

Stephen F. Mason

Historia de las ciencias

2. La revolución científica de los siglos XVI y XVII



Historia de la ciencia
Alianza Editorial

4. Descartes: el método matemático y la filosofía mecánica

Durante el siglo XVII los centros científicos se desplazaron de las localidades medievales de prosperidad comercial y de cultura renacentista, Alemania y la Italia septentrional, a las regiones próximas al Atlántico que se habían beneficiado de los grandes descubrimientos geográficos: Francia, Holanda y la Inglaterra meridional. Kepler y Galileo marcaron el clímax de los logros alemanes e italianos del comienzo de la ciencia moderna, y esas tierras no volverían a ser prominentes en el campo científico hasta finales del siglo XVIII. El cambio de las localidades geográficas de los centros científicos durante el siglo XVII se vio acompañado por un cambio en el tipo de personas que se hacían científicos. Tanto Kepler como Galileo habían sido científicos profesionales. Ambos habían trabajado bajo el patrocinio de príncipes y habían disfrutado de nombramientos académicos en diversos momentos de sus carreras. El nuevo tipo de científico que aparecía en Francia, Inglaterra y Holanda era esencialmente un aficionado. En Inglaterra tales personas provenían de las familias acomodadas del campo o del comercio, siendo a menudo nuevos ricos de la época, como Robert Boyle y sir William Petty. Newton es al respecto una excepción, dado

que era un profesional que disfrutaba de una cátedra en Cambridge y no era rico. En Francia, las personas provenientes de familias conectadas con la administración predominaban en las ciencias, especialmente abogados relacionados con la administración legal de los *parlements* locales o tribunales de Francia.

El desplazamiento de los centros de la ciencia se ilustra mediante el hecho de que los dos hombres que trataron de hacer un análisis general del método científico durante la primera mitad del siglo XVII provenían de las nuevas regiones: Francis Bacon de Inglaterra y René Descartes de Francia. Descartes, 1596-1650, era hijo de un consejero del *parlement* de Bretaña y durante toda su vida fue un amateur acomodado. En filosofía natural se propuso dos cosas. En primer lugar, examinar y generalizar el método matemático que se había estado desarrollando en la ciencia de la mecánica. En segundo lugar, construir mediante dicho método una imagen mecánica general de las operaciones de la naturaleza. Dado que la atmósfera intelectual de Francia demostraba ser más bien poco favorable, Descartes se trasladó a Holanda en 1628, publicando allí su *Discurso del método* en 1637. Esta obra constaba de dos partes: la primera era un análisis del método matemático-deductivo, mientras que la segunda presentaba un bosquejo de su concepción del mundo físico. La segunda parte se amplió posteriormente en sus *Principios de filosofía*, publicados en 1644, siendo esta parte la que ejerció mayor influjo durante el siglo XVII.

Descartes había leído las doctrinas de Bacon acerca del método científico, simpatizando con sus objetivos, si bien pensaba que Bacon había iniciado sus investigaciones por un lugar inadecuado. Había partido de los hechos empíricos del mundo natural en lugar de hacerlo de los principios generales que suministraban la base de la investigación deductiva. Descartes se sentía impresionado por el método matemático que se desarrollaba en el seno de las ciencias físicas y

se dio cuenta de que del mismo modo que el estudioso de la mecánica limitaba la diversidad de las cosas observables a aquellas que eran medibles, así también él debía recortar la variedad de teorías que se pudiesen sugerir, limitándola a aquellas que se pudiesen desarrollar matemáticamente. Del mismo modo, no todas las cualidades medibles tenían la misma importancia, habiéndose de desestimar algunas para simplificar el estudio, a la manera en que Galileo había dejado de lado la resistencia del aire en sus estudios sobre la caída gravitatoria. De manera semejante, Descartes pensaba que no todas las ideas susceptibles de tratamiento matemático eran de igual importancia, sino que había ciertas ideas fundamentales «dadas por intuición» que suministraban el punto de partida más seguro para las deducciones de carácter matemático. Dichas ideas eran las de movimiento, extensión y Dios. La idea de Dios constituía el fundamento principal de su sistema, dado que Dios había creado la extensión y había puesto el movimiento en el universo. Puesto que el movimiento había sido conferido al universo una vez sólo en el momento de la creación, la cantidad de movimiento del mundo había de ser constante. Mediante tal argumento Descartes llegó al principio de la conservación del momento.

