

FISICA MODERNA

Nelson Zamorano H.

Departamento de Física

Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas

Universidad de Chile

versión 12 de agosto de 2005

Índice general

I. Anomalías y Paradigmas	1
I.1. Introducción	1
I.2. El paradigma en física	3
I.2.1. Un ejemplo del par: anomalía -nuevo paradigma	4
I.2.2. De la gravitación de Newton a la de Einstein	6
I.2.3. Un ejemplo de cambio en el paradigma: de Aristóteles a Galileo.	8
I.3. Acerca de los universos paralelos y la computación cuántica . . .	13
I.3.1. El algoritmo de Shor	15
I.3.2. Ley de Moore	17
I.3.3. Otras Ideas Contemporáneas	22

Capítulo I

Anomalías y Paradigmas

I.1. Introducción

El objetivo de este libro es abordar algunas de las ideas más relevantes ocurridas en el área de la física durante los últimos cien años. Comprende la relatividad especial, nociones de la gravitación de Einstein y la mecánica cuántica.

Comienza con fenómenos no-lineales para ilustrar que, su complemento, la aproximación lineal, restringe fuertemente la riqueza de las soluciones posibles. En sistemas tan simples y universales como el oscilador armónico, se descubre - que en su aproximación no-lineal-, la frecuencia de oscilación depende de la amplitud con la cual oscila. Que el principio de superposición no es válido en estos sistemas (ecuaciones diferenciales no-lineales). En osciladores no-lineales amortiguados y con una oscilación forzada, aparecen saltos repentinos en la amplitud de oscilación al variar levemente el valor de la frecuencia de la fuerza de excitación del sistema.

La desventaja de estudiar algunos sistemas no-lineales simples es la complejidad de las soluciones. En general su estudio precisa de métodos tediosos para las aproximaciones o requiere el uso de métodos numéricos.

Al estudiar algunos de los problemas no-lineales típicos se produce una aproximación más cercana a la realidad. Por ejemplo, permite apreciar por qué el primer modelo de un oscilador armónico tiene como requisito oscilaciones con una pequeña amplitud: las matemáticas son simples. Se restringe a soluciones como seno, coseno, exponenciales, y a la vez proporciona una idea de lo efectiva y amplia que

es la aplicación de la dinámica de Newton. Pero, dada las facilidades de cálculo existentes, no conviene dejar esos modelos en el limbo de la aproximación lineal. Esta es la razón para introducir la física no-lineal.

Sin desmerecer lo dicho en el párrafo anterior, la física no-lineal tiene métodos y resultados nuevos pero no está basada en ideas revolucionarias. Su desarrollo creció junto con la facilidad tecnológica para realizar cálculos numéricos más precisos y el talento inquisitivo de sus pioneros.

La relatividad especial, la relatividad general y más aún la mecánica cuántica constituyen un cambio radical en la manera de pensar e interpretar los fenómenos naturales. Salvo la relatividad general, el resto surgió como una necesidad de resolver problemas insolubles que surgieron en el esquema pre-existente.

Un ejemplo de este cambio radical en la manera de interpretar un experimento ocurre en la teoría de la relatividad especial inventada por Einstein. Un postulado básico en esta teoría propone que la velocidad de la luz es una constante universal: que adopta el mismo valor en dos sistemas de referencias en movimiento relativo y uniforme. Esta propuesta transforma el concepto de simultaneidad en algo relativo, que depende del sistema de referencia, en oposición al de simultaneidad absoluta, prevalente hasta esa fecha. El resultado: si dos hechos son simultáneos en un sistema de referencia, no lo son en un sistema que se desplaza con rapidez constante con respecto al anterior.

En rigor, la relatividad general surgió de la imaginación de Einstein en un esfuerzo por extender la relatividad especial a sistemas acelerados y no como un esfuerzo por resolver un enigma presente en esa fecha. Aunque uno de sus triunfos inmediatos fue resolver la anomalía observada en la precesión de la órbita del planeta mercurio [6].

En la mecánica cuántica ocurren cambios aún más profundos. Si en la mecánica de Newton se puede determinar la posición y la velocidad de una partícula con una certeza arbitraria, que en principio depende sólo de la tecnología disponible, en la mecánica cuántica al determinar exactamente la posición de una partícula, la teoría predice que se pierde toda la información acerca del momentum de dicha partícula. Este resultado es independiente de la tecnología disponible. Es un principio. En la mecánica cuántica aparece por primera vez la idea de probabilidad de encontrar una partícula en un cierto punto del espacio en reemplazo de la certeza que es el esquema de la mecánica clásica.

De acuerdo a algunos autores existe una regularidad en la aparición de estos

cambios radicales en la manera de pensar y enfrentar algunos de los resultados experimentales. Para apreciar cómo se originan estos tremendos cambios en la interpretación de un fenómeno físico, incluimos un par de conceptos introducidos por T. S. Kuhn [1] y que nos servirán como un hilo conductor al describir el nacimiento de la relatividad especial y la física cuántica.

I.2. El paradigma en física

Los estudiantes pueden formarse la falsa impresión que el progreso de la física ocurre en forma suave y continua. Por ejemplo, en la mecánica comienzan aplicando las leyes de Newton a objetos puntuales, posteriormente extienden el formalismo a muchos cuerpos como barras, discos..., todos ellos absolutamente rígidos. A continuación se estudia el caso de objetos totalmente flexibles -como cuerdas-, pero que pueden soportar una tensión longitudinal, y así esta estrategia continúa hasta incluir objetos deformables pero que generan un torque que resiste la deformación, esto es la teoría de elasticidad.

Estas son las palabras T. S. Kuhn [1]. Él sostiene que la ciencia no tiene un carácter acumulativo sino más bien funciona en base a anomalías y paradigmas. La impresión que adquieren los alumnos tiene una base pedagógica más que una sustentación en los hechos. Se debe a que las materias se ordenan en forma coherente para facilitar su comprensión. El punto de vista de Kuhn no es compartido por todos. D. Deutsch, por ejemplo, acepta que uno ve y juzga los experimentos a través de una colección de teorías y que eso, sin duda constituye un paradigma. Sin embargo, considera que no se ajusta a la experiencia la hipótesis que quienes adoptan un paradigma sean incapaces de considerar otras alternativas (ver página 323 de [15]).

En nuestro caso, adoptamos la propuesta de Kuhn en cuanto a la idea de paradigma, porque nos proporciona un marco de referencia para analizar la sucesión de cambios que caracterizan el establecimiento de la física moderna. No consideramos posibles resistencias (psicológicas o de otra naturaleza) a las nuevas ideas como algo relevante para el establecimiento de las nuevas ideas.

Comenzamos con su propia definición.

Paradigma: Es la fuente de los métodos, problemas y normas de resolución aceptados por cualquier comunidad científica.

Este nuevo esquema representa un quiebre en el panorama continuista y acumulativo que puede haber adquirido el estudio de la física clásica en sus etapas previas. Este cambio dramático se arma con los mismos elementos del paradigma anterior. A. Zajonc [4], lo denomina un kaleidoscopio: es un reordenamiento en la estructura de la realidad que se arma con los mismos elementos básicos, cambiando la interpretación, que constituye el aporte de la nueva teoría.

