

La causalidad en la física: Johannes Kepler

José Luis Álvarez García

Departamento de Física, Facultad de Ciencias, UNAM
jlga@hp.fciencias.unam.mx



Johannes Kepler [1571-1630].

RESUMEN

En este artículo se presenta cómo aparece la noción de causalidad en la física a través de la obra del gran astrónomo alemán Johannes Kepler, en contraste con la tradición instrumentalista representada por la astronomía ptolemeica.

PALABRAS CLAVE

Causalidad, instrumentalismo, astronomía, física, Kepler.

ABSTRACT

This article presents how the notion of causality in physics appears in the work of the great german astronomer Johannes Kepler, by contrasting the notions that he uses against the instrumentalist tradition represented by ptolemaic astronomy.

KEYWORDS

Causality, instrumentalism, astronomy, physics, Kepler.

LA NOCIÓN DE CAUSALIDAD

En la naturaleza nada permanece constante. Todo se encuentra en continuo cambio y transformación. No obstante, descubrimos que nada surge simplemente de la nada, sin tener algún antecedente que ya existía. De igual forma, nada desaparece nunca sin dejar huella, en el sentido de que no exista después absolutamente nada. Esta característica general del mundo puede ser expresada en función de un principio que resume un enorme dominio de diferentes clases de experiencias y que jamás ha sido negado hasta ahora por ninguna observación o experimento, ya sea científico o de otra índole. Tal principio es el de que todo surge de otras cosas y da origen a otras cosas.

Este principio todavía no es la afirmación de la existencia de la causalidad en la naturaleza, sino que es incluso más fundamental que la causalidad, porque es el fundamento de la posibilidad de que entendamos a la naturaleza en una forma racional.

El siguiente paso es entonces el de advertir que, a medida que estudiamos los procesos que se realizan conforme a una gran variedad de condiciones, descubrimos que dentro de la complejidad de los cambios y transformaciones existen *relaciones* que permanecen efectivamente constantes. De la extremada generalidad de este tipo de comportamiento en los procesos, empezamos a considerar la posibilidad de que en estos procesos, por medio de los cuales una



Artículo publicado en el Boletín de la Sociedad Mexicana de Física, Vol. 20, No. 3, correspondiente a julio-septiembre 2006. Reproducido con la autorización de la SMF y del autor.

cosa surge de otras, no es una mera coincidencia la constancia de ciertas relaciones, dentro de una amplia variedad de transformaciones y cambios. Más bien, hacemos la interpretación de que esta constancia significa que dichas relaciones son *necesarias*, en el sentido de que no podrían ser de otro modo, porque representan aspectos esenciales e inherentes de la existencia de las cosas. Las relaciones necesarias entre objetos, sucesos, condiciones u otras cosas en un momento dado, y los subsecuentes, reciben el nombre de *leyes causales*.

Sin embargo, en este punto nos encontramos con que la necesidad de una ley causal jamás es absoluta. Por ejemplo, consideremos la ley de que un objeto soltado en el aire caerá. En realidad, esto es lo que generalmente sucede; pero, si el objeto es una hoja de papel, puede elevarse si “por azar” soplara viento. En consecuencia, advertimos que debemos concebir como necesaria a esa ley, solamente si hacemos abstracción de las *contingencias*. Tales contingencias conducen al *azar*. De aquí que concibamos la necesidad de una ley de la naturaleza como *condicional*, puesto que sólo es aplicable en el grado en que estas contingencias puedan ser despreciadas. En muchos casos así es. Por ejemplo, en el movimiento de los planetas, las contingencias son enteramente insignificantes para todo propósito práctico. Pero, en la mayoría de los casos, es evidente que las contingencias tienen mucha mayor importancia. Sin embargo, incluso donde las contingencias tienen importancia, por abstracción podemos considerar a la ley causal como algo que sería aplicable si éstas no se presentaran. En resumen, podemos decir que a la categoría general de ley, que incluye las leyes causales, las leyes del azar y las leyes que relacionan a estas dos clases de leyes, se les denomina *leyes de la naturaleza*.

Ahora bien, una asociación regular entre un conjunto dado, A, de acontecimientos o condiciones en el pasado, y otro conjunto, B, en el futuro, no implica necesariamente que A sea la causa de B. Por el contrario, puede implicar que A y B están asociadas simplemente porque ambos son el resultado de algún conjunto de causas comunes, C, que es anterior a A y a B. Por ejemplo, generalmente las hojas se desprenden de los árboles antes del invierno. Sin embargo, la pérdida de las hojas no es la causa del invierno, sino más bien es el *efecto*

del proceso general de descenso de la temperatura, que primero provoca la pérdida de las hojas por los árboles y luego el advenimiento del invierno. Está claro, pues, que el concepto de relación causal implica algo más que una simple asociación regular en la cual un conjunto de acontecimientos precede a otro en el tiempo. Implica, además (naturalmente, haciendo abstracción de las contingencias), que los efectos futuros surgen de causas pasadas a través de un proceso que satisface las relaciones *necesarias* y, como es evidente, la simple asociación no basta para comprobar esta clase de conexión.