De esta manera, argumentando de modo casi-matemático a partir de principios indubitables y ciertos, Descartes consideraba posible deducir todos los aspectos prominentes del mundo natural. En los detalles de la naturaleza de las cosas era inevitable que se diesen ciertas incertidumbres, dado que de las mismas proposiciones se podían deducir diferentes consecuencias, por lo que en este punto había que recurrir a los experimentos a fin de decidir entre opiniones rivales. Con todo, Descartes no hizo hincapié en este aspecto de su método, pues se ocupaba principalmente de la deducción del esquema general de las cosas a partir de los primeros principios. Además, consideraba que los experimentos se limitaban a ilustrar simplemente las ideas que se habían

deducido de los principios dados por intuición: no consideraba que los experimentos determinasen los principios a partir de los cuales se derivaban las deducciones, tal y como Galileo había hecho. En efecto, Galileo había obtenido su principio de inercia y la ley de la caída gravitatoria de los cuerpos a partir de sus experimentos con la esfera que rodaba por un plano inclinado, derivando matemáticamente la trayectoria de los proyectiles y demás a partir de esos principios dados experimentalmente.

El científico holandés Christiaan Huygens señaló más tarde que Bacon no había apreciado la función de las matemáticas en el método científico, mientras que Descartes había desestimado la función de la experimentación. En este sentido las obras de ambos filósofos eran complementarias, perpetuando Bacon el empirismo de la tradición artesanal, y Descartes, las tendencias especulativas de la tradición culta. Así pues, ninguno de ellos integró plenamente ambas tradiciones, si bien ambos se aproximaron a tal situación. Bacon era consciente de la función que podrían desempeñar las matemáticas en la ciencia. Decía que «la investigación de la naturaleza procede mejor cuando la física se ve limitada por las matemáticas», pero no desarrolló este punto. De manera semejante, Descartes distinguía entre «análisis», el modo práctico en que se descubren las cosas, y «síntesis», el modo teórico en que esas mismas cosas se pueden deducir de primeros principios. La síntesis es «lo único que usaban los geómetras antiguos en sus escritos –señalaba–, pero no satisface como el otro método, ni contenta el espíritu de aquellos que desean aprender, pues no muestra el camino por el que las cosas se descubren». Así, Arquímedes descubrió sus principios mecánicos experimentalmente, aunque los presentó como deducciones a partir de axiomas dados por intuición, de modo que no sabemos cuáles fueron de hecho sus experimentos. Por otro lado, Galileo dio cuenta de sus experimentos, por lo que el método de Descartes era más afín al de

Arquímedes que el de Galileo, por más que apreciase las ventajas de este último.

Descartes no se sentía atraído por la antigua idea pitagórica de que las consideraciones matemáticas determinaban la estructura del universo, la idea de que los perfectos cuerpos celestes deben poseer la forma perfecta de la esfera y de que sus movimientos deben ser circulares y uniformes. Para Descartes son consideraciones mecánicas las que determinan la forma y movimiento de los cuerpos celestes y, ciertamente, de todas las operaciones de la naturaleza. Consideraba a las matemáticas como un instrumento metodológico, sintiendo muy poca simpatía por la actitud de los matemáticos puros. «Nada hay más fútil que ocuparse de meros números y figuras imaginarias», escribía. Como Bacon, consideraba que los proyectos utilitarios constituían un fin importante de la ciencia. Descartes afirmaba que con su nuevo método llegaríamos a conocer la naturaleza de los elementos

tan distintamente como comprendemos los diversos oficios de nuestros artesanos y, mediante la aplicación de este conocimiento a cualquier uso al que se preste, podríamos convertirnos en amos y dueños de la naturaleza.

Al desarrollar su método matemático, Descartes realizó notables avances en la técnica matemática; en concreto, inventó la geometría de coordenadas. Galileo se había basado en demostraciones geométricas para probar sus proposiciones mecánicas. Amplió el ámbito de la geometría a otras magnitudes medibles, cantidad de movimiento, velocidad y tiempo. En este terreno la aplicación de la geometría resultaba más bien forzada y engorrosa. El álgebra constituía una técnica matemática mucho más flexible y general, pudiendo abordar fácilmente problemas que entrañasen masas y movimientos. Sin embargo, el álgebra era entonces algo más

bien novedoso, siendo abstracta y hallándose alejada del pensamiento geométrico predominante de los matemáticos de la época. Aun así se produjeron importantes desarrollos algebraicos durante los siglos XVI y XVII. Tartaglia encontró la primera solución algebraica de una ecuación cúbica, frente a los anteriores métodos geométricos de resolver ecuaciones. François Viète, 1540-1603, quien como el padre de Descartes era miembro del *parlement* bretón, mejoró la notación algebraica, siendo desarrollados sus resultados por el matemático, astrónomo y agrimensor inglés Thomas Harriot, 1560-1621. Siguiendo a Harriot, Descartes hizo la geometría algebraica, representando las figuras geométricas gráficamente por medio de ecuaciones algebraicas. Más tarde, Newton y Leibniz describirían las figuras geométricas mediante ecuaciones algebraicas que representaban el movimiento de un punto geométrico, desarrollando así el cálculo. Estos métodos servían para analizar las relaciones entre masas y movimientos, siendo las más importantes técnicas matemáticas utilizadas por los científicos hasta este siglo.

