premio Nobel en 1993, agregaron un test más definitorio aún que los anteriores restringidos a nuestro sistema solar. En efecto, ellos observaron durante 18 años un pulsar binario, concluyendo que la pérdida de energía del sistema era consistente con los cálculos basados en la Teoría de la Relatividad General (T.R.G.).

Finalmente digamos que en la trascendente teoría de Einstein, si bien el espacio, el tiempo y la masa (la energía), son relativos, existen absolutos esenciales; así tanto la velocidad de la luz c como las leyes de la naturaleza son las mismas cualquiera sea el sistema de referencia elegido.

Es el espacio el que se curva, dijo Einstein. Recordemos que es el recinto acelerado (Fig.14) 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. 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 experimentalmente.

Además, conceptualmente, ellas han permitido realizar