

PARTE I

Historia de la cosmología antigua y moderna

CAPÍTULO I

De los presocráticos a Kepler

SECCIÓN 1. LA CIENCIA EMPÍRICA INCIPIENTE DE LOS PRESOCRÁTICOS

La ciencia moderna empieza con los filósofos presocráticos y este inicio fue posible porque éstos permitían una crítica racional de sus ideas. Por ejemplo, Anaximandro de Milete (610-546 a.C.) cuestionó la idea de su maestro y contemporáneo, Tales de Milete (624-546 a.C.) quien había postulado la hipótesis de que la Tierra es un disco plano que flota en un océano infinito de agua. La propuesta de Tales ciertamente estaba modulada por las observaciones de ese entonces. Mientras que Anaximandro sostuvo que la Tierra no está sostenida en nada y flota en un vacío equidistante de las demás cosas, como el Sol y la Luna. ¿Cómo llegó Anaximandro a esta idea que en cierta medida anticipó la de Newton, la cual se basaba en fuerzas gravitacionales inmateriales? Ciertamente, “no por la observación, sino por el razonamiento.”² Sin embargo, también Anaximandro tuvo dificultad para desprenderse de las observaciones locales y el sentido común —que nos dicen que caminamos en un plano— al concebir la Tierra como un cilindro, con habitantes caminando en los dos planos opuestos. Anaxágoras (500-428 a.C.) fue el primero en postular que el Sol es una esfera caliente, la Luna una esfera fría que refleja la luz del Sol y la Tierra y las estrellas también son esferas, las cuales están a mucha mayor distancia, —ideas que le valieron ser expulsado de Atenas a Asia Menor como hereje—.

Deseando poner a prueba las ideas de Anaxágoras y Anaximandro, Aristarcos (310-230 a.C.) y Eratóstenes (276–196 a.C.) —quien era jefe de la famosa biblioteca de Alejandría—, diseñaron pruebas experimentales. Eratóstenes supo que existía un pozo en Syene (hoy Aswan), unos 5000 ‘estadios’ egipcios al sur de Alejandría, al cual el Sol enviaba sus rayos verticalmente, cada solsticio de verano (21 de junio), iluminando la base profunda del mismo. Un ‘estadio’ es una medida de longitud de 157 metros. Por otro lado, el Sol nunca está verticalmente sobre Alejandría. Un 21 de junio, Eratóstenes colocó un palo en la Tierra, en posición vertical, en Alejandría en la hora que el Sol iluminaba en Syene el fondo del pozo. Midiendo el ángulo que hacían los rayos del Sol con el palo en Alejandría (tomando en cuenta la sombra que éste formaba en la Tierra) obtuvo el valor de 7.2 grados. Con estos datos calculó la circunferencia de la Tierra en 250,000 estadios, es decir, 39,250 kilómetros. Dado que hoy sabemos que ésta es 40,100 Km, consta que ¡Eratóstenes la había calculado con un error de solamente 2%!

CUADRO MATEMÁTICO 1.1 CÓMO CALCULÓ ERATÓSTENES LA CIRCUNFERENCIA Y EL DIÁMETRO DE LA TIERRA

Este ángulo de 7.2 grados, por definición, debía ser igual al ángulo que el pozo y el palo formaban si se hubieran unido en el centro de la Tierra. Si la Tierra es una esfera, entonces su circunferencia debería de ser igual a $\frac{360}{7.2} * 5000$ estadios = 250,000 estadios, es decir, 39,250 kilómetros. Dado que los griegos sabían que la circunferencia de un círculo es 2π veces su radio r , Eratóstenes supo calcular el radio de la Tierra, a saber, $r = 6,250$ km. y, por lo tanto, su diámetro, a saber, 12,500 km.

² Karl Popper, *Conjeturas y Refutaciones* (1989): 177

Con estos datos, Eratóstenes logró calcular también el diámetro de la Luna y su distancia de la Tierra, obteniendo valores de 3,125 y 312,500 km, respectivamente. Hoy sabemos que esta última distancia es 384,000 km, ¡un error de solamente 19%!

CUADRO MATEMÁTICO 1.2 CÓMO CALCULÓ ERATÓSTENES LA DISTANCIA DE LA LUNA A LA TIERRA

Durante un eclipse Lunar, la Luna tarda 50 minutos en desaparecer totalmente detrás de la sombra de la Tierra y 200 minutos en pasar por esta sombra hasta aparecer del otro lado. Esto significa que el diámetro de la Luna era la cuarta parte (50/200) del de la Tierra, a saber, 3,125 km. Eratóstenes se dio cuenta que, estirando su brazo, la uña de un dedo cubre la Luna, y dado que el brazo es cien veces más largo que la uña, se sigue que la distancia de la Tierra a la Luna es cien veces el diámetro de la Luna, a saber, aproximadamente 312,500 km.

Aristarcos completó la labor de Eratóstenes. Según Arquímedes (287-212 a.C.), Aristarcos “sostenía la hipótesis de que las estrellas fijas y el Sol son inamovibles y que la Tierra gira alrededor del Sol en una trayectoria circular.”³ Aristarcos sostuvo, además, que la Tierra gira alrededor de su eje cada 24 horas, lo que es la causa de la alternancia de día y noche. Además, calculó el diámetro del Sol y su distancia de la Tierra. A pesar de ciertos errores de cálculo, debido a los limitados medios disponibles en aquel entonces, el diseño experimental de Aristarcos para medir el diámetro del Sol y su distancia a la Tierra era básicamente correcto.

CUADRO MATEMÁTICO 1.3 CÓMO CALCULÓ ARISTARCOS EL DIÁMETRO DEL SOL Y SU DISTANCIA A LA TIERRA

Aristarcos razonó, correctamente, que la media Luna significa que los rayos del Sol están verticalmente sobre la Luna, visto desde la Tierra, y midió el ángulo de los rayos del Sol sobre la Tierra durante la media Luna. Llegó al resultado de un ángulo de 87 grados y, usando la trigonometría ya en uso, dedujo que el Sol debe de estar 20 veces más lejos de la Tierra que la Luna, a saber más de 6,400,000 kilómetros. En este caso, le faltó a Aristarcos un poco de precisión. El mencionado ángulo no es de 87 grados, sino 89.85 grados. Este error parece pequeño, pero el tangente de un ángulo que se acerca a 90 grados, tiende a infinito, de modo que un error mínimo tiene grandes consecuencias. En este caso, el incremento de solamente 2.85 grados es causa de que la distancia del Sol a la Tierra no es 20 sino 400 veces la distancia de la Luna, a saber, 150 millones de km.

Usando el mismo principio que Eratóstenes, cuando éste usó su uña y su brazo para calcular la distancia de la Luna hasta la Tierra, Aristarcos razonó, correctamente, que el hecho de que la esfera de la Luna cubre exactamente la esfera del Sol, en un eclipse del Sol, significa que la distancia del Sol a la Tierra es 100 veces su diámetro, de modo que éste debería de ser unos 64,000 km. De hecho el diámetro mide 1,390,000 km.

Los presocráticos, en especial Eratóstenes y Aristarcos, se dieron cuenta de que a los cambios cíclicos de día y noche, de las estaciones del año y de las fases de la Luna, subyace un fenómeno estable que los explica. Otros filósofos, sobre todo Heráclito (540-475 a.C.), Parménides (515-450 a.C.) y

³ Citado en Simon Singh, *Big Bang. The Origin of the Universe* (2004): 22

Demócrito (470-380 a.C.) intentaron profundizar en este problema de cambio y estabilidad o fijeza en el Universo. Heráclito quedó impresionado por el hecho de que todo cambia y nada queda igual.⁴ Concibió la realidad no como una cosa fija, sino como un proceso comparable con el fuego. Según Popper, en la concepción de Heráclito, el mundo era “no la suma de todas las cosas, sino la totalidad de todos los **eventos** o cambios o hechos”.⁵ Una cosa se transforma en otra y, por lo tanto, las cosas no tienen identidad propia fija, de modo que lo que aparece en el mundo de los fenómenos existentes y cambiantes, no es. Pero, por otro lado, lo que realmente es no aparece. Heráclito sostenía, como dice Popper, que “la verdadera naturaleza de las cosas gusta ocultarse”.⁶

Demócrito coincidía, en parte, con Heráclito y, en parte, discrepaba de él. Coincidía con Heráclito, al afirmar que “en realidad, no conocemos nada por haberlo visto; pues, la verdad se halla oculta en las profundidades”.⁷ Discrepaba, en cuanto sostuvo que el mundo es la suma de las cosas, no la suma de los procesos o eventos. Estas cosas eran partículas básicas o átomos, en griego ατομοσ, que son duraderos y no cambian.