Descartes desarrolló también la idea de que la masa y el tiempo eran dimensiones fundamentales del mundo, tan importantes como las tres dimensiones del espacio. Escribió que

no sólo la longitud, anchura y profundidad son dimensiones, sino que también hay una dimensión en términos de la cual se estima el peso de los objetos. Así, también la velocidad es una dimensión del movimiento; habiendo un número infinito de casos similares.

No obstante, Descartes se olvidó de esta idea y hasta 1822 no desarrolló Fourier el método de representar las unidades físicas, como la velocidad, la aceleración, etc., mediante sus dimensiones fundamentales de masa, tiempo y longitud, a fin de obtener relaciones entre ellas. Descar-

tes incurrió de nuevo en la opinión de que la extensión y el movimiento eran las magnitudes fundamentales que componían el mundo. Como Galileo, tendía a identificar la materia con el volumen, esto es, con la extensión en tres dimensiones. Con todo, Descartes representó una mejora respecto a Galileo por cuanto que sugería que los movimientos naturales tomaban la forma de la velocidad uniforme en una línea recta y no en un círculo, como Galileo había supuesto. Así, fue Descartes el primero que enunció el principio de inercia.

Con la concepción de la extensión y el movimiento, Descartes consideraba posible deducir mediante su método las líneas maestras del funcionamiento del universo. «Dadme movimiento y extensión –escribía– y construiré el mundo.» Descartes era de la opinión de que las leyes de la naturaleza eran tales que podían desarrollar cualquier posible disposición del caos primordial de la materia para formar el tipo de mundo en el que nos hallamos en el presente. Independientemente de su forma original, el universo asumía por necesidad su configuración actual, cosa que haría también cualquier otro mundo posible compuesto de materia y movimiento. Puesto que Descartes identificaba la materia con el volumen, negaba que pudiese existir el vacío, un hueco en el espacio, y que la materia se compusiese de átomos con espacios vacíos entre sí. La materia impregnaba todo el espacio, y, por consiguiente, en un principio la materia primordial sólo podía sufrir un movimiento rotatorio. De este modo se estableció un vórtice gigante en el que los bloques primarios de materia eran arrastrados en torno, gastándose gradualmente por la fricción. Independientemente de su forma original, los bloques primarios de materia se desgastaban para formar un polvo, la materia primera, y pequeñas esferas, la materia segunda. El polvo cósmico o materia primera constituía el elemento fuego que formaba el Sol y las estrellas fijas. La materia segunda era el aire o elemento eté-

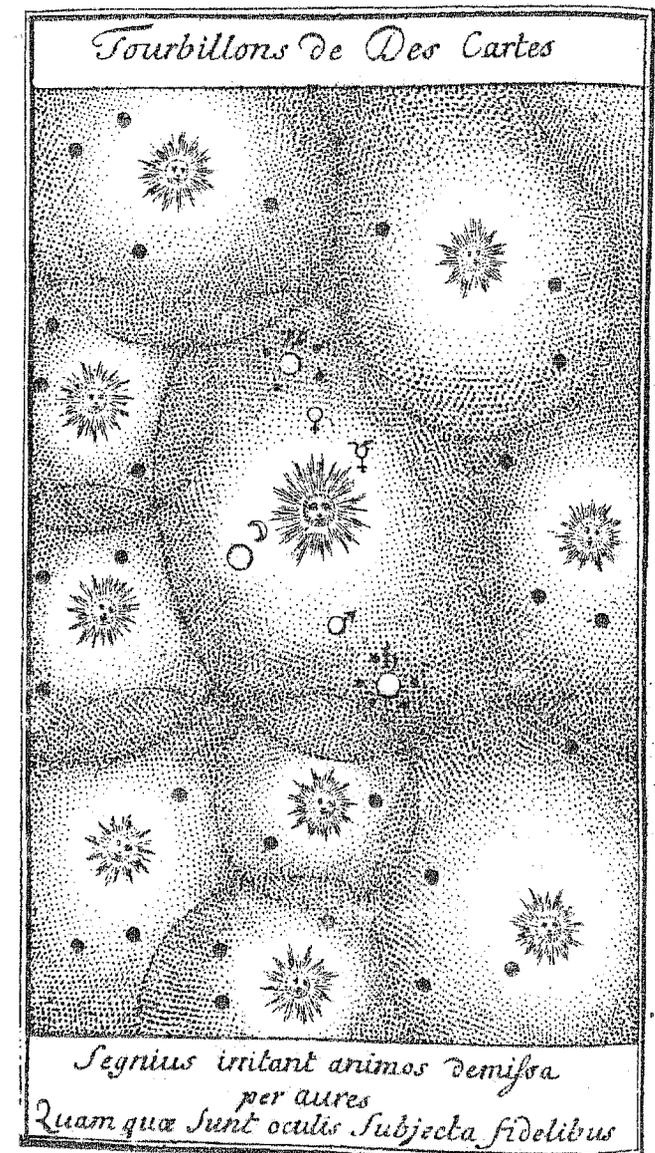
reo que componía el material del espacio interestelar. Había también una materia tercera, a saber, los bloques originales de materia que no se habían descompuesto en polvo sino que se habían redondeado tan sólo. Estos grandes bloques esféricos de materia constituían el elemento tierra que formaba la Tierra, los planetas y los cometas.

