

La ciencia antigua griega

Carlos Javier Alonso. Doctor en Filosofía (Universidad de Navarra), Licenciado en Filología Hispánica (Universidad de León) y Profesor titular del IES Ordoño II de León.



En el tema que nos ocupa en este artículo sobre la ciencia griega¹ prestaremos especial atención a la astronomía, por su relevancia futura, y dedicaremos algunas páginas también a tres importantes disciplinas, las matemáticas, la medicina y la biología. La astronomía será el hilo conductor desde la antigüedad hasta la revolución científica. La historia de la astronomía en esta época es de

suma importancia para la historia de la ciencia. Ha sido tradicionalmente una fuente de ejemplos y problemas para la reflexión filosófica, además de condición necesaria para la intelección del gran cambio que se produce en la ciencia renacentista y posterior; en consecuencia, merece cuidadoso estudio.

Por lo que hace a la biología, estudiaremos las teorías de Aristóteles. Para comprender correctamente el decurso de las teorías evolutivas del siglo XIX, necesitaremos un cierto conocimiento del esquema teórico más amplio que se mantuvo casi hasta ese momento, el aristotélico; y nos ha parecido oportuno incluir su estudio aquí, en el momento que cronológicamente le corresponde.

Introducción

No se conocen con certeza los orígenes de la nación griega. Su importancia en la historia de la ciencia empieza alrededor del año 600 a. C., pero la civilización helénica ya estaba establecida en el Mediterráneo oriental siglos antes de esa fecha. Los griegos no residían confinados en lo que hoy llamamos Grecia, sino que habitaban también la costa del Asia Menor y muchas islas del Egeo, y fundaron ciudades coloniales de población y cultura griegas en Italia y Sicilia. En el año 600 a.C. estas ciudades no se encontraban unidas políticamente, sino que coexistían en polis o estados-ciudad independientes, como Atenas, Corinto, Esparta, Mileto y

¹ En general, la ciencia griega recibe un tratamiento original y muy iluminador en las obras de G.E.R LLOYD: *Early Greek Science. Thales to Aristotle*, Chatto & Windus, Londres, 1970; trad. esp., Eudeba, Buenos Aires, 1977; ídem: *Greek Science after Aristotle*, Chatto & Windus, Londres, 1973; ídem: *The revolution of Wisdom: Studies in the Claims and Practice of Ancient Greek Science*, University of California Press, Berkeley, 1987, y, al menos, merecen ser citadas las de B. FARRINGTON: *Ciencia y política en el mundo antiguo*, Ayuso, Madrid, 1973; ídem: *Ciencia y filosofía en la antigüedad*, Ariel, Barcelona, 1977; ídem: *La ciencia griega*, Icaria, Barcelona, 1979.

Samos. La debilidad de aquellas aisladas ciudades excitó las ambiciones de los reyes persas. Entre el 546 a.C. y el final del siglo VI, Ciro y Darío conquistaron las polis griegas jónicas del Asia Menor. En 499 hubo una sublevación jónica apoyada por Atenas; pero fracasó, y los persas siguieron en su avance hacia el Oeste. Darío fue derrotado por los atenienses en Maratón el año 490 a.C.. Pero diez años más tarde, Jerjes reanudaba el ataque a Grecia. Un contingente espartano que intentó detenerle fue aniquilado en las Termópilas, y los atenienses se quedaron solos, cara a cara con el invasor. Ardió Atenas, pero los atenienses consiguieron salvarse gracias a las victorias de Salamina, en el mar, y de Platea, en tierra. Luego liberaron las demás ciudades egeas, y Esparta perdió parte de su prestigio por haberse negado a colaborar en esta empresa. Las ciudades del Egeo quedaron entonces unidas bajo la hegemonía de Atenas en la Liga Délica de Delos, que luego se convirtió en un imperio ateniense.

Dentro de este contexto histórico, la ciencia griega nació entre los jonios del Asia Menor, cuando sus empresas mercantiles les pusieron en contacto con Egipto, Fenicia y Babilonia. Cuando los persas invadieron el Asia Menor, y mientras Atenas luchaba por su subsistencia contra los persas, Pitágoras y sus discípulos continuaron el cultivo de la ciencia en la Italia sur. Terminada la guerra, Atenas alcanzó no sólo la cumbre de su poder militar y político, sino también su máximo período de influencia en la ciencia, las artes y las letras. Bajo Pericles, Atenas se convirtió en el centro de la vida intelectual griega. La ciencia de la edad ateniense fue enriquecida por los jonios tardíos asociados con Atenas en la Liga Délica.

No obstante, el momento de máximo esplendor de la ciencia griega transcurre en su mayor parte entre los siglos III-II a.C., en Alejandría, durante el reinado de los Ptolomeos y bajo la directa protección de esta dinastía. Este período helenístico de la ciencia griega se relaciona directamente con la fundación, por Ptolomeo I Soter, y con la inspiración y el consejo de Demetrio de Falero, miembro del Liceo aristotélico, del Museo, templo dedicado al honor de las Musas, destinado a convertirse (con Ptolomeo II) en el centro cultural del mundo helenístico, superando en importancia, magnitud y medios de investigación al Liceo de Atenas. Junto al Museo se construye una gran Biblioteca (500.000 volúmenes en sus comienzos), de la cual fueron famosos bibliotecarios Zenodoto, Apolonio de Rodas, Eratóstenes, etc.; su labor fundó las bases de la filología griega, y entre sus ediciones se cuentan las obras de Homero, *Ilíada* y *Odisea*, publicadas por Zenodoto, y la primera Gramática griega publicada por Dionisio de Tracia.