Una importante manera de obtener pruebas a favor de la suposición de que un conjunto dado de acontecimientos o condiciones proviene necesariamente de otro, es demostrar que el hacer una amplia variedad de cambios en una o más de las causas supuestas, bajo condiciones tales que los otros factores permanezcan constantes, produce los cambios correspondientes en los efectos. Cuantas más coordinaciones de este tipo puedan ser demostradas en los cambios de los dos conjuntos de acontecimientos, mayor es la evidencia de que están causalmente relacionados; y con un número suficientemente grande llegamos a tener la certeza, para propósitos prácticos, de que esta hipótesis de relación causal es correcta.

EL INSTRUMENTALISMO

La noción de causalidad que consideramos en términos muy generales en la sección anterior, corresponde a la noción clásica que caracteriza a la ontología, es decir, a la rama de la filosofía que estudia las causas últimas de las cosas. Esta noción



Tales [625-547 a.n.e.].



Heráclito [550-480 a.n.e.].

está en la línea de pensamiento que se inicia en el siglo VII a.n.e. con las obras de los filósofos jónicos como Tales, Anaxímenes, Anaximandro, Empédocles, Heráclito etc.

Por el otro lado, tenemos la tradición filosófica idealista iniciada por Parménides (siglo VI a.n.e.), quien sostiene en su obra la idea de la preponderancia de la razón sobre los sentidos para el conocimiento del Mundo. Parménides considera que el camino de las apariencias, el ser y el dejar de ser, es producto de las limitaciones del hombre. El hombre se sirve de los sentidos para conocer, pero éstos no ofrecen al hombre sino apariencias. Parménides hace también una cosmología, como el resto de los filósofos presocráticos, pero haciendo notar que esta cosmología no es sino producto de las opiniones de los hombres, no de la razón. Para la razón no existe otra cosa que la unidad.

Esta tradición es continuada por Platón (428-347 a.n.e.) y es en La República donde el filósofo ateniense muestra que ha adquirido una conciencia plena del mundo “ideal” y de la irrealidad del mundo de los sentidos, y pide a sus lectores no prestar atención al cosmos visible:

“...Hemos de pensar, desde luego, de esa policromía con que está adornado el cielo, que es, con mucho, lo más hermoso y lo más perfecto que puede existir. Ahora bien, esa belleza queda por debajo de la belleza verdadera, que es lo que produce la velocidad y lentitud características en la relación de ambas, según el verdadero número y según todas las verdaderas figuras que se mueven a sí mismas y mueven a la vez lo que hay en ellas. Todo esto es accesible a la razón y al pensamiento, pero no a la vista.”



Parménides [siglo VI a.n.e.]. Platón [428-347 a.n.e.].

“...Por tanto...para la práctica de la astronomía acudiremos a los problemas, lo mismo que cuando empleamos la geometría. Dejaremos a un lado las cosas del cielo, si realmente queremos, ahondando en el estudio de la astronomía, obtener algún provecho de la parte inteligente que por naturaleza hay en el alma.”⁴

Siguiendo ideas pitagóricas, Platón creyó que los cuerpos celestes eternos deben moverse en círculos perfectos a velocidad uniforme. Los movimientos observados de los planetas parecían contradecir esta hipótesis. Platón ya había planteado este problema a los miembros de la Academia para explicar las irregularidades de los movimientos observados, en el supuesto de que, a pesar de las apariencias, los cuerpos estaban, de hecho, moviéndose en círculos perfectos a una velocidad uniforme. El astrónomo y matemático Eudoxo (408-355 a.n.e.) da la respuesta requerida y la astronomía de éste se convirtió en la “verdadera” astronomía. Platón señala la inutilidad de los sentidos para conocer la realidad profunda de las cosas, a la cual sólo se puede acceder mediante la razón. En este sentido aconseja que los astrónomos no deberían intentar explicar la esencia de los fenómenos sino contentarse con describir, utilizando la geometría, sus observaciones. De esta posición filosófica proviene el instrumentalismo de los neoplatónicos, quienes para explicar el complicado movimiento de los planetas –que a simple vista parecen frenarse y, formando un lazo, retroceden sobre sus mismos pasos- elaboraron sistemas de esferas concéntricas para “salvar los fenómenos”.

Como resultado de las diversas concepciones que se tenían del Universo desde tiempos muy remotos tenemos la cosmología adoptada y desarrollada por el astrónomo Ptolomeo en el siglo II y plasmada en su obra el *Almagesto o Sintaxis Matemática*. El origen de esta concepción radica en lo que se denomina el universo de las dos esferas, concepción aceptada desde el siglo IV a.n.e. por la mayoría de los astrónomos y filósofos. Consiste de una esfera inmóvil, relativamente pequeña que representa a la Tierra suspendida en el centro geométrico de una esfera mucho mayor, ésta está en rotación y lleva consigo a las estrellas. En el espacio comprendido entre estas dos esferas concéntricas se desplaza el Sol. Fuera de la esfera exterior no había absolutamente nada, ni espacio ni materia. La Edad Media heredó

una versión desarrollada de la teoría de las dos esferas. De esta manera, ya desde el siglo II el ordenamiento de los cuerpos celestes, dentro del espacio comprendido por las esferas de la Tierra y de las estrellas era el siguiente: la Luna, Mercurio, Venus, el Sol, Marte, Júpiter y Saturno; todos ellos girando en torno a la Tierra en órbitas perfectamente circulares.