A medida que el universo se desarrollaba, se iniciaban torbellinos secundarios en torno a cada conglomerado de materia. Había un vórtice en torno a la Tierra que arrastraba a la Luna en su curso, y otro en torno a Júpiter que mantenía a sus cuatro lunas en sus órbitas, mientras que la Tierra y todos los planetas se hallaban atrapados en un vórtice más amplio en torno al Sol. En los vórtices cósmicos la materia pesada era arrastrada hacia los centros, mientras que la materia ligera se veía dispersada hacia los bordes exteriores. De ahí que los objetos pesados cayesen hacia la Tierra y que el fuego se elevase hacia arriba.

Descartes señalaba que en su sistema todos los movimientos eran realmente relativos. El movimiento, escribía, no es sino

la transferencia de una parte de materia, o un cuerpo, de la vecindad de aquellos cuerpos que se hallan en contacto inmediato con ella y que consideramos en reposo a la vecindad de otros.

Así pues, la Tierra podría considerarse inmóvil en el centro de su propio vórtice. Desde este punto de vista, la Tierra se hallaba en reposo en el centro del mundo, como exigía la imagen tradicional. No obstante, la teoría cartesiana de la relatividad del movimiento no salvó a sus obras de la condena. Se incluyeron en el Índice de libros prohibidos en Roma y en París en 1663. Más adelante, en 1740, se sacaron del Índice de París a fin de ofrecer una alternativa al sistema newtoniano del mundo que se estaba haciendo entonces popular en Francia.



El sistema solar en el sistema de torbellinos de Descartes.

En su contenido, la filosofía natural de Descartes era diametralmente opuesta a la visión del mundo tradicional basada en las teorías de Aristóteles. En el sistema de Descartes todos los seres materiales eran máquinas regidas por las mismas leyes mecánicas, el cuerpo humano no menos que el de los animales, las plantas y la naturaleza inorgánica. Así pues, prescindió de la concepción tradicional de que la naturaleza se hallaba jerárquicamente ordenada, la idea de que los seres que componen el mundo formaban una vasta cadena de criaturas que se extendía desde el más perfecto de todos los seres, la divinidad, en la periferia del universo, pasando por las jerarquías de inteligencias angélicas de los cielos, hasta los grados del hombre, los animales, las plantas y los minerales de la tierra. Para Descartes, el mundo físico y orgánico era un sistema homogéneo y mecánico compuesto de entidades cualitativamente similares, siguiendo cada una de ellas las leyes cuantitativas mecánicas reveladas por el análisis del método matemático. El mundo no era, como habían creído los filósofos escolásticos, una diversidad heterogénea aunque ordenada de entidades, cada una de las cuales hallaba su lugar en el orden cósmico mediante el análisis puramente cualitativo de una clasificación en términos del tipo de alma que poseía, vegetativa, animal o racional. Aparte del mundo mecánico, Descartes suponía que existía un mundo espiritual en el que, de entre todos los seres materiales, sólo el hombre participaba en virtud de su alma. Así, a medida que la filosofía cartesiana fue ganando terreno, desapareció gradualmente la concepción tradicional de que el mundo estaba compuesto por una escala vertical de criaturas, siendo sustituida por la idea de que el universo estaba compuesto, por así decir, de dos planos horizontales, uno mecánico y espiritual el otro, donde sólo el hombre participaba de ambos. Desde la época de Descartes, tal dualismo ha sido fundamental en el pensamiento europeo.