Heráclito creía que el proceso de cambio continuo de todo lo que existe obedece a una ley oculta o un destino inamovible, que es como su ‘razón’ y ‘medida’ la cual determina este cambio con su cuantía y plazo. En cambio, según Demócrito, el cambio continuo de todo lo que existe se debe a la recombinación continua de las partículas básicas. Según Popper, “la idea de Heráclito se asemeja a nuestra moderna concepción de la ley natural”.⁸ En cambio, en la idea de Demócrito se anticipa, en forma embrional, la visión materialista que reduce la realidad a partículas básicas y los cambios en la realidad a la recombinación de partículas.

SECCIÓN 2. EL MODELO GEOCÉNTRICO DE ARISTÓTELES Y PTOLOMEO

Platón (427 a 347 a.C.), aristócrata de Atenas consternado por los cambios sociales y el poder de la clase comerciante en la democracia emergente de su ciudad, buscó estabilidad en las Ideas o Formas eternas, fuera del espacio y el tiempo, que subsisten como prototipo de las cosas perecederas creadas en el espacio y el tiempo, las cuales reciben de estos objetos eternos su nombre y su forma. Las Ideas son como el padre que fecunda al Espacio como a una madre y las cosas visibles son sus múltiples hijos con rasgos de su padre, pero diferentes entre sí. Aquí estamos en el origen de la corriente filosófica del idealismo, que se encuentra en el lado opuesto del materialismo.

Aristóteles (384 a 322 a.C.), comentando estas ideas que Platón expresa en *Timeo*, sostuvo que “si el conocimiento o el pensamiento han de tener algún objeto, éste tendrá que ser cierta entidad inalterable, diferente de las cosas sensibles (...) y los múltiples objetos que tienen el mismo nombre que cierta Forma o Idea existen por su participación de la misma.”⁹ Aristóteles concibe esta Idea o Forma como la ‘esencia’ de las cosas, que se puede y debe captar en definiciones universales. Las cosas perecederas tienden ‘automáticamente’ a esta esencia o forma ideal en que participan imperfectamente. El esen-

⁴ πάντα ρει και ουδεν μενει

⁵ Karl Popper, *Quantum Theory and the Schism in Physics* (1982): 27

⁶ Karl Popper, *Conjeturas y Refutaciones* (1989): 184

⁷ Karl Popper, *Conjeturas y Refutaciones* (1989): 193

⁸ Karl Popper, *Quantum Theory and the Schism in Physics* (1982): 29

⁹ Citado en Popper, *La Sociedad Abierta y sus Enemigos*, (1982): 44

cialismo de Aristóteles implica el concepto de la causación por el estado final, a saber, la causación por la Forma ideal y final de las cosas y seres vivos, a la que tienden automáticamente. Si bien Aristóteles no creía, como Platón, que estas Formas son objetos reales, sí coincidía con él en que *la ciencia no busca leyes universales* para explicar la variación de los fenómenos precederos, *sino definiciones universales* que captan su esencia o forma eterna a la que tienden. Es por esta razón que Aristóteles se dedicaba a clasificar las cosas y establecer sus jerarquías. En el campo de la biología tuvo aciertos impresionantes, por ejemplo, cuando observó que los delfines amamantan a sus crías y los clasificó como mamíferos y no como peces.

Sin embargo, ese método científico de *la búsqueda de definiciones universales que captan la esencia de las cosas, calificada por Popper como 'esencialismo metodológico'*¹⁰ dio al traste con el enfoque científico incipiente de los presocráticos que buscaba *leyes universales*, el cual se veía en forma embrional en el intento de los presocráticos de corroborar sus hipótesis mediante experimentos. Cuando se trata de buscar una ley universal, la pregunta no es '¿qué es esencialmente esta cosa?', sino '¿cómo influye la variación de la conducta de aquella cosa en la variación de la conducta de esta cosa?'.

Según Aristóteles, la Tierra y las esferas celestiales se rigen por leyes naturales diferentes. En la Tierra todas las cosas son corruptas y cambiantes y en los cielos todo es permanente, puro y perfecto, sin cambio alguno. Los movimientos de los objetos celestiales son perfectos, es decir, circulares. En la Tierra, los cambios se 'explican' por el hecho de que *las cosas buscan su lugar o destino final en la jerarquía de los elementos*. Esta 'explicación' realmente no es científica, porque no concibe una ley natural sino una jerarquía estable, dentro de la cual las cosas buscan su lugar según su Forma. Por ejemplo, la Tierra se encuentra abajo; arriba de la Tierra está el agua; arriba del agua el aire; y arriba del aire el fuego. Por esta razón, una cosa como, por ejemplo, una roca (siendo 'esencialmente' hecha de Tierra), suspendida en el aire se mueve hacia abajo, porque la Tierra es su lugar; en cambio burbujas de aire, atrapadas en el agua, se desplazan hacia arriba, para encontrar su lugar. Y por la misma razón, la lluvia cae hacia abajo, para llegar, a través de los ríos, al mar, y el fuego sube hacia arriba. Por la misma razón, según Aristóteles, una cosa más pesada cae con más rapidez que una cosa más ligera, porque tiene un mayor deseo de regresar a su lugar, a saber, la Tierra. El éter era el quinto elemento, en el cual quedan insertados los objetos celestiales y sus revoluciones.

Con su esencialismo, Aristóteles desplazó la correcta concepción del Universo de Eratóstenes y Aristarcos, por casi dos mil años, debido también a que Hipparchos de Rhodes (190-120 a.C.) y Ptolomeo de Alejandría (100-170 d.C.) popularizaron su modelo geocéntrico al reducir a siete el número de esferas celestiales postulado por Aristóteles —en donde los astros dan vueltas alrededor de la Tierra en círculos perfectos—. Éstas eran: la Tierra que se localizaba en el centro; luego una esfera para la Luna; una para Mercurio; una para Venus; una para Marte; una para el Sol; una para Júpiter; una para Saturno; ellos consideraban a los astros lejanos como agujeros en la superficie exterior de la bola que representa el Universo. En realidad, la ruta irregular de Marte, Júpiter y Saturno, que parecen pararse, luego dar marcha atrás por un tiempo y luego volver a su ruta anterior, se explicaba bien, en el modelo heliocéntrico de Eratóstenes y Anaximandro, por el hecho de que el año de estos

¹⁰ Karl Popper, *La Sociedad Abierta y sus Enemigos* (1982): 45

planetas dura más que el de la Tierra, de modo que la Tierra los ‘alcanza’ y ‘rebasá’, generando así la ilusión óptica de la ruta retrograda de los planetas exteriores, pero no se explica, en absoluto, con el modelo aristotélico de los círculos perfectos. Entonces, Hipparchos y Ptolomeo añadieron una hipótesis auxiliar que hacía irrefutable su modelo: postularon que estos planetas se mueven en círculos grandes alrededor de la Tierra (los ‘deferentes’), pero, simultáneamente giran en un círculo pequeño (los ‘épíclis’) alrededor de un punto situado en el círculo grande. Así, el doble movimiento, bastante complicado, explicaría la trayectoria retrógrado de dichos planetas. Esta idea es un caso típico de verificacionismo.

Las obras de Aristóteles, que formaban parte del legado cultural de los árabes, pasaron a Occidente al traducirse al latín, en los siglos XII y XVIII. A partir de este momento, Aristóteles desplazó a Platón como *el* filósofo en Europa. El esencialismo de Aristóteles enlazaba, de una manera asociativa e intuitiva, con ideas cristianas sobre la perfección propia de la vida eterna. Hasta el día de hoy la palabra ‘cielo’ se refiere a dos cosas bien distintas, a saber, la idea de la vida eterna del alma inmortal con Dios; y la idea del firmamento con sus estrellas. La teología medieval asociaba intuitiva y erróneamente estas dos ideas, como si se tratara de una sola cosa propiciando en mayor grado la confusión de teología y astrofísica que tanto les costó a Kepler, Galileo y Newton destrabar, en el siglo XVII.

