Maestría en Filosofía e Historia de la Ciencia
Facultad de Humanidades
Universidad Nacional del Comahue

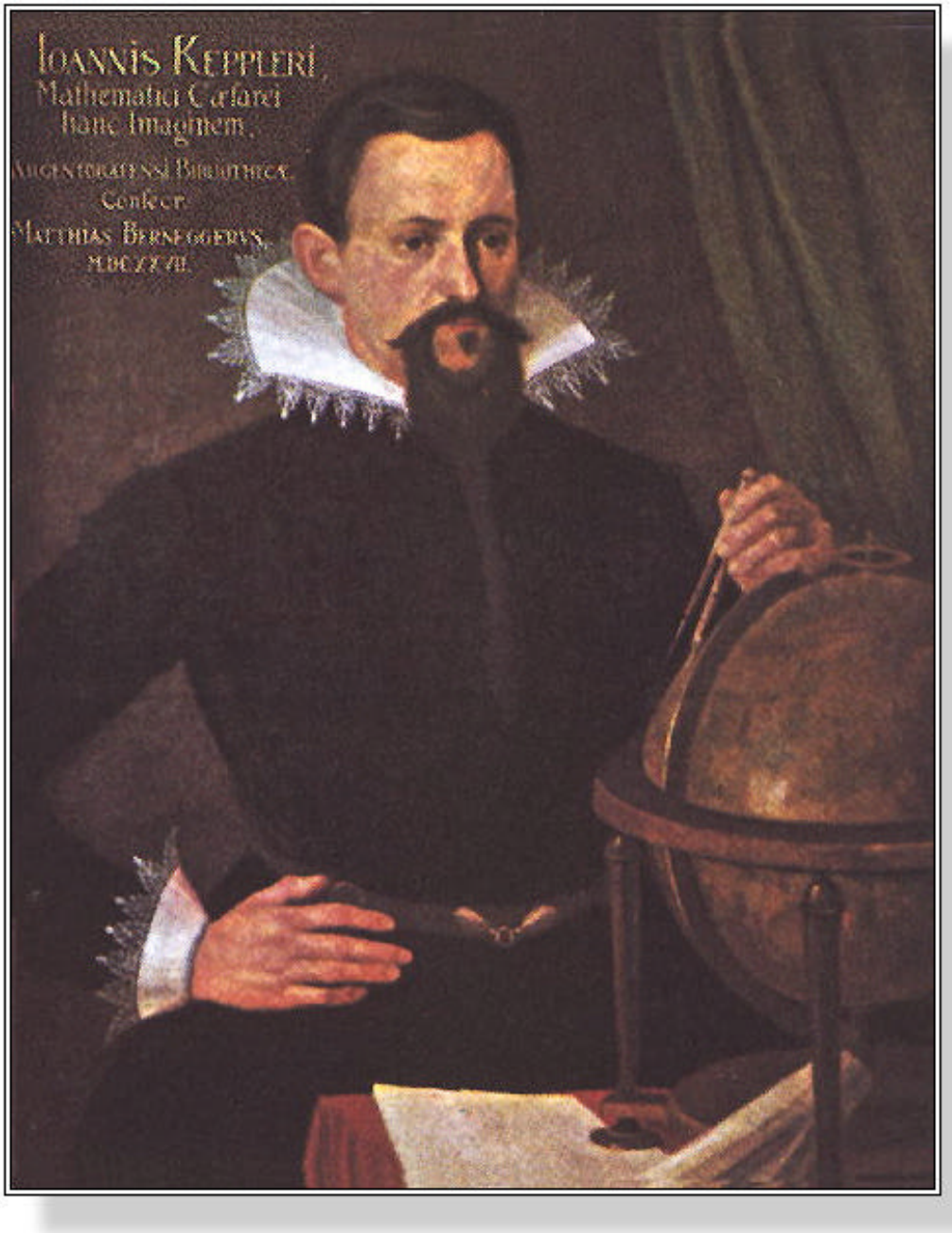
Teoría kepleriana del arco iris*

R. O. Barrachina#
Centro Atómico Bariloche, 8400 S. C. de Bariloche, Río Negro, Argentina.

Resumen: En este trabajo se analiza la evolución de las ideas de Kepler sobre el arco iris a lo largo de más de veinte años de estudios. A través de un exhaustivo análisis de las posibles fuentes a las que apeló, y las obras de otros autores anteriores o contemporáneos suyos, se intenta demostrar que existen sorprendentes similitudes entre las ideas que Kepler fue desarrollando individualmente, y aquellas que se generaron desde Aristóteles hasta sus días en el esquema más amplio de la evolución histórica del tema. También se resalta que al desarrollar sus propias ideas, fue dando pasos similares a los que dio en cosmología, proporcionando un espejo alternativo donde ver reflejado, aunque en menor escala en cuanto a su trascendencia posterior, su desarrollo científico y el nacimiento de la ciencia moderna. Esta comparación es particularmente relevante, en tanto que entre ambos desarrollos hay muchas e importantes similitudes, a excepción de que los estudios sobre el arco iris se dieron en un ambiente libre de la fuerte confrontación que caracterizó el surgimiento del modelo heliocéntrico, y que su teoría de reflexiones múltiples quedó incompleta. Se muestra que esta "falla" no se debió al desconocimiento de la ley de refracción como señalan algunos autores, en tanto que Kepler contaba con una ley de refracción aproximada, y aún si no hubiese sido así, estaba en posición de reproducir el descubrimiento que Descartes realizaría pocos años después. La explicación más plausible parece ser que simplemente no advirtió este punto faltante de su teoría, y que si abandonó el estudio del tema, se debió a las dificultades personales de los últimos años de su vida. Además, su insistencia en aceptar un radio angular de 45º para el arco iris, un dato que la gran mayoría de sus contemporáneos consideraban erróneo, posiblemente se debió al grado de certeza que Kepler debía asignar a las mediciones del radio del arco iris realizadas por distintos autores. Finalmente se analizan los rasgos fundamentales de la filosofía de la ciencia de Kepler que surgen de sus estudios sobre el arco iris. Se muestra como estos implicaron la revisión de sus propias ideas sobre causalidad, hipótesis, realidad y conocimiento.

* Monografía realizada para el curso "Historia de la Ciencia I: El surgimiento de la ciencia moderna: aspectos filosóficos", dictada por el Prof. Oscar Nudler durante el 2º semestre de 1998.

Correo electrónico: barra@cab.cnea.gov.ar, fax: +54 2944 445299.


IOANNIS KEPPLERI
Mathematici Cæsarei
hanc Imaginem,
Augustoranensi Bibliothecæ
Confecit
MATTHIAS BERNEGGERVS.
M.DC.XX.III.

Introducción

Este artículo está relacionado con el análisis de un episodio de la historia de la ciencia ocurrido en los países de Europa central a principios del siglo XVII. Aunque su protagonista es uno de los personajes más ampliamente conocidos de esta historia, no lo es el episodio al que nos vamos a referir. Durante un largo período de más de dos décadas, aproximadamente entre 1596 y 1619, Johannes Kepler desarrolló una teoría completa de la formación del arco iris, que en muchos sentidos anuncia el modelo posterior de René Descartes. Tal como mostraremos enseguida, este episodio muestra varias facetas interesantes, no siendo la menor que -a diferencia de este último- Kepler dejó un pormenorizado detalle de la muy laboriosa evolución de sus ideas sobre el tema a lo largo de esos veinte años de estudio.

Si bien sus conocidos estudios cosmológicos también muestran una gran abundancia de información, este episodio referido al arco iris presenta una sutil pero importante diferencia, que constituye una característica única desde el punto de vista historiográfico. Aún una lectura casual de cualquier escrito referido a la evolución del pensamiento kepleriano sobre el movimiento de los planetas, se asienta muy probablemente sobre un conocimiento previo de sus características esenciales (heliocentrismo, rotación de la tierra sobre su eje, órbitas elípticas, etc.). En cambio, si bien el arco iris es un fenómeno óptico bien conocido, es muy probable que el lector nunca haya oído hablar del asunto en términos científicos. Aún si enseña o estudia Física, es posible que las teorías sobre el arco iris de Descartes y Newton no le resulten familiar. No es un tema que se estudie en los cursos iniciales, y raramente es mencionado en la mayoría de los libros de texto especializados de óptica y meteorología. Aún cuando conocen sus características fundamentales, muy pocas personas pueden dar una explicación de este fenómeno óptico. Por el contrario, estamos tan influenciados por nuestro paradigma heliocéntrico, que nos cuesta advertir que tan poco "obvio" es el modelo copernicano.

Este "desconocimiento previo" permite que el lector pueda seguir paso a paso el penoso avance de Kepler en el desarrollo de su teoría, sin tener la capacidad de juzgarlo a la luz de los conocimientos actuales. Este ideal diacrónico se ve favorecido por el hecho de que una primera explicación del arco iris no precisa de conceptos de óptica física referidos a la naturaleza y propagación de la luz. Y precisamente ésta es otra de

las características importantes del tema: su sencillez. Al avanzar en la discusión, veremos que la complejidad de un proceso de investigación como el emprendido por Kepler no está necesariamente relacionada con la posible dificultad de sus aspectos técnicos.

Durante el período de vida de Johannes Kepler (1571-1630), se dio un inesperado interés en el estudio del arco iris. De hecho, volúmenes enteros fueron escritos sobre el tema. Sin embargo, por lo que se ve (o se deja de ver) en los trabajos históricos referidos a Kepler, uno podría imaginar que este tema no despertó su interés. Pero no es así, lo que Galileo fue para la dinámica, Gilbert para el magnetismo y Boyle para la neumática, Kepler lo fue para la dióptrica. Y una investigación exhaustiva de sus trabajos revela que Kepler realizó grandes esfuerzos para explicar el arco iris, con una dedicación que rivalizó con la que le consumía sus estudios sobre cosmología. Y aún así, los trabajos históricos dedicados a él prácticamente no mencionan sus trabajos sobre el tema. Por ejemplo, en las más de 130 contribuciones publicadas en los Proceedings[1] de las Conferencias dedicadas a Kepler en 1971, a 400 años de su nacimiento, sólo ocho están dedicadas a sus investigaciones ópticas.

No sabemos cuando el hombre se dio cuenta de que el arco iris no es una "cosa" en el sentido ordinario de la palabra, sino uno de los fenómenos más sutiles de la naturaleza. Teniendo su origen en una extraña interacción de la luz y la lluvia es, sin embargo, tan inasible como un espíritu. Uno no puede decir del arco iris: está aquí, o está allá. La lluvia que lo produce puede estar a kilómetros de distancia, pero al mismo tiempo parte de él puede generarse en una neblina tan próxima que parecería posible extender la mano para tocarlo. También habrá causado impresión el hecho de que al moverse uno, el arco iris parece seguirlo. Escapar ó acercarse a el es imposible.

No es sorprendente que un fenómeno de estas características despertase el interés de Kepler. Además, siendo explícitamente descrito en la Biblia como una señal divina, tampoco es de extrañar que Kepler buscara allí también una armonía oculta que mostrara a su Creador. Así, mientras que para algunos la búsqueda de las causas del arco iris podían parecer como una profanación, para otros, y entre ellos Kepler, era un esfuerzo piadoso para conocer mejor a su Hacedor.

[1] A. Beer and P. Beer: *Kepler, Four Hundred Years, "Proceedings of Conferences held in honour of Johannes Kepler"* (Pergamon Press, Oxford, 1975).

Esta es la señal del pacto...

Como en toda descripción del desarrollo de la ciencia en el siglo XVII, es oportuno comenzar por lo que el pensamiento cristiano tenía que decir al respecto. Este enfoque es particularmente relevante en el desarrollo de la cosmología heliocéntrica. Son claros ejemplos de ello, los temores de Copérnico al elaborar su modelo, la muerte de Giordano Bruno, el juicio al que fue sometido Galileo y hasta las dudas metafísicas del mismo Kepler al plantear órbitas elípticas para los planetas.

Pero si bien el modelo heliocéntrico nació en un ambiente de confrontación con la visión del mundo dominante, no ocurrió lo mismo con el modelo geométrico del arco iris. Tal como veremos en este trabajo, las similitudes entre ambos desarrollos son muchas e importantes. En particular, lo que el modelo ptolomaico de *epiciclos y deferentes* fue para la cosmología, el modelo aristotélico de la *esfera metereológica* que describiremos en un momento lo fue para el arco iris. Y en el Antiguo Testamento hay referencias tanto al movimiento de los astros, como a la forma y colores del arco iris. La diferencia esencial entre ambos estriba en que mientras la teoría geocéntrica formaba la base de la simbiosis realizada por Santo Tomás[2] entre la filosofía aristotélica y la religión cristiana, la teoría aristotélica del arco iris era absolutamente tangencial. A diferencia de aquella, esta se podía modificar sin alterar nada de la gran construcción aristotélica del mundo. Atendiendo a sus grandes similitudes con la historia del modelo heliocéntrico, excepto por esta diferencia esencial, el estudio de la génesis del modelo del arco iris nos permitirá analizar el desarrollo de una teoría científica en el siglo XVII fuera de un esquema de confrontación con la visión del mundo dominante. Sin embargo, es interesante destacar que las ideas antiguas sobre el arco iris fueron atacadas más tardíamente que otras doctrinas fundamentales. Posiblemente esto se debió no a un exaltado respeto por la autoridad, sino a un relativamente menor interés en el tema en comparación con el movimiento de los astros, o a ciertas dificultad inherente en el mismo.

Señalado el interés que tiene estudiar el desarrollo de las teorías del arco iris, el proverbial lector sagaz se estará preguntando porqué nos restringiremos a analizar lo realizado por Kepler, en lugar de ver el esquema más amplio del desarrollo histórico del

[2] Es interesante destacar que Santo Tomás de Aquino (1225-1274) también estuvo interesado en el fenómeno del arco iris. Inclusive escribió un muy poco inspirado comentario sobre la *Metereologica* de Aristóteles, que alcanzó cierto prestigio, siendo usado y copiado con asiduidad hasta el siglo XVI.

tema. Ocurre que, tal como veremos, es posible encontrar sorprendentes similitudes entre las ideas que Kepler fue elaborando individualmente, y aquellas que se desarrollaron desde Aristóteles hasta sus días. Tan cercanas, de hecho, son estas similitudes que, tal como señala Carl Boyer[3] uno está tentado a ver aquí la operación de un principio general de desarrollo mental de alguna manera afín a la ley biogenética de recapitulación.

Otra de las características más sobresalientes de esta investigación realizada por Kepler sobre la formación del arco iris, es que al desarrollar sus propias ideas sobre el tema, fue dando pasos similares a los que dio en cosmología. Estos proporcionan un espejo alternativo donde ver reflejado, aunque en menor escala en cuanto a su trascendencia posterior, su desarrollo científico y el nacimiento de la ciencia moderna. Pero, así como hay similitudes entre ambas líneas de investigación, también hay una importante diferencia, y es que, a diferencia de sus tres leyes del movimiento planetario, sus trabajos sobre óptica no alcanzaron el éxito.

Los panegiristas del Renacimiento son propensos a resaltar una revuelta contra la autoridad. En la segunda mitad del siglo XVI hubo violentos ataques a las doctrinas aristotélicas, aunque sus autores no sobrepasaron en número a los defensores del filósofo. Pero, tal como señalamos, esta controversia es de poca importancia en la historia de los estudios sobre el arco iris. El peso de la autoridad pudo haberse sentido atacado en ciertos campos, como la astronomía, parcialmente debido a que allí la ciencia y la teología estaban íntimamente conectadas, y un ataque a la cosmología ptolomaica parecía un asalto a la cristiandad. Se temía que un ataque tal a un detalle esencial pudiese hacer colapsar la estructura completa. La teoría del arco iris, en cambio, era absolutamente periférica en la Doctrina de Aristóteles. Sólo la parte referida al color tenía alguna relación con otras enseñanzas del filósofo. Y los pasajes bíblicos relativos al arco iris eran pocos y poco importantes.

Las escasas tres citas sobre el arco iris que figuran en el Antiguo Testamento tienen un muy claro sentido metafórico. En Eclesiástico es descrito como una obra maravillosa del Creador, *Contempla el arco iris y bendice al que lo hizo; es muy hermoso su resplandor; ciñe el cielo con el cerco glorioso; las manos del Altísimo lo han formado* (Eclesiástico. 43:12-13). Puesto que parece unir el cielo y la tierra con un puente o arco gigantesco, pareció muy apropiado que después del diluvio se volviese

[3] Carl Benjamin Boyer: *The rainbow from myth to mathematics* (T. Yoseloff, New York, 1959).

símbolo de paz entre Dios y el hombre. Así es descrito en el Génesis: *Y dijo Dios: "Esta es la señal del pacto que por generaciones perpetuas establezco entre Mí y vosotros y todo ser viviente que se halla entre vosotros. Pondré mi arco en las nubes, que servirá de señal del pacto entre Mí y la tierra. Cuando Yo cubriere la tierra con nubes y apareciere el arco entre las nubes, me acordaré de mi pacto que hay entre Mí y vosotros y todo ser viviente de toda carne; y las aguas no volverán más a formar un diluvio para exterminar toda carne. Pues cuando aparezca el arco en las nubes, Yo lo miraré para acordarme del pacto perpetuo entre Dios y todo ser viviente, de toda carne que existe sobre la tierra." Dijo, pues, Dios a Noé: "Esta es la señal del pacto que he establecido entre Mí y toda carne sobre la tierra".* (Génesis 9:12-17). Este pasaje bíblico dio lugar a considerables controversias acerca de si el arco iris podía formarse antes del Diluvio. Una interpretación literal de la Biblia condujo a la inferencia de que el arco iris fue creado en los días de Noé, por medio de algún cambio drástico en las condiciones atmosféricas. Pero la mayoría de los exegetas cristianos interpretaron este pasaje como indicativo de que Dios dio un nuevo significado al fenómeno familiar del arco iris, transformándolo en el símbolo de una promesa divina.

En la última referencia que aparece en el Antiguo Testamento sobre el arco iris, Ezequiel va más allá y ya no lo describe como obra de Dios o como símbolo, sino como imagen misma de la gloria de Dios: *Como el aspecto del arco que aparece en las nubes en día de lluvia, así era el aspecto del resplandor que le rodeaba. Tal fue el aspecto de la imagen de la gloria de Yahvé. Cuando la vi, me postré con el rostro en la tierra, y oí la voz de uno que hablaba* (Ezequiel 1:28).

Tal como muestran estos pasajes, tanto en la tradición hebrea como en la cristiana, el arco iris fue visto como un símbolo de alianza con Dios. En la tradición griega, en cambio, su aspecto tuvo otras connotaciones, muchas veces siniestras. Se lo asociaba a la estela dejada a su paso por la diosa Iris, mensajera de los dioses, hija de Elektra y hermana de las Arpías. Más allá de su papel como diosa de los elementos y hacedora de la lluvia, tanto en la Ilíada[4] como en la Odisea y en la Eneida de Virgilio, Iris (y con ella su arco) siempre aparece como precursora de algún desastre o como portadora de alguna advertencia de los Dioses. Así, como la palabra "Iris" significa "mensajero", es posible que también esté relacionada con "ira".

[4] En la *Ilíada*, Homero escribe que Afrodita, herida por el guerrero Diómedes, fue llevada por la diosa Iris desde el campo de batalla hacia el Olimpo con la rapidez del viento por el camino del arco iris. Es interesante destacar que en los Alpes austríacos se decía que las almas de los justos ascienden al cielo por el camino del arco iris.