El sistema de las dos esferas resultaba altamente satisfactorio si se consideraban al Sol y a las estrellas como los únicos cuerpos celestes. No obstante, se conocen otros cuerpos en el firmamento, *los planetas*, y el interés de los astrónomos por los mismos fue la principal fuente de la innovación de Copérnico.

Aristóteles (384-322 a.n.e.), preocupado por hallar un mecanismo real que explicara dichos movimientos, consideró que existían unos caparzones concéntricos al centro del Universo (la Tierra), formados de una substancia muy sutil que denominó éter, y dentro de los cuales se hallaban contenidos los planetas. Para Aristóteles, el número total de esferas cristalinas necesarias era de cincuenta, o en el mejor de los casos cuarenta y siete, pero dejaba “a otros más hábiles el cuidado de demostrarlo”.

En este sentido, el problema fue enfrentado olvidándose del mecanismo real de dicho movimiento y la búsqueda de su solución adquirió una forma diferente (en la tradición instrumentalista expresada por Platón anteriormente): se desarrollaron una serie de ingeniosas y elaboradas técnicas matemáticas para describir los movimientos planetarios. Apolonio e Hiparco de Rodas (siglos III y II a.n.e.) elaboraron epiciclos y deferentes; más tarde se elaboraron técnicas más complicadas agregando excéntricas y ecuantas, con la finalidad de describir con mayor precisión los complicados movimientos planetarios. Fue en el *Almagesto* donde se recopiló la parte esencial de la astronomía antigua y representó el primer tratado



Aristóteles [384-322 a.n.e.].



Ptolomeo [100-170].

matemático elaborado de una manera sistemática, que daba una explicación completa, detallada y cuantitativa de todos los movimientos celestes.

Era éste, en términos muy generales, el estado de la cosmología en la época en que Nicolás Copérnico (1473-1543) plantea su innovación, quitando a la Tierra del centro del Mundo y colocando al Sol en su lugar. Y es la tradición instrumentalista, si nos atenemos al famoso Prefacio que Andreas Osiander (1498-1552) escribe como presentación del *Revolutionibus Orbium Coelestium*, la que continúa esa obsesión por la esfera y el círculo que dominó al pensamiento occidental durante dos mil años, y la que estará operando al inicio del periodo de la ciencia conocido como Revolución Científica de los siglos XVI y XVII.

KEPLER Y LA CAUSALIDAD

“Johannes Kepler, Keppler, Khepler, Kheppler, o Keplerus, fue concebido el 16 de marzo del año 1571, a las 4:37 de la madrugada, y nació el 27 de diciembre a las 2:30 de la tarde, tras un embarazo que duró 224 días, 9 horas y 53 minutos”.^b

Todas estas formas de deletrear su nombre y los datos exactos de las fechas de concepción, embarazo y nacimiento fueron registradas en un horóscopo que Kepler (1571-1630) realizó para sí mismo, y revelan -tal y como lo señala A. Koestler en la biografía que realizó del gran astrónomo alemán- una mente para la cual la realidad definitiva, la esencia de la religión, la verdad y la belleza estaban contenidas en el lenguaje de los números.

Kepler empezó su carrera con la publicación de cartas astrológicas. Lo hizo para ganarse la vida, llamaba a la astrología “la hermanastra de la astronomía” y a las profecías populares “una asombrosa superstición” y “una imitación de sortilegios y hechicerías”. En su diario escribió: “Una mente acostumbrada a la deducción matemática, cuando afronta los imperfectos fundamentos [de la astrología], resiste durante largo, largo tiempo, como una obstinada mula, hasta que, obligada por los palos y las maldiciones, no tiene más remedio que meter su pata en ese sucio charco”.^c

Despreciaba esas burdas prácticas y se despreciaba a sí mismo por tener que recurrir a ellas, pero creía al mismo tiempo en la posibilidad de una nueva y auténtica astrología como una ciencia experimental exacta. Escribió algunos tratados serios sobre

astrología tal y como él la entendía, y este tema se inmiscuye constantemente incluso en sus tratados científicos más clásicos. Uno de esos tratados lleva como lema “una advertencia a algunos teólogos, físicos y filósofos...de que, aunque rechacen justamente las supersticiones de los astrólogos, no olviden que no deben tirar al niño junto con el agua del baño”. Porque “nada existe ni ocurre en el cielo visible que no sea sentido de alguna manera oculta por las facultades de la Tierra y la Naturaleza: [así pues] esas facultades del espíritu aquí en la Tierra se hallan tan afectadas como en el propio cielo”; e insiste nuevamente: “Que el cielo influye sobre el hombre es bastante obvio; pero de qué forma lo hace es algo que aún permanece oculto”.^d