SECCIÓN 3. COPÉRNICO: ENTRE LA METAFÍSICA ARISTOTÉLICA Y EL MODELO HELIOCÉNTRICO

Nikolaj Kopperrnikg, o Nicolás Copérnico (1473-1543) obtuvo, gracias a su tío Lucas, Obispo de Ermland, el puesto de canónigo de la catedral de Frauenburg en la costa del Mar Báltico, en la frontera de Prusia Oriental, Ermland y Polonia. Fue célibe, más no sacerdote. Aprovechó la jugosa prebenda y el mucho tiempo sobrante relacionados con este puesto y forma de vida, para dedicarse a la investigación astronómica, que llevó a cabo de 1513 a 1543, en una torre fortificada del muro que rodeaba la colina de la catedral, con vista al mar. Inesperadamente, en un manuscrito suyo de 20 páginas, el *Commentariolus* de 1514, el cual nunca publicó, pero sí dio a conocer a un público selecto, aparecen siete hipótesis audaces e innovadoras:¹¹

- 1) los cuerpos celestiales no comparten un solo centro común;
- 2) la Tierra no es el centro del Universo, sino solamente de la órbita de la Luna;
- 3) el Sol es el centro de las órbitas de los planetas y de las estrellas lejanas;
- 4) la distancia de la Tierra al Sol es insignificante en comparación con la distancia a las estrellas, lo que explica la aparente falta de paralaje;
- 5) el aparente movimiento de las estrellas en el firmamento, y la alternancia de día y noche, es el resultado de la rotación de la Tierra sobre su eje;
- 6) el movimiento anual aparente del Sol y la sucesión anual de las estaciones resulta del hecho que la Tierra gira alrededor del Sol en una posición ligeramente inclinada;
- 7) el estancamiento aparente y el posterior movimiento aparentemente retrograda de algunos planetas es el resultado de nuestra posición como observador entre el Sol y estos planetas.

¹¹ Simon Singh, *Big Bang. The Origin of the Universe* (2004): 38 & Arthur Koestler, *The Sleepwalkers* (1989):148-149

Excepto la segunda parte de la tercera hipótesis, todas son verdaderas y sorprendentemente modernas. Un diagrama de Copérnico presenta el sistema solar con el Sol en el centro, y luego, en respectivos círculos alrededor del Sol, Mercurio (1), Venus (2), la Tierra (3) con la Luna girando alrededor de la Tierra (4), Marte (5), Júpiter (6), Saturno (7) y las estrellas fijas (8).

Al conocer estas hipótesis, a las que Copérnico llamó axiomas, uno podría pensar que la suya era una mente genial y audaz, capaz de semejante rompimiento con el tradicional esquema aristotélico-ptolomeico. ¡Nada más lejos de la verdad histórica! Copérnico aceptaba las observaciones astronómicas de Ptolomeo y la física y metafísica de Aristóteles como una tradición venerable a la que había que sujetarse. Cuando un matemático de Nürenberg, Johannes Werner, se atrevió a poner en duda ciertas observaciones de Ptolomeo sobre la octava esfera de las estrellas lejanas, Copérnico atribuyó esta ‘calumnia’ a ‘alucinaciones’:

“Nos corresponde seguir los métodos de los antiguos estrictamente y aferrarnos a sus observaciones que nos han sido transmitidas como un Testamento. Y a quien piensa que éstas no son enteramente confiables, seguramente le quedan cerradas las puertas de la ciencia. Quedará postrado ante esta puerta.... entregado a sus propias alucinaciones al atreverse calumniar a los antiguos.”¹²

El hecho de que varios de los antiguos hubieran sugerido el modelo heliocéntrico convenció a Copérnico de no sentirse traidor al tomarlo como un supuesto para sus cálculos. En el original manuscrito de su obra principal, hay una referencia tachada a Aristarcos. A tal grado confiaba Copérnico en las observaciones de los antiguos, que, en su famosa obra de 1543, *De revolutionibus orbitum coelestium*, se basa en éstas y solamente aparecen 27 observaciones propias, hechas, además, con instrumentos imprecisos y más primitivos de los que estaban a la venta en su tiempo, pero que no quiso comprar, aunque le sobraba dinero para hacerlo. Copérnico era un archí-conservador. Lo que motivó sus siete axiomas no fue un deseo audaz de innovar el modelo aristotélico-ptolomeico del Universo, sino, al contrario, depurar el modelo de Ptolomeo de algunos ‘defectos’ por los cuales éste se desviaba de la física y metafísica de Aristóteles. Según Ptolomeo, los planetas no se mueven con movimiento uniforme alrededor de la Tierra tomándola como su centro, y por eso inventó un punto imaginario en el espacio, a cierta distancia de la Tierra, el llamado *punctum equans*, porque visto desde allí su movimiento sí resulta uniforme y circular, siempre y cuando se introduzcan los famosos epiciclos para explicar el movimiento retrograda de los planetas. Por otro lado, Copérnico no olvidaba que Aristóteles había establecido que los cuerpos celestiales han de moverse en círculos perfectos alrededor de su centro, con movimiento uniforme, como se lee a continuación:

“Nuestros ancestros asumían un número grande de esferas celestiales por una razón específica: explicar el movimiento aparente de los planetas por el principio de la regularidad. Porque ellos pensaban que sería absurdo que un objeto celestial no se moviera siempre con velocidad uniforme en un círculo perfecto.”¹³

¹² Citado en Arthur Koestler, *The Sleepwalkers* (1989): 203

¹³ Citado en Arthur Koestler, *The Sleepwalkers* (1989): 206

Cuando Nicolás Copérnico quedó huérfano de padre a los 10 años, él y sus hermanos fueron adoptados por su tío Lucas, el futuro Obispo de Ermland, lo que hace pensar que su madre ya había muerto antes. Su tío clerical no medía gastos en la educación de los hijos de su hermana, pero era rígido, autoritario e irritable. Andrés, el hermano mayor de Nicolás se rebeló y escogió el mal camino, pero Nicolás se sometió, aunque en el fondo reprimió mucho enojo: así desarrolló un desorden compulsivo-obsesivo. Para su mente perfeccionista solamente existían absolutos, es decir, todo lo que no era blanco era negro y lo que era gris le molestaba como si fuera negro. Por eso, esta mancha en el modelo ptolomeico significaba una molestia que no dejaba de irritarlo y para que su mente alcanzara la paz era preciso quitarla, como él mismo admitió: “*un sistema de este tipo no parecía suficientemente absoluto, ni suficientemente placentero para la mente.*”¹⁴

Para restablecer en el modelo del Universo los principios de Aristóteles en su pureza, Copérnico quiso eliminar el *punctum equans* y la no-uniformidad del movimiento de los planetas, de forma que éstos volvieran a dar vueltas en círculos perfectos, alrededor de su verdadero centro, con movimiento uniforme. Copérnico admitió otro tanto en su *Commentariolus* de 1514: “*Al darme cuenta de estos defectos [en el modelo de Ptolomeo], a menudo me preguntaba si no había un mejor arreglo de los círculos (..) en donde todo se movía uniformemente alrededor de su centro, así como el principio del movimiento absoluto [de Aristóteles] lo requiere.*”¹⁵

Ahora bien, al poner el Sol y no la Tierra en el centro del sistema, Copérnico creyó lograr su objetivo, es decir, eliminar los movimientos irregulares y no-uniformes de los planetas y sustituirlos por movimientos perfectos, a saber, circulares y uniformes alrededor de su centro. La conclusión es una paradoja: “*Su deseo de preservar el sistema ptolomeico lo llevó a revertirlo.*”¹⁶ Los siete axiomas revolucionarios del *Commentariolus*, que reaparecieron sin modificación en 1543, casi 30 años después, en la síntesis de su teoría dentro de las primeras 20 páginas de su famosa obra *De las Revoluciones de las Esferas Celestiales*, fueron hipótesis auxiliares que le servían para llevar a cabo su contra-reforma aristotélica del modelo ptolomeico.

A partir del *Commentariolus*, durante 30 años, Copérnico se puso a desarrollar su modelo matemáticamente. Sin embargo, su neurosis compulsivo-obsesiva y la ciega aceptación del pensamiento de Aristóteles afectaron seriamente los siete axiomas al grado de destruirlos en el camino. Copérnico entró en escrúpulos con respecto a su propia teoría. Poco a poco se daba cuenta que las observaciones de los antiguos no eran tan confiables como en un principio creía. Por otro lado, no se atrevía ir en contra de las observaciones y principios de los antiguos. Es más, mientras más se adentraba en el problema, más se daba cuenta que las observaciones imprecisas de los antiguos y las suyas propias chocaban con su idea obsesiva del movimiento circular de los objetos celestiales. Para encontrar paz para su mente, atormentada por la duda de si aceptar la idea del círculo perfecto ó modificarla a la luz de los datos de la observación, decidió no abandonar su idea obsesiva sino seleccionar y ocasionalmente falsificar los datos¹⁷ e introducir cada vez más círculos y epiciclos, para así salvar su teoría de los movimientos celestiales perfectos. Este es un ejemplo típico de verificacionismo, un proceder