La tradición popular en los países de Europa central adoptó una interpretación del arco iris cercana a esta última. Esta fue seguramente conocida por Kepler, por lo cual es relevante comentarla brevemente. En particular, el arco iris secundario fue llamado Teufelsregenbogen, y era creencia común que representaba un intento fallido de parte de Satanás para sobrepasar al arquitecto del arco iris. Otra leyenda medieval alemana aseguraba que no se producirían arco iris durante los últimos cuarenta años anteriores al fin del mundo, y por ello su aparición siempre fue vista como un buen augurio[5]. Por otra parte, a principios del siglo IX, Rabanus Maurus (784-856), arzobispo de Mainz y comúnmente llamado "praeceptor Germaniae", sostenía en un pequeño trabajo titulado *De Arcu Coelesti* que la presencia de los colores del agua y del fuego (azul y rojo) en el arco iris significaban que la tierra no sería destruida nuevamente por el agua, sino por el fuego. Esta creencia tradicional alemana sería recogida por Dante en el *Paradiso*, donde la une a las tradiciones Hebrea y Griega en un pasaje que describe al arco iris como símbolo de la doncella Iris, reina del cielo y mensajera de Juno y como un signo de la alianza de Dios con Noé: *Como se ven dos arcos paralelos y del mismo color encorvarse sobre una ligera nube, cuando Juno envía a su mensajera -naciendo el de fuera del de dentro, al modo de la voz de aquella ninfa que consumió el amor como el sol los vapores-; y cuyos arcos son un augurio para los hombres, por el pacto que firmó Dios con Noé, según el cual el mundo no volvería a sufrir otro diluvio...* (Dante: Paradiso, Canto XII, 10-18).

Esta idea, del arco iris como promesa divina, fue tomada por Roger Bacon (1214-1292) en uno de los más interesantes trabajos sobre el tema realizados en el siglo XIII, como parte del famoso *Opus Majus*, compuesto en 1266-1267 para el Papa Clemente IV. Después de abrir la obra con una típica vena crítica, señalando que Aristóteles, más que ningún otro filósofo, nos ha envuelto en la oscuridad respecto del arco iris, "*y Avicenna, la mayor autoridad en filosofía desde Aristóteles, como todos insisten, humildemente confesó su ignorancia sobre la naturaleza del arco iris. Así es cierto que ningún filósofo ha sido capaz de comprender algo sobre el arco iris"*. Y como buen hijo de su tiempo agrega, "*No es extraño, puesto que ellos no han examinado las escrituras con la necesaria diligencia. Pues todos los filósofos han sido ignorantes sobre la causa final del arco iris"*. A continuación Bacon señala que La

[5] Esta creencia fue tomada por el Venerable Beda (673-735) en un pequeño trabajo titulado *De natura rerum*. También es citada en *De Naturis Rerum* de Thomas de Cantimpré (c. 1200-1270) y *en De Proprietatibus Rerum* del monje franciscano Bartholomaeus Anglicus (activo en 1230-1250)

Biblia explica esta finalidad: El arco de Dios *nos protege del diluvio. Cuando aparece, debe haber un activo consumo de la humedad acuosa, y esto implica la existencia de algo que posee el poder de consumir*. Y precisamente esto es lo que hace el arco iris. Es interesante la vena mística de esta explicación finalista: Los no creyentes no podrán lograr una comprensión del arco iris, debido a su ignorancia de las escrituras.

Por otra parte se pensaba que el arco iris servía como signo de la Trinidad, donde el elemento tierra por un extremo, se unía a través del elemento aire, con el otro extremo en el elemento agua. Además los siete colores del arco iris estaban asociados a los siete sacramentos. Dante recoge nuevamente esta creencia. En el Purgatorio escribió *...sobre ellas aparecían claramente siete listas de los colores que el sol utiliza para formar su arco, y Delia para hacer su cinturón* (Dante, Purgatorio, Canto XXIX, 118-120). Esta última creencia tuvo una influencia muy importante en el desarrollo del modelo kepleriano. Mientras que en el pensamiento escolástico los colores del arco iris son sólo tres o -a lo sumo- cuatro, Kepler no tendría problemas en imaginar la presencia de siete colores o una multitud de tonalidades[6].

Johannes Kepler

Johannes Kepler es una de las figuras más fascinantes de la historia de la ciencia. Nació el 27 de Diciembre de 1571 en una pequeña "Reichsstadt" cercana a Stuttgart, conocida entonces como Wyl, y hoy llamada Weil der Stadt. Su padre era soldado mercenario. Muchos han querido ver en esto una señal de una familia de baja estima en la

[6] En la Eneida, Virgilio describe al arco iris como formado por infinitos colores: *"Como cuando el arco iris, opuesto al sol, arroja mil colores entremezclados. Con alas de azafrán entonces la neblinosa Iris vuela a través del espacio de los cielos, extrayendo mil variedades de tinturas del sol, opuesto a su lugar"*.

sociedad local, pero la evidencia parecería apuntar en otra dirección: Los archivos de la ciudad muestran una lista de gastos para una fiesta realizada en honor de su padre a la vuelta de una guerra. Su abuelo -inclusive- había sido alcalde. Pero lo cierto es que la familia se había empobrecido. La infancia de Johannes transcurrió en la vecina Lewenberg (hoy, Leonberg), a donde su familia se había trasladado en 1575. A la edad de 5 años, Kepler estuvo seriamente enfermo de viruela como resultado de lo cual su vista quedó debilitada y con doble visión en uno de sus ojos. En esto y en su contextura débil hay que ver una de las posibles causas de su poca inclinación a la observación astronómica. Esta inhabilidad para la observación tendría también importantes consecuencias en sus investigaciones sobre el arco iris, como veremos más adelante. A la edad de seis años comenzó a asistir a la escuela elemental (Schreibschule), aunque con muchas interrupciones por las guerras y las consecuentes ausencias de su padre. Recién en 1582 pudo asistir regularmente. Por esa época, la corte luterana de Württemberg había creado un sistema de becas para que jóvenes talentosos pudiesen estudiar en escuelas conventuales, pasando así a completar los cuadros intelectuales del naciente credo religioso. Johannes Kepler fue uno de estos jóvenes, al ganar en 1584 un lugar en la escuela monacal de Adelberg, cerca de Hohenstaufen. En 1586 estudió en la escuela preparatoria para la Universidad de Tübingen en Maulbronn. Y en 1587 fue finalmente matriculado en la Universidad de Tübingen, una pequeña ciudad de unos 3000 o 3500 habitantes. Sin embargo, como el seminario para estudiantes becados estaba lleno, permaneció otros dos años en Maulbronn. Finalmente, en 1589 Kepler logró una vacante en el Colegio Teológico de la Universidad. En su tradición monástica, los estudiantes dormían en celdas sin calefacción, se levantaban a las 4 o 5 de la mañana para orar, y vestían hábitos negros. Sus salidas estaban severamente restringidas. En Agosto de 1591, a la edad de 20 años, concluyó sus estudios iniciales (Latín, griego, hebreo, dialéctica, retórica y matemáticas) con una tesis de maestría sobre la Luna que hasta el presente permanece desconocida. En marzo de 1594, el joven candidato de 23 fue enviado por su universidad a la Escuela catedralicia (Stiftsschule) de la provincia de Styria en Graz como maestro de matemáticas. Entre sus ocupaciones figuraba la de realizar "calendarios" anuales con un "prognosticum", que no era otra cosa que una especie de horóscopo. Estando allí, tuvo tiempo para abocarse al estudio de la *Narratio Prima* de Rheticus y *De Revolutionibus Orbium Coelestium* de Copérnico, a que lo había impulsado su maestro Mästlin en Tübingen. La lectura del libro de Copérnico fue un aliciente formidable. De allí en más, su convicción en un mundo heliocéntrico se

volvió inamovible. Adhirió a las doctrinas neoplatónicas del culto al Sol, y de la "armonía del mundo", según la cual el Dios creador ha cifrado el universo en términos matemáticos que involucran sencillez y belleza. Y un día de Julio de 1595, mientras dibujaba figuras en el pizarrón para sus estudiantes, Kepler creyó haber encontrado el secreto del Universo, donde las dimensiones del Cosmos se derivan de la inscripción de los cinco poliedros regulares entre las seis esferas planetarias. Al año siguiente, publicó estas ideas en su pequeño libro, el *Mysterium Cosmographicum*, que fue bien recibido y le ayudo a formarse una reputación en Europa.

Primeras investigaciones sobre el arco iris

El interés de Kepler por el arco iris parece iniciarse con la publicación de su *Mysterium Cosmographicum*. En notas marginales agregadas a su libro, encontramos la primera referencia conocida al tema. Allí comparó el rango de colores del arco iris con los tonos de la octava musical. En esto vemos un intento de extender las relaciones armónicas que él buscaba entre la astronomía, la música y la geometría, para incluir el fenómeno del color. Según Kepler, tomando al amarillo como una especie de nota media, al ir hacia arriba se pasa por el naranja y el rojo hacia el negro, a medida que la influencia solar disminuye y la densidad de las nubes aumenta. Del amarillo hacia abajo se pasa por el verde, el azul, el púrpura, el violeta y nuevamente al negro, pero esta vez por medio del proceso de refracción.

En estas breves notas marginales, hay varios puntos que merecen ser destacados. En primer lugar, advertimos que el interés de Kepler por el tema del arco iris es absolutamente independiente de sus otros estudios de óptica. Mientras que estos están fundamentalmente relacionados con la dióptrica y su importancia instrumental en las observaciones astronómicas, aquel proviene de un intento de extender al fenómeno del color las mismas relaciones armónicas que había encontrado en la astronomía.

Kepler agrega que a menudo ha considerado si la proporción de los ángulos de refracción determinan los límites entre estos cinco colores interiores. Según escribe Kepler, la visión directa, es decir con ángulo de refracción nulo, resulta en la luz amarilla, y cuando el ángulo de refracción es de 90º, cesa toda la luz, lo que corresponde a la oscuridad. Pero, él quiere saber cómo se subdivide este gran ángulo en los diferentes colores, y propone que si se divide al ángulo recto en partes correspondientes a las fracciones simples 1/6, 1/5, 1/4, 1/3, y 1/2, allí se acomodarían los cinco colores

interiores[7]: amarillo, verde, azul, púrpura y violeta, respectivamente. *"Y así, ¿no es la magnitud del arco iris igual a 45º, que es la medida de medio ángulo recto?"*. Pero luego de esta frase agrega cautamente, *"Pero estas son sólo especulaciones"*.

En ésta, su primera explicación del arco iris, advertimos una clara muestra de la misma numerología pitagórica que campea en su primera publicación astronómica. Podemos preguntarnos si el ángulo de 45º que el postula para el arco iris, y que mantendrá a lo largo de su vida, fue medido por él mismo, fue tomado de algún autor previo, o si se trató de una deformación -a fin de hacerlo coincidir con su numerología- del ángulo de entre 40º y 42º que gozaba de mayor consenso[8]. Cualquiera sea la respuesta, Kepler no da ninguna cita. Sorprende además la suposición tácita de que es la nube[9], como un todo, la causante del fenómeno, cuando varios pensadores anteriores y contemporáneos ya habían llegado a la conclusión de que el arco iris era el efecto colectivo de la refracción en gotas de lluvia individuales. Todo esto hace pensar que Kepler comenzó su estudio del Arco Iris con un conocimiento muy superficial de lo realizado por autores anteriores.

[7] Vemos como Kepler mantiene la creencia tradicional en la existencia de siete colores en el arco iris, pero atribuye una causa distinta a los dos colores superiores, y se queda con los cinco interiores que enmarca en su división del ángulo recto en fracciones simples. El primero en atribuir cinco colores al arco iris había sido Roger Bacon en su *Opus Majus*, blanco, azul, rojo, verde y negro, en contraste con los siete que incorrectamente atribuye a Aristóteles. Según Bacon esto es así *"pues el número cinco es mejor que todos los otros números, como Aristóteles dice en el Libro de los Secretos... Porque el número cinco distingue las cosas de manera más definida y mejor, la naturaleza por esta razón intenta que haya cinco colores. Por lo tanto, estos cinco colores están en el arco iris, más que otros colores, de acuerdo con el arreglo general de la naturaleza, que lleva a efecto y propósito aquello que es mejor"*. En apoyo de su idea, advierte que hay cinco elementos en el ojo: tres humores y dos membranas (la uvea y la cornea); y los cinco colores del arco iris aparecen de acuerdo con estas cinco partes. (En contrapartida, Alhazen, a quien nos referiremos más adelante, había reconocido tres fluidos y cuatro membranas).

[8] En su *Opus Majus*, después de hacer un llamado sobre la utilidad de la matemáticas en la comprensión de las sagradas escrituras, y sobre el valor de la ciencia experimental (inferencia inductiva a partir de la experiencia), Roger Bacon sugiere considerar al arco iris como ejemplo. Y siguiendo su propio consejo hace algo que, desde un punto de vista actual, puede resultar exasperante que nadie haya intentado antes en los casi dos mil años transcurridos desde que Aristóteles investigara el tema por primera vez. ¡Mide el ángulo del arco iris!. Encuentra muy fácilmente que el arco exterior (rojo) subtiende un ángulo de 42º. Repite esta cifra, sorprendentemente precisa, varias veces en su *Opus Majus*. y este valor será tomado por la inmensa mayoría de sus sucesores, ¡con la prácticamente única excepción de Kepler! quien mantendrá el valor de 45º en todos sus estudios sobre el arco iris.

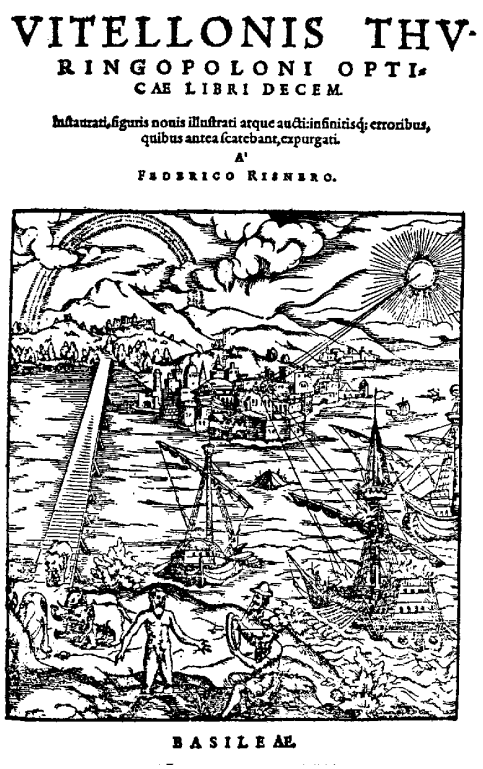
[9] Esta idea había sido mantenida hasta bien entrado el siglo XIII. Por ejemplo, en *De Proprietatibus Rerum* del monje franciscano Bartholomaeus Anglicus, la descripción del arco iris recae no tanto sobre las ideas de Alberto Magno y Grosseteste (a quien conoce y cita) sino sobre Aristóteles, Séneca y Beda, al afirmar que el arco iris es causado por la reflexión en nubes cóncavas.

Posibles fuentes previas

Pero, ¿es realmente así?. ¿Estas primeras ideas de Kepler sobre los colores del arco iris son completamente originales?. ¿O sería posible rastrear una o varias fuentes de información?. Naturalmente, en este punto debemos considerar la posibilidad de que conociera el tratado *De Meteorologica* de Aristóteles, si no directamente, al menos a través de alguno de sus comentaristas. Con las invasiones bárbaras, el conocimiento antiguo se había ido perdiendo poco a poco. Prácticamente no se conserva ningún texto o fragmento referido al arco iris escrito en el período de tres siglos que va de Alejandro de Afrodisia al cierre de la escuela de Atenas por Justiniano en 529. Sin embargo, ya a mediados del siglo XIII existía una traducción de la *Meteorologica* del árabe al latín, y traducciones de este mismo libro y de los comentarios de Alejandro de Afrodisia, realizadas por Guillermo de Moerbecke (1215-1286), arzobispo de Corinto, y fechadas el 24 de Abril de 1260. También existían traducciones en lengua vernácula, en particular una copia en francés de la *Meteorológica* escrita entre 1249 y 1270 para el Rey Juan de Jerusalén por un tal Matthieu le Vilain, nativo de Rouen. Por esta época también se tradujo la obra de Abu Ali al-Hasan ibn al-Hasan ibn al-Haitham (c. 965-1039), conocido como Alhazen. Este fue uno de los pensadores árabes más influyente en la tradición occidental[10]. Su tratado *Kitab al-manazir* o *Tesoro de Optica*, se convirtió, junto con la *Metereologica*, en la principal fuente de investigación árabe y latina sobre óptica. Aunque no estudió el arco iris, se sabe por comentaristas posteriores que sostenía una posición básicamente aristotélica. Además disparó en la Edad Media una corriente de interés en la óptica geométrica que, a la larga, sería beneficiosa.

[10] Nacido en Basra, alcanzó tal reputación como científico que fue llamado por el califa del Cairo para diseñar la forma de irrigar el bajo Egipto. Viendo que la tarea era imposible, y temiendo la ira del califa, se fingió loco, siendo confinado y sus propiedades confiscadas. Al morir el califa recuperó su libertad y sus propiedades, continuando sus estudios, sobre todo en óptica. Alhazen fue uno más en una larga tradición árabe en estudio de óptica, iniciada por Job de Edessa, un escritor Néstoriano que nos dejó una clara narración de la ciencia natural que se enseñaba en Bagdag a comienzos del siglo IX. El *Libro de Tesoros* fr Job de Edessa contiene varias páginas dedicadas al Arco Iris. Abu Ali al-Husain ibn Abdallah ibn Sina (980-1037), conocido en Occidente como Avicenna, escribió un tratado sobre Meteorología, que traducido al latín ejerció una gran influencia en Europa. Este libro incluye un estudio sistemático sobre el arco iris. Es interesante su propuesta de que el arco iris se forma en las partículas de humedad, y no en las nubes como un todo. También debemos mencionar a Abu-l-Walid Muhammad ibn Ahmad ibn Muhammad ibn Rushd, nacido en 1126, y conocido en Occidente como Averroes. Escribió comentarios sobre una versión árabe de la *Meteorologica* (no sabía griego), en un lenguaje muy claro. Sin embargo, confundiendo el uso que Aristóteles hacía de la *esfera meteorológica*, o posiblemente adoptando una versión cruda de las ideas de Alhazen, Averroes afirmó que la forma circular del arco iris se debe a la esfericidad de las nubes cóncavas donde se produce, una idea que sería rápidamente adoptada durante la Baja Edad Media en Occidente.

Es difícil imaginar que al escribir sus notas marginales, Kepler ya conociese la obra de Alhazen de manera directa. Por otra parte, por esa época, este libro era conocido principalmente a través de la *Perspectiva* de Witelo, uno de los tratados de óptica más difundidos, y que dedicaba una parte sustancial al estudio del arco iris. En 1572, las obras de Alhazen y Witelo habían sido publicadas en una Editio Princeps, por Risner. Sin embargo, que Kepler no estaba aún familiarizado con la obra de Witelo es evidente en varios puntos de las notas marginales. Por ejemplo, en la afirmación de que el arco iris se forma en la nube como un todo, y en el uso que hace de la palabra *refracción*.


VITELLONIS THV·
RINGOPOLONI OPTI·
CAE LIBRI DECEM.
Inſtaurati, figuris nonis illuſtrati atque auctiinfinitis q; erroribus, quibus antea ſcatebant, expurgati.
A'
FRIDERICO RISNERO.
BASILEAE.

En este punto, la influencia de Aristóteles es muy clara. En su *Meteorologica*, Aristóteles distingue entre dos formas de reflexión: "*En algunos espejos la forma de las cosas se refleja, en otros sólo sus colores. De este último tipo son aquellos espejos que son tan pequeños como para ser indivisibles*[11]". El arco iris y el halo caen en esta última categoría, ya que los considera causados por la "*reflexión de la vista del sol*" en las nubes y la niebla, respectivamente[12]. Que este tratado de

[11] Es muy llamativa la referencia que hace Aristóteles *a "espejos que son tan pequeños como para ser indivisibles*". Si extrapolamos este comentario a su descripción del arco iris como producido por este tipo de reflexión de color y no de forma, entonces debemos necesariamente pensar que las nubes están formadas por una multitud de pequeñísimos espejos. ¿Qué sería más natural que interpretar esto en el sentido de que la nube está formada por pequeñas gotas de agua que actúan como espejos?. Aristóteles, en cambio, piensa en las nubes como un medio continuo, cuyas partes son cohesivas y contiguas, y no como un agregado de gotas discretas. En virtud de la intensa oposición peripatética a la teoría atómica de la materia de Demócrito, es difícil imaginar que Aristóteles hubiese adoptado una visión tan favorable a las tesis atomistas.