Las unidades que Khun denomina paradigmas tienen un ciclo característico. Éste comienza con la aparición de una o varias anomalías que generan una crisis del paradigma vigente. Este fenómeno provoca la aparición de un número de nuevos paradigmas, esta competencia termina resolviéndose con la hegemonía de uno de ellos. La imposición de un nuevo paradigma, resuelve las anomalías que afectaban al antiguo y, simultáneamente, propone un método para resolverlas inventando nuevos escenarios donde experimentar o poner a prueba la validez de estas ideas. Finalmente aparecen nuevas preguntas o evidencias (anomalías) que esta visión no es capaz de resolver, volviéndose eventualmente a repetir el ciclo.

Un ejemplo de esta situación lo constituye el método utilizado universalmente para aprender la mecánica de Newton: debemos resolver numerosos ejercicios para entender el espíritu de las tres leyes de Newton, es necesario descifrar el contenido de su mensaje usándolo en diversas circunstancias. De hecho, la razón que no exista un libro de física introductorio sin ejercicios, se debe a que son precisamente los ejercicios los que nos enseñan qué fuerza utilizar en cada caso: fuerza normal, fuerza de roce, de reacción...etc.

I.2.1. Un ejemplo del par: anomalía -nuevo paradigma

Una anomalía que fue resuelta por el sistema heliocéntrico propuesto por Nicholas Copernicus (1473 – 1543), al imponerse sobre el sistema geocéntrico, se refiere a la coincidencia del movimiento retrógrado observado en los planetas y la posición relativa de este planeta con respecto a la Tierra y el Sol. En la Figura adyacente se dibuja la trayectoria del planeta Marte vista desde la Tierra cuando realiza su movimiento retrógrado.

El movimiento retrógrado ocurre siempre que los tres cuerpos –Sol, planeta exterior y Tierra–, se encuentran en oposición: el Sol se ubica en el lado opuesto al planeta exterior y la Tierra al centro. En la Figura se indica la situación para el caso *geocéntrico*, es decir con la Tierra como centro del sistema Solar.

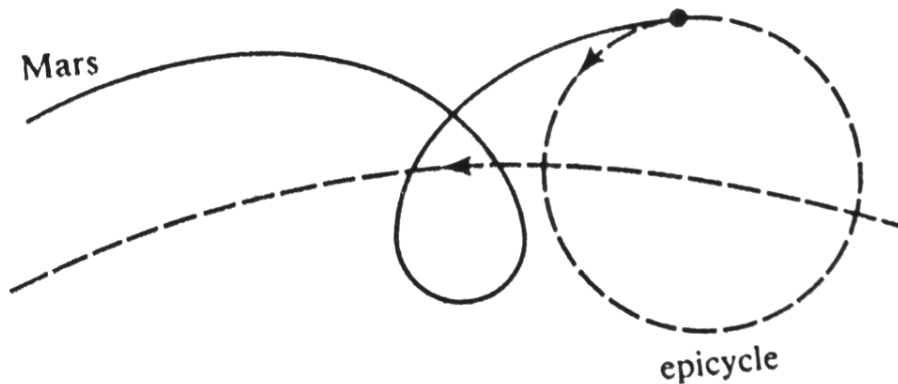


Figura I.1: En el esquema de Ptolomeo, la órbita circunferencial de Marte se indica con trazos. Este planeta se desplaza hacia la izquierda. Para explicar el movimiento retrógrado se lo une a una circunferencia imaginaria (epíclito) que gira en torno a la órbita y permite que Marte retroceda durante su trayectoria.

La teoría de Claudius Ptolomeo (A.D. 140) [5], explicaba el movimiento retrógrado suponiendo que los planetas giraban siguiendo pequeños círculos llamados *epíclitos*, que a su vez giraban en torno a un círculo mayor centrado en la Tierra, como se indica en la Figura.

En el modelo de Ptolomeo, la posición relativa de los tres cuerpos celestes durante el movimiento retrógrado de uno de ellos, era una simple coincidencia, debía ser aceptada como tal. En cambio, en el modelo propuesto por Copérnico, era un fenómeno natural: debía ocurrir de esa forma puesto que al estar las órbitas de los planetas centradas con respecto al Sol, los planetas exteriores giran con una velocidad menor que los más cercanos al Sol y en consecuencia, al alcanzar dicha configuración (oposición), aparecen quedándose atrás. La realidad es que no retroceden, es sólo un efecto del movimiento relativo.

Esta comparación ilustra la diferencia entre un paradigma que comienza a imponerse sobre otro: algunos hechos que permanecían sin explicación en la teoría antigua, son un resultado natural en el nuevo esquema. Se entiende mejor lo que está sucediendo.

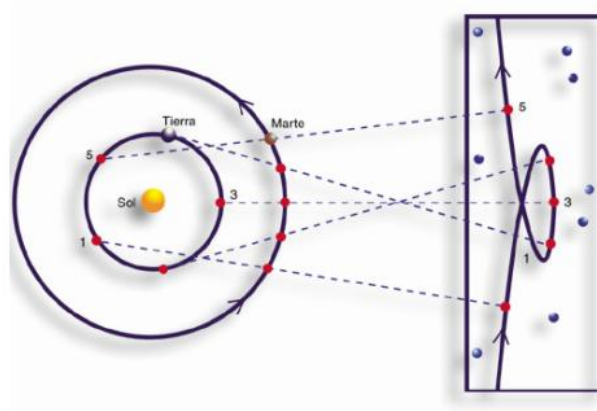


Figura I.2: La Tierra por estar más cerca del Sol gira más rápido que Marte que se encuentra en una órbita más alejada. Marte demora un poco más de 2 años en dar una vuelta alrededor del Sol. Los 5 puntos señalados en la Figura establecen (aproximadamente) una relación entre las posiciones relativas de la Tierra y Marte cuando se encuentran en oposición. Se nota que desde el punto de vista de un observador en la Tierra, Marte, durante este período (en oposición) parece retroceder con respecto a la Tierra.

I.2.2. De la gravitación de Newton a la de Einstein

Es interesante analizar dentro de este esquema de anomalía y paradigma, la ley de gravitación universal de Newton [14]. En el esquema de Newton no existe razón alguna para que la fuerza sea proporcional a $1/r^2$. Podría tener otra expresión: $1/r^{2,00001}$ o cualquier otro número. Esta es una anomalía en la teoría de la gravitación propuesta por Newton, el valor del exponente es dos porque funciona correctamente, no hay una razón definitiva.

Más extraño aún es la acción a distancia que involucra esta fuerza. La Tierra y la Luna se atraen de acuerdo a esta ley sin que exista ningún medio que transmita esta fuerza. Esta hipótesis impulsó una resistencia notable entre sus contemporáneos mecanicistas, quienes requerían de un medio para que una interacción pudiera transmitirse desde un punto del espacio a otro.

La teoría que reemplazó a la gravitación de Newton es la relatividad general de Einstein. En esta teoría el espacio- tiempo, este receptáculo donde todo ocurre, es dinámico. No es un andamiaje rígido. Si pensamos en una superficie en dos dimensiones, la superficie de una mesa carece de curvatura, no así la superficie de una manzana o esfera, por ejemplo. En este nuevo paradigma, los ladrillos fundamentales son:

- La densidad de energía que determina la curvatura del espacio-tiempo,
- la trayectoria de los cuerpos puntuales de prueba son las geodésicas asociadas a la curvatura del espacio-tiempo generada por la energía.