¹⁴ Citado en Arthur Koestler, *The Sleepwalkers* (1989): 206

¹⁵ Citado en Arthur Koestler, *The Sleepwalkers* (1989): 148, 206

¹⁶ Arthur Koestler, *The Sleepwalkers* (1989): 202, 206

¹⁷ Arthur Koestler, *The Sleepwalkers* (1989): 259

contrario a la verdadera ciencia. Copérnico empezó, en 1514, con 34 círculos y epiciclos y terminó, en 1543, después de 30 años de fatigosas elaboraciones, con 48, es decir, ocho más que en el modelo del mismo Ptolomeo.¹⁸

Lo peor de todo era que para conservar sus círculos amados, Copérnico tuvo que renunciar a su idea original de eliminar el *punctum equans* del modelo del Universo, e introducir varios de estos puntos. En su obra maestra, el centro de la órbita de Saturno queda lejos del Sol, cerca de la órbita de Venus; el centro de la órbita de Júpiter, cerca de la órbita de Mercurio; y el movimiento ‘circular’ de la Tierra se disuelve en una combinación de no menos de nueve movimientos circulares, cada uno con su propio centro. A lo largo de su obra, lo que había empezado como un modelo simple y claro —los siete axiomas— “*se había transformado en una pesadilla confusa.*”¹⁹

Otra cosa que inquietaba a Copérnico era el rechazo del mundo académico a la idea de que la Tierra gira alrededor de su eje. Por ejemplo, Regiomontanus (1436-1476), astrónomo famoso en toda Europa por las precisiones matemáticas que había realizado en el modelo ptolomeico y su defensa aguerrida de este modelo se burlaba de la idea de que la Tierra pudiera girar alrededor de su eje, argumentando que, en tal caso, las cosas sueltas en la superficie de la Tierra se echarían para atrás al no poder seguir el movimiento giratorio de la misma. Copérnico ‘resolvió’ este problema con un argumento impecable de la física de Aristóteles. Éste distinguía entre movimiento ‘natural’ y movimiento ‘violento’ y Copérnico explicó que movimientos naturales no pueden tener efectos violentos. Para una esfera, como la Tierra, según Copérnico²⁰ es natural que gire sobre su eje, de modo que no se dan las consecuencias violentas señaladas por los que se oponen al movimiento rotatorio de la misma. Aquí vemos como una hipótesis falsa, sobre las consecuencias desastrosas de la rotación de la Tierra, es contrarrestada por Copérnico con otra hipótesis falsa, a saber la distinción aristotélica entre movimientos naturales y movimientos que violan el ‘orden natural’ a causa de una fuerza externa.

El hecho de que Copérnico no logró ubicar con perfección las rutas de los planetas, sobre todo Marte, en círculos perfectos alrededor del Sol, lo llenaba de una duda y culpa insuperables y por eso no se animaba a publicar su obra maestra. Tres importantes miembros de la jerarquía católica intentaban —en vano— persuadirlo a que la publicara, mostrando genuino interés y ofreciéndole apoyo moral. En primer lugar, el Cardenal Schoenberg —hombre de confianza de tres Papas sucesivos, a saber, Leo X, Clemente VII y Paulo III—, le mandó en 1536 una carta a Copérnico: “*Me han informado que Usted .. ha creado una nueva teoría del Universo según la cual la Tierra se mueve y el Sol ocupa la posición ...central; (...) Por eso, o hombre docto, le suplico que comuniqué su descubrimiento al mundo académico y me envíe lo antes posible sus teorías sobre el Universo (...).*”²¹ Sin duda influyó en la decisión del Cardenal Schoenberg de escribir esta carta el hecho de que el secretario particular del Papa, de nombre Johannes Widmanstadt, le había explicado al Papa, en 1533, en los jardines del Vaticano el modelo de Copérnico. Aún con este apoyo moral, Copérnico esperó otros siete años antes de publicar.

¹⁸ Arthur Koestler, *The Sleepwalkers* (1989): 579-580

¹⁹ Arthur Koestler, *The Sleepwalkers* (1989): 198

²⁰ Copérnico, *De Revolutionibus*, Libro I, Cap. 8

²¹ Arthur Koestler, *The Sleepwalkers* (1989): 155

En segundo lugar, Mgr. Tiedemann Giese, Obispo de Kulm, trató durante años de contacto personal convencer a Copérnico a que publicara su obra. Cuando el joven matemático Georg von Lauchen de Rhaetia, conocido como Rheticus, ofreció escribir y publicar una síntesis del manuscrito, por fin Copérnico se dejó persuadir por Mgr. Giese para aceptar esta propuesta, y así apareció en 1539 esta síntesis bajo el título *Narratio Prima*.

En tercer lugar, el gran humanista Johannes Flachsfinder, de Danzig —por eso conocido como Dantiscus—, cuya obra poética es caracterizada por la *Enciclopedia Británica* como “la mejor poesía latina de la Europa moderna” le ofreció repetidas veces a Copérnico su amistad y apoyo. Dantiscus era amigo íntimo de Melanchton, y conservó su amistad con éste y otros luteranos después de su conversión al catolicismo y, gracias a sus viajes por toda Europa, era conocido y apreciado por miembros importantes de la nobleza, jerarquía católica y comunidad académica del continente entero. Fue el sucesor de Mgr. Giese, Obispo de Kulm y, por lo tanto, también Obispo de Copérnico. En 1541, le envió a Copérnico un epigrama poético como prefacio laudatorio para su obra maestra. Si Copérnico se hubiera dignado incluirlo, este prefacio habría ayudado a una mayor aceptación de la teoría heliocéntrica en toda Europa. Pero, así como Copérnico rechazó dos veces, en 1533 y 1536, una invitación de Dantiscus para un encuentro personal, tampoco quiso publicar este prefacio, “*movido por alguna envidia oscura, o rencor, o mera incapacidad de entrar en una relación humana.*”²²

Un impedimento para la publicación era que los ayudantes luteranos de Copérnico —Rheticus y Osiander— tenían cierto miedo al rechazo de Lutero (quien había dicho que Copérnico era “*un necio que iba en contra de la Sagrada Escritura,*”²³) y Melanchton (quien posteriormente, en su *Doctrinas de Física* de 1549, plasmó su rechazo del modelo heliocéntrico). Por eso, Rheticus escribió un ensayo (que nunca publicó) en donde intentó demostrar que el modelo heliocéntrico de Copérnico no era contrario a la Sagrada Escritura. Y el segundo editor de la obra, Osiander, añadió en el último momento un prefacio diciendo que las hipótesis heliocéntricas de Copérnico se publicaban “*no porque son necesariamente verdaderas o siquiera probables*”, sino “*porque permiten calcular los movimientos [de los planetas] correctamente a partir de los principios de la geometría.*”²⁴

Pero, Rheticus, con su acostumbrada y asombrosa generosidad, copió el manuscrito entero de Copérnico (cientos de páginas), haciendo algunas correcciones en la marcha, obteniendo, por fin, el permiso de Copérnico para publicar la obra en 1543, bajo el título *De revolutionibus orbitum coelestium*, cuando éste ya estaba agonizando en su lecho de muerte. En su Introducción, dedicada al Papa Paulo III, Copérnico reprodujo la carta del Cardenal Schoenberg, pero no hizo referencia alguna a Rheticus y todo el apoyo recibido de éste, lo que constituye una ingratitud rayana en “*traición.*”²⁵

Gracias al hecho de que la obra maestra de Copérnico es en extremo tediosa y casi ininteligible, confusa y aún contradictoria, casi nadie la leyó, de manera que sus siete hipótesis originales tuvieron una vida independiente y pudieron echar raíces en la mente de la clase pensante europea. Por ejemplo, años después, Galileo llegó a defender la teoría heliocéntrica de Copérnico sin jamás haber

²² Arthur Koestler, *The Sleepwalkers* (1989): 182

²³ Citado en Arthur Koestler, *The Sleepwalkers* (1989): 572, nota 40 y en Simon Singh, *Big Bang. The Origin of the Universe* (2004): 40

²⁴ Arthur Koestler, *The Sleepwalkers* (1989): 573-574

²⁵ Arthur Koestler, *The Sleepwalkers* (1989): 175

leído estas elaboraciones tortuosas en donde Copérnico aniquilaba su propia teoría. La primera edición de la obra, de mil ejemplares nunca fue vendida en su totalidad. La obra de Copérnico tuvo, en el siglo XVI, una sola re-edición. Otras obras cosmológicas, en este mismo lapso, fueron *bestsellers*, por ejemplo la obra del jesuita Clavius: 19 re-ediciones; la de Melanchton, contra la teoría de Copérnico, 17 re-ediciones; la de Peucer, seis; éstas y otras dos obras, de Ptolomeo y Peurbach, tuvieron un total de 100 reediciones hasta finales del siglo XVI.