[12] Aristóteles interpretó claramente que los agentes involucrados en la formación del arco iris eran una fuente de luz, generalmente el sol, una nube de lluvia y los ojos del observador. Sin embargo, aún cuando no sea significativo en cuanto a la formación del arco iris, es interesante advertir como Aristóteles cae en una terminología abiertamente platónica al escribir *reflexión de la vista del sol*, en lugar de *reflexión de la luz del sol*, cuando él en general rechazaba la doctrina de los rayos visuales en su teoría de la luz. Antes de Aristóteles había varias doctrinas sobre la luz y la visión. Una, sostenida por los atomistas, mantenía que los cuerpos luminosos emitían *eidola*, representaciones de los objetos formadas por átomos especialmente sutiles que alcanzaban los ojos estimulando la visión. Otra, asociada comúnmente con Euclides, sostenía que los ojos emitían rayos visuales o exploratorios que alcanzaban los objetos percibidos. Una hipótesis reconciliadora, atribuida a Platón, suponía que tanto los ojos como los objetos emitían rayos de cuya conjunción resultaba la visión. La imagen de Aristóteles es netamente distinta a todas estas. No vincula la luz al movimiento de partes de la materia o a cualquier tipo de emanación. La luz sería un estado o cualidad de los medios diáfanos tales como el agua o el aire, que el fuego es capaz

Aristóteles (o unos de sus muchos comentarios) no es ajeno a Kepler, es evidente en tanto que en sus notas marginales se está basando en la distinción aristotélica entre el proceso de reflexión en un espejo, donde se preserva la "forma" de la luz, y la reflexión en una superficie desigual, donde la luz se colorea. Kepler está usando la voz "*refracción*" en este último sentido aristotélico. Más adelante veremos como Kepler terminó abandonando esta primera definición, a favor de la utilizada por sus contemporáneos, de desviación de la luz al pasar de un medio a otro.

En la época en que Kepler realizaba sus dos primeros años de Maestría en la Universidad de Tübingen, existían varias publicaciones de comentarios sobre la *Metereologica*. Uno de los primeros comentarios vernáculos fue publicado por Francesco de Vieri en 1573 (y nuevamente en 1582), con el título de *Trattato*, y dedicado a Francesco de Medici, Gran Duque de Toscana. Se basaba en las cuatro fuentes mas citadas: Aristóteles, Alejandro, Olimpiodoro y Witelo. En 1576, había aparecido en París *el Iridis Coelestis* de Jean Demerlier. Sin embargo, de todos los comentarios disponibles sobre las obras de Aristóteles a fines del siglo XVI, los que gozaron de mayor prestigio fueron aquellos que eran dictados a los estudiantes de la Universidad de Coimbra por profesores jesuitas. Como habían aparecido varias ediciones fraudulentas, el Padre Pedro Fonseca había sido encargado de revisar estas ediciones para su publicación. Los comentarios publicados por él pasaron a llamarse simplemente *Conimbricenses*, y gozaron de un gran prestigio, dándole a Fonseca el seudónimo de "Aristóteles de Portugal". La *Meteorologica* de la serie apareció en 1592, mientras Kepler era estudiante en la Universidad de Tübingen, con el título de *Commentarii Collegii Conimbricensis Societatis Jedu in libros meteorum Aristotelis Stagyritae*, y formó parte del curriculum de todos los colegios jesuitas de Europa.

Durante el siglo XVI, se realizaron varios trabajos sobre el arco iris, pero pocos de ellos pasarían por la recién inventada imprenta. Uno de los que si lo hicieron, y que, habiendo gozado de una enorme popularidad, posiblemente haya sido conocido por

---

de actualizar. La presencia o ausencia de luz se asocia así, no al movimiento local, sino a la alteración o cambio de cualidad, que se produce a la vez en todos los lugares sobre los que el fuego del Sol actúa. Dicho de otro modo, la propagación de la luz, por no implicar desplazamiento de materia, es instantánea. La distinción medieval entre *lux* (luz atendiendo a la fuente luminosa: Sol, estrellas o llamas) y *lumen* (luz en cuanto *species* o representación de la luz que se transmite por el agua o el aire hasta llegar a nuestros ojos) no es ajena a la influencia de Aristóteles. Sin embargo, en muchos tratados, y en particular en su *Meteorologica,* Aristóteles utiliza el lenguaje de los rayos visuales, posiblemente de acuerdo con la imagen de su época, y teniendo en cuenta que la geometría del arco iris es independiente de la doctrina de la visión en que se exprese. El resultado de la teoría será el mismo ya sea que se piense en rayos de luz solar que rebotan en la nube y se reflejan hacia los ojos del observador o en rayos visuales del ojo que se reflejan hacia el sol por la nube.

Kepler, fue *la Margarita Philosophica* escrita por Gregor Reisch (m. 1525), prior de Freiburg en Breisgau, en 1503. Este era una especie de libro de texto sobre las artes enseñadas en la Universidad, y gozó de un sorprendente auge por más de un siglo y medio. La biblioteca pública de Nueva York, por ejemplo, tiene una docena de ediciones, incluyendo las de 1503, 1504, 1508, 1512, 1535, 1583, 1599 y 1600. La descripción que hace del arco iris es muy cruda en comparación con las obras de Witelo ó Themo, pero a tono con las notas marginales de Kepler. Supone que el arco iris es debido a reflexión (de color en el sentido aristotélico) cuando el sol brilla sobre una nube cóncava. La diversidad de colores se debe a las varias densidades de la nube, amarillo donde es más densa y verde donde lo es menos. El arco iris es circular debido a que el espejo (la nube) lo es. Plantea además el asunto de si el arco iris existía antes del diluvio.

Otra obra referida al arco iris que podría haber sido conocidas por Kepler, es la *De Meteoris Libri III* de Alberto Magno (m. 1280). Esta obra tuvo gran influencia. Fue publicada dos veces durante el siglo XV (en 1488 y en 1494), y se realizaron varias ediciones posteriores entre los años 1518 y 1651. Incluye 39 capítulos referidos a los efectos de arco iris y halo. Es una revisión enciclopédica desde Hesiodo hasta sus días. Aún cuando no lo mencione, parece claro que su explicación del arco iris en términos del pasaje de la luz a través de medios de distinta humedad y densidad, debe mucho a Roberto Grosseteste, aún cuando no lo cite[13]. Pero apartándose de Grosseteste, sigue a Séneca en la idea de que las gotas individuales son responsables de la formación de los colores.

Finalmente, debemos mencionar los tratados realizados por la escuela de Jean Buridan (m. 1358?) en la Universidad de París. Nicolás Oresme (c. 1323-1382), obispo de Lisieux y consejero de Carlos V de Francia, Alberto de Sajonia (1316?-1390), y Themon Jdaei (or Judaeus) or Themo Judoci o Thimon le Juif (1349-1416) eran los que formaban, junto con Buridan, este grupo parisino. Los cuatro estuvieron interesados en el tema del arco iris, al nivel de que cada uno escribió un trabajo sobre el tema. En cada caso, el título fue, con menores variaciones, *Quaestiones in Libros Meteororum*, es decir Preguntas sobre la *Metereologica* de Aristóteles. Este era un nuevo género que vendría a reemplazar los comentarios anteriores, y que constituiría lo que las notas del Profesor o

[13] Esta falta de cita es muy extraña, en tanto que es casi seguro que el *De Iride* de Grosseteste era un texto de estudio en la Universidad de París cuando Alberto Magno estudió allí. Posiblemente este olvido se deba al poco interés de un dominico por citar a un miembro de la rival orden franciscana.

los libros de texto son en la actualidad. Mientras era estudiante, Newton también escribiría sus notas en este estilo. Las cuatro versiones son casi idénticas, tanto en el orden, como en el lenguaje y las respuestas. Más que un caso de plagio, esto nos indica que los cuatro autores estaban en cierta forma asociados en los mismos cursos en la Universidad de París. Siendo el mayor del grupo, es posible que Buridan fuera el que tirara las líneas generales de las cuatro *Quaestiones*, pero el trabajo de Themo, uno de los más prominentes maestros de la Universidad, es superior a los de los otros tres. Sus obras son citadas con frecuencia hasta en el siglo XVII, y sus *Quaestiones in Meteora* fueron publicadas varias veces entre 1480 y 1518. Las de los otros tres no son citadas en trabajos posteriores, y aparentemente nunca fueron publicadas. Más que una exposición sistemática, las *Quaestiones in Meteora* están pensadas como compañeros de la *Meteorologica*. Sin embargo, Themo afirma lo que Aristóteles niega y niega lo que afirma. Establece quince preguntas sobre el arco iris, la primera es *"¿Son los colores del arco iris reales, y están donde parecen estar*?[14]. En general, a cada pregunta le siguen una serie de interpretaciones y objeciones, estableciendo argumentos a favor y en contra, pero sin llegar en general a ninguna conclusión[15].

De Fundamentis Astrologiae Certioribus (1602)

En 1597, Kepler se había casado con Barbara Mueller, dos veces viuda e hija de un molinero razonablemente rico. Parecía que, por fin, habían terminado para Kepler sus constantes dificultades económicas. Sin embargo, cuando en 1598, fue forzado a abandonar la católica Graz, tuvo graves dificultades para liquidar sus propiedades inmuebles. Después de una corta estancia con el astrónomo Tycho Brahe, pudo regresar a Graz. Pero en 1600 fue nuevamente dejado cesante en su empleo por la nueva Dieta católica, con el salario de medio año y una carta de recomendación. Fue a trabajar a Praga con Tycho Brahe, y a su muerte asumió su puesto. En 1601 fue nombrado Matemático Imperial en la corte de Rodolfo con un salario dos veces y media mayor que el que recibía en Graz.

[14] Desde que fue planteado por primera vez por Alejandro de Afrodisia, cabeza del Liceo entre 198 y 211, en su comentario sobre la *Metereologica*, esta sería uno de las quaestiones más populares en la baja edad media.

[15] Un ejemplo del tono de estas preguntas es la Nro. 22 *"¿Puede el arco iris ser visto a toda hora del día?"*. La respuesta es *"Si, si uno incluye a toda la gente y a todos los arco iris artificiales"*.

Durante este período, Kepler no realizó ningún estudio adicional sobre el arco iris. En cambio, se apresuró a publicar su primer modelo en un tratado astrológico de 1602, denominado *"De Fundamentis Astrologiae Certioribus"*. En este trabajo reitera la distinción aristotélica entre reflexión desde la superficie de un espejo, en donde se preserva la forma, y reflexión desde una superficie desigual, donde la luz toma color. Siguiendo esta tesis, sostiene que los colores del arco iris caen en dos categorías: aquellos que provienen del oscurecimiento o privación de luz, y aquellos que vienen de la refracción o *coloreado*. Aquí Kepler está usando el término refracción nuevamente en el sentido aristotélico de reflexión. De la primera clase es *la luz del calor* mismo (amarillo), que corta el círculo del arco iris en dos. En una dirección la intensidad de la iluminación disminuye, produciendo el naranja, el rojo y finalmente el negro, y en la otra es refractado, resultando en verde, azul, púrpura y violeta.

Podemos comparar este modelo, con el aristotélico. En este punto, con su idea de la existencia de dos tipos de reflexión de color y de forma, Aristóteles estaba claramente orientado a explicar los colores del arco iris en términos del primer tipo de reflexión. Pero ¿cuál era el mecanismo que generaba tal variedad de tonos y siempre orientados con el rojo en el exterior y el azul en el interior?. Para abordar la respuesta que da Aristóteles a esta pregunta, primero hay que discutir brevemente su teoría de los colores, que admite la existencia de tres colores primarios: rojo, verde y violeta, y que se diferencian por la proporción de blanco y negro que los forman. *"Cuando la vista es relativamente fuerte el cambio es hacia el rojo; el siguiente estado es el verde, y un mayor grado de debilidad da el violeta. Ningún cambio adicional es visible, pero tres completan la serie de los colores (como vemos que hacen tres en la mayoría de los casos)"*. Todos los otros colores resultan del contraste entre colores primarios, como *"negro junto a negro hace que aquel que tenga algún grado de blanco parezca como blanco"*. Respecto al arco iris escribió: *"Si los principios que establecemos sobre la apariencia de los colores es cierta, el arco iris necesariamente tiene tres colores, y estos tres y no otros"*. Y continúa en su *Meteorologica* diciendo que *"La aparición del amarillo es debida a contraste, puesto que el rojo es blanqueado por su yuxtaposición con el verde. Podemos ver esto del hecho de que el arco iris es más puro cuando más oscura es la nube; y entonces el rojo muestra más amarillo. Así todo el rojo se muestra blanco por contraste con la oscuridad de la nube: pues es blanco comparado con la nube y el verde"*.

Para explicar el orden de los colores en el arco iris, Aristóteles imagina que el color es producido por el debilitamiento de la luz o la vista, que puede ocurrir de la reflexión o refracción de la luz, o de la distancia que recorre la luz o la vista. Así, las líneas que conectan al sol con las nubes cubren una mayor distancia en el interior que en el exterior del arco iris, y por lo tanto, el orden de los tres colores debe ser con el más fuerte (rojo) arriba y el más débil (azul) debajo, con el verde en el medio.

La tesis kepleriana sobre los colores, ya esbozada en sus notas marginales de 1596, es completamente distinta a la aristotélica, y sigue una línea similar a la expuesta por Séneca el Jóven (3-65) en sus *Quaestiones Naturales*[16]. Junto con Séneca, Kepler se opone a la teoría aristotélica de los tres colores. Por otra parte, si bien por encima del círculo amarillo Kepler adopta el modelo aristotélico del debilitamiento de la luz, por debajo opta por un impreciso proceso de refracción.

Obras contemporáneas con el *De Fundamentis Astrologiae Certioribus*

Durante los últimos años del siglo XVI se publicaron dos trabajos referidos al arco iris, que merecen ser brevemente comentados aquí como muestra de la base de conocimiento en la que aparecieron las ideas de Kepler. Uno es el tratado *De Refractione Optices Parte Libri Novem*[17] publicado en Nápoles en 1593 por Giambattista della Porta[18] (1543-1615). La última sección estaba totalmente dedicada al arco iris. Allí hace una mezcla de ideas nuevas con conceptos y lecturas desordenadas de las obras antiguas. Ubica el arco iris sobre una cortina vertical de lluvia que trata como un continuo. Supone entonces un tipo de refracción[19] que dirige los rayos hacia el observador. Los colores se deben a que cada ángulo está relacionado con la penetración de la luz hasta una capa más profunda de lluvia, pero así le resultan los colores invertidos, con el rojo debajo.

El otro trabajo sobre el arco iris al que queremos hacer referencia se debe William Gilbert (1544-1603), médico de Isabel I y Jaime I, y pionero en los estudios sobre el Magnetismo. Gilbert es reconocido por su libro *De Magnete* de 1600. Uno

[16] Este tratado popular sobre geología, meteorología y astronomía fue uno de los pocos escritos clásicos que alcanzaron la Edad Media directamente, donde tuvo una considerable influencia.
[17] En este tratado Porta fue uno de los primeros en intentar una explicación matemática del telescopio, cuya paternidad reclamó.
[18] Porta llegó a ser muy conocido por ser el autor de un libro inmensamente popular llamado *Magia Naturalis*.
[19] A lo largo de toda la obra Porta confunde una y otra vez las palabras reflectio y refractio.

podría imaginar que ese fue el único libro que escribió, un modelo de pensamiento independiente y experimentación que se sostiene en un marcado contraste con los trabajos de sus contemporáneos. Pero mencionar sólo aquellas ideas que eventualmente condujeron al éxito, dejando en el silencio aquellas que la posteridad juzgó sin valor, puede dar una impresión errónea sobre la manera en que la ciencia se desarrolló en el pasado. No es que Gilbert no merezca respeto por *su De Magnete*, pero simplemente se debe llamar la atención sobre otro de sus tratados, llamado *De Mundo Nostro Sublunari, philosophia nova* (1651). Los primeros dos libros de este tratado están dedicados a la constitución de la tierra y el cielo, los últimos tres a la meteorología. Todos ellos están dirigidos contra Aristóteles. A partir del capítulo X del cuarto libro comienza su estudio del arco iris. Sus ideas son vagas y especulativas, similares a las de Avicenna; pero, teniendo en cuenta sus inmoderados ataques a otros pensadores medievales, ya sean latinos o árabes, es muy probable que sean independientes. Tal como ocurre en un espejo que es una lámina de vidrio con una superficie de metal detrás, el arco iris sería para Gilbert una imagen del sol que vuelve hacia el observador por reflexión en una nube, una montaña o un edificio y se forma en el vapor que nos rodea. En el capítulo XI arremete contra Jerome Cardan (1501-1576) y Josee Clichtove o Jodocus Clichtovaeus (m. 1543), quienes sostenían que el arco iris secundario es un reflejo del primario. En el capítulo XII estudia la forma y el color del arco iris. Si el aire fuera denso y uniforme y ubicado directamente opuesto al sol, reflejaría una imagen no distorsionada del sol, como ocurre con un espejo. Sin embargo la luz es concentrada por las gotas de lluvia, produciendo una imagen difusa con variedad de colores. En el capítulo XIII vuelve a arremeter contra las hipótesis atacadas en el capítulo XI, *"¿Pero qué dices tu, Clichtovaeus?. ¿En el orden general de las cosas no deberían las enteras proporción y forma estar invertidas?. Mira como tu propia demostración te refuta"*. Estos cuatro capítulos ciertamente son devastadores para la reputación de Gilbert *como "el gran padre de la filosofía experimental"*. Para salvar esta noción, el *De Mundo* fue descrito como una *philosophia contra Aristotelem* no experimental, un tratado típicamente renacentista que ataca la doctrina aristotélica en un estilo peripatético. Tampoco se puede aducir que es una obra juvenil, y por lo tanto anterior al nuevo estilo de filosofar que declara en el prefacio de su *De Magnete*. Por el contrario, *De Mundo* es de 1591, o sea considerablemente posterior a *De Magnete*. Podríamos pensar también que Gilbert no le asignaba a *De Mundo* la importancia que le dio a sus estudios de Magnetismo. Pero parece que comenzó su estudio sobre magnetismo para aplicarlo a su teoría del

cielo. Que *De Mundo* apareciera en 1651, mucho después de la muerte de su autor, sugiere que la obra podía no estar en su forma final. Pero el editor (hermano del autor) encontró dos copias manuscritas "idénticas" de la obra.

Al menos en este tema, Gilbert nunca estuvo "adelantado a su tiempo". Si sus ingeniosos experimentos con el magnetismo son chispazos de modernidad, sus tortuosos argumentos sobre el arco iris son un recuerdo de que sus hábitos mentales eran los de su propia época. Juntos, su *De Magnete* (o *Physiologia Nova*) y *De Mundo* (*o Philosophia Nova*) muestran un Gilbert a la vez moderno en su búsqueda de la precisión del laboratorio, y medieval en su predilección por las especulaciones.

Paralipomena (1604)

Dos años después de su *De Fundamentis Astrologiae Certioribus*, Kepler adoptó un interés especial por la dióptrica. Para esa época ya ha estudiado concienzudamente la obra de Witelo, de la cual llegó a publicar una versión comentada, *"Ad Vitellionem Paralipomena Quibus Astronomiae Pars Optica Traditur"*.