Note que la fuerza de gravitación desapareció y la trayectoria de los cuerpos está determinada por la curvatura generada por la energía contenida en la fuente del campo gravitacional (el Sol, en nuestro sistema solar). Si la fuente del campo gravitacional es un objeto cuya forma es una esfera perfecta, la curvatura del espacio-tiempo debe tener también simetría esférica. La curvatura asociada a un cuerpo con simetría esférica medida a una distancia r del centro de la esfera, es proporcional al inverso del cuadrado de esta distancia ¹.

De este modo, es natural que la fuerza gravitacional sea proporcional a $1/r^2$. El coeficiente 2 está determinado por la geometría de la fuente y la teoría propuesta por Einstein.

En conclusión, en la teoría de Einstein la dependencia de $1/r^2$ en la atracción gravitacional se desprende de la geometría particular de la fuente del campo. En esta nueva teoría carece de sentido la pregunta cómo se propaga la fuerza. Simplemente no existe. La curvatura de la geometría determina las trayectorias y, en el límite en que ambas teorías dan los mismos resultados, entendemos que la fuerza proviene de la curvatura del espacio-tiempo y por tanto varía con la distancia como $1/r^2$. En las palabras de Weinberg, [14], la teoría de Einstein es más bella que la de Newton porque es más rígida.

En este mismo contexto podemos mencionar como una anomalía la precesión

¹Más detalles de este resultado se incluye en el último capítulo.

de la órbita del planeta Mercurio. Para explicar este fenómeno, en el esquema de Newton, era preciso apelar a la existencia de un nuevo planeta entre Mercurio y el Sol o al achatamiento de los polos en el Sol. De acuerdo a la teoría de Einstein, Mercurio, por su proximidad al Sol naturalmente debe precesar porque al ubicarse muy cerca del Sol, experimenta modificaciones del campo gravitacional que son propias de la gravitación propuesta por Einstein. De esta forma, la precesión de la órbita de Mercurio surge naturalmente y la anomalía desapareció con la nueva teoría.

I.2.3. Un ejemplo de cambio en el paradigma: de Aristóteles a Galileo.

La física de Aristóteles

De acuerdo a Aristóteles [3] un cuerpo puede ser movido sólo debido a un agente en contacto con aquel trasladado. ¿Cómo se traslada un objeto? El agente externo le comunica al medio (i.e. aire o agua), no sólo el movimiento pero también la capacidad de moverse. Las primeras partículas mueven otras partículas y a los proyectiles. Pero esta capacidad de movimiento disminuye proporcionalmente a la distancia, de esta forma el proyectil se detiene sin necesidad de la presencia de fuerzas que se opongan al desplazamiento. Con este punto de vista sostenido por Aristóteles en su metafísica, no hay espacio para descubrir la ley de Inercia. Es necesario un paradigma muy diferente.

En cuanto al tiempo, destaca que a diferencia del movimiento que tiene varias dimensiones el tiempo es único. Se puede distinguir solamente cuando existe el cambio y el movimiento.

Si vamos a medir el tiempo, debemos tener una medida estándar. De acuerdo a Aristóteles el movimiento en una línea no es satisfactorio debido a que no es uniforme, como se explicó anteriormente, disminuye con la distancia.

Si el movimiento es natural —la caída libre de un cuerpo por ejemplo—, se acelera; si no lo es, se desacelera. ¿Cuál es el movimiento que es a la vez natural y uniforme? Del punto de vista de Aristóteles el movimiento circular cumple con este requisito, es naturalmente uniforme, y la rotación de las esferas celestiales *constituye* un movimiento natural. Así, de acuerdo a este criterio, medir el tiempo mediante el movimiento del sol es lo natural.

El mundo supralunar está constituido por las estrellas, son eternas y no sufren alteraciones a excepción de la traslación, siendo su movimiento circular (de acuerdo a la teoría geocéntrica), ya que éste es el movimiento natural. Aristóteles concluye que las estrellas están hechas de un elemento material diferente: *éter*, el quinto y el más alto en la escala de los elementos. El eter no se ve afectado por ningún cambio, fuera del movimiento circular. esta esfera obtiene su movimiento del Primer Movimiento.

El cambio de paradigma: visión de Galileo

Otro ejemplo de un cambio de paradigma lo constituye el paso de la física de Aristóteles a la era de Galileo. Este cambio se puede ilustrar con la interpretación de la oscilación de un péndulo. Como veremos, la diferencia entre ambos radica en la interpretación asociada a *un mismo* experimento.

Aristóteles vió este movimiento como un camino tortuoso seguido por la masa ubicada en el extremo de un hilo, para ubicarse lo más cerca del centro de la Tierra, que es el lugar que –de acuerdo a la física Aristotélica– naturalmente le corresponde.

Galileo, en cambio, veía un cuerpo que lograba repetir su movimiento eternamente. Abstraía el roce de este movimiento. Como una generalización del péndulo, Galileo estudió el plano inclinado con una esfera que oscilaba entre dos brazos en forma de V. nuevamente, si nos abstraemos del roce existente, la esferita alcanza (casi) la misma altura en ambas extremos de la V. A partir de esta misma configuración, comenzó a inclinar uno de los brazos, permaneciendo el otro sin alterar. La esferita volvía a recuperar su altura original en el brazo opuesto. Debía por supuesto recorrer un camino más largo. En el caso extremo, cuando uno de los brazos alcanza la horizontal, la esfera quedaba eternamente viajando. Galileo supo extraer la información relevante de este experimento y visualizó la Ley (o principio) de Inercia en base a este experimento: un objeto permanece en reposo o en movimiento uniforme a menos que actúe sobre él una fuerza externa. Ésta es la Primera Ley de Newton. A continuación reproducimos un párrafo de su *Diálogo sobre dos Nuevas Ciencias* que aparece en el libro *En los Hombros de Gigantes* editado por S. Hawking [21].

SALVIATI. *La experiencia consiste en tomar dos cuerpos cuyo peso sea tan diferente como se pueda y hacerlos caer desde cierta altura*

para observar si sus velocidades son iguales. Esta experiencia presenta algunas dificultades, ya que si la altura es grande, el medio bajo la presión del cuerpo que cae, se abrirá siendo empujado lateralmente. De esta forma opondrá un freno relativamente mucho mayor al escaso momento de un móvil muy ligero que a la gran fuerza (violencia) de uno muy pesado. De este modo, el cuerpo ligero, en un espacio largo, quedará muy retrasado. Y si, por el contrario, la altura es pequeña, se podría muy bien pensar o que no hay diferencia alguna de velocidad, o que es inobservable, en caso de haberla.

Es esta la razón que me ha impulsado a repetir muchas veces las caídas en alturas muy pequeñas, acumulando así un número suficiente de aquellas diferencias mínimas de tiempo, que tal vez existiesen entre la llegada al suelo del cuerpo más pesado y la llegada del más ligero, de forma que, una vez unidas, dieran un tiempo no sólo observable sino notoriamente observable. Además, para darme la posibilidad de captar movimientos extraordinariamente lentos, en los que la resistencia del medio altera mucho menos el efecto del simple peso, se me ha ocurrido hacer descender a los móviles sobre un plano inclinado, no muy elevado con respecto a la horizontal y sobre el cual, tan bien como en la caída vertical, se podrá ver cómo se comportan los cuerpos con pesos diferentes. Además, y matizando el experimento, he querido eliminar los obstáculos que pudiesen derivarse del contacto de estos móviles con el plano inclinado. Finalmente, he cogido dos bolas, una de plomo y la otra de corcho, siendo aquella cien veces más pesada que ésta. Até, después, cada una a dos cordones iguales, muy delgados y de una longitud de cuatro o cinco brazas, colgándolas a cierta altura. Habiendo separado, luego, las dos bolas de la perpendicular, las he dejado que se pusieran en marcha al mismo tiempo; entonces, siguiendo las circunferencias de los círculos descritos por los cordones, sus radios han pasado más allá de la perpendicular, para volver, después, atrás por el mismo lugar. Y repitiendo más de cien veces estas idas y venidas, han demostrado de modo palpable que la bola más pesada se adecua de tal modo al ritmo de la más ligera que ni en cien vibraciones ni tampoco en mil tomaría aquella la más mínima delantera (mínimo momento), sino que ambas marchan al mismísimo paso.