¿A qué viene toda esta información sobre las dudas neuróticas y confusiones aristotélicas de Copérnico? El asunto adquiere importancia, porque ilustra un punto importante de la filosofía de la ciencia. Presentaré más adelante, en la Sección 21, la filosofía de los tres mundos, de Popper y de Penrose:

1. el mundo uno de la realidad física;
2. el mundo dos de los pensamientos e impulsos subjetivos, y
3. el mundo tres de las ideas objetivas de la ciencia y metafísica.

En el caso de Copérnico, se puede rastrear el origen subjetivo de su modelo heliocéntrico objetivo, a saber, la relación paradójica entre el mundo dos —su apego neurótico a la física y metafísica aristotélicas— y el mundo tres —las siete hipótesis heliocéntricas que, aisladas de su contexto aristotélico, resultan audaces y modernas—. Se puede constatar también cómo estas hipótesis llevan, desde el *Commentariolus* de 1514, una vida autónoma en el mundo tres y como éstas son capaces de ser contrastadas con la realidad del mundo uno, independientemente de su origen en el mundo dos, a saber, la mente tortuosa de Copérnico. Fue Johannes Kepler el primero en contrastar estas hipótesis heliocéntricas con observaciones más precisas del sistema solar acumuladas por Tycho de Brahe. Este es el tema de la siguiente sección.

SECCIÓN 4. LA CIENCIA EMPÍRICA Y EL PLATONISMO ESOTÉRICO DE KEPLER

La primera publicación de Johann Kepler (1571-1630) es *Mysterium Cosmographicum*, de 1597. En la primera parte de su libro, Kepler procedió como Copérnico. Así como éste puso el modelo heliocéntrico al servicio de una teoría errónea, a saber, la aristotélica de los movimientos perfectos de los planetas, Kepler puso este mismo modelo al servicio de otra teoría errónea, a saber, la pitagórica de la perfecta armonía de las esferas celestiales.

Kepler creía con Pitágoras que formas geométricas perfectas eran la clave para entender el Universo, el cual, según él, fue obra de un Creador amante de la armonía perfecta. Ahora bien, solamente existen cinco formas geométricas tridimensionales perfectas, es decir, totalmente simétricas, a saber, el cubo (1); el tetraedro o pirámide (que consiste de cuatro triángulos equiláteros) (2); el dodecaedro (que consiste de 12 pentágonos) (3); el icosaedro (que consiste de 20 triángulos equiláteros) (4); y el octaedro (que consiste de ocho triángulos equiláteros) (5). Kepler proyectó estas figuras virtuales entre las dos revoluciones esféricas de cada par de planetas, de tal manera que los ángulos agudos de una figura toquen la superficie de la esfera exterior y que la esfera interior toque el centro de las superficies planas de la figura. Entre Saturno y Júpiter cabía, según Kepler, un cubo (1); entre Júpiter y Marte, un tetraedro (2); entre Marte y la Tierra, un dodecaedro (3); entre la Tierra y Venus

un icosaedro (4); y entre Venus y Mercurio, un octaedro (5). En aquel tiempo se conocían solamente seis planetas y cinco formas tridimensionales perfectas, lo que hacía pensar a Kepler que el modelo heliocéntrico permitía una integración perfecta de figuras geométricas y revoluciones planetarias. Este argumento falaz fue la razón por la que Kepler no dudaba de las hipótesis heliocéntricas de Copérnico, que son verdaderas.

Este argumento erróneo le vino como una intuición imbuida en una experiencia de gozo: “*Jamás podré expresar en palabras el gozo que experimenté al hacer mi descubrimiento.*”²⁶ Kepler atribuía esta intuición falaz a un acto de Dios, razón por la cual nunca dudó de su verdad, ni aún cuando preparó la segunda edición de *Mysterium Cosmographicum* en 1618, así como confiesa con ingenuidad desconcertante:

“*Sería un error y una presunción pensar que [esta teoría] es meramente un invento de mi mente, cuando de hecho tocamos el arpa de siete cuerdas de la sabiduría del Creador. Porque, como si un oráculo celestial me lo hubiera dictado, el pequeño libro fue inmediatamente reconocida como enteramente verdadero, como suele suceder cuando se trata de actos obvios de Dios.*”²⁷

Kepler no conocía las advertencias de los místicos del siglo XVI, sobre el grave peligro de dar fe, ingenuamente, al contenido de sus visiones.²⁸ Su visión intelectual con gozo intenso motivó a Kepler a dedicar su vida entera a la investigación astronómica como un camino de acercamiento a quien él creía ser el Dios de la armonía. Él provino de una familia disfuncional: su padre era un inútil y un mercenario que apenas escapó de la horca. Las pocas veces que estaba en casa, según Kepler, “*trataba muy mal a mi madre,*”²⁹ una mujer agresiva que apenas, años después, gracias a la defensa eficiente de Kepler, escapó de la hoguera para brujas. De los seis hermanos y hermanas de Kepler, tres sobrevivieron la infancia, uno como psicópata y epiléptico. Todos ellos, más dos abuelos y cinco tíos y tías vivían hacinados en una casa en Weil, en el suroeste de Alemania, en medio de continuos conflictos. La infancia de Johann Kepler, así como él la relata, fue una serie de castigos físicos, accidentes y enfermedades de todo tipo. En su paso por la escuela sus compañeros de salón se ensañaban con él, provocados por el hecho de que él era muy inteligente y de aspecto físico repugnante.

Destacan, sin embargo, en su autobiografía dos recuerdos positivos: en primer lugar, a los seis años, “*escuché mucho sobre el cometa de este año, 1577, y mi madre me llevó a un lugar alto para mirarlo*” y, en segundo lugar, a los nueve años, “*mis padres me llamaron para salir de la casa y ver el eclipse de la Luna, que se vio enteramente roja.*”³⁰ Son los únicos recuerdos de armonía familiar en su autobiografía y ambos están relacionados con fenómenos astronómicos. En esta línea, su experiencia religiosa del 9 de julio de 1595 le encaminó a buscar por medio de la astronomía un espacio libre de conflictos en donde el Creador tocaba la música armoniosa de las esferas celestiales.

²⁶ Citado en Arthur Koestler, *The Sleepwalkers* (1989): 249

²⁷ Citado en Arthur Koestler, *The Sleepwalkers* (1989): 254

²⁸ Sobre todo de San Juan de la Cruz, quien sugiere que el sujeto rechace estas visiones y no les haga caso, para no abrir el camino para el auto-engaño.

²⁹ Citado en Arthur Koestler, *The Sleepwalkers* (1989): 231

³⁰ Citado en Arthur Koestler, *The Sleepwalkers* (1989): 234

Lo que impidió que Kepler se empantanara en sus especulaciones pitagóricas, así como antes Copérnico en las aristotélicas, fue su decisión de trabajar en “*la determinación astronómica de las órbitas con cálculos geométricos.*”³¹ Dejó a un lado las especulaciones y se dedicó a buscar las ecuaciones matemáticas de las revoluciones planetarias que recogieron los datos de observación de 20 años, hasta 1601, de Tycho de Brahe. La corrección que Kepler realizó al modelo heliocéntrico de Copérnico, durante 25 años de trabajo, a partir de 1601, se aprecia en el siguiente esquema:

TABLA. UNA COMPARACIÓN DE LAS IDEAS DE COPÉRNICO Y KEPLER

	COPÉRNICO	KEPLER
1	Los planetas se mueven en círculos perfectos	Los planetas se mueven en elipses
2	Los planetas se mueven con velocidad constante	Los planetas varían sus velocidades
3	El Sol se encuentra en el centro de sus órbitas	El Sol se halla en un foco de la elipse

La característica de una elipse es que tiene dos focos, de tal manera que si se trazan dos líneas desde ambos focos hacia el mismo punto en la curva de la elipse, la suma de las longitudes de estas dos líneas es siempre igual al eje mayor de la elipse. Los hallazgos de Kepler se conocen como las *tres leyes de Kepler*. Según la *primera ley*, los planetas se mueven en elipses, no en círculos alrededor del Sol que se encuentra en uno de los focos de la elipse que representa la revolución de un planeta. La *segunda ley*, establece que la velocidad de un planeta es inversamente proporcional a su distancia del Sol, de manera que, si se traza una línea del Sol hasta el planeta, mientras gira el planeta, esta línea cubre siempre un área igual en un tiempo igual. La *tercera ley* sostiene que el cuadrado del tiempo de una revolución completa de un planeta siempre es proporcional al cubo de la distancia promedio del planeta al Sol, la cual es equivalente a la mitad del eje mayor de la elipse.