Witelo nació en 1230 en las cercanías de Cracovia, y recibió educación en París, Padua y Viterbo. El libro que más influyó en su obra posterior es el ya mencionado *Tesoro de la Optica* del egipcio Alhazen (965-1039). Si bien en Occidente los estudios de óptica siguieron la tradición peripatética, en el siglo XIII su obra constituiría la más importante fuente de inspiración hacia el desarrollo de una óptica geométrica. Witelo tuvo mucho que ver en esto, cuando en algún momento entre 1270 y 1278 escribió uno de los libros más influyentes en el desarrollo posterior de la Optica[20]. Este libro, conocido como *Perspectiva*, sigue tan de cerca el libro del egipcio, como para ganarle el mote de "mono de Alhazen". Como ya dijimos, el *Tesoro* de Alhazen no incluía información sobre sus posibles estudios del arco iris, pero si lo hace el libro de Witelo, donde muestra una clara independencia de sus predecesores, aunque con posibles influencias de Roger Bacon. Al igual que Grosseteste, comienza por refutar la vieja imagen de que el arco iris es el resultado de un proceso de reflexión en las nubes, pues

[20] Junto con la obra de Witelo, otro de los tratados más populares del siglo XIII fue *el Perspectiva Communis* de John Peckham (m. 1292), arzobispo de Canterbury, también fuertemente influenciado por la obra de Alhazen. Las proposiciones 18-21 del tercero y último de sus libros están dedicadas al arco iris, donde advierte que este recibe la influencia de tres tipos de rayos: directos del sol, reflejados en las gotas de agua y refractados en las nubes, y son estos últimos los que dan origen a la forma circular del arco iris. En siglos posteriores, las partes más significativas de su explicación se

si eso fuera así, el arco iris no debería seguir al observador cuando este se mueve lateralmente. Propone que la refracción debe jugar un papel importante. Esta será su contribución más original e importante al estudio del arco iris. Imagina que los rayos son reflejados o refractados por las gotas de lluvia, pero que ambos procesos nunca ocurren en una misma gota, y que es el efecto colectivo de las gotas, con refracciones y reflexiones sucesivas, lo que da lugar al arco iris. En su libro aparecen tablas propias y otras copiadas de Ptolomeo y Alhazen sobre el fenómeno de refracción. Estas tendrán influencia sobre la obra posterior de Kepler, así como las instrucciones que da para armar un instrumento, con una escala graduada, para medir el ángulo de refracción.

En los próximos tres siglos, la obra de Witelo será citada con igual o mayor frecuencia que la *Metereologica* de Aristóteles, siendo para la Optica lo que Ptolomeo fue para la Astronomía.

En su comentario a la *Perspectiva* de Witelo, Kepler mantiene su modelo numerológico anterior y su teoría para la separación de los colores, y afirma categóricamente que el diámetro del arco iris es de 90º. En este punto contradice al libro que está comentando, y con él a la mayoría de sus contemporáneos, ya que Witelo, posiblemente familiarizado con la obra de Bacon, afirma que el Arco Iris mide 42º de radio. Este dato va a pasar entonces de uno a otro tratado de óptica durante el siglo XVI. Pero Kepler lo niega, manteniendo su idea original.

No es este el único punto donde Kepler se opone a Witelo, ya que en sus comentarios agrega una proposición que había sido largamente discutida por Grosseteste y otros comentaristas de Aristóteles. Afirma que el arco iris no es causado por reflexión o refracción de los rayos del sol o de la visión en aquella porción de la nube donde aparece el arco iris, sino por un proceso de refracción de los rayos de luz por lluvia o materia acuosa ubicada entre el espectador y el Sol en la región sublime por encima de las nubes[21].

---

olvidarían, pero sería recordado junto con Posidonio, Plinio y Averroes como uno de los que atribuyeron la forma del arco iris a la redondez de las nubes.

[21] En el mismo tratado Kepler cita los colores del arco iris como soportando su idea de que los cometas y las novas son de origen y naturaleza acuosa. En una descripción realizada por Cornelius Gemma Frisius (1535-1577) sobre la variación de colores en la nova de 1572, Kepler había leído que la nueva estrella era al principio roja, luego amarilla brillante, luego verde y finalmente desapareció al tornarse violeta. ¡Pero este es precisamente el orden de los colores en el arco iris!. Kepler concluye entonces que siendo que el arco iris resulta de la humedad del aire, lo mismo debe valer para la nova, que debió ser engendrada por humedad.

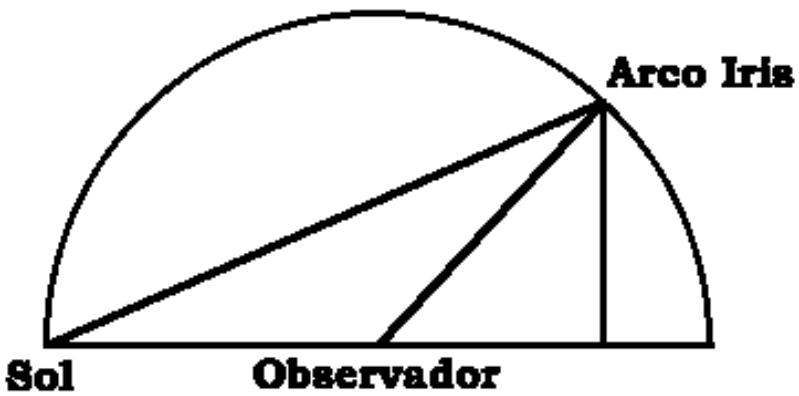
Primera carta a Frabicius (1604)

Kepler abandona pronto esta teoría. Como respuesta a una pregunta de David Frabicius (m. 1617) acerca de si el radio del halo lunar era siempre la mitad del radio del arco iris, Kepler le escribe diciéndolo que no puede afirmar nada al respecto más allá de lo que dice en su *Paralipomena*, excepto que se había equivocado al ubicar la fuente del arco iris por encima de las nubes, y que la causa había que buscarla en las gotas o vapores donde aparece el arco iris. Esta correspondencia con Frabicius lo lleva a realizar un primer intento de realizar una teoría geométrica del arco iris, basándose en la relación entre los ángulos central e inscripto en una circunferencia.

Carta a Brengger (1605)

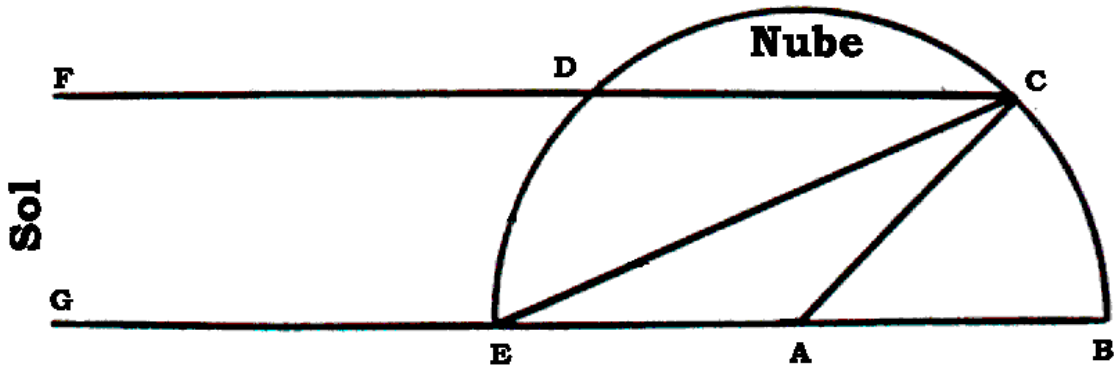
Kepler desarrolla más ampliamente esta idea en una carta escrita en 1605 a Johann Georg Brengger, profesor de medicina en Kaufbeuren. Kepler dice que el arco iris no se forma por la lluvia, como opina Witelo, sino por la disposición de las gotas de humedad en la nube. Y continúa desarrollando un primer modelo geométrico sobre la forma del arco iris. Pero para poder describirlo, debemos primero explicar la teoría aristotélica de la *esfera meteorológica*.

Respecto a la forma circular del arco iris, Aristóteles había dado una explicación que muestra todo el poder de su genio. Imaginando el problema como contenido en una esfera que encierra al observador en su centro, discurre en una larga explicación que se puede resumir en la idea de que el fenómeno debe ser simétrico alrededor de la línea que une al sol y al observador. Por lo tanto el arco iris debe ocupar un círculo alrededor de esa línea, y si sólo vemos un fragmento, es debido a la tierra que se interpone en su observación. Advirtió así que debía haber un ángulo de elevación del sol, por encima del cual el arco iris no podría observarse.



A continuación Aristóteles ubica al Sol sobre la superficie de la esfera, la misma superficie que ocupan las nubes. Pero, si las nubes son objetos claramente sublunares y el sol un ente supralunar, ¿cómo se entiende esta idea?[22]. Tal vez estaba aquí siguiendo el consejo platónico de armar una construcción geométrica que "salvara los fenómenos", como la de Ptolomeo para el movimiento de los planetas. En este sentido su modelo debería interpretarse no como una teoría física, sino como una representación geométrica cuyo único objetivo era explicar la circularidad del arco iris. De todas maneras, esta genial construcción geométrica da crédito a quien tenía poco interés en la matemática. Era más sofisticada que la de cualquiera de sus predecesores o sucesores por más de un milenio. Sin embargo es llamativo como, a pesar de su raíz geométrica, el modelo aristotélico no incluye ningún contenido mensurable. Por ejemplo, no menciona en ningún lugar el radio angular del arco iris.

En cambio, basándose en este modelo, Kepler propone que el arco iris se ve en un ángulo central de 45º. Aquí Kepler cambia el modelo de Aristóteles en tanto que los rayos del sol llegan de forma paralela y no desde un punto de la esfera. El rayo FDC se refleja en el punto C sobre las nubes y va hacia el observador en A. El ángulo del DCA del arco iris es de 45º. Aquí mantiene la postura aristotélica de que la reflexión de color no necesita satisfacer las leyes de la reflexión. Luego dice que si el observador está en el punto de reflexión C, sobre la nube, el halo subtiende el correspondiente ángulo inscripto BEC de 45º/2 = 22.5º, alrededor del Sol que se ve en la dirección FDC. Años



más tarde, Pierre Gassendi (1592-1655) propondría un modelo semejante[23]. Kepler continúa su carta con varias sugerencias: Puesto que los halos se forman en la niebla

[22] El mismo Aristóteles usaba la palabra meteorología (meta: más allá, area: aire) para designar el estudio de los fenómenos naturales que ocurren dentro de la esfera de la órbita lunar. Los meteoros se clasificaban en tres categorías: aereos (vientos), acuosos (lluvia, granizo, nevisca y nieve) y luminosos (halos, auroras, meteoros ígneos). En esta última categoría incluía a los arco iris, y también a los cometas, que imaginaba como fenómenos sublunares.

[23] Así como Roger Bacon fue el primero en medir el ángulo del arco iris, obteniendo un valor muy preciso que adoptarían todos los investigadores posteriores, también se debe a él la errada conclusión de

fina, mientras que el arco iris requiere una lluvia, ¿no será que el ángulo de refracción en la primera es mitad que en la segunda?. Por otro lado, puede ser que el ángulo doble del arco iris sea el resultado de un doble proceso de reflexión y refracción, mientras que el halo resulta sólo de la refracción. De una cosa está seguro, y es que este fenómeno no es una ilusión óptica, sino que llega al ojo por rayos de luz, ya que ha logrado reproducir los colores del arco iris sobre la pared de su cuarto. Sugiere a Bregger que experimente con un globo lleno de agua[24], para ver como los rayos que lo atraviesan por el centro no se colorean, mientras que los que pasan por los bordes si. El color, por lo tanto, debe depender del ángulo de incidencia. Después de otras consideraciones, admite que sólo puede asegurar que el arco iris es un fenómeno real y no una ilusión óptica, pero de su origen dice "*No se*". Brengger tardó tres años en responderle a Kepler, y en el ínterin este desarrolló su última teoría sobre el arco iris.

Primera carta a Harriot (1606)

Debemos destacar que en la época que estamos discutiendo, Kepler estaba trabajando en su *Astronomia nova*, y aún así contaba con suficiente tiempo como para continuar sus estudios de óptica[25]. Una carta que Kepler le escribe a Thomas Harriot (1560-1621) en Octubre 2/11 de 1606 es una clara muestra de los sorprendentes avances que había logrado en sus investigaciones sobre el arco iris durante este período[26]. Este matemático de Oxford fue uno de los primeros científicos en visitar América en 1584, acompañando a Sir Walter Raleigh en su expedición para explorar el territorio de Virginia. A su regreso a Londres en 1588 escribió una descripción del viaje titulado *Briefe and True Report*. Encontró patronazgo en Henry Percy, conde de Northumbria, con un salario de

---

que el diámetro aparente del halo es igual al radio aparente del arco iris. Esta supuesta coincidencia iba a despistar a varios investigadores posteriores, entre ellos Kepler, quienes teniendo en cuenta esta relación buscarían una causa común para ambos fenómenos. No es raro que Roger Bacon haya errado en esta observación, ya que el halo de 22º requiere ciertas condiciones atmosféricas que lo hacen un efecto muchísimo menos frecuentes que el arco iris, sobre todo en una nación lluviosa como Inglaterra. Además el conocía la posibilidad de crear un arco iris con un spray de agua, donde posiblemente realizó sus mediciones si nos atenemos a lo que dice en su libro respecto de que *muchos experimentos son necesarios para determinar la naturaleza del arco iris, tanto en cuanto a su color como su forma*.

[24] Este experimento había sido realizado anteriormente por Alhazen.

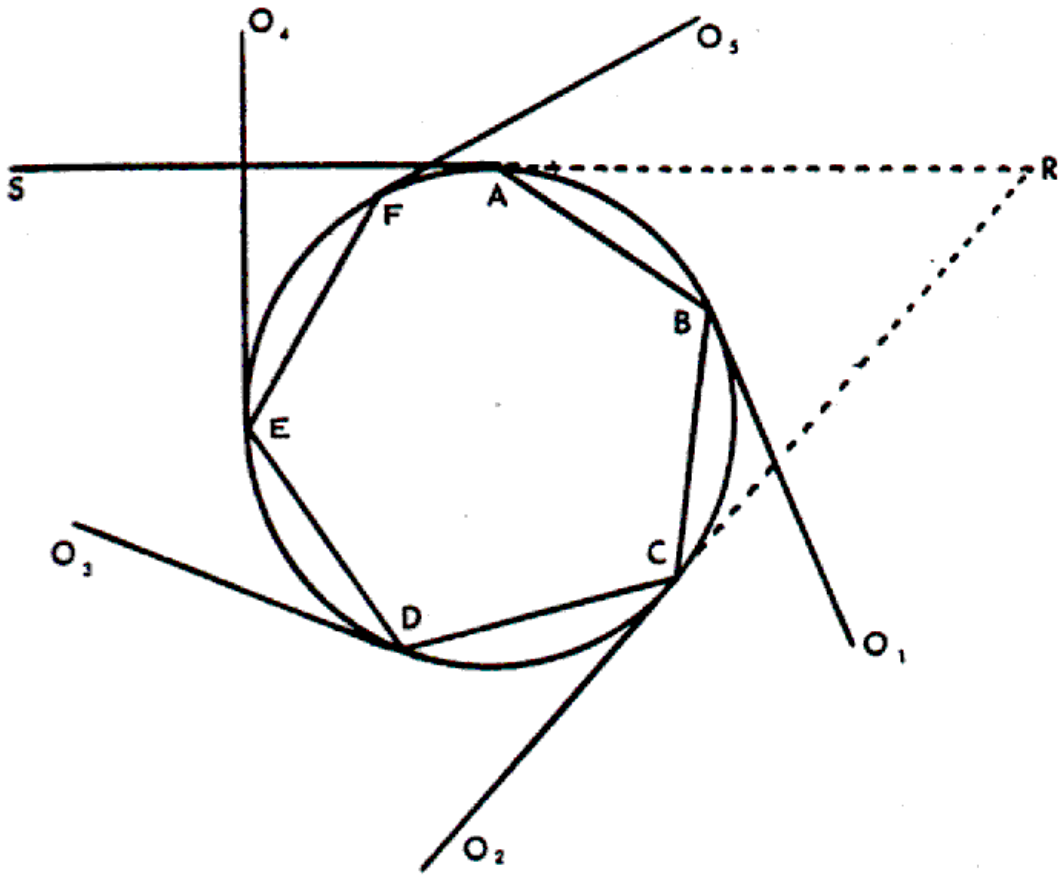
[25] El libro fue publicado en Heidelberg, Alemania, en 1609. Sin embargo hay que destacar que su redacción había finalizado cuatro años antes, pero una serie de conflictos con los herederos de Tycho Brahe, demoraron su publicación. Un cuñado y ex ayudante de Brahe se encargó de redactar el prólogo, en el cual recuerda que "todo el material (me refiero a las observaciones) fue reunido por Brahe".

[26] J.A.Lohne: *Kepler and Harriot - their Search for a Law of Refraction*, en Arthur Beer and Peter Beer, eds*: Kepler, Four Hundred Years* (Proceedings of Conferences held in honour of Johannes Kepler (Pergamon Press, Oxford, 1975).

300 libras al año. Pero Henry fue sospechado de complicidad en el complot de la pólvora y encarcelado en 1606, exactamente cuando Kepler le envía su primera carta. A partir de este momento Harriot compartió el cautiverio con su patrón. Durante este período la enfermedad y el desorden político le impidieron completar los proyectos que tenía. Fue un acérrimo crítico de la astrología, por lo cual es sorprendente el contacto epistolar que estableció con Kepler.

Volviendo a la primera carta, Kepler había oído de los trabajos de Harriot en química y óptica, y le requiere su opinión sobre su *Paralipomena*. Incluye además una larga descripción de su modelo actual del arco iris. Nuevamente ha abandonado sus ideas anteriores, y ahora mantiene que este se forma, no en la nube como un todo, sino en las pequeñas gotas de agua que la forman, y que son perfectamente redondas. Puesto que los rayos de luz que las atraviesan por el punto medio no se colorean, mientras que aquellas que pasan por los bordes sí, Kepler supone que son estos últimos rayos, los que producen el arco iris. Tal como se muestra en la siguiente figura, estos rayos llegan tangencialmente a la superficie de la gota en el punto A, se refractan hacia su interior, y luego de reflejarse una vez en B, vuelven a refractarse en C, abandonando la gota en una dirección nuevamente CO_2 tangencial a su superficie[27]. Y estos son los rayos que un observador ve formando el arco iris. Un poco de geometría le permite advertir que si el

[27] Esta es la primera vez que Kepler introduce en su teoría del arco iris el concepto de refracción como desviación de la luz al pasar de un medio a otro, y no ya en el sentido aristotélico de reflexión de color. Esta idea había sido planteada por primera vez por Grosseteste, aunque aparentemente (aunque esto no queda claro en sus escritos) sin dejar ningún papel para la reflexión. El entiende que el arco iris se produce por refracciones sucesivas de la luz al pasar del aire a la nube, de esta al aire húmedo y enrarecido que cae de la nube, y a través de capas de aire más condensado hacia el observador. Roger Bacon, en su *Opus Majus*, es el primero en explicar el arco iris en términos de procesos de reflexión y refracción en gotas de agua: *...Pero el arco iris es debido al sol y las nubes. Por lo tanto las nubes son la causa material, y la proyección de los rayos es la causa eficiente. Esta vigorosa acción es necesaria para que los rayos converjan; pero la convergencia puede ocurrir sólo a través de reflexión y refracción. El arco iris por lo tanto debe ser producido por infinitas reflexiones y refracciones en innumerables gotas de agua, así que la verdad es entonces descubierta respecto de sus colores y su forma. Son debidas a esta multiplicidad de rayos en lo que respecta a figuras, ángulos y líneas, y no producidas por una diversidad en la materia que forma la nube, que es lo que enseñan los textos en Latín y que todos creemos".* A pesar de lo que sugiere esta cita, es importante destacar que Bacon no es muy explícito respecto de lo que entiende por refracción, por lo tanto no hay que descartar la posibilidad de que le asignara el sentido aristotélico de reflexión de color y no el sentido de desviación de la luz asignado por Grosseteste. Además no queda claro si antes de alcanzar el ojo del observador, la luz sufre estos procesos de reflexión y refracción en gotas individuales o en muchas de ellas en forma sucesiva. Varios autores mantendrían esta última posición. Más cercano a la época de Kepler, por ejemplo, el clérigo luterano Johann Fleischer o Fletcher (1539-1593), después de trabajar 6 años en el tema, publicó en 1571 un grueso volumen titulado *De Iridibus Doctrina Atistotelis et Vitellionis*. Con una claridad inusual presenta las teorías de Aristóteles y Witelo en forma trigonométrica y, citando al segundo, muestra que el primero había olvidado la refracción como una de las causas esenciales del arco iris. Propone una teoría plausible, donde cada rayo de luz sufre múltiples reflexiones y refracciones en distintas gotas antes de llegar al observador. Atractiva desde un punto de vista cualitativo, la teoría no tiene ninguna base cuantitativa. Sin embargo expone que el arco iris subtiende un radio de 42º 30', aunque no explica porqué.



arco iris subtiende un ángulo SRO_2 de 45º, el ángulo de desviación SAB (ó BCO_2) en la refracción debe ser de 33.75º. Y aquí Kepler encuentra una dificultad en su modelo, ya que las tablas de refracción de que dispone le muestran que ese ángulo no puede ser inferior a 37º, lo cual le conduciría a un arco iris con una abertura de apenas 32º. Descorazonado sugiere que el agua de las gotas puede estar suficientemente caliente como para cambiar las propiedades de refracción. También anticipa cierto escepticismo respecto de la condición de que los rayos penetren en la gota en forma tangencial, pero reitera que sólo de esta forma pueden colorearse.