Vemos, entonces, que Kepler consideraba las prácticas astrológicas de su tiempo como charlatanería, pero solamente en la medida en que un médico moderno, por ejemplo, desconfía de una dieta adelgazante no comprobada, pero sin dudar por un momento de la influencia de la misma en la salud y en la silueta. Y añade: “La creencia en el efecto de las constelaciones deriva en primer lugar de la experiencia, que es tan convincente que sólo puede ser negada por la gente que no la ha examinado”.^e

Para una mente inquisitiva, desconocedora del proceso mediante el cual la herencia y el medio ambiente modelan el carácter de un hombre, ¿qué otra explicación podía haberse encontrado en aquella época? La astrología, de muy diversas maneras, era el medio obvio de relacionar al individuo con el Universo, haciéndole reflejar la total constelación del mundo, estableciendo una íntima simpatía y correspondencia entre el microcosmos y el macrocosmos. A menos que pudiéramos explicarlo todo mediante la predestinación por sí misma, y haciendo entonces que careciera de sentido cualquier investigación posterior sobre la Naturaleza, era lógico suponer que la condición y el destino de los seres humanos venían determinados por los mismos movimientos celestes que determinan el clima y las estaciones, la calidad de las cosechas, la fertilidad de los animales y plantas, etc. En pocas palabras, para una mente científica como la de Kepler, el determinismo astrológico era el precursor del determinismo biológico y psicológico.

Vayamos ahora al 9 de julio de 1595 de la vida de Kepler –fecha que fue registrada minuciosamente



Kepler [1571-1630].

en su diario-. Él se encontraba haciendo el dibujo de una figura en la pizarra para sus alumnos, cuando de improviso le llegó una idea con tal fuerza que lo hizo estar convencido de que poseía la clave del secreto de la creación en la mano. “El deleite que extraje de mi descubrimiento –escribiría más tarde- es algo que jamás seré capaz de describir con palabras”.^f Este descubrimiento determinó el curso de su vida y fue su principal inspiración a lo largo de toda ella.

La idea era que el Universo está construido con base en ciertas figuras simétricas (triángulo, cuadrado, pentágono, etc.) que forman su esqueleto invisible. La idea, no obstante ser completamente falsa, llevó a Kepler a formular sus leyes, a la demolición de la antigua concepción del Universo y al nacimiento de la moderna cosmología. Esto lo hallamos expuesto en su primer libro, el *Mysterium Cosmographicum*, que publicó cuando tenía veinticinco años.

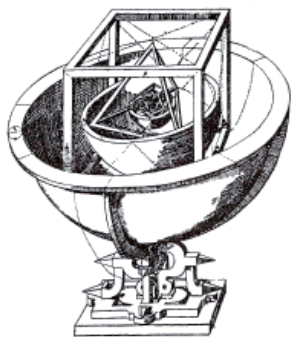
Después de largos y laboriosos intentos en los que fracasó en su búsqueda por hallar proporciones en las órbitas de los planetas, llegó la mencionada clase. Pensó en insertar las figuras geométricas entre las órbitas de los planetas, pero no funcionó. “Y entonces seguí avanzando. ¿Porqué buscar formas bidimensionales que encajaran entre sus órbitas en el espacio? Había que buscar formas tridimensionales...[y he aquí, querido lector, que ahora tienes mi descubrimiento en tus manos]”.^g

En términos generales su modelo es el siguiente: Es posible construir tantos polígonos regulares como se desee en dos dimensiones, pero sólo se pueden construir cinco sólidos regulares en un espacio de tres dimensiones. Esos “sólidos perfectos” o “pitagóricos”, en los que todas las caras son iguales, son el tetraedro, el cubo, el octaedro, el dodecaedro y

el icosaedro. Dado que son perfectamente simétricos, cada uno puede ser inscrito dentro de una esfera, de tal modo que sus vértices se apoyen en la superficie de la misma. Igualmente, cada uno de ellos puede ser circunscrito en torno a una esfera, de forma que ésta toque el centro de cada una de las caras del sólido correspondiente. Euclides había demostrado que sólo pueden ser construidos esos cinco sólidos.

En aquel entonces sólo se conocían seis planetas (Mercurio, Venus, Tierra, Marte, Júpiter y Saturno) entre cuyos espacios –pensó Kepler– se podían insertar los cinco sólidos pitagóricos. Era sumamente difícil creer que esto fuera producto del azar y no de la disposición divina. Proporcionaba la respuesta a la pregunta de por qué sólo había seis planetas y no veinte o cien. Permitía comprender también el por qué de las distancias entre las órbitas planetarias; éstas debían estar dispuestas de tal manera que los cinco sólidos pudieran encajar perfectamente dentro de ellas. Kepler pensó que encajaban. Dentro de la órbita, o esfera, de Saturno, Kepler inscribió un cubo; y dentro del cubo otra esfera, que era la de Júpiter. Inscrita en ésta se hallaba el tetraedro, e inscrita en él la esfera de Marte. Entre las esferas de Marte y la Tierra estaba el dodecaedro; entre la Tierra y Venus el icosaedro; entre Venus y Mercurio estaba el octaedro. El misterio del Universo había sido resuelto por el joven Kepler, profesor de la escuela protestante de Gratz, y así lo expresa en el *Mysterium Cosmographycum*:

“¡Es sorprendente! Aunque aún no sabía claramente el orden en que debían estar dispuestos los sólidos perfectos, lo conseguí... disponiéndolos con tanto acierto que, cuando después hice las pertinentes comprobaciones, no tuve que cambiar nada. Ahora ya no lamentaba el tiempo perdido; ya no me sentía cansado de mi



Modelo cosmológico de Kepler.

trabajo; ya no temía los cálculos, por difíciles que fueran. Pasé día y noche efectuándolos para ver si la proposición que había formulado encajaba con las órbitas copernicanas o si mi alegría era barrida por los vientos... Al cabo de unos pocos días todo encajaba en su lugar. Vi cómo, uno tras otro, los sólidos simétricos encajaban tan perfectamente en las órbitas adecuadas que si un campesino preguntara de qué tipo de gancho están colgados los cielos para que no se caigan, resultaría muy fácil explicárselo. ¡Adiós!”^h

Es sumamente interesante ver cómo la errónea creencia de Kepler en los cinco sólidos perfectos no fue una ilusión pasajera, sino que la mantuvo, en una versión modificada, hasta el fin de sus días, y –tal y como señala Koestler– aunque presenta todos los síntomas de una ilusión paranoide, sin embargo funcionó como el vigoroso motor de sus inmortales logros. Kepler escribió el *Mysterium* cuando tenía veinticinco años y publicó una segunda edición un cuarto de siglo más tarde, hacia el final de su vida, cuando ya había realizado todo su trabajo y había descubierto sus tres leyes, destruido el universo ptolomeico y sentado los fundamentos de la moderna cosmología.

El *Mysterium Cosmographycum* es el primer reconocimiento público del sistema copernicano. Galileo, seis años mayor que Kepler, y algunos astrónomos como Maestlin, guardaban silencio o sólo se mostraban de acuerdo con Copérnico en privado. Kepler pretendió añadir en el primer capítulo de su libro una prueba de que no había contradicción con las Sagradas Escrituras, pero el director de la Facultad de Teología de Tubinga, cuyo consentimiento era necesario para la publicación del libro, le indicó que abandonara –en la tradición del famoso prefacio de Osiander– cualquier reflexión teológica y tratara las hipótesis de Copérnico como algo puramente formal y matemático. Sin embargo, Kepler hizo todo lo contrario, proclamando que el sistema copernicano era literal, física e incontrovertiblemente exacto. El sistema de Copérnico era, para Kepler, “un tesoro inagotable de intuición auténticamente divina acerca del maravilloso orden del mundo y todos los cuerpos que se hallan en él”. La primera parte del libro habla de teología, astrología, numerología, simbología del Zodíaco y habla de la armonía de las esferas, buscando correlaciones entre sus sólidos perfectos y los intervalos armónicos de la música.

La segunda parte es diferente y sólo se hallan unidas entre sí únicamente por su *leitmotiv* común. La primera parte es medieval, apriorística y mística; la segunda es moderna y empírica. El *Mysterium Cosmographicum* es el perfecto símbolo de la gran línea divisoria entre dos edades del pensamiento.

En la segunda parte Kepler se pone decididamente a comprobar las proporciones de su modelo del Universo con los datos observados. Puesto que los planetas no giran en torno al Sol en círculos sino en órbitas ovaladas (que años más tarde identificó como elipses a través de su primera ley), la distancia de cada planeta al Sol varía dentro de ciertos límites. Esta variación (o excentricidad) la resolvió otorgando a cada planeta una envoltura esférica del espesor suficiente como para acomodarse a la órbita ovalada entre sus paredes. La pared interior representa la distancia mínima del planeta al Sol, la pared exterior su distancia máxima. El espesor de cada envoltura y los intervalos entre ellas fueron extraídos de los cálculos de Copérnico. En el prefacio, Kepler había afirmado que las órbitas estaban espaciadas de tal modo que los cinco sólidos cabían exactamente entre ellas. Ahora descubría que no.

Kepler encontró que para las órbitas de Marte, Tierra y Venus había una buena correlación, pero no para Júpiter y Mercurio. Eliminó el problema respecto a Júpiter con la ingenua observación de que “nadie pensará mucho en ello, teniendo en cuenta la gran distancia”. Respecto a Mercurio, simplemente hizo trampa. En los siguientes capítulos Kepler intentó varios métodos para explicar las incoherencias de su modelo. La falla debía residir o bien en éste o en los datos de Copérnico; y Kepler prefería culpar a los últimos. Descubrió que Copérnico había colocado en el centro del Universo no exactamente al Sol, sino al centro de la órbita de la Tierra. Intentó con nuevas cifras, e incluso recurrió a la ayuda de su viejo maestro, Michael Mestlin, pero no sirvió en absoluto; sin embargo, consiguió de golpe, y sin darse cuenta, colocar el centro del Sistema Solar en el lugar que realmente le correspondía.