La operación descrita manifiesta también la acción del medio, el

cual, acarreado algún obstáculo al movimiento, disminuye bastante más [la amplitud de] las oscilaciones del corcho que las del plomo, sin hacerlas, no obstante, más o menos frecuentes. Más aún, si los arcos descritos por el corcho no fuesen más que de cinco o seis grados, mientras que los del plomo, de cincuenta o sesenta, las oscilaciones se producirían en los mismos tiempos.

Son numerosos los resultados obtenidos por Galileo usando su estilo de extraer información a partir de las observaciones y su genialidad para ver más allá de lo obvio.

Elaboró un argumento para mostrar que la aceleración de caída de un cuerpo no depende de su masa. Nuevamente aquí debe abstraer la resistencia del aire. Su estrategia era: mido el tiempo de caída de un cuerpo. Posteriormente lo quiebro en dos pedazos desiguales. Mido el tiempo de caída de ambos cuerpos. Su medición señalaba que ambos demoraban lo mismo en caer. Este argumento iba directamente contra los seguidores de Aristóteles que afirmaban que aquel con mayor masa tenía más *ansia* de alcanzar el centro de la Tierra, su lugar natural, y por tanto demoraba menos en llegar. No fue eso lo que observó Galileo.

Conviene destacar que hoy, en la mayoría de los textos introductorios de mecánica se comienza por la cinemática, la trayectoria de los cuerpos en el espacio. Esta estrategia se puede aplicar debido precisamente a que todos los cuerpos (descontando la resistencia del aire) caen con la misma aceleración independiente de su masa. De otra forma deberíamos resolver el problema para cada masa, o especificarla en cada ejemplo a resolver.

No hay explicación para este fenómeno. Estamos entonces frente a una anomalía. Se conoce como el Principio de Equivalencia y constituye la base fundacional de la teoría de la relatividad general. Por su relevancia continuamente se está intentando establecer, experimentalmente, su límite de validez. El experimento que permite obtener la mayor precisión del principio de equivalencia es la medición de la distancia entre la Tierra y la Luna. Ambas están cayendo hacia el Sol. Si una de ellas cae más rápido, la distancia Tierra-Luna cambiaría en el tiempo. Se ha establecido que la distancia permanece constante con un error fraccional menor que $1,5 \times 10^{-13}$. La distancia a la Luna se conoce con un error de unos pocos centímetros [19]. Esto se ha logrado enviando un pulso de un rayo laser desde la Tierra y midiendo cuánto tarda en retornar su reflejo a Tierra [20].

Galileo usó su ingenio para patentar instrumentos. Entre otros, inventó una regla de calcular que resultó de utilidad para ingenieros mecánicos y militares [21]. aprovechó la repetición del movimiento del péndulo para cuantificar el tiempo empleado en la caída de los cuerpos en un plano inclinado y para medir el número de latidos del corazón.

Para Galileo lo fundamental eran las mediciones. No respetaba los principios impuestos en base a la autoridad de quien los establecía sino a los resultados obtenidos a partir de los experimentos.

Como dato anecdótico, hacemos notar que las vidas de Giordano Bruno y Galileo Galilei coincidieron. Galileo fue nombrado profesor de la Universidad de Padua cuando Giordano Bruno -temerariamente-, retornó a Italia en 1592. Es difícil de imaginar que ambos hombres -revolucionarios de su época-, no hayan llegado a conocerse durante el período en que Giordano Bruno enseñó en Padua a comienzos de 1592. Tampoco es difícil imaginar que no era recomendable acercarse a Bruno por al menos dos razones. Primero Bruno era un fugitivo, huyó de Italia para evitar caer en las manos del tribunal de la inquisición de Roma. Segundo, mientras Bruno era un deductivo, al estilo de Aristóteles a quien criticaba por lo mismo, Galileo era un empírico, utilizaba las matemáticas y estaba instalando -con su método-, las fundaciones de la nueva manera de hacer ciencia. Bruno era más intuitivo, basaba sus argumentos en imágenes y no correspondía al científico que era Galileo. Cuando Bruno fue quemado en la hoguera en Roma, Galileo tenía treinta y seis años.

Otros pensadores no-ortodoxos

Entre estos dos hombres, Aristóteles y Galileo, separados por casi dos mil años, fueron surgiendo estudiosos que examinaron críticamente las ideas de Aristóteles. Por ejemplo, Galileo fue educado en el pensamiento de Jean Buridan y Nicole Oresme, escolásticos del siglo XIV que introdujeron y desarrollaron la teoría del *ímpetu* o *momentum*, en el lenguaje de hoy [10].

Antes que ellos, esta teoría fue propuesta por Hiparcus y por J. Philoponus (600 A. de C.). Philoponus enseñó en Alejandría. Fue uno de los últimos comentadores de Aristóteles. Tenía una gran independencia de pensamiento. Su concepto de las leyes de movimiento difieren de Aristóteles a quien critica basado en razonamientos físicos. Introduce el concepto *ímpetu* y *potencia cinética*. El movimiento se genera porque al ponerse en contacto dos cuerpos, uno transmite al otro el ímpetu

que corresponde a lo que en el futuro sería denominado momentum. Introduce también la idea de potencia cinética que constituye el preámbulo de lo que hoy conocemos como energía cinética.

Difiere de Aristóteles en su cosmología. Afirma que tanto los cuerpos celestes como los que se ubican bajo la luna fueron creados por Dios de la misma materia. Aristóteles tenía una física para los objetos sublunares y otra para los objetos cósmicos que se regían por leyes distintas [11].

I.3. Universos paralelos y computación cuántica

Nosotros estudiaremos dos crisis ocurridas durante este siglo en las ciencias físicas: la relatividad y la mecánica cuántica. Con estos dos ejemplos esperamos que sea posible apreciar que la ciencia no progresa en forma continua, que avanza mediante revoluciones: cambios notables en la *interpretación* de los fenómenos observados en la naturaleza.

Al emerger un nuevo paradigma que se impone al antiguo por sus logros, se establece una revolución. Este cambio conlleva una economía de hipótesis y eliminación de anomalías [8] existentes en la teoría (o paradigma) pre-existente. Simultáneamente da cuenta de todos los fenómenos descritos por la teoría desplazada.

Un ejemplo donde el carácter acumulativo de la ciencia no se cumple es la simultaneidad relativa, en oposición a la simultaneidad absoluta, esta última fundada en la física newtoniana. Este cambio no es un cambio acumulativo, aquí la relatividad especial de Einstein marca un quiebre profundo con la física tradicional a fines del siglo pasado. Este cambio lo estudiaremos en el capítulo de relatividad especial. Ambos enfoques coinciden cuando consideramos que el valor de la velocidad de la luz es muchísimo mayor que el de las velocidades de los objetos que se están considerando.