Al momento de su carta a Brengger, Kepler ha alcanzado la conclusión a la que algunos de sus predecesores habían llegado tres siglos antes, que el arco iris se forma en las gotas de lluvia y no en la nube como un todo. No sabemos como llegó a esta conclusión, pero puestos a especular es posible que haya seguido la sugerencia hecha en su carta del año anterior a Brengger, donde le proponía estudiar la refracción en un globo esférico de vidrio lleno de agua, un paso que retomaría Descartes pocos años después.

A pesar del severo inconveniente relacionado los ángulos de refracción, Kepler tenía fe en su teoría, ya que aparentemente podía explicar también la formación de halos. Anticipando una explicación posterior de Newton y Halley sobre la formación de los arco iris múltiples, Kepler advirtió que en cada contacto con la superficie de la gota,

parte de la luz se reflejaría y parte se refractaría. Así podría ser que la luz abandonase la gota después de haber realizado no una, sino un cierto número de reflexiones internas. ¡Y después de cuatro reflexiones internas, la luz saldría en la dirección O_5 con el ángulo requerido para la formación del halo de 22.5º!. Pero esta teoría tenía varias dificultades. Aquel rayo de la "ruleta" que sufre dos refracciones sin reflexión, debería causar un halo en la dirección O_1 con un ángulo de 67.5º. Para tener uno de 22.5º, la refracción en los puntos A y B debería ser de apenas 11.25º, algo que ni Kepler estaba dispuesto a aceptar. El haz con dos reflexiones debería producir un halo o arco iris de 22.5º en la dirección O_3 opuesta al sol. Kepler supone que no se ve debido a que el sol debería estar muy bajo, a lo sumo a 22.5º del horizonte. El haz que produce tres reflexiones, causaría un arco iris de 90º en la dirección O_4, que nuevamente nunca se ve. En estas dudas sobre su propia teoría vemos claramente como la más extravagante imaginación, derivada de su visión pitagórica del mundo, va en Kepler acompañada por una estricta fidelidad por el ajuste con los hechos.

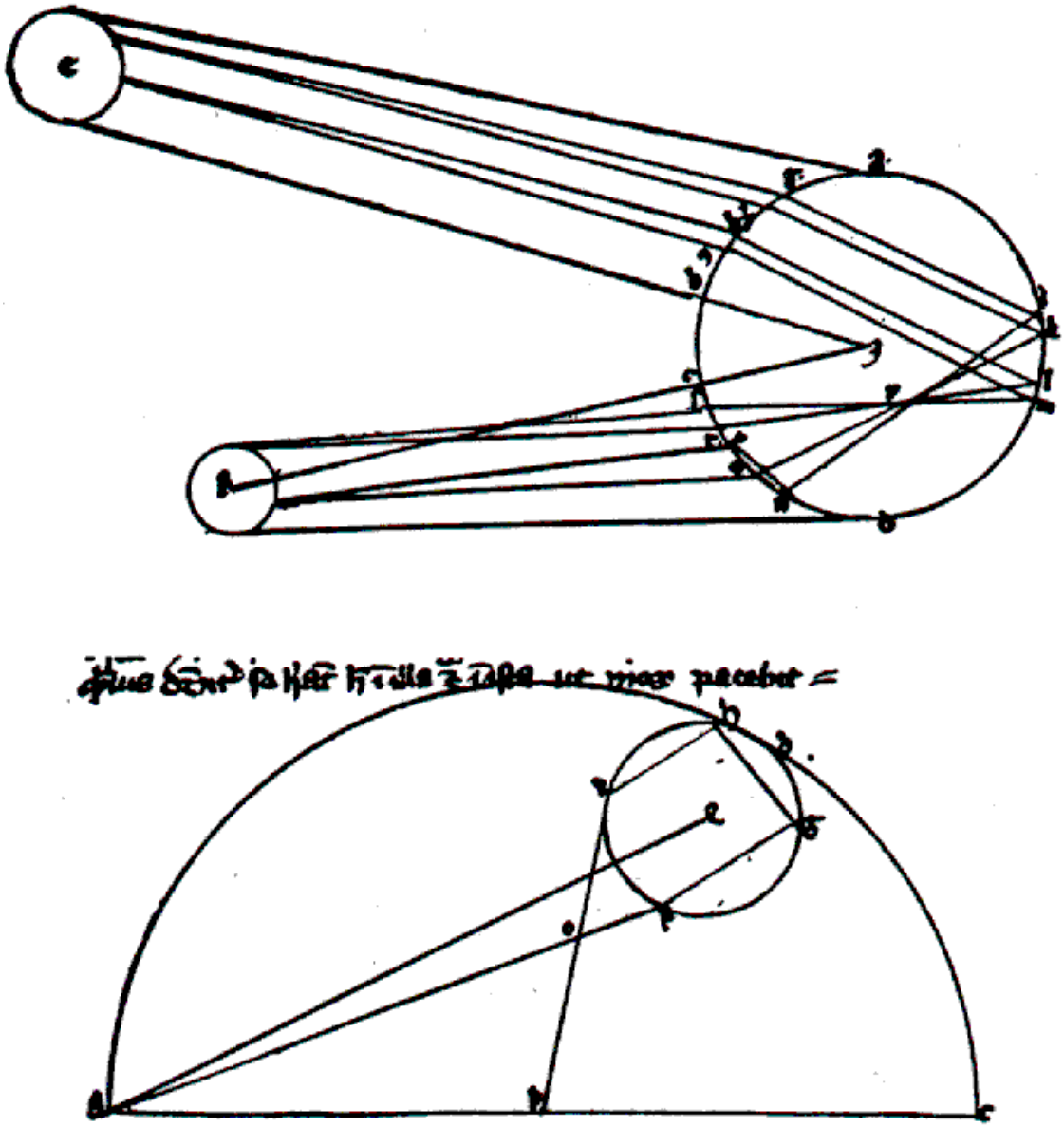
Teodorico de Freiberg

Al comienzo de este trabajo mencionamos como las investigaciones sobre el arco iris que Kepler fue desarrollando individualmente parecen constituir una recapitulación de aquellas que se desarrollaron desde Aristóteles hasta sus días. Y en este preciso punto, con su modelo de las reflexiones múltiples dentro de una gota de agua, Kepler estaba reproduciendo los resultados obtenidos a comienzo del siglo XIV por un monje teutónico, llamado Teodorico (o Dietrich, o Thierry) de Freiberg (m. 1311?). Es importante discutir aquí brevemente el trabajo de este personaje, en tanto que marcaría el nivel de máxima comprensión del fenómeno del arco iris anterior a Kepler y Descartes.

Teodorico escribió, por pedido del Maestro de su orden Aymeric de Plasance, un trabajo de más de 200 páginas sobre el arco iris con el título *De Iride et Radialibus Impressionibus*. Educado en París, en 1310 volvió allí como maestro de Teología. Es casi seguro que conocía *el Thesaurus Opticae* de Alhazen, las fuentes griegas, y el trabajo de Avicenna. Experimentó con un globo lleno de agua, pero no como sus predecesores (con la posible excepción de Alberto Magno) que veían en ello a los sumo una pequeña nube redonda, sino imaginándola como una gota de lluvia aumentada. Teodorico fue el primero en entender que el arco iris es el efecto combinado de muchas

gotas individuales. Es posible que esta idea viniese a el de la lectura de las obras de Alhazen, y Alberto Magno. Con este experimento descubrió cinco tipos de *fenómenos radiales*: una reflexión única, una refracción única, dos refracciones con una reflexión interna intermedia, dos refracciones con dos reflexiones internas intermedias, y una reflexión total en la interfase entre dos medios. Así propone que el arco iris primario se debe a un fenómeno del tercer tipo, y el secundario a un fenómeno del cuarto tipo. *"Permítase que la radiación entre al ya mencionado cuerpo transparente y lo atraviese hasta la superficie opuesta de aquella por donde entró, y desde allí sea reflejado internamente de vuelta hacia la primera superficie por la que entró originalmente, y entonces después de salir vaya al ojo. Tal radiación, afirmo, en tanto sea producida por un cuerpo esférico transparente, sirve para explicar la producción del arco iris".* Uno aquí encuentra la explicación cualitativamente correcta que, siglos más tarde, descubrirían Kepler de manera independiente. Con este entendimiento sorprendentemente claro y consistente le resultó fácil explicar también su forma circular, y que cada gota contribuye con un color distinto. Y aquí superó a Kepler en que también es correcta su explicación del arco iris secundario, como debido a un efecto de doble reflexión interna. Sólo faltaba encontrar porqué ambos procesos ocurren sólo para ciertos ángulos y no otros, el punto donde encallaría la investigación de Kepler y que sólo resolvería Descartes poco después. Su primera respuesta es muy vaga, *"es así ordenado por la naturaleza".* Después vuelve a recurrir a la esfera meteorológica de Aristóteles. Y aquí comete un error inexplicable, al asumir que el ángulo del arco iris es de 22º en lugar de 42º. Y no se trata de un error de los copistas del manuscrito, ya que insiste en que el radio del halo es de 11º y el del arco iris secundario es de 33º. Hay dos explicaciones posibles, o se tentó con la progresión aritmética 11º, 22º y 33º; o, como sugieren E. Krebs en "Meister Dietrich" (1905) y Crombie en el capítulo que le dedica a Teodorico en su obra "Roberto Grosseteste", cometió un error cuando trabajó con el ángulo suplementario del arco iris, escribiendo 158º en lugar de 138º, y todos sus cálculos posteriores se basan en esta cifra. En contra de esta idea se debe mencionar que el mismo Teodorico repite en un pasaje que cualquiera que lo mida con un astrolabio, encontrará un ángulo de 22º.

Diagrama que acompaña la explicación de Teodorico sobre el arco iris.



Mantiene que los colores son cuatro, pero no en base a numerología como Roger Bacon. Rechaza la idea de que tres es más apropiado debido a la importancia de la Trinidad con la observación de que el hombre no tiene tres ojos o tres dientes. Mantiene un principio de formación de los colores similar al de Aristóteles, como mezcla de dos principios formales: claridad y oscuridad, y dos principios materiales: limitado e ilimitado, de cuya combinación se forman los cuatro colores. Rojo es claro e ilimitado, amarillo es claro y limitado, verde es oscuro e ilimitado y azul es oscuro y limitado. Analiza la distancia recorrida por la luz dentro de la gota para decidir, teniendo en

cuenta su longitud en función de la altura sobre la esfera meteorológica, si los rayos serán rojos o azules[28].

La prácticamente nula trascendencia que tuvo la obra de Teodorico, se pone de manifiesto en el libro *Buch der Natur*, escrito en 1350 por Konrad de Mengenberg (1309-1374), un franco que estudió en Erfurt y París y luego se instaló en Regensburg siendo canónigo de la catedral. Su descripción del arco iris se basa en el ya mencionado[4] manuscrito *De Naturis Rerum* de Thomas de Cantimpré (c. 1200-1270), aunque el lo supone de Alberto Magno. Pero no hace ninguna referencia al trabajo de Teodorico, a pesar de haber estudiado en la misma Universidad de París donde apareció el manuscrito de este. La obra de Teodorico tampoco era conocida por la escuela de Jean Buridan en esta misma Universidad[29]. Este grupo fue responsable de un acercamiento matemático a los problemas físicos, y aún así su manejo del tema del arco iris parece casi un retroceso respecto del cuidadoso estudio experimental y geométrico de Teodorico un siglo antes. A pesar de ello, es improbable que el grupo de París no conociera el *De Iride* de Teodorico. Se conservan tres manuscritos de su obra, y la Universidad de París había sido su centro de enseñanza. En 1218, su estudiante Berthold de Mosburg cita sus ideas en un comentario de la *Meteorologica*. ¿Cómo puede ser que este trabajo haya escapado a la atención del grupo progresista de París?. Themo no es mesquino con sus citas, y sin embargo Teodorico no aparece ni una sola vez. Además hay algunas coincidencias secundarias, que hacen pensar que, más que desconocerlo, el grupo si conocía el *De Iride* y no lo apreció como valioso. El trabajo de Teodorico no se había perdido, en tanto que Regiomontanus (1436-1476), el mejor astrónomo de su tiempo, llegó a planear la publicación del trabajo antes de morir prematuramente. La superioridad de *De Iride* sobre, por ejemplo, las *Quaestiones* de Themo es indiscutible a

[28] Es un dato interesante que simultáneamente con la redacción de este trabajo por Teodorico, entre los años 1302 y 1311, el persa Kamal al-Din al-Farisi (m. 1320?) presentó una teoría del arco iris muy semejante, que refiere a su maestro, uno de los grandes científicos persas, Qutb al-Din (o Kittab al Di, o Kotb ed Din) al-Shirazi (1236-1311). Este hallazgo simultáneo se podría atribuir a lo sumo a la herencia intelectual común (la *Meteorologica* de Aristóteles y el *Kitab al-Manazir* de Alhazen) teniendo en cuenta la hostilidad entre ambas culturas. Sin embargo, debemos mencionar que había algunas escasas líneas de comunicación a nivel cultural. Por ejemplo, a principios del siglo XIII, el emperador Federico II (1194-1250) le envió al rey Kamil (activo en 1218-1238) una serie de preguntas científicas, que se volvieron famosas en el mundo árabe con el nombre de "Preguntas Sicilianas", y que sirvieron de base a muchas discusiones científicas.

[29] Este pobre intercambio de información dentro -inclusive- de una misma universidad no es tan extraño como podría parecer. Así, por ejemplo, el *Tractatus Super Libros Meteororum*, escrito entre 1372 y 1395 por el Cardenal Pierre d'Ailly (1350-1420), obispo de Cambray y director en 1384 del Colegio de Navarra donde había enseñado Nicolas Oresme, es un comentario sobre Aristóteles, sin ninguna influencia de otros autores. Habiendo sido educado en la Universidad de París, ignora completamente a Grosseteste, Alberto Magno, Witelo, Teodorico y la escuela de Buridan.

la luz de nuestros conocimientos actuales, pero eso no quiere decir que sus contemporáneos lo tuvieran en igual estima. De cualquier manera, el resultado es que la obra de Teodorico fue olvidada, mientras que las *Quaestiones* de Themo tuvieron una influencia duradera[30], en tanto formaban parte de un curso prestigioso dictado en una de las grandes Universidades de su tiempo.

Kepler y Maurolico

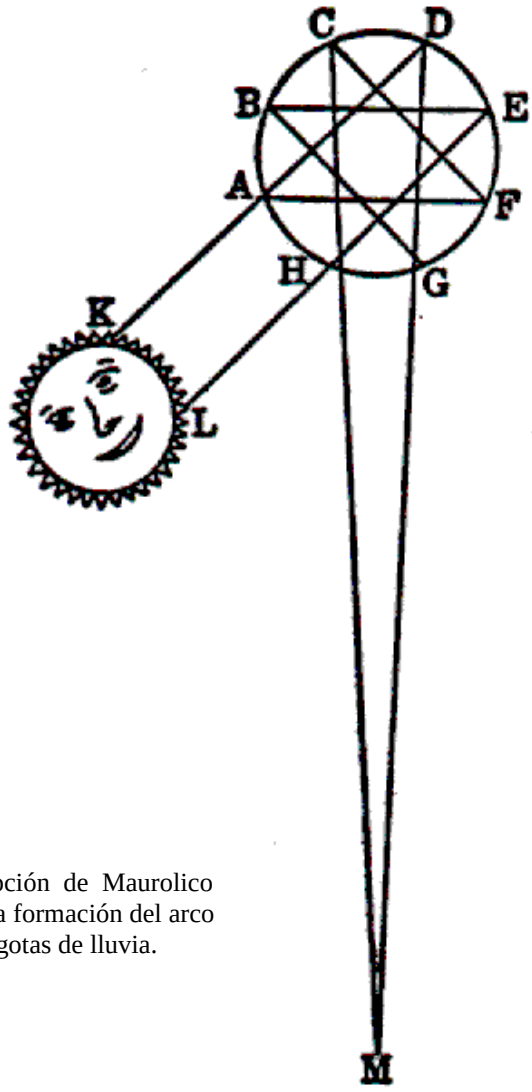
A esta altura de su estudio sobre el arco iris, advertimos en su carta a Harriot de 1606, que Kepler había dado por fin el paso definitivo de romper con la *esfera metereológica* y con toda la tradición aristotélica y escolástica sobre el estudio del arco iris. La importancia fundamental de su trabajo está en reinstalar la refracción como *un sine qua non*, y en centrar la atención sobre las gotas individuales, más que en la construcción artificial de la *esfera metereológica*. Por lo que hemos visto hasta aquí, parecería que en este punto no existe ningún precursor anterior a Kepler. Pero no es así. Nuevamente, y muy posiblemente de forma independiente, Kepler estaba "recapitulando" las ideas de otro investigador anterior a él. De hecho, el matemático siciliano Franciscus Maurolycus (1494-1575) de Mesina, abad de Castronuovo, fue aparentemente el primero en romper completamente con la tradición aristotélica. Porciones de los *Tesoros* de Alhazen habían sido impresos en las ediciones de 1533 de la *Optica* de Witelo y la *Perspectiva* de Peckham (1542). Probablemente estas fueron las fuentes que uso Maurolico concluir que la esfericidad de las gotas de lluvia era la clave para el entendimiento del arco iris, una idea a la que Kepler llegaría nuevamente cuatro décadas después. Aunque no es imposible, parece improbable que Maurolico conociera los trabajos de Teodorico y Themo, ya que no los cita, siendo que la obra esta escrita con gran candor al admitir fuentes. Además, hay tal ausencia de coincidencias, que su trabajo es probablemente independiente de aquellos del siglo XIV.

Después de un largo interés en la óptica, Maurolico publico en 1521 la primera parte de un tratado que aparecería con distintos títulos: *De Lumine et Umbra*, *o Theoremate de Lumine*, o *Diaphaneon*, o *Photismi de Lumine*. En esta obra, Maurolico demuestra estar muy bien informado sobre la literatura del tema: Aristóteles, Plinio,

[30] Ejemplo de esta influencia es un comentario sobre la *Meteorologica* adscrito a Duns Scotus pero posteriormente atribuido a Simon Tunsted (m. 1369) de Oxford, y escrito entre 1328 y 1369 que, sin citarlas, muestra una marcada influencia de las *Quaestiones* parisinas.

Averroes, Peckham, Witelo. La primera porción del libro trata sobre la reflexión. La segunda parte, aparecida años después, es sobre el pasaje de luz por varios medios e incluye tres libros. El primero sobre refracción, el segundo sobre el arco iris, y el tercero sobre el ojo. El libro sobre el arco iris está fechada el 12 Febrero 1553. El 12 de Octubre de 1567 le agregó una sección sobre "*Preguntas pertinentes a óptica y arco iris*". La primera publicación de este libro se realizó en 1611, muchos años después de la muerte del autor. Así que es absolutamente seguro que Kepler no conocía estos antecedentes, y llegó a su modelo de reflexiones múltiples en forma completamente independiente.