Posteriormente tuvo problemas también respecto a la posición de la Luna. Aquí simplemente decidió tomar la decisión que más se adaptara a su modelo.

Decidió, entonces, emprender un ataque frontal contra los datos de Copérnico. Encontró que los datos del astrónomo polaco eran poco confiables e incluso afirmó que también había hecho trampas.

En los primeros veinte capítulos de su libro, Kepler había estado preocupado por hallar razones para el número y distribución espacial de los planetas. Se había convencido a sí mismo de que los cinco sólidos proporcionaban todas las respuestas, y de que las discrepancias observadas se debían a las cifras erróneas de Copérnico.

En estas circunstancias se enfrentó con un problema distinto y más prometedor, que ningún astrónomo antes que él había planteado: buscar una relación matemática entre la distancia de un planeta al Sol y su periodo de revolución en torno a éste.

Estos periodos eran conocidos desde la antigüedad con una considerable precisión. En números redondos, Mercurio necesita tres meses para completar una revolución, Venus siete meses y medio, la Tierra un año, Marte dos años, Júpiter doce años y Saturno treinta años. Cuanto mayor es la distancia al Sol, el planeta ocupa más tiempo en completar una revolución. Pero esto es cierto en términos completamente generales, faltaba una relación matemática. Saturno, por ejemplo, se halla dos veces más lejos del Sol que Júpiter, y en consecuencia debería necesitar el doble de tiempo en recorrer su órbita, o sea veinticuatro años; pero lo hace en treinta. Algo similar se puede afirmar de los demás planetas. Kepler encontró que a medida que los planetas se alejan del Sol su movimiento se torna más lento. Si viajaran siempre a la misma velocidad, Saturno, con una órbita dos veces más larga que la de Júpiter, necesitaría el doble de tiempo para completar una revolución; sin embargo necesita dos veces y media.

Nadie antes que Kepler se había planteado la pregunta de *por qué* era así, y nadie se había hecho también la pregunta de por qué solamente había seis planetas. La última resultó totalmente estéril, la primera resultó enormemente fértil. La respuesta de Kepler fue que debía existir una *fuerza que emana del Sol* y que hace posible que los planetas se muevan en sus órbitas. Los planetas exteriores se mueven más lentamente debido a que esta fuerza les llega

disminuida en proporción a su distancia “del mismo modo que lo hace la fuerza de la luz”.

Por primera vez desde la antigüedad, se hacía un intento no sólo de *describir* los movimientos celestes en términos geométricos, sino de asignarles una *causa física*.

Hemos llegado al punto en que la astronomía y la física se hallan de nuevo, en un divorcio que duró dos mil años. La unión de estas dos mitades produjo las tres leyes de Kepler, que son los pilares sobre los que Newton construyó el universo moderno.

En el siguiente pasaje clave del *Mysterium Cosmographicum* vemos cómo Kepler llega a su resultado:

*“Si deseamos acercarnos a la verdad y establecer alguna correspondencia en las proporciones [entre las distancias y las velocidades de los planetas], entonces debemos elegir entre estos dos supuestos: o las almas que mueven los planetas son menos activas cuanto más lejos se halla el planeta del Sol, o existe tan sólo un alma motora en el centro de todas las órbitas, es decir el Sol, que dirige a los planetas más vigorosamente cuanto más cerca está, pero cuya fuerza se halla casi exhausta cuando actúa sobre los planetas exteriores debido a la larga distancia y a la debilitación de la fuerza que lo vincula”.*¹

Los detalles de la teoría de Kepler eran de nuevo completamente erróneos. La fuerza motriz que él atribuía al Sol no se parece en nada a la fuerza de gravedad, era –como señala Koestler en su libro- una especie de látigo que acicateaba a “los indolentes planetas para que sigan su curso”. Como resultado de ello, el primer intento de Kepler de formular la ley que relaciona las distancias planetarias con los periodos era tan claramente errónea, que él mismo lo tuvo que admitir. Pero fue el mismo Kepler quien encontró la solución correcta, al final de su vida, a través de su tercera ley.

Sin embargo, poco faltó para que Newton no pudiera disponer de las leyes de Kepler. Éstas sólo podían ser descubiertas con la ayuda de los inigualables datos del “tesoro de Tycho”; y cuando Kepler lo conoció sólo le quedaban dieciocho meses de vida.

Kepler parte para su encuentro con Tycho Brahe (1546-1601) el 1 de enero de 1600. Su llegada a la isla de Tycho significó una reorganización en el trabajo de los asistentes de éste. A Kepler le

encomendaron el estudio de las posiciones del planeta Marte, cuyo movimiento había derrotado a Tycho y a sus asistentes. Kepler alardeó de que iba a resolver el problema de su órbita en ocho días, e incluso hizo una apuesta en torno a ello. Los ocho días se transformaron en ocho años, pero de esa lucha con el recalcitrante planeta surgió su libro *Astronomía Nova*.