Otro ejemplo es la mecánica cuántica: la física del mundo microscópico. Una comparación de la física clásica con los principios e ideas que de la mecánica cuántica revela un cambio abismante de esquemas y supuestos aceptados como válidos en la descripción de los fenómenos físicos. Quizás lo más impresionante de este nuevo esquema es su *reduccionismo*: no sólo coincide con la física clásica en los campos que ésta describe un número de fenómenos con éxito sino, además, incluye otros que ocurren en la naturaleza y que resultan inexplicables dentro del

contexto de la física clásica.

Al estudiar las ideas propuestas en la antigüedad, podemos encontrar la existencia de universos infinitos, con infinitos sistemas solares, como es una de las proposiciones de Giordano Bruno. También el mundo atómico fue propuesto por Demócrito. Estas ideas carecían de base experimental, eran netamente deductivas. La capacidad del hombre le permitía imaginar estas posibilidades. No hay, sin embargo, ninguna proposición en la física Socrática o pre-Socrática, o de la Edad Media que avance siquiera remotamente cercana a las leyes asociadas a la mecánica cuántica. El fenómeno de un electrón desdoblándose y cruzando dos rendijas e interactuando consigo mismo es difícil, por decir lo menos, de imaginar². No hay registro histórico previo al siglo XX de una idea tan alejada del sentido común como la indicada. Quizás sea esta una explicación de las dificultades y las controversias que han surgido en la interpretación de la mecánica cuántica [13], [14].

Una idea interesante que ha surgido recientemente como una aplicación de la mecánica cuántica es la posibilidad de desarrollar un computador que funcione usando los principios de la mecánica cuántica. Uno de los físicos que ha publicado uno de los trabajos pioneros en el desarrollo de esta idea, David Deutsch, manifiesta que su interés en esta área surgió como una forma de proponer un experimento que lograra demostrar la realidad de uno de las interpretaciones de la mecánica cuántica, la existencia de muchos universos. Esta es una interpretación de la mecánica cuántica originada en los años 50. Las propuestas, algunas de ellas muy originales y poco ortodoxas, de David Deutsch están contenidas en su libro *La estructura de la realidad*. Otras referencias en este tema son [22], [24], [23].

A continuación haremos una breve referencia al origen e inicio de la idea acerca de los computadores cuánticos y a algunos límites que se plantean en su desarrollo tanto de origen económico como físico. Los datos fueron extraídos del libro **The Quest for the Quantum computer** de Julian Brown, 2001 [16], páginas 24 a 29.

I.3.1. El algoritmo de Shor

En 1994 Peter Shor un investigador asociado a la ATT de los laboratorios BEL en New Jersey, demostró cómo un computador cuántico podía resolver un prob-

²En el capítulo de Mecánica Cuántica se explica con mayor detalle el significado de esta frase.

lema matemático muy importante. Uno que por largo tiempo se sabía que superaba con creces el dominio y osibilidad de los computadores ordinarios. Él demostró cómo un computador cuántico podría calcular los factores, o divisores, de un número muy grande y, además, hacerlo en forma extraordinariamente rápida. Resolver este problema particular conlleva implicaciones que van mucho más allá del dominio e interés de las matemáticas.

Veamos por qué. Desde 1970, la dificultad de encontrar los factores de un número muy grande había formado la base de un método extremadamente importante y en la actualidad ampliamente usado para proteger códigos secretos. El código funciona casi como las tarjetas con números secretos que Ud. utiliza normalmente, sólo que en lugar de tener que llevar consigo este código, que podría ser robada, todo lo que usted necesita es enviar un mensaje con un número muy grande, que llamamos N , que puede ser dado a quien uno quiera con completa seguridad. La clave para deserrajar el código depende del conocimiento de los dos números que multiplicados entre sí generan el número N . Normalmente esto sería conocido sólo por aquel a quien se intenta enviar el mensaje.

Al demostrar cómo un computador cuántico podía factorizar un número muy grande y en forma muy rápida, Shor amenazó con echar abajo este sistema de criptografía usada en la actualidad.

El programa o algoritmo de Shor no sólo ofrecía una evidencia muy poderosa para proclamar que un computador cuántico podría exceder lejos las capacidades de un computador convencional, él también revelaba cómo esta fuente poderosísima podría ser aplicada en el mundo real. Fue éste el punto que generó un gran interés en este tema. La posibilidad de que una máquina con estas propiedades pudiera eventualmente construirse (son en realidad a muy largo plazo, 50 años) tendría enormes repercusiones: afectaría las comunicaciones militares, los secretos del gobierno, vigilancia y protección de datos, comercio electrónico, y la privacidad de un ciudadano común y corriente. Si alguien pudiera construir un computador cuántico a plena escala, significaría que él o ella tendrían acceso a todo: desde la cuenta del Banco de cualquier persona hasta el secreto más escondido del Pentágono. No causa ninguna sorpresa, entonces, que grandes cantidades de fondos estén apoyando esta línea de investigación y que las entidades que los distribuyen son el Departamento de Defensa de los Estados Unidos y la Agencia Nacional de Seguridad en la Unión Europea.

Si alguien intenta construir una de estas máquinas, las Agencias de inteligencia quieren estar seguras que ellas sabrán cómo se hacen primero que nadie. Esta

es la razón por la cual el programa de factorización inventado por Shor ha sido rápidamente reconocido como la aplicación asesina de un computador cuántico.

Para David Deutsch sin embargo el poder o las aplicaciones del algoritmo de Shor tomaron otro significado. Desde su punto de vista, consolidaron, aún más claramente, la realidad de los universos paralelos. Examinemos uno de sus argumentos.

Considere el problema de factorizar el número 15. Es tres veces 5. Ahora trate de factorizar un número con cinco dígitos, como 24.287. No es tan fácil. Aún con una calculadora probablemente le tomaría un buen rato encontrar los factores que son 149 y 163. Note dos cosas. Primero, los procesos opuestos la multiplicación de dos números es directo. Segundo, solamente cuando los factores son muy grandes y además indivisibles por números pequeños (149 y 163 son números primos), es en ese caso que el problema se pone muy difícil. Sí, por otra parte, yo le consulto o le pregunto a Ud., que factorice 24.288, Ud., fácilmente obtiene la respuesta jugando con números pequeños, por ejemplo con los factores 2, 3, 11 y 23.

Ahora imagine lo difícil que sería factorizar un número con 250 dígitos que fuera sólo el producto de dos números primos muy grandes. Resulta que aún con los super computadores más avanzados de hoy día, es muy poco probable que Ud., alguna vez sea capaz de resolver ese problema. Incluso con los algoritmos clásicos más rápidos conocidos hasta hoy, tomaría algo así como la edad del Universo. Sin embargo, un computador cuántico que usara el algoritmo de Shor, si es que esa máquina alguna vez fuera construida, podría resolver el problema en cosas de segundos o minutos porque el sería capaz de calcular simultáneamente tantos como 10^{500} o más números o caminos distintos. Como argumenta Deutsch en su libro *La estructura de la realidad*, este número tan grande, casi imposible de imaginar, genera a los creyentes de la existencia de un solo Universo, un problema fenomenal: *hay solo alrededor de 10^{80} átomos en todo el universo visible, un número absolutamente insignificante comparado con el mencionado anteriormente, 10^{500} . De esta forma si el Universo visible representara la extensión de toda la realidad física posible, esta realidad no podría ni siquiera en forma remota contener los recursos requeridos para factorizar tal inmenso número. ¿Quién lo factorizó entonces? ¿Cómo, y dónde se realizaron las computaciones?*

Para Deutsch la única respuesta que tiene sentido es que distintos cálculos de estas 10^{500} posibilidades son realizados en diferentes universos. Además, aun cuando nunca se pueda probar este algoritmo en un computador, la sola existencia del algoritmo de Shor es un testimonio poderoso para probar que existen otros univer-

sos. El enigma de: ¿dónde y cómo se puede realizar un cálculo de esta magnitud? es válido hoy día aunque no seamos capaces, todavía, de construir la máquina capaz de realizar esta factorización.