Así y todo, comparando los trabajos posteriores de Kepler con el *Diaphaneon* de Maurolico, causa un gran asombro el carácter revolucionario de ambos enfoques, al establecer un primer corte con la tradición aristotélica. Parece que era menos obvio para los meteorólogos que se necesitaba una reforma en la teoría del arco iris, que para los cosmólogos que el sistema de Ptolomeo era inadecuado. Así y todo, Carl Boyer[31] señala que *"la reforma de Maurolico* (y Kepler) *sobre el arco iris en 1553 fue en un sentido mas revolucionaria en actitud que la reforma de Copérnico en astronomía una década antes"*. Si bien este desplazó la tierra, mantuvo el concepto de movimiento uniforme. Modificó el mecanismo, pero mantuvo el esquema general. Maurolico y Kepler, por otra parte, dieron un paso que ni siquiera Teodorico se



Concepción de Maurolico sobre la formación del arco iris en gotas de lluvia.

[31] Carl Benjamin Boyer: *The rainbow from myth to mathematics* (T. Yoseloff, New York, 1959).

había atrevido a dar. Allí donde todos sus antecesores mantuvieron la *esfera metereológica*, Maurolico y Kepler la abandonaron completamente. Más aún, se enfocaron por primera vez en la pregunta básica para la que sus antecesores sólo habían dado evasivas. ¿Cómo se puede explicar el tamaño del arco iris?.

En este sentido ambos se sintieron atraídos por la similitud del ángulo de arco iris con la mitad de un ángulo recto. Y aquí muestran un gran influjo de ideas pitagóricas sobre armonías matemáticas en la naturaleza, buscando una explicación geométrica simple. ¿Cuándo los rayos paralelos del sol que inciden sobre una gota esférica se van a reflejar a 45º?. En este punto Maurolico tuvo una idea que seguramente habría sido del agrado de Kepler. Razona que al alcanzar la gota, parte de la luz se refleja en la superficie exterior, y parte penetra. Supone entonces que para lograr mayor intensidad, parte de la luz que penetra, debe salir en la misma dirección que la luz reflejada, luego de haber realizado algunas reflexiones internas. La mitad de un ángulo recto, razona Maurolico, es un octavo de un círculo. Así que divide el círculo de la gota en ocho partes iguales, construyendo dentro una estrella octogonal.

Vemos que dos siglos después del trabajo pionero de Teodorico, Maurolico y Kepler fueron los primeros en basar su explicación del arco iris en términos de reflexiones internas. Y es interesante notar que mientras en el siglo XIV se había anticipado esta idea en base a observaciones en globos de agua, Maurolico ha llegado a ella guiado sólo por la geometría, sin realizar ninguna experiencia. Allí donde Teodorico conocía por experiencia que debía haber un camino particular a través de las gotas que era el apropiado para el arco iris primario, aún cuando no pudiese explicarlo en términos de números y medidas, Maurolico sintió que la base geométrica del problema se podía descubrir sin recurrir a la observación experimental. Explicó así que después de siete reflexiones internas, el rayo iba a poder salir en la misma dirección que el que se había reflejado en el punto de entrada. Y aquella porción que no saliese, podría volver a reforzar la intensidad del rayo saliente después de otras siete vueltas. En ángulos que *"no coincidieran con el octógono"*, los rayos no se reforzarían lo suficiente como para alcanzar el ojo con el efecto suficiente[32]. Maurolico pensó que aquí estaba el secreto del radio del arco iris de 45º. Y *mirabilu dictu* ¡siete reflexiones!, cuando

[32] Otro argumento a favor, es que si el ángulo es menor que 45º, los rayos incidente y reflejado, estando más cerca, interfieren entre sí, y cuando es mayor, la mayor "oblicuidad" produce una disminución de la reflexión.

también son siete los colores del arco iris[33]. ¿Podía alguien pedir una confirmación más hermosa?. No podemos dejar de especular sobre el agrado que le habría causado a Kepler este modelo geométrico.

Sin embargo, hay algunos puntos de discordia entre ambos enfoques de reflexiones múltiples. Allí donde Kepler mantenía un ángulo de 45º para el arco iris, en contra de la gran mayoría de las fuentes conocidas por él, Maurolico vio la necesidad de justificar que dicho ángulo fuese menor a 45º, tal como afirmaba Witelo, aún cuando ese valor fuese esencial en su teoría geométrica. Al respecto sugería la siguiente explicación: "*Pero ¿cómo puede ocurrir, Ud. preguntará, que la altitud del arco iris no es de exactamente cuarenta y cinco grados, pero un poco menor tal como muestra la observación?. No se como contestar esta pregunta o que razones podría ofrecer, a menos que las gotas que caen están algo elongadas o achatadas, y por lo tanto, apartándose de la forma esférica, cambian el ángulo de reflexión y por lo tanto la rectitud de los rayos que en una esfera perfecta regresan a un ángulo de cuarenta y cinco grados".*

Tal como vimos Kepler tenía inconvenientes para ajustar el ángulo de 45º del arco iris, con el ángulo máximo de refracción de la luz al entrar en la gota de agua. Buscó una posible explicación en ciertas suposiciones sobre la densidad de las gotas de lluvia, pero eventualmente esta inconsistencia le llevaría a un punto muerto en su estudio del arco iris. En contrapartida con esta actitud, Maurolico prefirió forzar la ley de refracción para hacerla coincidir con su modelo. La ley de refracción de Grosseteste había sido publicada en 1503 en un tratado titulado *De Phicisis Lineis Angulis et Figuris per Quas Omnes Acciones Naturales Completur*, y sabemos que Maurolico conocía el tratado de Witelo, donde la ley de refracción es ampliamente discutida. Sin ser un gran experimentalista, en la primera sección de la segunda parte del *Diaphaneon*, Maurolico da una exposición sistemática de los hechos conocidos sobre la refracción. Además estuvo entre los primeros en usar el "ángulo de incidencia", aunque retuvo el tradicional "*angulus fractionis*", aquel que forman el rayo refractado y la prolongación del incidente (hoy llamado ángulo de desviación). Al igual que Ptolomeo, creyó que ambos ángulos eran proporcionales, lo cual es correcto para pequeños valores. ¿Porqué decidió no tener en cuenta las nociones de Witelo acerca de la importancia de la refracción en el arco iris?. ¿Fue debido a la autoridad de otros autores, o porqué, como

[33] Respecto de los colores, Maurolico vuelve a la teoría de los cuatro colores: naranja, verde, azul y púrpura. Por mezcla, hay tres colores más entre ellos, llegando a los siete que el postula en el arco iris.

él mismo dice, Witelo "*multiplicó las líneas e hizo trabajar a sus lectores, pero nunca probó nada*"?.

Para el arco iris secundario, luego de citar varios factores en apoyo de la idea de que es una imagen del primario, la rechaza e intenta otra explicación geométrica. Sin conocer el trabajo de Teodorico, donde establecía una diferencia de 11º, el la estima en 11.25º. Y ahora el geómetra razona que 11.25º es un octavo de un ángulo recto, y por lo tanto proviene de una estrella poligonal con cuatro veces más vértices. Requiriendo 31 reflexiones internas, el arco iris secundario es necesariamente menos intenso.

El *Diaphaneon* cierra con una serie de 24 quaestiones, entre las cuales merece atención la última, donde advierte la zona luminosa que aparece justo en el interior del arco iris primario. Este es el primer comentario conocido sobre lo que hoy se denomina *arco iris supernumerario.* Vagamente, lo supone debido a *"superposiciones, reverberaciones y reflexiones repetidas de los rayos"*. Finalmente confiesa que ha pasado 30 años estudiando el problema del arco iris y dice que *"si entre los problemas de la óptica el mas oscuro es aquel que concierne a los cuerpos transparentes, el mas difícil es el referido al arco iris"*.

Correspondencia posterior con Harriot (1607-1609) y segunda carta a Fabricius (1608)

Por varias razones, Kepler dudaba en aceptar su teoría de reflexiones múltiples. En primer lugar, porqué de toda la multitud de opciones, sólo la primera y la cuarta producían algún efecto observable. Uno podría argumentar que cuanto mayor fuese el número de reflexiones, menor sería la impresión de color. Pero, entonces ¿cómo podemos ver el halo alrededor del sol después de cuatro reflexiones?. Además, Kepler encontraba difícil reconciliar la mobilidad de las gotas cayendo en la lluvia con la constancia del arco iris en el cielo[34]. Tal vez, sólo se formaba por la niebla. Después de describir un arco iris observado en Junio 10/20, en Mogontia, Kepler cierra su carta a Harriot con el desafío*: Tu, entonces, oh excelente sacerdote de los misterios de la naturaleza, dime las causas*.

[34] Es interesante destacar que este mismo argumento fue utilizado por Séneca el Joven para afirmar que las nubes y no las gotas de lluvia son las responsables del arco iris, en tanto que estas caen muy rápido como para poder formar una imagen estable, aunque sin embargo creía que era el efecto de muchas partes componentes.

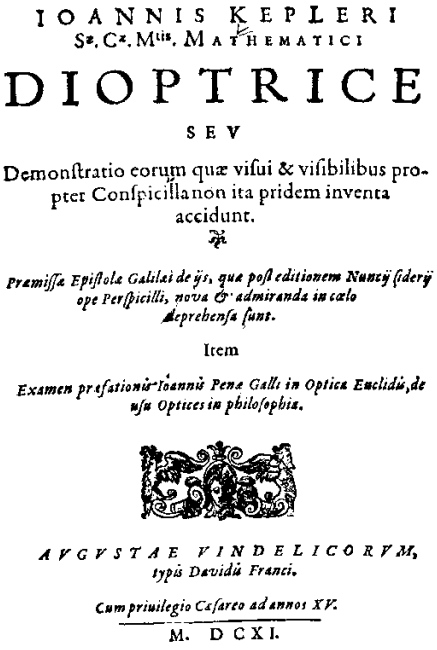
Harriot respondió desde Londres en Diciembre 2/11. Le enviaba una larga tabla de índices de refracción para más de una docena de sustancias, y un intento de explicar la reflexión y refracción simultánea de luz por un medio transparente. Prometía que le iba ha escribir otra carta con sus ideas sobre el arco iris, agregando que *ahora diría lo siguiente sobre el arco iris, que la causa se podrá demostrar en una gota por reflexión en una superficie cóncava y refracción en una convexa. Sin embargo, no he dicho nada en consideración a los misterios que están ocultos.*

El intercambio epistolar entre ambos se mantuvo con tres cartas adicionales, la primera de Kepler de Agosto 2/11 de 1607 escrita en Praga, llena de ansiedad por ver los trabajos de Harriot sobre los colores y el arco iris. Le sigue una respuesta de Harriot de Julio 13/22 de 1608, aduciendo falta de tiempo para escribir y filosofar. Gira la discusión hacia algunos argumentos a favor del vacío que Gilbert había dirigido contra los peripatéticos, y evita el tema del arco iris. Por último hay una carta de Kepler de Setiembre 1 de 1609, pero sin ningún intercambio relevante sobre el fenómeno del arco iris. Sólo se limita a argumentar en contra del vacío.

Entre tanto, Kepler había vuelto a escribirle a Fabricius en Noviembre 10 de 1608, explicándole su nuevo modelo del arco iris, en similares términos que lo había hecho con Harriot dos años antes.

Tertius Interveniens (1610) y Dioptrice (1611)

Finalmente, en un trabajo defendiendo la astrología, publicado en 1610 con el título *de Tertius Interveniens. Das ist, Warnung an Etliche Theologos, Medicos und Philosophos Dass sie Nicht das Kindt mit dem Badt Ausschütten* Kepler da a conocer su nueva teoría sobre la formación del arco iris por el pasaje de rayos solares por gotas de lluvia redondas, pero sin dar mayores detalles.


IOANNIS KEPLERI
Sæ. Cæ. Mtis. MATHEMATICI
DIOPTRICE
SEV
Demonſtratio eorum quæ viſui & viſibilibus propter Conſpicilla non ita pridem inventa accidunt.
Præmiſſæ Epiſtolæ Galilæi de ijs, quæ poſt editionem Nuncij ſiderij ope Perſpicilli, nova & admiranda in cælo deprehenſa ſunt.
Item
Examen præfationis Ioannis Pena Galli in Optica Euclidis, de uſu Optices in philoſophia.
AVGVSTAE VINDELICORVM, typis Davidis Franci.
Cum priuilegio Cæſareo ad annos XV.
M. DCXI.

Uno hubiese esperado que estos detalles aparecieran en su segundo gran tratado de óptica, la *Dioptrice*, de 1611. Sin embargo, sólo

se encuentra la afirmación ya familiar de que los colores aparecen cuando la refracción es mayor, es decir cuando los rayos solares penetran en la gota de lluvia tangencialmente.

Sin embargo, aquí aparece un detalle muy interesante desde el punto de vista historiográfico, y es que en el Prefacio Kepler afirma que había pensado agregar un pequeño libro sobre el arco iris, donde deseaba incluir explicaciones adicionales sobre algunas formas extraordinarias de arco iris, pero que hasta el presente no había logrado deducirlas. Aparentemente, Kepler nunca escribió este libro, a pesar de que estaba muy confiado de su última explicación.

Otras obras contemporáneas de la *Dioptrice*

El año 1611 fue muy activo en publicaciones sobre óptica. Junto con la *Dioptrice* de Kepler, está la edición del ya mencionado *Diaphaneon* de Maurolico, la *Optica* de Ambrosio Rhodius, y la obra de Antonio de Dominis (1564-1624), titulada *De Radiis Visus et Lucis in Vitris Perspectivis et Iride Tractatus.* La óptica de Rhodius es un largo tratado de más de 400 páginas, con ocho dedicadas al arco iris. El autor era doctor en medicina y filosofía en Kembergensis y profesor de matemáticas en la Academia Leucorea. Su obra deriva de las de Aristóteles, Witelo y Porta. Describe la teoría aristotélica y presenta la explicación de la circularidad del arco iris como propia. De Witelo toma la idea de incluir la refracción, y de Porta la teoría de los colores del arco iris.

De Dominis era un ambicioso Jesuita de Dalmacia, que llegó a ser arzobispo de Spalato, y de quien Goethe dijo que "*descubrió el espectro solar mientras decía misa*". Renunciando a su fe, se convirtió al protestantismo, y por influencia del embajador ingles en Venecia, fue nombrado deán de Windsor por Jaime I. Finalmente, con dudas y tentado por la posibilidad de un sombrero cardenalicio, buscó la reconciliación con el papa, solo para morir en las mazmorras de la Inquisición en San Angelo. Posteriormente, la Inquisición lo encontró culpable, haciendo exhumar y quemar su cuerpo, junto con sus escritos. Como ocurre con Giordano Bruno, ha habido una tendencia a verlo como un mártir de la ciencia, cuando en realidad su muerte se debió a su heterodoxia religiosa.

La licencia de *De Raddis Visus et Lucis* es del 27 de Enero de 1610, pero el autor declara en el prefacio que el trabajo está basado en notas preparadas para clases en

Padua y Brescia 20 años antes, aunque debió incorporar mucho material nuevo. Así lo demuestra una sección "*en donde, entre otras cosas, se muestra la teoría de cierto instrumento que he inventado para ver claramente cosas que están lejos"*. Cita abiertamente a aquellos de una posición más filosófica como Alberto Magno, Witelo, Piccolomini y Cardan, pero nunca a aquellos de tendencia geométrica como Teodorico, Fleischer, Maurolico, Porta o Kepler. De esta manera no es fácil conocer sus fuentes, aunque su descripción del arco iris es sorprendentemente similar a la de Teodorico, excepto porque se olvida la última refracción, cuando la luz sale de la gota de lluvia. Se podría imaginar que esto se trata de un descuido, pero no es así, ya que no aparece en ninguno de los muchos gráficos que acompañan al libro. Sólo en un punto, sin embargo, casualmente menciona la posibilidad de una refracción a la salida.

En la obra de De Dominis hay dos comentarios asombrosos. En un punto indica que, puesto que en un prisma el rojo es el color que recorre menor distancia, lo mismo debe pasar dentro de la gota para separar los colores del arco iris. Mientras que la separación de los colores del arco iris sería un tema que ni siquiera Kepler o Descartes pudieron explicar, con esta sola frase De Dominis parecería estar dando un adelanto de la teoría de los colores que Newton descubriría varias décadas después.

La segunda frase a la que nos queremos referir dice textualmente: *Ninguna gota envía al ojo todos los colores del arco iris, cada gota es responsable de solo uno*. Antes de De Dominis, esta idea sólo había sido planteada por Teodorico, ¿conocía su obra?... Posiblemente no, pues *De Raddis Visus et Lucis* incluye muchos errores que una lectura del libro de Teodorico habría aclarado. Posiblemente conocía las *Quaestiones* de Themo, que se publicaron en Venecia donde también la obra de de Dominis fue impresa. Themo también había olvidado la segunda refracción. Pero el no dice nada sobre que cada gota sea responsable de un solo color. Esta parece ser una idea completamente original de De Dominis, algo que Descartes redescubriría pocos años después. Por este motivo Newton, Leibniz, Musschenbroek y Goethe acusarían a Descartes de plagiar a De Dominis. Otros irían tan lejos como para llamar a De Dominis *"uno de los espíritus más esclarecidos del siglo*"; y en más de un tratado de óptica se lee que la teoría elemental del arco iris fue dada por primera vez por De Dominis. Sin caer en estas exageraciones, es claro que, aún con todas sus fallas, su descripción del arco iris es superior a todas las publicadas en los tres siglos anteriores, excepto por la de Teodorico. El arco iris se forma en las gotas individuales y no hay señales del *incubus* aristotélico de la esfera meteorológica. Pero es inferior a las nociones no publicadas de

Kepler, en cuanto olvida la segunda refracción, y no intenta explicar el tamaño del arco iris, algo que Kepler intentó aun cuando sin éxito.

De Facie in Orbe Lunae

En una carta escrita a Remus en 1619, Kepler declara que ciertas características del arco iris y el halo son claras para él. Por ejemplo, que el radio angular del arco iris primario es de 45º, que el secundario es 11º mayor, y que el radio del halo es de 22.5º. La causa está en la máxima refracción en la gota de agua para trayectorias tangenciales, ya que cuando mayor es la refracción, aparecen los colores.

Kepler da la misma explicación en las notas que acompañan su traducción del griego al latín de la obra de Plutarco: *De Facie in Orbe Lunae*. Aquí acepta la idea mantenida por algunos escolásticos de que el arco iris secundario es una imagen especular sobre una nube exterior del arco iris primario.

Esta es una de las pocas menciones que Kepler hace del arco iris secundario. En su *Meterologica* Aristóteles se había referido al tema, pero entrando en una inconsistencia respecto del orden invertido de sus colores. Para justificar esto, proyecta el arco iris secundario no sobre la esfera meteorológica, sino sobre una superficie plana vertical. Esto le permite invertir las distancias a la fuente de luz, pudiendo ubicar el color más oscuro (azul) por encima del más claro (rojo).