Antes de la época moderna, se consideraba que las operaciones del mundo natural se hallaban gobernadas por la costumbre, el principio de retribución y actos de planificación, voluntad o designio, más bien que por leyes naturales y fuerzas mecánicas. Descartes suponía que la naturaleza se hallaba gobernada completamente por leyes, identificando las leyes de la naturaleza con los principios de la mecánica. «Las reglas de la naturaleza –escribía– son las reglas de la mecánica.» Descartes fue de hecho el primero que utilizó consistentemente el término y el concepto de «leyes de la naturaleza», que, como el uso anterior de la noción de «costumbre» y «retribución», constituía una analogía basada en las prácticas de la sociedad civil. Los antiguos griegos rara vez utilizaron la expresión «leyes de la naturaleza». Las reglas cuantitativas que descubrieron se denominaban «principios», como el «principio de las palancas» y el «principio de flotación» de Arquímedes. Galileo denominaba a sus reglas cuantitativas «principios», «razones» o «proporciones». El «principio de inercia» de Galileo es lo mismo que la «primera ley del movimiento» de Newton, pues éste utilizaba la expresión «leyes de la naturaleza» con libertad, ya que se había tornado en un lugar común en su época, aunque algunos hacían algunas objeciones a ello. Robert Boyle consideraba el término como «una expresión figurada e impropia». Cuando se lanza una flecha con un arco, escribía, «nadie dirá que se mueve por ley, sino por un impulso externo».

Descartes suponía que Dios gobernaba el universo plenamente mediante «leyes de la naturaleza» que habían sido decididas desde el comienzo. Una vez creado el universo, la deidad no había interferido con la máquina autosuficiente que había hecho. La cantidad de materia y la cantidad de movimiento del mundo eran constantes y eternas, siéndolo también «las leyes que Dios ha puesto en la naturaleza». Durante la Edad Media se había llegado a pensar que Dios participaba día a día en el funcionamiento del universo, delegan-

do su poder en las jerarquías de seres angélicos que impulsaban los cuerpos celestes en torno a sus órbitas, observando y rigiendo los acontecimientos terrestres. Los sucesos extraordinarios eran entonces de gran interés, como los milagros o portentos más diabólicos, como la aparición de los cometas, que se consideraba debida a la interferencia divina o diabólica en el movimiento ordinario de los procesos cósmicos. Las personas del siglo XVII, por otra parte, estaban interesadas en el curso ordinario de los acontecimientos, buscando su modo «legal» de operación. Sucesos extraordinarios, como la nueva estrella de 1572 y el cometa de 1577, eran ahora problemas científicos más bien que objeto de lecciones teológicas, llevando al abandono de los sistemas teóricos que no podían explicar su aparición.

El historiador¹ de la idea de las «leyes de la naturaleza» ha sugerido que el término se derivó de dos fuentes primarias: en primer lugar, de una analogía basada en la práctica del gobierno civil mediante leyes promulgadas por los monarcas absolutos de los siglos XVI y XVII, y, en segundo lugar, de la concepción judía en el seno de la cristiandad de un Dios como legislador divino del universo y que provenía del antiguo despotismo de Babilonia.

La expresión «leyes de la naturaleza» se usaba con mucha frecuencia en el mundo antiguo, como ocurre con los estoi-

1. E. Zilsel, «La génesis del concepto de ley física», *Philosophical Review*, 1942, 51, 245.

Es posible que la idea de «leyes de la naturaleza» específicamente cuantitativas proviniese de otra fuente; a saber, las asociaciones internacionales de mercaderes, como la vieja Liga Hanseática, que tenía leyes propias que traspasaban los límites nacionales y que trataban de números, pesos y medidas. Gerard Malynes, en su *Lex Mercatoria*, publicada en 1622, escribía: «La verdadera ley es la recta razón de la naturaleza, concordando con ella en todos los puntos, difundida y extendida en todas las naciones, subsistiendo eternamente, con lo que *meum* y *tuum* se distinguen y distribuyen mediante el número, el peso y la medida, que habrá de hacerse patente.