Para entender la naturaleza en su totalidad, Deutsch cree que debemos resignarnos a aceptar la existencia de un número casi sin límite de universos paralelos. Nosotros normalmente experimentamos la realidad solo dentro de uno de todos estos universos. Pero en ciertos eventos cuánticos, los universos paralelos se pueden diferenciar entre ellos y, bajo circunstancias especiales, pueden posteriormente interferir entre ellos para producir efectos que de acuerdo Deutsch son imposibles de explicar si usted se aferra a la idea de un simple universo aislado.

A pesar de las afirmaciones de Deutsch acerca de la existencia o de la interpretación de los muchos universos, la comunidad de físicos, en su mayoría, permanece indiferente, simplemente no les parece una idea aceptable.

I.3.2. Ley de Moore

Consideremos ahora un par de aspectos acerca de la industria de los computadores.

En primer lugar nos referiremos a la ley de Moore.

En las últimas cuatro décadas, desde la aparición de los circuitos integrados, el número de transistores instalados en una pastilla individual de silicio ha aumentado en forma increíble. Aproximadamente, su número se duplica cada 18 meses, lo cual explica por qué los computadores se tornan obsoletos rápidamente. Esta tendencia a la duplicación fue notada en los años 1964 por Gordon Moore, cofundador y presidente emérito de la empresa Intel, y ahora es conocida en el medio como la Ley de Moore.

Lo que Moore observó se basaba en unos pocos años de experiencia en la producción de circuitos integrados, antes que los microprocesadores hubieran sido siquiera inventados. Incluso así su predicción ha permanecido vigente, ver la figura que se acompaña. En el otoño de 1997, para graficar el desarrollo alcanzado por la industria de los semiconductores, Moore informó en un seminario especializado en San Francisco dirigido a miembros de la empresa Intel, que la producción total de Intel en aquel año era de alrededor de 10^{17} transistores. Este número, señaló,

era comparable a una estimación hecha por el biólogo de Harvard y experto en hormigas, el Dr. Wilson quien estimaba que el número de hormigas que habitaban en la Tierra era precisamente 10^{17} . Moore concluyó entonces: *fabricamos un transistor por cada hormiga en la Tierra*.

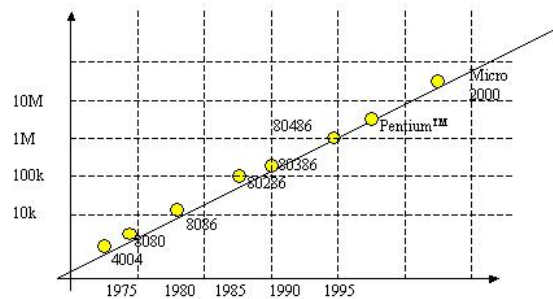


Figura I.3: La ley de Moore establece que el número de transistores en pastillas de silicio se duplica aproximadamente cada 18 meses. Esta duplicación ha generado un crecimiento exponencial a partir de los años 60 y se especula que proseguirá con este ritmo hasta el 2010 (copyright 1999 Intel Corporation).

Una de las razones de este aumento exponencial en la capacidad del computador es que en cada generación de aparatos (los cuales típicamente duran alrededor de tres años y medio) se ha disminuido a la mitad el tamaño de sus componentes y de este modo se ha cuadruplicado la densidad de componentes dentro del computador. Al mismo tiempo, varios otros elementos han seguido mejorado, los circuitos han disminuido su tamaño, las pastillas son más rápidos, ha aumentado la eficiencia en el consumo de energía y su funcionamiento se ha tornado más confiable.

Los costos también se han bajado en forma apreciable. El precio por transistor

bajó en forma increíble en los últimos 40 años. Su disminución ha establecido un record en la historia de la industria de manufacturación. No ha habido nada parecido a esto.

Sin embargo sería erróneo considerar la ley de Moore como una ley sacrosanta de la naturaleza. No hay ninguna buena razón para que este tren de duplicación permanezca inalterado en el tiempo. De hecho, la tasa de crecimiento ha experimentado cierta variación con los años: Moore originalmente estableció su ley como una duplicación al año, pero este número ha variado, a partir de los años 70 un número más realista es doblarse cada 2 años. (Ahora cuando la gente se refiere a esta ley, optan normalmente por 18 meses, algo intermedio entre los valores mencionados anteriormente). Por otra parte un crecimiento exponencial no es realista. Invariablemente choca con alguna condición externa que no sostiene tal demanda. Es como el viejo problema de cuántos granitos de trigo puede ubicar en un tablero de ajedrez si ubica un grano en el primer cuadrado, dos en el segundo, cuatro en el tercero y así sucesivamente hasta cubrir todos los cuadrados del tablero. Para completar esta tarea se requieren 10^{19} granos. Se puede demostrar que la superficie de la tierra no alcanza para completar esta tarea. Cuando los números se duplican en intervalos regulares, los resultados muy rápidamente explotan más allá de los límites razonables. Así en el caso de la ley de Moore parece probable que se quebrara en algún punto.

Sin embargo las profecías acerca de un cambio en la ley de Moore han probado hasta ahora ser un juego para perdedores. Prácticamente desde el instante en que fue propuesta han aparecido voces advirtiendo que aparecerán obstáculos a la vuelta de la esquina que impedirán que esta ley se siga cumpliendo. Hasta ahora todas esas predicciones han resultado erróneas.

Al final de los años 80 por ejemplo, algunos expertos hablaban acerca de la barrera del micrón. Se referían a la dificultad que surgiría al intentar diseñar elementos más pequeños que un micrón (un micrón es la milésima parte de un milímetro). El micrón aparecía como una barrera en el crecimiento se basaba en la forma cómo se fabricaban los circuitos integrados. Los circuitos en pastillas de silicio son fabricados usando una técnica fotográfica en la cual un láser ilumina a través de una mascara una pastilla de silicio cubierta con una resistencia sensible a la luz.

Por la misma razón que usted no puede dibujar una línea con un ancho menor que el diámetro del lápiz que Ud. utiliza, tampoco puede dibujar circuitos más pequeños que la longitud de onda de la luz láser (el lápiz del ejemplo) que se

utiliza en la fabricación. Dado que la longitud de onda de la luz visible es alrededor de 0,5 micrones, este número establecía un límite práctico al tamaño de los circuitos.

Sin embargo, los fabricantes de estos circuitos han resultado ser más hábiles de lo estimado por los críticos. Ellos mejoraron las técnicas de enfoque del láser y usando un láser de longitud de ondas más pequeñas lograron superar esta barrera. De hecho en 1999 los fabricantes comenzaron la producción de pastillas cuyo tamaño era 0,18 micrones con la ayuda de láser que trabajan en la región ultravioleta del espectro, que tiene longitudes de onda más cortas. También consideran extender estas reducciones a tamaños del orden de 0,3 a 0,08 micrones. Una vez alcanzado este límite ahora la gente habla acerca de la barrera del punto uno.