La propuesta de Kepler de que el arco iris secundario es una imagen especular del primario, ya había sido refutada por Alejandro de Afrodisia, uno de los más importantes comentaristas de Aristóteles, quien fue cabeza del Liceo entre 198 y 211. Como ya señalamos, esta obra era conocida desde mediados del siglo XIII en la traducción de Guillermo de Moerbecke (1215-1286), y en otros comentarios y traducciones posteriores, como la realizada en 1540 por Alessandro Piccolomini[35] (1508-1578), cardenal de Siena y miembro de una distinguida familia que daría dos Papas (Pío II y III). Al llegar en una época de letargo en la investigación del tema, con el corpus de los dos siglos anteriores prácticamente olvidado, esta traducción fue

[35] Piccolomini incluyó algunos comentarios personales en un apéndice titulado *De Iride*. Muchos de estos comentarios no agregan gran cosa, aunque por otra parte reporta que el arco iris puede llegar a ser de una altura máxima de 42º y que el mismo había medido con el astrolabio uno de 38º de altura en Bologna. Piccolomini estaba además familiarizado con los trabajos no ortodoxos de Witelo, Alberto Magno y Themo, pero permaneció fiel a la visión aristotélica.

recibida con una respuesta muy favorable y tuvo seis ediciones en un cuarto de siglo[36]. Sin embargo, es evidente que esta obra no fue conocida por Kepler. Otro hallazgo de Alejandro que no es mencionado por Kepler, tiene que ver con el descubrimiento por aquel de una zona de oscuridad entre ambos arco iris. En la teoría aristotélica esto constituía una paradoja, ya que por continuidad, siendo el rojo el más "fuerte" de los colores, uno esperaría que la zona contenida entre ambas franjas, exterior para el arco iris primario e interior para el secundario, fuese más luminosa.

Estudio de la ley de refracción

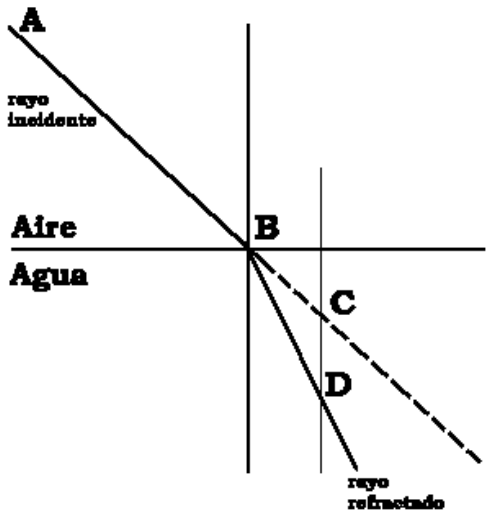
Es asombroso cuán cerca estuvo Kepler de la solución del problema, y de cuanta ayuda hubiese sido que publicase esos resultados. Las importantes ideas que se pueden encontrar en su correspondencia sólo vieron la imprenta en una edición de sus *Epistolae* de 1718, cuando Descartes, Newton y Halley ya habían resuelto el problema. Por su propio esfuerzo, Kepler había llegado a varios de los conceptos fundamentales: Que el arco iris se forma en las gotas de lluvia individuales y no en las nubes como un todo, que la luz solar debe realizar dos refracciones y una reflexión interna, que en la reflexión el ángulo de entrada de la luz con respecto a la normal a la superficie es igual y opuesto al de salida, que la separación de los colores aumenta con el ángulo de desviación de la luz. Sólo le faltaba una pieza del rompecabezas, y esta era porqué la intensidad de la luz que se refleja en el arco iris es máxima en un ángulo específico de 42º (o 45º según Kepler). Y para ello, Kepler necesitaba la ley de refracción.

La ley de reflexión era bien conocida desde Aristóteles, pero la ley de refracción había eludido los mejores esfuerzos de Ptolomeo[37], Alhazen, Grossesteste, Witelo,

[36] Pierre Duhem exagera diciendo que parte del sistema de Teodorico *"reaparece en los escritos de Alessandro Piccolomini"*. Sin embargo, en su *Iride* no hay casi ninguna señal de los resultados de aquel. No hay ni traza del concepto de reflexión interna, ni una clara comprensión del rol de la refracción. De hecho, este libro, junto con la traducción realizada en 1551 del comentario griego relativamente extenso de la *Meteorologica*, realizado en el siglo VI por el alejandrino Olympiodorus (libro notable no tanto por su perspicacia, sino por estar muy bien organizado) dieron un aura de respetabilidad a las doctrinas más antiguas, y la gente, en lugar de buscar nuevos rumbos, se aferró a los viejos argumentos, entrando en detalles de máxima sofisticación. Esta aceptación de las doctrinas antiguas se nota en los comentarios de 1556 y 1565 de Francesco Vimercati, o Franciscus Vicomercatus (M. 1570) de Milán, que fueron frecuentemente citados. Este es un ejemplo palmario del escolasticismo, ya que es un comentario de Olimpiodoro, que comenta a Alejandro que comenta a Aristóteles.

[37] De hecho, Ptolomeo fue uno de los primeros en estudiar este tema, siguiendo una sugerencia de Cleomedes (40 a.c). En su *Optica* se encuentran las primeras tablas de ángulos de refracción en el paso de aire a agua, una información que sería citada y vuelta a citar hasta los tiempos de Kepler, y que aquel utilizaría en su estudio del arco iris, aunque no la conociese de manera directa. De su *Optica* se han perdido el libro I y el final del V. La pérdida del libro I es particularmente lamentable pues parece que allí

Maurolico y Porta. Esta ley era de particular interés para Kepler, no sólo por su relación con la formación del arco iris, sino por su importancia astronómica en la refracción atmosférica. Y por lo tanto trabajó incesantemente en su búsqueda.



Esta ley fue finalmente descubierta por el científico holandés Willebrord Snell[38] (1581-1625). Se ha sugerido que su trabajo sobre la refracción se basó en una cita de Kepler respecto a que Alhazen y Witelo habían sugerido que la luz que cae oblicuamente sobre una superficie puede ser vista como compuesta de dos movimientos, donde la componente refractada se acerca a la normal pues su componente perpendicular es reforzada. Para 1621 Snell había descubierto la ley de refracción, pero no sabemos como lo hizo. El autor murió dejando su manuscrito sin edición. Posiblemente, este manuscrito haya sido visto por Descartes, pero lo cierto es que ahora está irremediablemente perdido. Sin embargo, por Christiaan Huygens (1627-1695) sabemos que Snell expresó su ley en los siguientes términos geométricos: Si se prolonga el rayo incidente AB y el refractado BD hasta cortar una recta normal a la superficie en los puntos C y D respectivamente, los segmentos BC y BD mantienen un cociente constante BD / BC = n.

En su primer intento por encontrar la ley de refracción, Kepler siguió un camino parecido, aunque algo más intrincado[39]. Es de interés discutirlo aquí, no sólo por su originalidad. A partir de dos puntos A y B ubicados sobre cierto eje, Kepler trazó dos

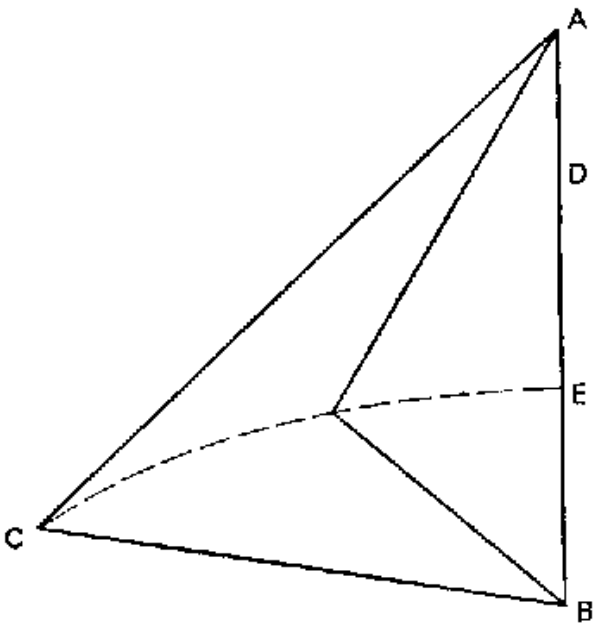
---

estableció sus ideas sobre los colores y el arco iris. Comentaristas posteriores nos informan que en dicho libro afirmaba que los colores del arco iris eran siete, en contra de la afirmación de algunos historiadores de la ciencia acerca de que la teoría de los tres colores no fue refutada hasta los tiempos de Teodorico en el siglo XIV.

[38] También Snell realizó investigaciones sobre el arco iris. En un trabajo sobre el cometa de 1618, se refiere a los halos y arco iris como causados por reflexión y refracción. Promete que en alguna otra ocasión va a comentar más sobre esta idea, pero si lo hizo, no ha llegado hasta nosotros. Además, en una nota al margen de la edición Risner de las Opticas de Alhazen y Witelo, escribió que De Dominis toma el arco como de 42º y lo explica como el resultado de dos refracciones y una reflexión interna. Adviértase como Snell corrige aquí a De Dominis en cuanto a la presencia de una segunda refracción que este no tenía en cuenta.

[39] V.P.Linnik: Kepler´s Works in the Field of Optics, en Arthur Beer and Peter Beer, eds*: Kepler, Four Hundred Years* (Proceedings of Conferences held in honour of Johannes Kepler (Pergamon Press, Oxford, 1975).

rectas que forman con el eje los mismos ángulos que los rayos incidente y reflejado forman con la normal a la superficie en un proceso de refracción. Estas rectas se cortan en algún punto C. Ahora Kepler construyó la hipérbola que pasa por el punto C y tiene a los puntos A y B como sus focos, en la esperanza de que los otros puntos de la hipérbola dieran valores que coincidan con las tablas de las que dispone. Pero no resultó. Probó entonces con una elipse, con igual suerte. Finalmente intentó disociar los puntos A y B de la sección cónica. El resultado fue el mismo. Ante esta coyuntura dijo: *Inquisitionis methodus nulla geometrica est, periclitanda fortuna (como el método geométrico no funciona, debemos probar nuestra suerte).* Tal como vimos, la ley de refracción encontrada por Snell tiene una forma simple cuando se escribe en términos de los ángulos entre los rayos incidente y refractado con respecto a la normal a la superficie, θ_i y θ_r, respectivamente. En este punto, Kepler adoptó el primero de estos ángulos para caracterizar la dirección del rayo incidente, pero eligió medir el ángulo del rayo refractado no con respecto a la normal, sino con respecto a la dirección de incidencia, es decir $\theta_d = \theta_i - \theta_r$. Para pequeños ángulos de incidencia (menores que 30º), Kepler usó la ley de proporcionalidad, $\theta_d \propto \theta_i$. Una ley de este tipo aparece por primera vez en una de las primeras obras escolásticas sobre el arco iris, el pequeño libro "*De Iride Seu de Iride et Speculo*" de Roberto Grosseteste (1175-1253). El suyo había sido uno de los primeros intentos de geometrizar el fenómeno de refracción[40], De los trabajos de Alhazen, a través de la edición de Risner, Kepler disponía de tablas realizadas por aquel cada 5º, y sabía que una ley de proporcionalidad $\theta_d \propto \theta_i$ era una expresión



[40] Grosseteste postuló una ley $\theta_d = \theta_i / 2$. Esto muestra un claro entendimiento de las matemáticas, pero una falta de aplicación del método científico que usualmente se le reporta. Una ley aproximadamente correcta para la interfase aire-agua, sería $\theta_d = \theta_i / 4$. Difícilmente esta ley pueda ser un punto a favor de la afirmación usual de que Grosseteste y sus sucesores de los siglos XIII y XIV crearon la ciencia experimental moderna. Si bien es posible que hubiese leído los trabajo de Ptolomeo y Aristóteles, ya que sabía griego, es muy dudoso que conociese los trabajos de Alhazen, donde una directa comparación de su ley con las tablas de este último hubiese bastado para mostrar su error.

aproximada, y que daría resultados muy pobres a ángulos mayores. Así que, tanto en el *Paralipomena* de 1604 como en la *Dioptrice* de 1611, intentó encontrar una mejor relación entre ambos ángulos. Probó con más de media docena de relaciones trigonométricas. Finalmente encontró una expresión que corregía la ley $\theta_d \propto \theta_i$ en base a un factor de proporcionalidad que variaba como la secante de θ_r. Esta ley sólo se empezaba a apartar apreciablemente de los valores de las tablas para ángulos de incidencia mayores que 70º. Así que con esta excelente expresión aproximada abandonó la búsqueda de una ley de refracción más precisa.

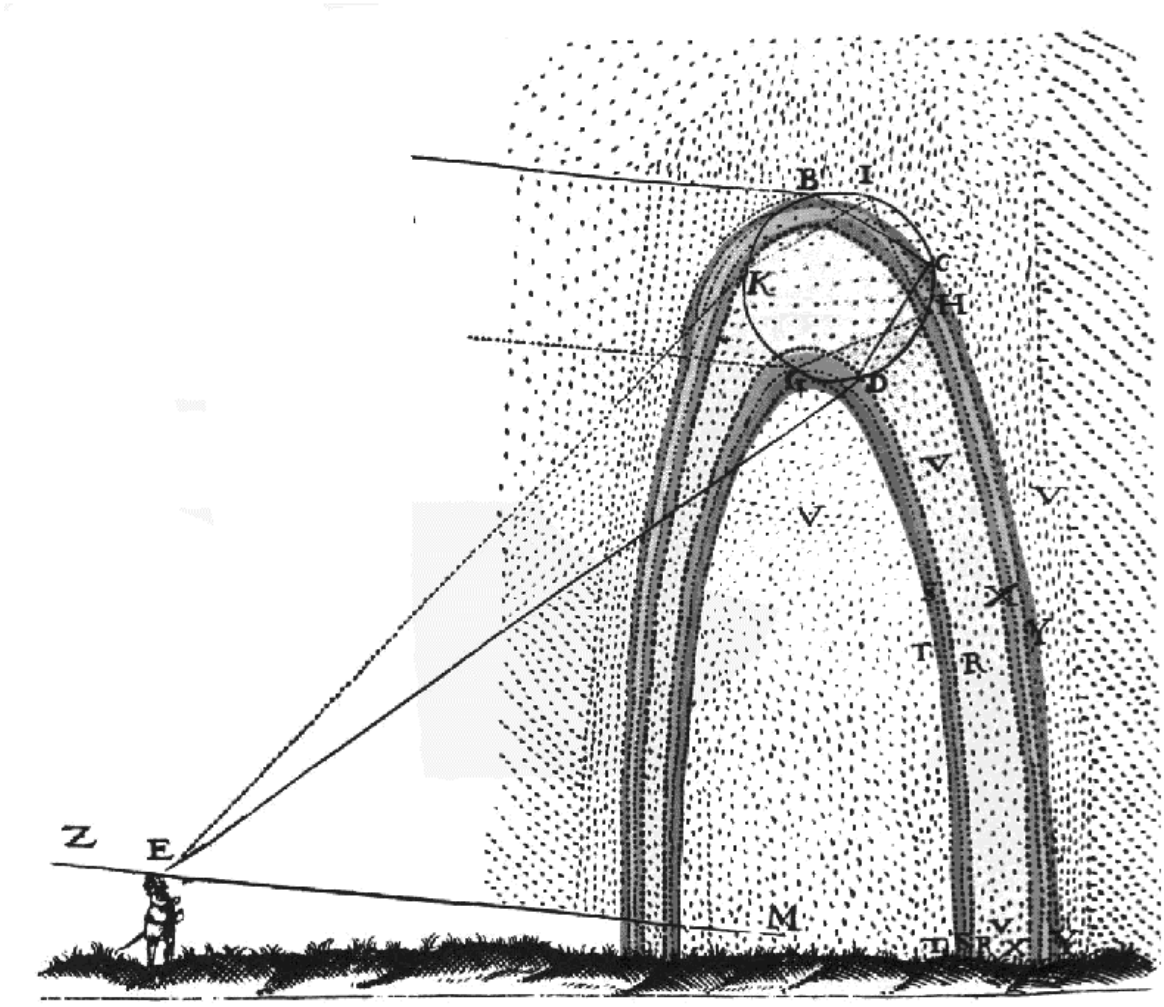
Descartes

Pocos años después, Descartes completaría la teoría del arco iris. Al trasladarse a Holanda en 1629, Descartes tenía un gran interés en cuestiones vinculadas con la óptica, y se propuso continuar sus estudios sobre dióptrica, a los que ya se había dedicado con intensidad en Francia. Estando allí, Descartes se enteró del fenómeno de los parahelios o soles falsos que en marzo de ese mismo año se habían observado en Roma. Según el mismo expuso en una carta a Mersenne fechada el 8 de octubre, esto le llevó a dirigir su atención al estudio de los meteoros, de los cuales "*ahora pienso que puedo dar alguna razón, y estoy resuelto a hacer un pequeño Tratado que contendrá la razón de los colores del arco iris*". Este pequeño tratado apareció en 1637 con el título de *los Meteoros*, como parte de uno de los tres ensayos que siguen al Discurso del Método. En particular su estudio sobre el arco iris abarca el Discurso 8º de dicha obra. El interés de esta monografía, terminada con anterioridad al Discurso del Método, trasciende el tema que trata, al constituir el primer escalón hacia la redacción de un tratado más general donde *"en vez de explicar solamente un fenómeno, he decidido explicar todos los fenómenos de la Naturaleza, es decir, toda la física"*[41]. Esta es la primera declaración de intención respecto de la posibilidad de escribir un tratado que posteriormente denominaría *El Mundo* o *el Tratado de la Luz*, y que habría de sentar la base de una nueva física, alternativa a la de Aristóteles.

Los estudios sobre la luz de Descartes pueden dividirse en temas de Optica Física, (relacionados con la naturaleza de la Luz) que ocupan los capítulos 12 y 13 de *El Mundo*, temas de óptica geométrica y fisiológica (estudio de la visión) que ocupan los

[41] Carta a Mersenne del 13 de Noviembre de 1629.

diez discursos de la *Dióptrica* (que es otro de los tres ensayos que cierran el Discurso del Método) y finalmente aplicaciones a fenómenos atmosféricos en *los Meteoros*.



En las primeras páginas de *Les Météores*, explica su objetivo al estudiar el arco iris: "*El arco iris es una maravilla natural tan extraordinaria y su causa ha sido celosamente perseguida por hombres capaces y tan poco es comprendida, que pensé que no había nada que pudiera elegir que fuese más apropiado para mostrar como, por el método que yo empleo, podemos llegar al conocimiento que aquellos cuyos escritos poseemos no tienen*"

Descartes raramente admitía citar a otros autores, así que aún cuando supongamos que su obra es la consecuencia de los puntos de vista de Kepler, Harriot, De Dominis o Snell, nunca lo sabremos con certeza. Tal como mencionamos anteriormente, Newton y Leibniz prácticamente lo acusaron de plagiar a De Dominis. Huygens escribió que la teoría cartesiana del arco iris había sido *"tomada del incomparable Kepler*". Tampoco conocemos los pasos que dio para llegar a su teoría,

pues mientras Kepler tenía el hábito de comentar aún sus más ingenuos o fallidos intentos, Descartes sólo mostraba sus resultados finales.

Así, habiendo recuperado el modelo de Kepler, atacó el problema que nadie había logrado resolver: "*La principal dificultad permanece aún, y es determinar porqué, en tanto que hay otros muchos rayos que pueden alcanzar el ojo después de dos refracciones y una reflexión cuando el globo está en alguna otra posición, sólo aquellos de los que hablé exhiben colores*". Y más adelante agrega: "*Tomé mi lápiz e hice un preciso cálculo de los caminos de los rayos que caen sobre diferentes puntos de un globo de agua para determinar en que ángulo, después de dos refracciones y una o dos reflexiones, llegarán al ojo, y entonces encontré que luego de una reflexión y dos refracciones había muchos más rayos que podían ser vistos en un ángulo de entre 41 y 42 grados que a cualquier ángulo menor, y que no había ninguno que pudiese ser visto a un ángulo mayor. Encontré también que después de dos reflexiones y dos refracciones, hay muchos más rayos que llegan al ojo a un ángulo de entre 51 y 52 grados que a cualquier ángulo mayor, y ninguno que proviene de un ángulo menor*". ¡Voilá!, el problema estaba resuelto.