Tycho murió el 24 de octubre de 1601, el 6 de noviembre de ese año, Kepler fue nombrado sucesor de Tycho en el cargo de matemático imperial, y permaneció en Praga como tal entre 1601 y 1612, hasta la muerte de Rodolfo II.

Fue el periodo más fructífero de su vida, durante el cual publicó la que podríamos considerar su obra maestra, la que lleva por título:

NUEVA ASTRONOMÍA basada en la causalidad o FÍSICA CELESTE derivada de las investigaciones de LOS MOVIMIENTOS DE LA ESTRELLA MARTE. Fundada en las observaciones del NOBLE TYCHO BRAHE

Kepler trabajó en ella ininterrumpidamente desde 1600 hasta 1606. Contiene las dos primeras de sus leyes planetarias: 1) Los planetas se mueven alrededor del Sol describiendo órbitas elípticas con el Sol en uno de sus focos. 2) Los planetas no se desplazan en sus órbitas con velocidad uniforme, sino de forma tal que una línea trazada desde el planeta hasta el Sol barre áreas iguales en tiempos iguales. La tercera ley la publicaría más tarde.

Las leyes de Kepler constituyen las primeras leyes naturales en el sentido moderno. Afirmaciones precisas y verificables acerca de las relaciones generales que rigen fenómenos particulares, expresadas en términos matemáticos. Separaron a la astronomía de la teología y la unieron a la física.



Tycho Brahe [1546-1601].

Además, pusieron fin a la obsesión que gobernó la cosmología occidental durante dos mil años, que era la de esferas girando sobre otras esferas, y la sustituyeron por una visión de cuerpos materiales, similares a la Tierra, flotando libremente en el espacio, movidos por fuerzas físicas actuando sobre ellos.

La forma en que Kepler llegó a su nueva cosmología es verdaderamente fascinante y es imposible comprenderla en toda su dimensión en este apretado resumen. No obstante, mencionaremos a grandes rasgos algunos de los hechos más sobresalientes de dicha historia.

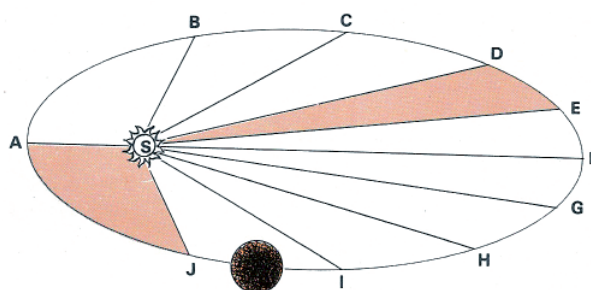
Recordemos que Tycho encomendó a Kepler el estudio del movimiento de Marte, que había agotado la paciencia de los colaboradores de Tycho y de él mismo. Kepler comentaría más tarde:

“Creo que fue un acto de la Divina Providencia el que yo llegara precisamente en el momento en que Longomontanus estaba ocupado con Marte. Porque sólo Marte nos permite penetrar en los secretos de la astronomía que de otro modo permanecerían para siempre ocultos”!

La razón de esta posición clave de Marte es que, de entre todos los planetas exteriores, su órbita es la que mayor excentricidad tiene, y como todos esperaban que los planetas se movieran en círculos, era imposible reconciliar la teoría con las observaciones.

Kepler, ya contando con las cifras confiables de Tycho, y asumiendo una actitud de absoluto respeto ante éstas, comienza a modificar su modelo. Él no sabía aún que la órbita era una elipse; todavía creía que era un círculo. Pero incluso así, para conseguir unos resultados aproximadamente correctos, era preciso situar el centro del círculo fuera del centro del Sol. En consecuencia formuló esta pregunta: si la fuerza que mueve los planetas procede del Sol, ¿por qué insisten en girar en torno a un punto fuera del centro del propio Sol? Kepler respondió a la pregunta suponiendo que cada planeta estaba sujeto a dos influencias conflictivas: *la fuerza del Sol y una segunda fuerza localizada en el propio planeta*. Esta competencia ocasionaba que unas veces se acercara al Sol y otras se alejara de él.

Estas dos fuerzas son, como sabemos, la gravedad y la inercia. Kepler nunca llegó a formular tales conceptos, pero preparó el camino para Newton (1642-1727) estableciendo dos fuerzas dinámicas



Primera y segunda leyes de Kepler.

para explicar la excentricidad de las órbitas. Antes que Kepler no se había sentido la necesidad de una explicación física; el fenómeno de la excentricidad era simplemente “salvado” mediante la introducción de un epiciclo que hacía girar el centro de la órbita del planeta en torno al centro del Sol. Kepler reemplazó las ruedas ficticias por fuerza reales.