La tercera ley nos dice que, mientras más alejado un planeta se encuentra del Sol, más largo es el año que le toma al planeta para dar una vuelta alrededor del Sol y que la relación entre este período y esta distancia es constante. Sería un error pensar que esta distancia difiera mucho del radio de los círculos de Copérnico. Se trata de elipses muy cercanas a círculos. En el caso de la Tierra, la razón del eje menor dividido entre el eje mayor es 0.99986; en el caso de Marte, este razón es 0.99566. Es admirable que Tycho de Brahe, sin telescopio, pudo detectar estas mínimas diferencias y que Kepler supo identificarlas, muchos años después, como elipses.

Kepler mandó ejemplares de su primer libro a astrónomos de toda Europa, entre ellos Galileo y Tycho de Brahe. Al leer las especulaciones pitagóricas de Kepler, Galileo formó un prejuicio contra él por el resto de su vida, en detrimento de su propia investigación. En cambio, Tycho de Brahe descubrió el genio embrional que se escondía en sus páginas. Tycho de Brahe era de la nobleza danesa, pero, aburrido de la existencia inútil de su clase, que se la gastaba, en palabras de Tycho, entre “*caballos, perros y lujos,*”³² se dedicó desde los 17 años a la observación astronómica. En 1563, se dio cuenta

³¹ Citado en Arthur Koestler, *The Sleepwalkers* (1989): 257

³² Citado en Arthur Koestler, *The Sleepwalkers* (1989): 288

de que las predicciones sobre la conjugación de Saturno y Júpiter, emitidas por las Tablas Alfonsinas, y por Copérnico, estaban equivocadas en un mes y varios días, respectivamente, y decidió dedicar su vida a la obtención de observaciones exactas. Tuvo dinero para comprar y construir los instrumentos más precisos de su tiempo —sin tener todavía el beneficio del telescopio—.

En 1573, se hizo famoso con su publicación *De Nova Stella*, cuya parte principal describe en 27 páginas el fenómeno de una supernova que fue visible a partir de noviembre de 1572, durante 18 meses —al principio aún durante el día—. La teoría aristotélica sostenía que solamente algunos objetos celestiales debajo de la octava esfera de las estrellas se movían, pero éstas no, y que solamente los objetos del ámbito sublunar, incluyendo las cometas, cambiaban de aspecto. Para que la teoría aristotélica quedara corroborada, una de las siguientes dos posibilidades habría de ser cierta: ó la nueva estrella era un cometa, de modo que cambiaba de aspecto y se movía, ó era una estrella de la octava esfera, de modo que no debía moverse ni cambiar de aspecto. Con observaciones diarias rigurosamente exactas, durante 18 meses, Tycho de Brahe demostró que la nueva estrella NO se movía pero SÍ cambiaba de aspecto (se prendía y luego se apagaba lentamente), asestando así un golpe certero a la (meta)física aristotélica, que postulaba la inmutabilidad de los objetos celestes. Otro golpe, que la dejó moribunda, fue su demostración de que el famoso cometa de 1577 no era un objeto sublunar, como la teoría aristotélica demandaba, sino que se encontraba por lo menos seis veces más alejado de la Tierra que la misma Luna.

En reconocimiento de sus méritos, el Rey de Dinamarca, Federico II, le regaló a Tycho de Brahe, en 1576, una isla entera, Hveen, para instalar allí su observatorio, llamado Uraniburg, con rentas generosas y servidumbre. Allí realizó miles de observaciones astronómicas —las más exactas hasta aquel entonces—, en series continuas durante más de 20 años —casi como una película de lenta acción—. Pero, Tycho de Brahe trató mal a su servidumbre y era, además, arrogante. Cuando el nuevo Rey de Dinamarca, Cristián, lo cuestionó, Tycho de Brahe lo desafió y se vio obligado a abandonar su isla en 1599, para trasladarse al Castillo de Benatek, cerca de Praga. Antes, Kepler le había pedido a Tycho de Brahe que lo empleara como su asistente en la isla de Hveen, pero éste no quiso. Kepler aprovechó los años de 1597 a 1599, para actualizarse en matemáticas las cuales en aquel entonces no dominaba bien. Pero ahora, en 1599, la situación era diferente: Tycho de Brahe necesitaba a Kepler para dar sentido matemático al tesoro de sus observaciones astronómicas y Kepler necesitaba a Tycho de Brahe para obtener los datos astronómicos precisos que necesitaba para determinar matemáticamente las revoluciones planetarias. Así que Tycho de Brahe empleó a Kepler como asistente, por un sueldo raquítico, de 1599 a 1601, pero aún así aquél no le dejaba ver a éste todos sus datos. Sin embargo, cuando Tycho de Brahe murió repentinamente en 1601, Kepler vio colmado su deseo.

En su lecho de muerte, Tycho de Brahe, había repetido entre dolores agudos la petición “*Que no sea que yo haya vivido en vano.*”³³ El buen uso que Kepler hizo de las observaciones de Tycho —sin ser el heredero formal—, permitió que se cumpliera su petición. Con su tesoro de datos y conocimiento de matemáticas recién adquiridos, siendo Matemático del Emperador de Austria, de 1601 a 1612, y después de la muerte de Rodolfo II en 1612, Matemático de la Provincia de Linz, la capital de Austria Superior, de 1612 a 1626, Kepler entró en la etapa científicamente más fértil de su vida. En

³³ Citado en Arthur Koestler, *The Sleepwalkers* (1989): 316

1609 publicó su obra principal, *Una Nueva Astronomía*, en donde describe cómo descubrió primero lo que hoy conocemos como la segunda ley de Kepler y luego, la primera; y en 1618, publicó *La Armonía del Mundo*, que contiene la definición correcta de la tercera ley también. En otra publicación puso las bases científicas para la óptica.

CUADRO MATEMÁTICO 4.1 LAS TRES LEYES DE KEPLER

La *primera ley de Kepler* afirma que la órbita de un planeta es una elipse. Para lo que sigue ayudaría al lector consultar el dibujo y la explicación de la geometría de la elipse en el Apéndice I. El lector interesado en la derivación completa de las leyes de Kepler, que implica cálculo diferencial e integral, la encuentra en el Apéndice II. Las ecuaciones que expresan las características de una elipse son:³⁴

$$(1) e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} \Rightarrow a = \frac{b}{\sqrt{(1-e)(1+e)}} = \frac{r_{\min} + r_{\max}}{2}$$

en donde a es el semieje mayor, b es el semieje menor, r_{\min} el radio mínimo, r_{\max} el radio máximo, y e la excentricidad:

$$(2) r_{\min} = a(1 - e) \quad y$$

$$(3) r_{\max} = a(1 + e)$$

Con respecto a la *segunda ley de Kepler*, si $t_1 = t_2 \Rightarrow A_1 = A_2$, en donde t es el tiempo que un planeta requiere para recorrer una parte AB de su órbita elíptica y A es el área que se encuentra entre AB , SA y AB , si S es el foco de la elipse donde se encuentra el Sol. La ecuación matemática que expresa la segunda ley es:

$$(4) dA = \frac{L_k}{2m} k * dt,$$

en donde $\frac{L_k}{2m} k$ tiene un valor constante, no variable.³⁵

La *tercera ley de Kepler*, en su forma aproximada (la de Kepler), es:³⁶

$$(5) a^3 = K P^2 \Rightarrow P^2 = \frac{a^3}{K}$$

en donde a es el semieje mayor, K una constante, y P el período de la órbita.

Al no dar con el papel de la gravedad en las revoluciones planetarias, resulta que esta versión simplificada de la tercera ley de Kepler no identifica varios factores importantes y no es del todo correcta. La fórmula exacta identifica la constante gravitacional G y la masa del Sol M_{SOL} y toma en cuenta no solamente la masa del Sol, sino también la del planeta:³⁷

$$(6) P^2 = \frac{4\pi^2 a^3}{G(M_{SOL} + m)}$$

³⁴ Véase el Apéndice I

³⁵ Véase la ecuación (130) del Apéndice II

³⁶ Véanse las ecuaciones (136) y (137) del Apéndice II

³⁷ Véase el Apéndice II

En el Apéndice II se demuestra cómo esta ecuación correcta de la tercera ley de Kepler se deriva de la ley gravitacional universal de Newton. Dado que la masa del Sol M_{SOL} es muchísimo mayor que la masa m de cualquier planeta, por ejemplo, mil veces la de Júpiter, la masa de los planetas es relativamente pequeña, en comparación con la masa del Sol, de modo que la tercera ley de Kepler quedó corroborada por las observaciones relativamente imprecisas de Brahe.