cos, influidos por las ideas de los babilonios, especialmente por su astrología, siendo notable durante el período de los absolutismos antiguos la escuela que surge en la época de Alejandro Magno y que florece bajo los emperadores romanos. A lo largo de la Edad Media, la expresión no se usó mucho, ya que la sociedad civil estaba ordenada más bien por la costumbre que por la ley positiva, dado que el monarca delegaba su poder en los diversos estados del orden feudal, cada uno de ellos con sus privilegios y deberes tradicionales. Los monarcas absolutos de los siglos XVI y XVII eran más poderosos, gobernando a todos sus súbditos por medio de leyes promulgadas por ellos. Jean Bodin en la última parte del siglo XVI defendía el desarrollo del gobierno civil mediante leyes promulgadas, una política que se llevó a cabo del modo más completo en Francia, la patria de Bodin y Descartes. «No es un simple azar —escribió Zilsel— que la idea cartesiana de Dios como legislador del universo se desarrollase tan sólo cuarenta años después de la teoría de Jean Bodin de la soberanía.» Quizá tampoco haya sido una casualidad que unos cuarenta años antes de Bodin otro francés, J. Calvino, estuviese elaborando en el terreno teológico la concepción de Dios como rector absoluto del universo, gobernando mediante leyes promulgadas desde el comienzo. Como veremos, se daban notables semejanzas entre los valores cósmicos de los calvinistas y los del hombre de la revolución científica. Además, la filosofía cartesiana disfrutó del favor de los calvinistas interesados en la ciencia. Durante el siglo XVII, las teorías de Descartes se enseñaron en las universidades de la calvinista Holanda, así como en Cambridge, la más puritana de las dos universidades inglesas, mientras que en Francia eran defendidas sobre todo por los jansenistas, los calvinistas dentro del credo católico. La filosofía cartesiana no fue bien recibida por los teólogos católicos del siglo XVII, porque rivalizaba con eficacia con el sistema de Aristóteles que había dado forma a su teología. Descartes suministró

alternativas constructivas tanto al método como a la cosmología aristotélica, aunque tal vez tuviese menos éxito que su antiguo predecesor, ya que no reunió todas las corrientes intelectuales de la época en la filosofía natural. Bacon había presentado otra concepción del método científico, mientras que Galileo y Kepler, dentro de los límites de sus especialidades, habían formulado más adecuadamente para la ciencia el método matemático que aquél propugnaba. Además, Newton estaba destinado, después de él, a suministrar el sistema del mundo final y más duradero del siglo XVII empleando el método galileano más bien que el cartesiano.

Al estudiar la inflexión de un haz de luz en la superficie de separación entre dos medios transparentes, Kepler mostró que la ley de refracción aproximada de Ptolomeo, que suponía una proporcionalidad directa entre los ángulos de incidencia y refracción, era válida tan sólo para ángulos menores de unos 30°. Creía que el poder refractor de un medio era proporcional a su densidad, mas el matemático inglés Harriot le indicó que el aceite refracta más que el agua aunque sea menos denso.

La ley correcta de la refracción de la luz se descubrió en 1621 gracias a Willebrod Snell, 1591-1626, un profesor de matemáticas de Leiden que descubrió que los senos de los ángulos de incidencia y refracción mantenían siempre la misma razón entre sí para una superficie dada entre dos medios, denominándose esa razón el índice de refracción de dicha superficie de separación. Esta ley de refracción se dio a conocer por vez primera en 1637 gracias a Descartes, quien trataba de explicar esta ley y otros fenómenos ópticos suponiendo que la luz constaba de pequeñas partículas en rápido movimiento lineal. Sostenía que la refracción de la luz no era sino el rebote de las partículas de luz en una superficie elástica de acuerdo con las leyes de la mecánica. De manera similar, la refracción de la luz al pasar de un medio denso a otro ligero era algo análogo a una bola abriéndose paso a través de una tela delgada. La componente de la velocidad de la bola que forma ángulo recto con la tela se ve reducida por la resistencia de ésta, mientras que la componente paralela a la tela permanece intacta. De ahí que la velocidad total de la bola decrezca y que su trayectoria se incurva hacia la tela, del mismo modo que la luz se incurva hacia la superficie de separación al pasar de un medio más denso a otro más raro. La analogía entrañaba que la luz viajaba más aprisa en los medios densos que en los raros. Podemos hacernos cargo de este extremo, decía Descartes, si recordamos que una bola rueda más fácil-

mente por una mesa dura y densa que por una alfombra blanda y ligera.