Junto con la reducción en tamaño, a la industria de los semiconductores le preocupa también otro problema a mediano plazo, conocido como la segunda ley de Moore. Esta establece que a medida que la sofisticación de los chips aumenta, el costo de una planta manufacturadora de estos elementos esencialmente se duplica cada cuatro años. Hoy en día típicamente cuesta dos billones de dólares construir una planta de fabricación de circuitos integrados.

Si usted considera las dos leyes juntas no toma mucho tiempo darse cuenta que algo va tener que suceder a menos que las compañías como Intel puedan o sean capaces de crecer en forma exponencial, lo cual parece demasiado poco probable.

Un problema similar pero en otro aspecto fue señalado en 1997 por Stan Williams, quien es a cargo de la física básica de la Hewlett Packard. Williams predice que habrán problemas alrededor del año 2010 en ambas bases: la económica y la física. En una conferencia en computación cuántica en Londres, Williams afirmó que en ese instante los transistores que llevaban las pastillas se activarían mediante la acción de alrededor de 8 electrones. Hoy día se utilizan aproximadamente 500 electrones (ver figura).

Según Williams en el año 2000 los fabricantes de tarjetas alcanzarán un límite físico, en la cual cada transistor será comprimido hasta alcanzar proporciones atómicas y será activado o desactivado mediante un solo electrón. Claramente, no será posible otra subdivisión en este punto. Esto representa un límite físico. Dado este límite y el costo colosal de construir plantas manufacturadoras de tarjetas con esta tecnología, Williams predice que alrededor del año 2010 el progreso comenzará a detenerse a medida que nosotros entremos en la era cuántica.

Las cosas sin embargo no han resultado exactamente así. En 1997 Ed Fredkin

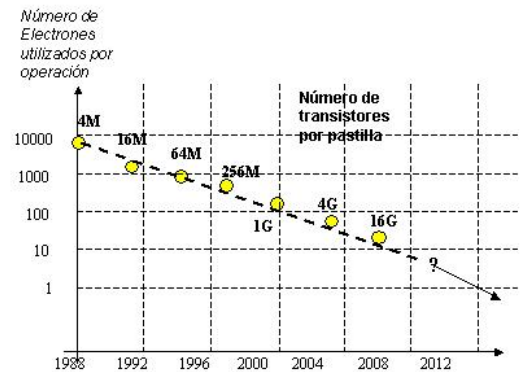


Figura I.4: El número de electrones utilizados para conectar o desconectar interruptores lógicos involucra la participación de cientos de electrones. Sin embargo, este número está disminuyendo rápidamente con el tiempo. 4M significa pastillas de memoria con cuatro millones de bits.

, profesor del MIT argumentó que este proceso podría continuar por alrededor de 100 años porque los fabricantes serían capaces de armar circuitos en tres dimensiones. Hasta el momento ellos utilizan solamente superficies. Si ellos pudieran almacenar circuitos uno encima del otro entonces ellos tendrían una nueva dimensión en la cual expandirse. Mediante este razonamiento, Fredkin, predijo que alguna vez en el siglo XXI nosotros veríamos un número de elementos procesadores igual al número de Avogadro (aproximadamente 10^{24}). El número de Avogadro se refiere al número de moléculas en un mol de una sustancia, la cual en los tiempos de Avogadro significaba 22 litros de gas pero que hoy día está definido por el carbón y representa el número de átomos que contiene 12 gramos de carbón para ser precisos. Fredkin de alguna forma se anticipó al tiempo cuando casi todos los átomos o moléculas en un montón de materia pueden ser utilizados en cálculos

computacionales.

Aquí nos reencontramos con el argumento utilizado por Deutsch para reforzar su conjetura acerca de los universos paralelos: quien podía realizar los 10^{500} cálculos necesarios para factorizar un número de 2500 dígitos.

I.3.3. Otras Ideas Contemporáneas

La idea de partícula como ente fundamental, en torno a la cual se arma el modelo propuesto, se remonta a Newton y en los tiempos antiguos a Demócrito y su teoría atomista. Durante estos últimos decenios, se ha considerado como semilla fundamental de una teoría unificada, un objeto unidimensional -una cuerda-, en lugar de un punto. Este modelo, que no significa que las partículas elementales sean pequeñas cuerdas, ha logrado avances notables. Sin alcanzar un estatus de teoría unificada, el proyecto posee cierta madurez. Se le conoce como la teoría de supercuerdas. Aparece como la teoría con mayores expectativas de lograr la unificación de las leyes físicas, en particular incorporar la gravitación en un esquema unificado de todas las interacciones restantes: electro débil y nucleares. *El Universo Elegante* de Brian Green explica sin recurrir a las matemáticas las ideas básicas de esta teoría que, entre otras complejidades, requiere de la existencia de un espacio-tiempo de 11 dimensiones [29], [30],[27]. Existe un video basado en este libro que se puede obtener en la biblioteca de la **PBS**, cuya página web es : www.pbs.org/wgbh/nova/elegant/.

No todos aceptan que la teoría de supercuerdas es el final de la historia. Roger Penrose afirma que quienes prosiguen estas ideas, la quimera de dimensiones mayores que las cuatro que captamos con nuestro sentidos, están perdiendo su tiempo.

Uno de los argumentos contra la teoría de supercuerdas es que debe partir con una geometría dada. Una alternativa que no necesita de una geometría específica como base para iniciar los cálculos es la teoría de espiras cuánticas. Una descripción de esta teoría aparece en el libro de Lee Smolin, *Three Roads to Quantum Gravity*, [17].

Ejemplo

(Ver [7], página 20).

Las posiciones de los planetas en el sistema solar, las efemérides, interesaba a

los Babilonios (Irak de hoy) hace ya cuatro mil años. Las efemérides que aparecen hoy en el Nautical Almanac en Washington son calculadas numéricamente. Pero este método restringe sus predicciones a un par de décadas. ¿Qué sucede para intervalos mucho más largos, de billones de años, por ejemplo?

Para cerrar esta introducción, mencionamos un problema que no tiene solución analítica y que se ha estudiado numéricamente. Se trata de la estabilidad del sistema solar. En rigor, se ha utilizado la teoría de perturbaciones para entender su comportamiento. Sin embargo, los resultados que se desprenden de este método se restringen al orden de magnitud de la aproximación usada. De esta forma se ignora cuál es el comportamiento real de este sistema complejo, puesto que su evolución debe efectuarse para tiempos muy largos, billones de años, para que sea realista. La teoría de aproximaciones no da información a estas escalas de tiempo.

En el sistema solar la fricción sobre los planetas es despreciable y existe la posibilidad que se produzcan resonancias, al repetirse algunas configuraciones en el tiempo. Éstas pueden inyectar energía uno de los planetas y cambiar la trayectoria, en el muy largo plazo, si la perturbación producida es pequeña. Por ejemplo, después de cinco revoluciones de Saturno, Júpiter ha realizado dos, la configuración entre estos dos planetas se repite cada diez años. Este es un pequeño empujoncito (absorción de energía por uno de estos cuerpos) que a lo largo de los siglos puede sacarlo del sistema solar. El problema no es simple. Pueden aparecer otras perturbaciones que destruyan o alteren este esquema. En resumen, el problema ideal de n -cuerpos puntuales interactuando a través de la ley de gravitación de Newton es imposible de comprender intuitivamente. Sólo se doblega ante el cálculo numérico.