Muchos hablan de Descartes como un hombre de ideas brillantes pero poca persistencia en la experimentación o el cálculo, un hombre que dormía hasta las diez de la mañana, y que inventó la geometría analítica mientras se mantenía caliente en la cama durante un frío invierno en Bavaria. Pero si esto fuese cierto, el trabajo sobre el arco iris debería tomarse como una flagrante excepción. El cálculo diferencial todavía no había sido inventado por Newton y Leibniz, así que debió proceder por fuerza bruta, calculando la desviación de la luz en la gota de agua trayectoria por trayectoria. Considerando una gota de 10000 unidades de longitud, calculó el ángulo de salida en grados en función del parámetro de impacto de la luz en similares unidades de longitud, obteniendo la siguiente tabla

parámetro de impacto	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
ángulo de salida	5º 40'	11º 19'	17º 56'	22º 30'	27º 52'	32º 56'	37º 26'	40º 44'	40º 57'	13º 40'

Se ve un máximo, pero no es obvio que los rayos se agrupen, así que Descartes volvió a hacer el cálculo, en la vecindad del valor máximo

parámetro de impacto	8000	8100	8200	8300	8400	8500	8600	8700	8800
ángulo de salida	40º 44'	40º 58'	41º 10'	41º 20'	41º 26'	41º 30'	41º 30'	41º 28'	41º 22'

8900	9000	9100	9200	9300	9400	9500	9600	9700	9800
41º 12'	40º 57'	40º 36'	40º 04'	39º 26'	38º 38'	37º 32'	36º 06'	34º 12'	31º 31'

Ahora sí, el agrupamiento de rayos en un ángulo de entre 41º y 42º es evidente. El problema de la forma del arco iris estaba finalmente resuelto.

¿Podría Kepler haber resulto completamente el problema del arco iris?

Respecto de la búsqueda por Kepler de una ley de refracción, Carl Boyer[42] escribió: *¿No es sorprendente que [Kepler] se volviera amargamente descorazonado y abandonara la búsqueda de una ley de refracción y, tal vez, consecuentemente, la solución del arco iris?. Su interés en óptica parece haberse desvanecido rápidamente. ¡Y sin embargo estaba tan cerca de la verdad!.*

Esta afirmación de Boyer se basa en tres premisas incorrectas. Primero ubica sus estudios sobre la ley de refracción como posteriores cronológicamente a sus modelo de reflexiones múltiples para la formación del arco iris. De hecho, sus estudios sobre la ley de refracción ocupan la sección *De refractionum mensura* de su *Paralipomena* Y la publicación de esta obra es dos años anterior a la primera carta a Harriot donde desarrolla por primera vez su modelo de reflexiones múltiples.

En segundo lugar, Kepler <u>si</u> encontró la ley de refracción. Recordemos que su expresión aproximada es válida hasta ángulos de incidencia mayores que 70º, y que el error allí es menor que 2.5 %. Con esta expresión Kepler podría haber reproducido los cálculos de Descartes, sin ningún problema.

Finalmente, si aceptásemos que Kepler no deseaba usar su expresión aproximada, aún así podría haber llegado al descubrimiento clave sobre la formación del arco iris hecho por Descartes, y me refiero al agrupamiento de rayos en el ángulo de

[42] Carl Benjamin Boyer: *The rainbow from myth to mathematics* (T. Yoseloff, New York, 1959).

42º. Lo que quiero decir es que este hallazgo no fue algo que surgió automáticamente por el descubrimiento anterior de la ley de refracción. No se puede negar que tal ley facilitó la resolución del problema, pero no es cierto que Kepler o Teodorico, por ejemplo, no hubiesen podido llegar a una conclusión semejante con el conocimiento aproximado que tenían de la ley de refracción, o inclusive sin ella, usando las tablas que tenían a su disposición. Por ejemplo, Kepler podría haber partido de los datos de Ptolomeo

θ_i	10º	20º	30º	40º	50º	60º	70º	80º
θ_r	8º	15.5º	22.5º	29º	35º	40.5º	45.5º	50º

Extrapolando esta secuencia se podía llegar a un ángulo de refracción de 54º para un ángulo de incidencia de 90º, con lo cual se completa la tabla. Witelo modificó sólo la primera entrada reemplazando 8º por 7.75º, pero el resto permaneció inalterado. Y tanto Teodorico como Kepler disponían de estos resultados. Usando el razonamiento de Descartes, hubiesen llegado a la siguiente tabla de ángulos de arco iris

θ_i	10º	20º	30º	40º	50º	60º	70º	80º	90º
θ salida	12º	22º	30º	36º	40º	42º	42º	40º	36º

En esta tabla se observa claramente que hay un agrupamiento de rayos en un ángulo de salida de 42º y oscuridad total para ángulos mayores (banda oscura de Alejandro).

En este sentido, vemos que no es sostenible la afirmación de que Kepler no descubrió la clave del arco iris por no contar con una ley de refracción. La respuesta es otra bien distinta, y mucho más directa: Simplemente, no se le ocurrió...

De Kepler a Descartes

Generalmente los libros científicos suelen mostrar la ciencia evolucionando en una línea continua y sin retrocesos. ¿Qué sería más tentador que imaginar a Descartes agregando su ley de refracción a la teoría ya desarrollada por Kepler, y a Newton completando el modelo con su teoría sobre la separación de los colores?. Sin embargo, la ciencia difícilmente evoluciona de esta manera. En realidad, es más probable que los

trabajos de Kepler y De Dominis sobre el arco iris quedaran ocultos en un mar de otras obras contemporáneas de naturaleza abiertamente peripatética. La imagen de Descartes construyendo sobre la base dejada por aquellos dos y las varias acusaciones de plagio que tuvo que padecer podrían ser así el fruto de una reconstrucción histórica a posteriori. Para sustentar esta opinión, veamos algunas de las obras referidas al arco iris que se publicaron en este período.

En 1615, Josephus Blancanus o Giuseppe Biancani (1566-1624) escribió un libro sobre la matemática en Aristóteles, donde da una clara exposición de la interpretación del arco iris como un proceso de reflexión en una nube sobre la *esfera meteorológica*. Además cita a Porta y Maurolico como autoridades para el arco de 45º. Pero, ¿si había leído a estos autores, porqué no acepta también el modelo de la gota individual?. Evidentemente, la autoridad del filósofo todavía seguía pesando sobre él.

En 1621 Bartholomew Keckermann, en una sección "*Scientiae opticae pars prior*" de su *Systema Mathematices*, sigue a Witelo en describir el arco iris como una combinación de rayos reflejados y refractados.

A través de Remus, con quien mantenía correspondencia, Galileo Galilei (1564-1642) pudo haber oído de las ideas de Kepler acerca del arco iris, pero el tema no le interesó. Sus referencias al arco iris son completamente casuales. Un jesuita contemporáneo, el padre Horatio Grassi, escribiendo con el seudónimo de Lothario Sarsi, había comparado el arco iris con los cometas, mientras que Galileo, en el Il Saggiatore de 1624, señala que el arco iris no tiene objetividad física como el cometa. Un comentario hecho por Galileo de que el halo aparece en dirección al sol, y el arco iris opuesto, y los cometas no necesitan aparecer en ninguna de ambas direcciones, había sido mal interpretado por Sarsi en el sentido de que el arco iris sólo se forma sobre una superficie plana opuesta al sol. Ante esto Galileo estalló con: *"¡Temerario bestiuolo!, ¿Dónde dije eso?".*

Sir Francis Bacon (1561-1626), elevado a la nobleza como Baron Verulam, no estudió el problema. Nuevamente sólo hay referencias casuales, sin comprensión ni interés. En *Historia Ventorum* escribió: *El arco iris, que es el inferior de los meteoros y que se genera más cerca de la tierra, cuando no aparece entero, sino partido y con sólo los extremos visibles, se resuelve en el viento, tanto como en la lluvia*". Y en *el Advancement of Learning* agregó que "*el arco iris esta hecho en el cielo de nubes de lluvia, o aquí abajo con un jet de agua".*

En 1627, apareció el *Partitiones Meteorologicae* de Conrad Cellari (fl. 1619-1636), con un débil tratamiento de las visiones peripatéticas.

También en 1627 apareció la primera edición del *Metereologicorum Libri Sex* de Liebert Froidment o Fromondus (1587-1653), profesor de teología y filosofía en Louvain. Es un tratado popular sobre el arco iris de más de cincuenta páginas. Es una visión puramente conservadora, que excluye cualquier opinión contraria a Aristóteles. Cita a Themo y De Dominis, pero sin encontrar nada de valor en su obra.

Como se ve, el camino que va de Képler a Descartes no es tan directo como uno podría imaginar.

Conclusiones

En este trabajo hemos analizado la laboriosa evolución de las ideas de Kepler sobre el arco iris a lo largo de más de veinte años. Este análisis se ha visto facilitado por los pormenorizados detalles que Kepler dejó sobre estos estudios en libros, apuntes y cartas. Apelando a un posible desconocimiento previo sobre la teoría del arco iris de parte del lector, hemos intentado seguir paso a paso el penoso avance de Kepler en el desarrollo de su teoría, evitando juzgarlo a la luz de los conocimientos actuales. Este ideal diacrónico se vio favorecido por una de las características más importantes del tema: su sencillez, en tanto que una primera explicación del arco iris no precisa de conceptos modernos de óptica física.

A través de un exhaustivo análisis de las posibles fuentes a las que Kepler apeló en sus estudios sobre el tema, y de las obras de otros autores anteriores o contemporáneos suyos, hemos intentado demostrar que existen sorprendentes similitudes entre las ideas que Kepler fue elaborando individualmente, y aquellas que se generaron desde Aristóteles hasta sus días en el esquema más amplio del desarrollo histórico del tema.

Otra de las características de la investigación realizada por Kepler sobre la formación del arco iris que hemos intentado resaltar es que al desarrollar sus propias ideas sobre el tema, fue dando pasos similares a los que dio en cosmología. Tan cercanos, que proporcionan un espejo alternativo donde ver reflejado, aunque en menor escala en cuanto a su trascendencia posterior, su desarrollo científico y el nacimiento de la ciencia moderna.

Además este desarrollo, tanto de manera individual en Kepler como en forma colectiva en otros investigadores, se dio en un ambiente libre de la fuerte confrontación que caracterizó el surgimiento del modelo heliocéntrico puesto que, a diferencia del modelo geocéntrico que formaba la base de la simbiosis tomista entre la filosofía aristotélica y la religión cristiana, la teoría aristotélica del arco iris era absolutamente tangencial a este gran esquema, y se podía modificar sin alterar nada de la construcción aristotélica del mundo. Además, hemos intentado demostrar que esta comparación es particularmente relevante, en tanto que entre ambos desarrollos hay muchas e importantes similitudes. En particular, lo que el modelo ptolomaico de *epiciclos y deferentes* fue para la cosmología, el modelo aristotélico de la *esfera metereológica* lo fue para el arco iris.

En su punto de mayor desarrollo, la teoría kepleriana de reflexiones múltiples para el arco iris estuvo a un paso de completarse. El punto clave que faltaba, y que Descartes descubriría pocos años más tarde, se refería al agrupamiento de rayos en el ángulo de 42º. Algunos autores han sostenido que esta "falla" de Kepler se debió al desconocimiento de la ley de refracción. Sin embargo, hemos intentado demostrar la falsedad de esta afirmación, en tanto que Kepler contaba con una ley de refracción aproximada, y aún si no hubiese sido así, estaba en posición de reproducir el descubrimiento de Descartes en base a las tablas de refracción de las que disponía. Parece más razonable suponer que simplemente no advirtió este punto faltante de su teoría, y que si abandonó el estudio del tema, se debió a las dificultades personales de los últimos años de su vida.

Un hecho sorprendente que surge del estudio de los trabajos de Kepler sobre el arco iris, es su insistencia en aceptar un radio angular de 45º, un dato que la gran mayoría de sus contemporáneos consideraba erróneo. En general se estima que la verdadera hazaña de Kepler como fundador de la ciencia moderna *reside en su insistencia en que las hipótesis matemáticas válidas deben ser exactamente verificadas en el mundo de la observación*. Sin embargo su sujeción al ángulo de 45º para el arco iris no favorece esta afirmación de Edwin Burtt[43] en el sentido de que *la principal diferencia entre Kepler y los primeros filósofos del Renacimiento (...) reside en que Kepler insiste en la exacta aplicación de la teoría a los hechos observados.* Si bien

[43] Edwin Arthur Burtt: *Los fundamentos metafísicos de la ciencia moderna (Ensayo hisórico y crítico)* (Editorial Sudaméricana, Buenos Aires)

Burtt afirma que *el pensamiento de Kepler era genuinamente empírico en el sentido moderno del término,* en su estudio del arco iris aparentemente no muestra el mismo celo *por la exacta aplicación de la teoría a los hechos observados* que demostró, por ejemplo, en su análisis de los datos de Brahe para la órbita de Marte.

Ante esta aparente contradicción, podemos imaginar que Kepler debía asignar un mayor grado de certeza a los datos de Brahe que a las mediciones del radio del arco iris realizadas por distintos autores. Al preferir el valor de 45º, aunque gozara de menor consenso entre sus contemporáneos, justificando esta elección en que se ajustaba mejor a sus hipótesis matemáticas, posiblemente Kepler no hizo más que lo que haría un científico actual ante unos datos observacionales con cierto grado de dispersión.

El análisis que hemos realizado sobre los trabajos de Kepler sobre el arco iris confirma algunos de los rasgos fundamentales de la filosofía de la ciencia de Kepler que surgen de sus estudios sobre el movimiento de los planetas. El estaba convencido de que los fenómenos físicos, ya sea que se trate del movimiento de los planetas o la formación del arco iris, están basados en armonías matemática, y que estas confirman ampliamente la verdad del modelo. Según Burtt, en este punto Kepler plantea una concepción de la causalidad donde "*piensa que la armonía matemática que puede descubrirse en los hechos observados es causa de estos hechos, o la razón, como suele llamarla, de que sean como son*". Su primer modelo del arco iris, donde cinco colores interiores del arco iris se acomodan en las cinco partes en que se divide al ángulo recto por fracciones simples 1/6, 1/5, 1/4, 1/3, y 1/2, muestra otro ejemplo de esta aplicación de la palabra causa, que se agrega al ejemplo ya conocido del sistema de los cinco sólidos regulares que pueden insertarse entre las esferas de los seis planetas. Estas son las causas de que los colores sean cinco y los planetas seis, en tanto que Dios creó el mundo de acuerdo con el principio de los números perfectos. De aquí que las armonías matemáticas que se hallan en el espíritu del creador proporcionen la causa "*de por qué el número, el tamaño y los movimientos de las órbitas sean como son y no de otra manera*". La causalidad se interpretar en términos de armonía y sencillez matemática.

Además, tal como indica en muchos pasajes de su obra, esta concepción de la causalidad implica también que una hipótesis explicativa de efectos observados debe revelar orden y armonía, incluyendo y relacionando hechos que hasta entonces se habían considerado como distintos. El mismo Kepler escribió que *"... cuando hay diversas hipótesis diferentes sobre los mismos hechos, la verdadera es aquella que muestra por qué son como son los que en las demás hipótesis quedan sin relacionarse,*

es decir, es verdadera la hipótesis que demuestra su conexión matemática racional y ordenada". O dicho con las palabras de su propio sumario: "*Por tanto, no merece el nombre de hipótesis astronómica ni esta ni aquella suposiciones, sino más bien la que está implicada en ambas*". Esta idea, que justifica su adhesión a la teoría copernicana, orientó sus estudios sobre el arco iris hacia la búsqueda de una causa común con el fenómeno del halo. La errónea consideración de que los radios de ambos efectos están en una relación de 1:2 constituiría para Kepler una poderosa justificación de su modelo. Muchos años más tarde se descubriría que esta búsqueda de una causa común estaba irremediablemente condenada al fracaso, en tanto que el halo está relacionado con la desviación de la luz no en gotas esféricas de agua, sino en pequeños cristales hexagonales de hielo.

En sus escritos póstumos sobre temas matemáticos hay una breve crítica de la consideración aristotélica de las ciencias, en la que declara que la diferencia fundamental entre el filósofo griego y él mismo era que el primero llevaba las cosas en última instancia a distinciones cualitativas, y por consiguiente irreductibles, en tanto que él había hallado medios para descubrir proporciones cuantitativas entre todas las cosas: *"Dondequiera que haya cualidades hay igualmente cantidades; pero no siempre viceversa*". Y escribía que *"no pocos principios son de propiedad especial de las matemáticas: Estos principios, que se descubren por la común luz de la razón y que se refieren primariamente a las cantidades, no necesitan demostración. Luego se aplican a las demás cosas en la medida en que éstas tienen algo de común con las cantidades. Ahora bien, de estos principios hay mayor abundancia en las matemáticas que en las otras ciencias teóricas debido precisamente a una característica del entendimiento humano que parece serle constitutiva desde la creación. Por esa característica resulta que no se puede conocer completamente otra cosa sino cantidades o lo que nos es conocido por medio de ellas. Y así ocurre que las conclusiones de las matemáticas son las más ciertas e indubitatibles*". Estas ideas se ven claramente reflejadas en sus estudios sobre el arco iris. Donde la mayoría de sus contemporáneos desarrollaba vagas consideraciones cualitativas, Kepler intentó crear una rigurosa construcción geométrica. Esta posición de cuño pitagórico y platónico, implicaba la revisión de las ideas tradicionales de causalidad, hipótesis, realidad y conocimiento, para adecuarlas a la nueva visión del mundo.

Aparentemente, la carta a Remus de 1619 y las notas de *De Facie in Orbe Lunae*, son los últimos escritos de Kepler referidos al arco iris. Por esa época también realizó su último gran descubrimiento en cosmología. El 15 de Mayo de 1618 Kepler descubrió la tercera ley del movimiento planetario, o ley armónica, que publicó al año siguiente en su *Harmonices Mundi*. Ya en esta época la vida de Kepler había sufrido algunos importantes traspiés. En 1611 había fallecido su esposa, y en 1612, tras la muerte de Rodolfo II, debió abandonar la tranquilidad de su puesto en la corte, trasladándose a Linz. Pero en 1618 ocurriría el golpe de gracia, ya que pocos días después de su descubrimiento de la ley armónica, la relativa paz de la que gozaba Europa luego de la muerte de Felipe II y del reinado de Enrique IV en Francia, se quebró bruscamente con la llegada al trono imperial de Fernando II, alumno de los jesuitas y fanático católico decidido a restablecer su credo en los dominios del Imperio Habsburgo. Comenzó así la Guerra de los Treinta Años, que iba a desbastar los países de Europa central, y que atormentaría los últimos diez años de la vida de Kepler. Para colmo de males, entre 1617 y 1620 Kepler debió defender a su madre en un juicio por brujería. Finalmente Kepler murió en 1630, en la miseria, luego de deambular por distintos lugares de Europa, reclamando de sus antiguos protectores el pago de salarios adeudados. El mismo escribió su epitafio:

"Medí los cielos, ahora las sombras de la tierra mido.
Celestial era el espíritu, ahora el cuerpo yace en las sombras".

Bibliografía

La información contenida en el presente trabajo proviene principalmente de las siguientes fuentes:

- Arthur Beer and Peter Beer: *Kepler, Four Hundred Years (Proceedings of Conferences held in honour of Johannes Kepler* (Pergamon Press, Oxford, 1975).
- Carl Benjamin Boyer: *Kepler's explanation of the rainbow*, American Journal of Physics, 18, 360-366 (1950).
- Carl Benjamin Boyer: *The rainbow from myth to mathematics* (T. Yoseloff, New York, 1959).

Otra bibliografía consultada:

- Carlo Benjamin Boyer: *William Gilbert on the Rainbow*, American Journal of Physics, 20, 416-421 (1952)
- Edwin Arthur Burtt: *Los fundamentos metafísicos de la ciencia moderna (Ensayo hisórico y crítico)* (Editorial Sudaméricana, Buenos Aires)
- Dante Alighieri: *La Divina Comedia*, traducción de E. Rodríguez Vilanova y F. Sales Coderch (Editorial Bruguera, Barcelona, 1968).
- René Descartes: *El mundo o el Tratado de la Luz* (Alianza Universidad, Madrid, 1991).
- A. Rupert Hall: *La revolución científica 1500-1750* (Ed. Crítica, Barcelona).
- Homero, *Iliada*, 5:350.
- James A. Weisheipl: *La teoría física en la edad media* (Editorial Columba, Nuevos Equemas, Buenos Aires, 1967).