Vale la pena seguir de cerca esta búsqueda de muchos años, porque podemos presenciar no solamente la paulatina definición de las leyes de Kepler, que prepararon el camino para Newton, sino *el nacimiento de la ciencia moderna*, dado que Kepler satisfizo las tres condiciones que la definen como tal:

1. abandonar las teorías o ideas fijas que son refutadas por los datos de la observación y reemplazarlas por otras que sean corroboradas por ellos;
2. elaborar teorías que expliquen los fenómenos (físicos u otros) por sus verdaderas causas (físicas u otras);
3. expresar estas relaciones causales en ecuaciones matemáticas que recogen y predicen los datos de la observación.

Veamos primero por qué hemos de caracterizar el proceder de Kepler como científico, a saber, su disposición de abandonar ideas fijas refutadas por los datos de la observación y de reemplazarlas por otras que sean corroboradas por ellos. Vimos arriba que Copérnico empezó su carrera astronómica con siete hipótesis lúcidas y verdaderas, para luego perderse en el pantano de sus elaboraciones aristotélicas. En cambio, Kepler empezó en el pantano del esoterismo pitagórico, expuesto en la primera parte de *Mysterium Cosmographicum*, pero luego salió del pantano *por su decisión de contrastar su teoría con los hechos de la observación y en caso de encontrar conflicto entre teoría y hechos, abandonar la teoría*. Basta leer el párrafo con que empieza la segunda parte de *Mysterium Cosmographicum* para darse cuenta de ello:

*“Lo que hemos dicho hasta ahora sirvió únicamente para apoyar nuestra tesis con argumentos que la hacen probable. Pero, ahora procede la determinación astronómica de las órbitas [de los planetas] con cálculos geométricos. Si éstos no confirman la tesis, entonces nuestros esfuerzos previos han sido en vano.”*³⁸

A partir de este momento se dedicó a determinar estas órbitas, aplicando la geometría a los datos de la observación de Tycho de Brahe. Empezó, en 1601, poniendo el Sol S en el centro físico del sistema, pero alejado del centro geométrico C , e introduciendo en el lado opuesto de S , en el eje $S - C - E$ un *punctum equans* E . No fue sino hasta muchos años después que identificó estos puntos S y E como los dos focos de una elipse. El lector interesado puede consultar el dibujo y la geometría de una elipse en el Apéndice I. Al principio, Kepler suponía, erróneamente, que la órbita del planeta era un círculo. Además sostuvo, también erróneamente, que, visto desde el punto E , el planeta recorría *ángulos* iguales en tiempos iguales. No fue sino hasta años después que acertó en conjeturar que se trataba

³⁸ Citado en Arthur Koestler, *The Sleepwalkers*, (1989): 257

de áreas iguales en tiempos iguales, vistas desde S . Sin embargo, esos errores no fueron evidentes, ya que con su teoría falsa logró predecir correctamente 10 posiciones de Marte, registradas por Tycho de Brahe. Esto fue, después de haber realizado, durante varios años, siguiendo el método de *trial and error*, cálculos que cubrían novecientas páginas tamaño folio escritas en letra pequeña.

Sin embargo, encontró dos posiciones en el tesoro de datos de Tycho de Brahe que su teoría no logró predecir exactamente, generando un error de ocho minutos de arco. La tentación debió haber sido grande para declarar la victoria, no obstante estos dos datos molestos. Ptolomeo y Copérnico no se habrían preocupado por errores de este tamaño, porque ¡sus observaciones tenían un margen de error de diez minutos de arco! Sin embargo, Kepler desechó 900 páginas de cálculos y años de trabajo, por dos observaciones que refutaban su teoría. Vale la pena citar a Kepler, porque parece que estamos leyendo un párrafo de la filosofía moderna de la ciencia:

*“Mi hipótesis que coincide tan exactamente con las [diez] posiciones observadas, es, sin embargo, falsa. (...) Si yo hubiera creído que podríamos ignorar estos [dos errores] de ocho minutos, yo habría ajustado y mantenido mi hipótesis en consecuencia. Pero, dado que no era permisible ignorarlos, estos [dos errores de] ocho minutos indican el camino hacia una reforma completa de la astronomía”, es decir, una teoría completamente diferente.*³⁹

Invito al lector a detenerse en pensar un momento en qué es lo que habría pasado si Kepler no hubiera tenido esta disposición para permitir que los hechos decidan sobre la verdad o falsedad de las teorías y para sacrificar una teoría aparentemente exitosa y años de investigación por dos observaciones que la refutaban, cuando otros diez la corroboraban. No habríamos tenido las tres leyes de Kepler, y no sabemos que habría hecho Newton sin ellas...

Para calcular la órbita de Marte, con observaciones hechas desde la Tierra, obviamente era necesario calcular primero bien las respectivas posiciones de la Tierra, con respecto al Sol, tomando en cuenta las variaciones en la velocidad del planeta al realizar su órbita. Siguiendo con su método de *trial and error* Kepler, abandonó solamente uno de los dos elementos erróneos de su primera teoría, a saber, el supuesto erróneo de que un planeta recorra ángulos iguales en tiempos iguales, visto desde el punto E , dejando sin embargo en pie la otra conjetura errónea de que esta órbita sea un círculo. Por suerte, este error del círculo se anuló por otro error, a saber, el supuesto de que una área en un círculo, contenida por dos rectas trazadas desde el punto S , una hacia dos puntos de la circunferencia y otra hacia la parte de la circunferencia que se encuentra entre estos dos puntos, se defina como la suma de las rectas comprendidas en esta área. Gracias al hecho, como admitió Kepler después, que “*estos dos errores —como de milagro— se cancelan de una manera muy precisa,*”⁴⁰ obtuvo la definición correcta de la segunda ley, a saber, que la órbita del planeta cubre áreas iguales en tiempos iguales, visto desde el Sol (el punto S). La verdad de esta tesis quedó corroborada por todos los datos de observación de Tycho de Brahe, sin excepción.

Ya que ahora, con esta nueva ley, pudo definir bastante bien la posición de la Tierra, abandonó el supuesto erróneo del círculo, y buscó la forma correcta de la órbita de Marte. Postuló, erróneamen-

³⁹ Citado en Arthur Koestler, *The Sleepwalkers* (1989): 326-327

⁴⁰ Citado en Arthur Koestler, *The Sleepwalkers* (1989): 332

te, una órbita de forma ovalada, como la circunferencia de un huevo: “*La conclusión es sencillamente, que la órbita de un planeta ... no es un círculo, sino una figura ovalada.*”⁴¹ Esta conjetura se transformó en la mente de Kepler en una idea fija. Pero, una vez más, gracias a su disposición de permitir que los datos de la observación decidan sobre la verdad o falsedad de una hipótesis, pudo falsear la hipótesis de la figura ovala y encontrar, después de dos años de *trial and error*, *la forma de la elipse, que es el contenido de la primera ley de Kepler.*

Veamos ahora como buscó explicar los movimientos de los cuerpos celestiales por *causas físicas idénticas a las que rigen los movimientos de objetos terrestres*, rompiendo radicalmente con el esquema aristotélico en donde astronomía y física estaban totalmente divorciadas. El título de su obra maestra de 1609, revela su enfoque revolucionario. Anunció su intención de explicar los movimientos de planetas por causas físicas: “*Una nueva Astronomía basada en Causación, o una Física del Cielo derivada de Investigaciones sobre la Estrella Marte.*”

Kepler partió del modelo heliocéntrico de Copérnico, pero le encontró inconvenientes. Si bien Copérnico había propuesto un modelo heliocéntrico, había re-introducido el lugar céntrico de la Tierra por la puerta trasera, al postular que el Universo giraba alrededor del centro de la órbita de la Tierra el cual estaba un poco alejado del Sol. Kepler empieza *Una Nueva Astronomía*, abandonando este supuesto haciendo referencia al hecho de que, según Kepler, la causa física del movimiento de los planetas es el Sol. Sin embargo, aunque identificó el Sol como el centro **físico** de los movimientos planetarios, reconoció que el centro **geométrico** se hallaba a cierta distancia del Sol. Al preguntarse por qué el centro geométrico de la órbita de Marte —la cual todavía no identificaba como una elipse— no era el Sol en el punto *S*, sino un punto *C* cercano al Sol, Kepler conjeturó correctamente que el movimiento de un planeta es un compuesto de dos movimientos, uno generado por una fuerza proveniente del Sol y otro, propio del mismo planeta. Erróneamente identificó la fuerza como el ‘magnetismo’ del Sol que arrastra al planeta en círculos a su alrededor, en una especie de vórtice, e identificó correctamente el movimiento propio del planeta como inercial, pero creyó erróneamente que éste lentificaba su movimiento compuesto.