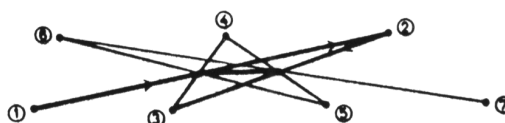


Figura I.5: Aunque no lo parece, el origen de este ejercicio académico es la imposibilidad de resolver analíticamente el problema de N -cuerpos en la gravitación de Newton.

Los matemáticos han inventado un ejemplo simple, que se propone a continuación, con la esperanza que su solución nos ayude a visualizar algunas de las características del problema original de muchos cuerpos.

Este ejercicio geométrico es el que se plantea a continuación.

Considere un óvalo en un plano y defina la *órbita* como sigue: tome un punto arbitrario 1 en el exterior del óvalo, trace una de las tangentes posibles hasta llegar al punto 2, definido de modo tal que el punto medio del trazo 1–2, es precisamente el punto de tangencia al óvalo.

Proceda en forma similar para determinar 3, 4 ...etc. De esta manera se obtiene la órbita a través del punto 1. Si esta órbita crece sin límite, definimos el movimiento como inestable. Éste sería el caso de una órbita inestable en el sistema solar. A pesar que este problema parece muy simple, no lo es. Se puede demostrar que para figuras suaves (C^5 : que admiten hasta una quinta derivada), con curvatura positiva, las órbitas son siempre finitas.

Ud. puede ensayar este método con:

- a) Una recta,
- b) Un triángulo,
- c) Un cuadrado.

Para el caso de un cuadrilátero arbitrario este problema no está resuelto.

Una simulación de este problema se puede encontrar en la página www.escueladeverano.cl en la sección de física.

Utilizando una aproximación numérica, J. Wisdom y G. Sussman afirman que la órbita de Plutón manifiesta signos de inestabilidad. Su exponente de Lyapunov ³ así lo indica. Estas integraciones deben simular el sistema solar por alrededor del billón de años reales, de modo que siempre existe la duda acerca de esta afirmación. Ver el capítulo 10 del libro *Newton's Clock* [31].

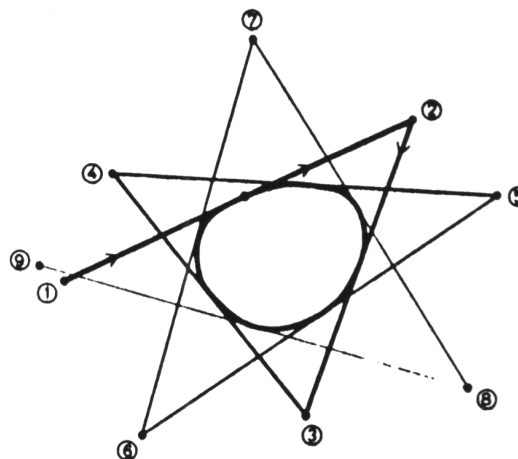


Figura I.6:

³Ver capítulo acerca del Caos.

Bibliografía

- [1] **La estructura de las revoluciones científicas**, T. S. Khun, Fondo de Cultura Económica, # 213.
- [2] **An Introduction to the History of Structural Mechanics**, 1991, E. Benvenuto, Springer Verlag, Vol I and II .
- [3] **A History of Philosophy**, F. Copleton, S. J. A Doubleday Image book, Vol. 3 Part I, Vol 1, Part II .
- [4] **Atrapando la Luz**, Arthur Zajonc, Editorial Andrés Bello, Santiago, 1994, 372 págs.(Ver crítica del libro en el El Mercurio, 26 de Febrero de 1995 por J. M. Ibáñez L., y una interpretación Aristotélica de un aspecto del libro.)
- [5] **The Sleepwalkers**, A. Kostler, The universal Library, Grusset and Dunlap, NewYork, 1963 .
- [6] **How I Created the Theory of Relativity**, Physics ToDay, August 1982, p45. Existe una traducción en el sitio de cosmología. cfg.plataforma.cl , buscar cosmología hoy.
- [7] *Mathematical Intelligencer*, **1**, 65–71, (1978). Este trabajo está reimpreso en el libro: **Hamiltonian Dynamical Systems**, R. S. MacKay & J. D. Maeiss, editores, Adam Hilger 1987, se encuentra en la biblioteca de física
- [8] **Science**, A. Lightman Vol **255**, 7 February 1991, página 690.
- [9] **Ideas Revolucionarias en las Ciencias**, D. Papp, Editorial Universitaria.
- [10] **Physical Thoughts from the Pre-Socratics to the Quantum Physics**, Samuel Sambursky, Pica Press, 1975, págs. 434 y 115.

- [11] **Man's View of the Universe** G. E. Tauber, Crown Publishers, Inc., New York, 1979.
- [12] **Dreams of a final theory**, S. Weinberg, 1993, First Vintage Books Edition 1994, A division of Random House Inc., New York.
- [13] **QED: The Strange Theory of Light and matter**, Richard Feynman (Versión en Español: Biblioteca de Física y Central), Princeton NewJersey, Princeton University Press, 1985.
- [14] **Elementary Particles and the Laws of Physics**, (The 1986 Dirac memorial Lectures), R. Feynman and S. Weinberg, 1988, Cambridge University Press, New York.
- [15] **The Fabric Reality**, (The science of parallel universes-and its implications), D. Deutsch, 1997, Allen Lane, The Penguin Press. Existe un copia de este libro en español en la Biblioteca Central.
- [16] **The Quest for the Quantum computer**, Julian Brown, 2001, Touchstone edition, published by Symon and Schuster, new york.
- [17] **Three Roads to Quantum gravity**, Lee Smolin, 2001, Basic Books.
- [18] **The elegant universe**, Brian Greene, 1999, WWNorton & Company, New York.
- [19] **Gravity: An In troduction to Einstein's General Relativity**, James B. Hartle, Addison Wesley, 2003, San francisco.
- [20] **Long Range Test of the Equivalence Principle**, 2001, Anderson J.D. and J. G. Williams. Class. Quant. Grav. **18**, 2447, 2001.
- [21] **En los Hombros de Gigantes**, S. Hawking, Ed. , Crítica, Barcelona, **2003**, pág. 409.
- [22] **Quantum Computation explained to my Mother**, Pablo Arrighi, <http://arxiv:quant-ph/0305045>.
- [23] **Rules for a Complex Quantum World**, M. A. Nielsen, Scientific American, November 2002, p67.

-
- [24] **Feynman Lectures on Computation**, Richard P. Feynman, Anthony J.G. Hey, Robin Allen, Anthony J. G. Hey, Robin W. Allen, 1999, Westview Press.
 - [25] **Los agujeros negros y la paradoja de la información**, L. Susskind, Investigación y Ciencia , Junio 1997, p12.
 - [26] **Nuevas Dimensiones para otros Universos**, N.Arkani-Hamed, S. Dimopoulos y G. Dvali, Investigación y Ciencia, Octubre 2000.
 - [27] **La teoría M**, M. Duff, Investigación y Ciencia, Abril 1998, p48.
 - [28] **The Cosmic Symphony**, Wayne Hu and Martin White, Scientific American, February 2004, p44.
 - [29] **Everything's now tied to strings**, G. E. Tauber, Discover, November, 1986, page 34.
 - [30] **Reflections on the fate of spacetime**, E. Witten, Physics Today, April 1996, page 24.
 - [31] **Newton's clock: Chaos in the Solar System**, I. Peterson, W. H. Freeman and Company, 1993