La tarea que se le presentaba consistía –y la presentamos enormemente resumida- en definir la órbita de Marte. Eligió del tesoro de Tycho cuatro posiciones de este planeta observadas en las fechas cuando el planeta estaba en oposición al Sol. El problema geométrico que tenía que resolver era, por tanto, determinar la órbita de esas cuatro posiciones. Era un problema que no podía ser resuelto por un método matemático riguroso, sino sólo por aproximación, es decir, por una especie de procedimiento por tanteo que tenía que ser proseguido hasta que todas las piezas del rompecabezas encajaran aceptablemente. El increíble trabajo que esto representa puede calcularse por el hecho de que el borrador de los cálculos de Kepler (conservados en el manuscrito) ocupa novecientos folios escritos con letra pequeña.

Al final de ese capítulo de la *Nueva Astronomía*, Kepler parece haber conseguido el triunfo. Como resultado de sus “más de setenta tanteos”, obtuvo para el radio de la órbita y para los puntos centrales, valores que daban, con un permisible error de menos de dos minutos, las posiciones correctas de Marte en las diez oposiciones registradas por Tycho. El invencible Marte parecía haber sido finalmente conquistado. Kepler proclamó su victoria con una inusitada modestia:

“Verás ahora, diligente lector, que la hipótesis basada en este método no solamente satisface las cuatro posiciones en las cuales se

basa, sino que también representa correctamente, dentro de un margen de dos minutos, todas las demás observaciones”.^k

Después siguen en su libro tres páginas de tablas para probar lo correcto de su afirmación; y luego, sin otra transición el siguiente capítulo empieza con estas palabras:

“¿Quién hubiera pensado que fuese posible? Esta hipótesis, que tan exactamente concuerda con las oposiciones observadas, es sin embargo falsa...”^l

En los siguientes capítulos Kepler explica, con gran cuidado, cómo descubrió que la hipótesis era falsa y por qué debía ser rechazada. A fin de verificarla con una nueva prueba, seleccionó dos piezas especialmente raras del tesoro de observaciones de Tycho, ¡y no encajaban! Y cuando intentó ajustar su modelo a ellas fue aún peor: las posiciones observadas de Marte diferían de las que su teoría exigía en más de ocho minutos de arco.

Era una catástrofe. Ptolomeo, incluso Copérnico, podían permitirse despreciar una diferencia de ocho minutos, debido a que sus observaciones eran exactas tan sólo con un margen de diez minutos. Y Kepler señala:

“Pero nosotros, que por la divina bondad hemos dispuesto de un observador tan exacto como Tycho Brahe, estamos obligados a reconocer este divino don y utilizarlo... En consecuencia, voy a tener que seguir el camino hacia esa meta según mis propias ideas. Porque si creyera que podía ignorar esos ocho minutos, hubiera elaborado mi hipótesis de acuerdo con ello. Pero, puesto que no me resulta permisible ignorarlos, esos ocho minutos indican el camino hacia una completa reforma de la astronomía...”^m

Tal y como señala Koestler, era la rendición de una enorme voluntad de trabajo y de una mente genial ante los “irreductibles y obstinados hechos”. En una época anterior, si un detalle menor no encajaba con una hipótesis importante, se hacía un poco de trampa o se dejaba de lado; ahora esta indulgencia ya no era permitida. Se había iniciado una nueva era de austeridad y rigor en la historia del pensamiento.

El momento crucial de este cambio se encuentra expresado de forma dramática en la obra de Kepler. En el *Mysterium Cosmographicum* se fuerzan los hechos para encajarlos en la teoría. En la *Astronomia Nova*, una teoría, edificada sobre años de labor y

tormento, es inmediatamente rechazada debido a una discrepancia de ocho miserables minutos. En vez de maldecirlos como una roca con la que se tropieza, Kepler los transformó en la piedra angular de una nueva ciencia.

Amén de todas las causas de carácter general que formaban el telón de fondo de todos los cambios que estaban teniendo lugar en esta época, lo que convirtió a Kepler en el primer constructor de leyes de la naturaleza fue algo muy específico y fundamental: fue su introducción de la causalidad física en la geometría formal de los cielos lo que hizo que resultara imposible para él ignorar los ocho minutos de arco. Mientras que la cosmología estuvo regida por reglas puramente geométricas, independientemente de las causas físicas, las discrepancias entre teoría y hechos podían ser superadas insertando otra rueda dentro del sistema. En un Universo movido por fuerzas reales, eso ya no era posible.

BIBLIOGRAFÍA

1. D. Bohm, Causalidad y azar en la física moderna, Dirección General de Publicaciones, UNAM, México (1959).
2. L. Zea, Introducción a la filosofía, Dirección General de Publicaciones, UNAM, México (1981).
3. Platón, Obras Selectas, Edimat Libros S. A., Madrid (2000).
4. A. Koestler, Kepler, Salvat Editores, Barcelona (1987).

NOTAS

- a. Platón, Obras Selectas, La República, Libro Séptimo, pp. 291 y 292.
- b. A. Koestler, Kepler, p. 9.
- c. Ibid., p. 22.
- d. Ibid.
- e. Ibid., p. 23.
- f. Ibid., p. 25.
- g. Ibid., p. 26.
- h. Ibid., p. 27.
- i. Ibid., p. 33.
- j. Ibid., p. 79.
- k. Ibid., p. 85.
- l. Ibid.
- m. Ibid.