Descartes disponía de una segunda teoría de la luz, según la cual la luz era una acción o presión transmitida desde un objeto al ojo a través de la materia densamente dispuesta del espacio intermedio. Sugería que la luz era como la presión transmitida desde un objeto a la mano de un ciego a través de su bastón. Descartes creía que era la presión de la luz proveniente del Sol la que mantenía al vórtice del sistema solar rígido frente a las presiones de los vórtices de las estrellas exteriores. Así, la fuerza centrífuga de los vórtices cósmicos no era sino la presión de la luz de sus regiones centrales. Los diferentes colores de la luz se producían por las diferentes velocidades de rotación de la materia en el espacio, siendo producido el rojo por el movimiento más rápido y el azul por el más lento. La teoría de que la luz era una acción transmitida por el éter del espacio fue desarrollada por los cartesianos, mientras que la teoría corpuscular de la luz fue tomada por Newton y sus seguidores.

La deducción cartesiana de que la luz ha de viajar más aprisa en un medio denso que en uno ligero fue puesta en tela de juicio por Pierre de Fermat, 1608-1665, un consejero del *parlement* provincial de Toulouse, en Francia. Fermat basaba su argumentación en un principio de economía según el cual se suponía que las acciones de la naturaleza eran de tal carácter que empleaban siempre el menor tiempo. Mostró entonces que las leyes de refracción y reflexión de la luz se seguían como consecuencias necesarias del principio del mínimo tiempo en caso de que se supusiera que la luz viajaba más lentamente en los medios más densos. Tal resultado se oponía a la teoría corpuscularista de la luz de Descartes y ciertamente a las teorías de la emisión de la luz en general, mientras que concordaba con las teorías que suponían que la luz era una acción transmitida por un medio etéreo, como era el caso de la teoría ondulatoria de la luz sugeri-

da por Christiaan Huygens y desarrollada por otros cartesianos.

El primero en sugerir una teoría ondulatoria de la luz fue Francesco Grimaldi, 1618-1665, un jesuita profesor de matemáticas en Bolonia. Grimaldi halló que la luz no viajaba exactamente en líneas rectas, ya que descubrió que las sombras eran un poco más anchas de lo que deberían ser suponiendo que la propagación de la luz fuese rectilínea. Además, descubrió que los bordes de las sombras se hallaban coloreados con frecuencia, por lo que sugirió que la luz era un fluido susceptible de un movimiento ondulatorio, constituyendo diferentes frecuencias los distintos colores, como las notas de las vibraciones del sonido. Señalaba que si los movimientos del fluido luminoso fuesen ondulatorios, entonces los bordes de las sombras serían confusos y de colores, pues las ondas de agua pueden rodear fácilmente los obstáculos con que se encuentran.

En 1665, Grimaldi supuso que el fluido luminoso se movía con gran velocidad, ondulando durante todo el tiempo. Christiaan Huygens se acercó más aún en 1678 y 1690 a la teoría ondulatoria clásica de la luz, sugiriendo que el fluido luminífero o éter es estacionario, consistiendo la luz en ondas propagadas longitudinalmente a través de este medio. El colega de Huygens en la Academia de Ciencias de París, Olaus Römer, 1644-1710, un astrónomo danés, había descubierto entre 1672 y 1676 que la luz viaja con una velocidad finita. Descubrió que las lunas de Júpiter poseían períodos de rotación más largos y eclipses menos frecuentes cuando la Tierra se alejaba de ellos que cuando se acercaba a ellos. Römer interpretó estos fenómenos en el sentido de que la luz se propagaba con una velocidad finita, empleando once minutos para atravesar la órbita terrestre. Huygens unió la suposición de que la luz viaja con velocidad finita y la idea de que la luz es un tipo de movimiento ondulatorio. Supuso que había un éter luminífero continuo a través de todo el espacio que

consistía en partículas duras y elásticas que transmitían impulsos sin desplazarse. Así, cada partícula oscilaba en torno a una posición media y transmitía su movimiento a las partículas vecinas, de modo que la perturbación de cualquier fuente se propagaba esféricamente a través del espacio con una velocidad finita. Pensaba que ese éter llenaba todos los cuerpos transparentes, de manera que la luz pudiese pasar a través de ellos. No obstante, las ondas de luz tenían que realizar desviaciones en torno a las partículas del cuerpo, con lo que se hacían más lentas, explicando así la refracción de la luz.

En 1670 Erasmus Bartholin de Dinamarca halló que un rayo de luz se dividía en dos merced a un cristal de espató de Islandia; un rayo, el denominado «ordinario», obedecía la ley de refracción, mientras que el otro, el «extraordinario», no lo hacía. Huygens explicaba este fenómeno suponiendo que las partículas de espató de Islandia tenían forma elipsoidal, de manera que los rayos de luz tenían que hacer mayores rodeos en una dirección que en otra. De esta manera, un rayo de luz se dividiría en dos mitades correspondientes a las trayectorias más largas y más cortas desde el momento en que penetraba en el cristal. No obstante, encontró que dos de esos cristales producían cuatro rayos cuando se orientaban arbitrariamente, así como que los rayos ordinario y extraordinario se intercambiaban cuando los cristales se ponían en ángulo recto. Estos fenómenos le resultaban inexplicables, no pudiendo tampoco dar razón de los colores producidos en los bordes de las sombras ni de los colores de las películas delgadas de aceite, aire y vidrio.