Hoy día sabemos que estos dos movimientos, que Kepler no logró identificar y comprender totalmente, son el movimiento centrípeto generado por la fuerza gravitacional y el movimiento inercial.⁴² A diferencia de Koestler, quien cree que Kepler no supo integrar la fuerza gravitacional en sus leyes por algún tipo de bloqueo psicológico,⁴³ yo más bien creo que este desacierto de Kepler se debe al hecho que nunca logró entender que la inercia de un objeto, lejos de pararlo, lo hace moverse en línea recta con velocidad constante. La inercia de un planeta, lejos de pararlo, lo mueve constantemente en dirección perpendicular sobre la dirección de la atracción gravitacional. El movimiento elíptico del planeta es el resultante de estos dos movimientos. Kepler, en cambio, concebía, erróneamente, la inercia como un tipo de freno sobre la fuerza que emana del Sol. Como él bien sabía, de ser así, el planeta habría que caer sobre el Sol, y dado que esto no sucede, prefirió no integrar la fuerza gravitacional en su explicación de la órbita planetaria, sino que postuló una fuerza magnética solar que —aunada al la rotación del Sol sobre su eje— arrastra al planeta alrededor del Sol. La velocidad

⁴¹ Citado en Arthur Koestler, *The Sleepwalkers* (1989): 333

⁴² Véanse los Apéndices I y II

⁴³ Citado en Arthur Koestler, *The Sleepwalkers* (1989): 422

variable del planeta, la explicó primero por la inercia del planeta que, según Kepler, lo frenaba, y después por la masa magnética del propio planeta que a veces lo aceleraba —cuando los polos magnéticos del planeta y del Sol eran contrarios— y a veces lo frenaba —cuando eran del mismo signo—.

El hecho que la explicación física específica que Kepler da del movimiento planetario alrededor del Sol es falsa, *no quita la acción revolucionaria de buscar una explicación física*. Una hipótesis es científica, no por establecer necesariamente relaciones causales verdaderas, sino falseables. Y la hipótesis de Kepler era perfectamente falseable. Más aún, el hecho de que Kepler no postuló el papel de la gravedad en sus leyes no significa, como cree Popper, que Kepler no entendió la fuerza gravitacional en general. Al contrario, *precisamente por entender bien la fuerza gravitacional, pero mal el movimiento inercial, Kepler no supo integrarla*. Vale la pena citar integralmente lo que Kepler dice sobre la gravedad en la Introducción de *Una Nueva Astronomía*, en donde refuta la noción aristotélica de la gravedad, según la cual las cosas tienden hacia el centro del Universo, a saber, el centro de la Tierra, y la sustituye por un concepto asombrosamente moderno:

“Está claro que la doctrina tradicional de la gravedad es errónea(...). Gravedad es la tendencia mutua corporal entre dos cuerpos materiales a unirse ..., de tal manera que la Tierra atrae una piedra mucho más que una piedra atrae la Tierra (...) Si dos objetos se pusieran en cualquier lugar en el espacio, uno cercano al otro, y fuera del alcance de la fuerza de un tercer cuerpo material, entonces se encontrarían (..) en un punto intermedio, cada uno acercándose al otro en proporción a la masa del otro.”⁴⁴

En el fragmento que sigue sobre la Tierra y la Luna aparece claramente que lo que Kepler no logró entender es el movimiento inercial, al que identifica como “una fuerza espiritual o alguna otra, equivalente”, teniendo, sin embargo, una comprensión buena de la fuerza gravitacional, a la que Kepler denominó “fuerza atractiva”:

“Si alguna fuerza espiritual o alguna otra fuerza equivalente no mantuviera a la Tierra y la Luna en sus respectivas órbitas, la Tierra ascendería a la Luna una cincuentésima cuarta parte de la distancia entre ambas, y la Luna descendería hacia la Tierra las cincuenta tres partes restantes, para unirse en este punto. El cálculo supone que ambos cuerpos tienen la misma densidad (...) Si la fuerza atractiva de la Luna alcanza la Tierra, se entiende que la fuerza atractiva de la Tierra alcanza la Luna y aún más lejos.”⁴⁵

En *La Armonía del Mundo* de 1618 él reconoció la evolución de su propio pensamiento al respecto. Él mismo, en 1597, había atribuido estos movimientos del Sol y los planetas a sus ‘almas’, pero, en 1609, *sustituyó ‘almas’ por ‘fuerzas’, un concepto teológico por un concepto físico*. Criticando su propia teoría anterior, afirmó en 1618: “*El que tales ‘almas’ no existen, lo he comprobado en mi Astronomía Nueva [de 1609]. Si sustituimos la palabra ‘alma’ por la palabra ‘fuerza’, entonces obtenemos exactamente el principio que subyace mi Física del Cielo en Astronomía Nueva (...)[allí] llegué a la conclusión que esta fuerza debe ser algo sustancial –‘sustancial’ no en el sentido literal ... pero de la misma manera que la*

⁴⁴ Citado en Arthur Koestler, *The Sleepwalkers* (1989): 342-343

⁴⁵ Citado en Arthur Koestler, *The Sleepwalkers* (1989): 342-343

luz es algo sustancial, en el sentido de algo no-sustancial que proviene de un cuerpo sustancial.”⁴⁶ Kepler supo, además, que la intensidad de la luz disminuye con el cuadrado de la distancia y comparó la luz con la gravedad, pero, no llegó a afirmar que la fuerza gravitacional disminuye con el cuadrado de la distancia.

Ahora toca comprobar la tercera razón por qué afirmo que Kepler tuvo un enfoque científico moderno, a saber, el hecho que *expresó estas relaciones causales en ecuaciones matemáticas* que recogen y predicen los datos de la observación. Antes de tener los datos de Tycho de Brahe, Kepler empezó a buscar, en la segunda parte de *Mysterium Cosmographicum*, una ecuación matemática que relacionara el período P de un planeta con su distancia R del Sol. No se trata de una relación causal, sino de una relación entre dos efectos que dependen de una causa que Kepler, en 1595, todavía identificaba en términos aristotélicos, como el ‘alma’ de los objetos celestiales. La fórmula que presentó es errónea. La fórmula correcta, no la encontró sino hasta más de 20 años después, al final de su vida, escondida entre nuevas especulaciones pitagóricas sobre la música celestial de los planetas, en *La Armonía del Mundo* de 1618, a saber, la versión simplificada de la tercera ley de Kepler, en donde a es el semieje mayor de la órbita elíptica y K una constante (véase cuadro matemático 4.1).

Los principales hallazgos científicos de Kepler circulaban en forma independiente en los círculos académicos de Europa. Pero, no todos los contemporáneos de Kepler aceptaban sus ideas. En el caso de Galileo, una razón de su rechazo fue el hecho de que Galileo se aferraba a la idea ptolomeica de las órbitas circulares, como veremos en la siguiente sección, lo que le impedía aceptar los hallazgos de Kepler sobre las órbitas elípticas.

En la mayoría de los casos, el rechazo provino de los prejuicios aristotélicos. Para entender esto, es necesario recordar que según Aristóteles, la física explicaba las causas de los movimientos de objetos terrestres, y los movimientos de objetos celestiales no tenían causas físicas, de modo que arriba de la Luna había eventos, pero sin causas físicas, y había movimientos, pero no fuerzas que mueven. La reacción negativa de un astrónomo de Danzig, de nombre Crüger, es representativa por la dificultad generalizada que tenían los contemporáneos de Kepler para abandonar la física y metafísica aristotélica y aceptar que los fenómenos celestiales tenían causas físicas: “*Al intentar comprobar la hipótesis copernicana a partir de causas físicas, Kepler introduce extrañas especulaciones que no pertenecen al campo de la astronomía, sino de la física.*”⁴⁷ Esto es exactamente lo que Kepler hizo: reunir la astronomía y la física que habían quedado divorciados por la metafísica aristotélica, por dos mil años. Estoy de acuerdo con la siguiente síntesis que hace Koestler de la obra de Kepler. Los números entre paréntesis se refieren a las tres condiciones que la obra de Kepler cumple para merecer el calificativo de ciencia moderna: “*Sus leyes eran las primeras ‘leyes naturales’ en el sentido moderno de la palabra: enunciados precisos, verificables (1) sobre relaciones universales que determinan fenómenos particulares (2), expresados en términos matemáticos (3).*”⁴⁸

⁴⁶ Citado en Arthur Koestler, *The Sleepwalkers* (1989): 261

⁴⁷ Citado en Arthur Koestler, *The Sleepwalkers* (1989): 353

⁴⁸ Citado en Arthur Koestler, *The Sleepwalkers* (1989): 318, números entre paréntesis míos