Newton accedió al estudio de la óptica por las imperfecciones de las lentes de los telescopios de su época que daban imágenes coloreadas y distorsionadas. Tales efectos se debían a que la luz pasaba por trozos de vidrio curvo, las lentes, y consideraba que tales defectos no se podían remediar en los telescopios de refracción. Consiguientemente diseñó y cons-

truyó en 1668 el primer telescopio reflector en el que la luz se concentraba por medio de un espejo cóncavo. A continuación, en 1672, procedió a investigar la dispersión de la luz blanca en colores mediante trozos de vidrio cuyas superficies no son paralelas. Con un prisma resolvió la luz blanca en los colores espectrales y, aislando cada color, mostró con un segundo prisma que los colores poseían sus propios grados característicos de refrangibilidad sin que se pudiesen descomponer de nuevo. Inicialmente Newton se sentía atraído por la teoría ondulatoria de la luz, mas en su *Óptica*, publicada en 1704, adoptó la teoría corpuscular, aunque retuvo elementos de la teoría ondulatoria. Suponía que las partículas de luz que se movían en línea recta excitaban movimientos vibratorios en el éter que podían reforzar o impedir los movimientos de las partículas de luz. Newton consideraba que ello explicaría por qué la luz en parte se reflejaba y en parte se refractaba en la superficie de separación entre dos medios. Las partículas reforzadas poseían el impulso necesario para pasar a través de la superficie de separación, mientras que las partículas estorbadas no, por lo que se reflejaban. Explicó de manera semejante las series concéntricas de anillos claros y oscuros que se producían cuando se ponía una lente biconvexa en contacto con la cara plana de una lente plano-convexa. A medida que variaba la distancia entre ambas lentes, Newton pensaba que los rayos de luz se verían alternativamente reforzados y disminuidos por sus vibraciones concomitantes, dependiendo de que la distancia entre las lentes fuese un número entero de longitudes de onda o no. Así, la luz pasaría y retrocedería alternativamente a partir del centro de contacto, produciendo una serie de anillos claros y oscuros. A fin de dar cuenta del fenómeno observado en el espato de Islandia, Newton supuso que las partículas de luz poseían «lados», de modo que un rayo de luz era como una barra de sección cuadrada. Pensaba que las partículas de espato de Islandia poseían una dua-

lidad similar, de manera que un rayo de luz tomaba dos caminos por el cristal.

Después de Newton no hubo muchos progresos en óptica durante un siglo. La mayor parte de los científicos adoptaron la teoría corpuscular de la luz, si bien los cartesianos suizos, John Bernoulli, 1710-1790, y Leonard Euler, 1707-1783, abrazaron la teoría ondulatoria. Pierre Maupertuis, 1698-1759, un matemático francés de la Academia de Ciencias de Berlín, recuperó el principio del mínimo de Fermat para la teoría corpuscular de la luz, suponiendo que la *acción* de un haz de luz, la distancia atravesada multiplicada por su velocidad, era un mínimo, en lugar del *tiempo*, la distancia atravesada dividida por su velocidad, como había creído Fermat. Con este supuesto, la luz viajaría más aprisa en medios más densos, tal y como sostenía Newton, así como Descartes en su teoría corpuscular de la luz.

La creencia de Newton en que los telescopios de lentes producirían siempre imágenes coloreadas fue puesta en entredicho por David Gregory, 1661-1708, un profesor de matemáticas de Edimburgo y luego de Oxford. Decía que el ojo humano es un sistema de lentes, a pesar de lo cual no produce la aberración cromática que se daba en los telescopios de lentes. De ahí que fuese posible construir una combinación acromática de lentes. Su tío, James Gregory, 1638-1675, que precedió a su sobrino como profesor de matemáticas en Edimburgo, se había interesado por el mismo problema y había diseñado, aunque no construido, un telescopio reflector en 1663, unos cuantos años antes que Newton. El método de fabricar telescopios de lentes acromáticas lo dio a conocer por vez primera en 1758 John Dolland, 1706-1761, un constructor de instrumentos londinense de origen hugonote, si bien el primer telescopio que producía imágenes carentes de colores lo construyó un caballero científico aficionado, Chester More Hall, en 1733.