El Museo, centrado en la investigación matemática y científica, pudo reunir, gracias a la protección de los soberanos, a los grandes matemáticos, astrónomos, médicos y geómetras de aquella época, y el desarrollo que alcanzaron las ciencias en Alejandría, ya divididas por especialidades, superó en mucho al logrado por Atenas con la Academia y el Liceo; de hecho, la actividad del Liceo quedó paralizada cuando su segundo escolarca, Estratón de Lámpsaco, marchó a Alejandría, llamado por Ptolomeo. Además de la Biblioteca, el Museo disponía de grandes recursos materiales para la investigación: salas de lectura, de estudio, de disección de animales, observatorio astronómico, parque zoológico, jardín botánico, etc. Los Ptolomeos, por

La ciencia antigua griega

su parte, mantenían al casi centenar de profesores llegados de todas partes, pero, sobre todo, de la parte oriental del imperio, y financiaban aquel centro de cultura universal como una manera de aumentar su prestigio e influencia, así como por el interés por la aplicación práctica de la ciencia.

Por lo demás, los eventos científicos más reseñables en este período de la ciencia griega pueden considerarse los siguientes:

-585. Se produce el eclipse solar predicho por el sabio griego Tales de Mileto, el “padre de las ciencias físicas”.

-570. Nace, en Grecia, el futuro filósofo y matemático Pitágoras.

-440. El filósofo griego Leucipo realiza la primera formulación del atomismo.

-405. El filósofo griego Demócrito expone su teoría sobre los átomos.

-405. El médico griego Hipócrates de Cos elabora su teoría fisiológica basada en los cuatro humores.

c.-375. El médico, astrónomo y matemático griego Eudoxo de Cnido crea un prototipo de cosmos tolemaico utilizando una red de esferas invisibles para explicar los movimientos del Sol, la Luna, las estrellas y los cinco planetas que conocía.

-370. Se construye el primer trazado de muralla con forma de cremallera en Arcadia (Grecia).

c.-369. Fallece el matemático Teeteto el Ateniese, quien desarrollaría la teoría de los números irracionales

-312. Fallece el astrónomo griego Heráclides Póntico, quien había expuesto un sistema pseudoheliocéntrico que admite la rotación terrestre y atribuye dos satélites al Sol.

c.-310. Nace el futuro médico Erasístrato, quien se centrará, sobre todo, en estudios fisiológicos y patológicos.

c.-300. El matemático griego Euclides funda, en Alejandría (Egipto), su escuela de geometría y escribe *Elementos de geometría*.

-290. El anatómico Herófilo de Calcedonia realiza disecciones en Alejandría (Egipto).

c.-287. Nace, en la ciudad de Siracusa (Sicilia), el futuro sabio Arquímedes.

c.-285. El arquitecto griego Sóstrato de Cnido construye el faro de Alejandría (Egipto), gigantesca torre en cuya cúspide se encendía una gran hoguera.

Carlos Javier Alonso

-280. Aristarco de Samos realiza importantes estudios de astronomía y emite, por vez primera, la teoría heliocéntrica de nuestro sistema.

-225. El mecánico alejandrino Ctesibio desarrolla su teoría de los cuerpos cónicos.

c.-200. Ctesibio inventa el órgano hidráulico y una versión más precisa del reloj de agua, la clepsidra.

c.-200. El astrónomo griego Teodosio de Bitinia escribe tres libros sobre la geometría de la esfera.

c.-180. Muere el matemático griego Apolonio de Pérgamo, discípulo del sabio griego Arquímedes de Siracusa y autor de un importante tratado sobre la sección

c.90. Nace el futuro astrónomo, matemático y geógrafo griego Ptolomeo, quien desarrollará especialmente su actividad en Alejandría (Egipto).

201. Muere el médico griego Galeno, considerado como uno de los anatomistas más importantes de la Antigüedad. c.250. El matemático griego Diofanto de Alejandría introduce la notación algebraica en los conocimientos matemáticos.

1. La astronomía²

Los primeros científicos griegos eran inferiores a los babilonios como observadores astronómicos. Subestimaban la importancia de la observación y del experimento y suponían que podían obtener un conocimiento del mundo externo por deducción a partir de principios generales basados en sus particulares impresiones de lo que debía ser propiamente un universo organizado. Los babilonios habían prestado atención al primer elemento esencial del método científico: el paciente registro de hechos observados. Los griegos la prestaron al segundo elemento esencial del método, que consiste en hallar una teoría (o hipótesis) para la organización de los hechos. Este paso, llamado generalización inductiva exige ingenio imaginativo. Difícilmente puede ser

² Sobre la astronomía griega es especialmente claro y fiable el libro de E. PÉREZ SEDEÑO: *El rumor de las estrellas: teoría y experiencia en la astronomía griega*, Siglo XXI, Madrid, 1986; también el clásico de O. NEUGEBAUER: *A History of Ancient Mathematical Astronomy*, Springer Verlag, Berlín, 1975, aunque su alto nivel técnico no es el más adecuado aquí. E. BATTANER: *Planetas*, Alianza, Madrid, 1991 y T. KUHN: *La revolución copernicana*, Ariel, Barcelona, 1978, aunque no tratan principalmente sobre la astronomía griega, son, sin embargo, buenas lecturas introductorias, libros muy recomendables para adentrarse en la astronomía planetaria con agrado. Además, nos parece oportuno ofrecer la referencia de alguna guía de observación para que el lector pueda aproximarse directamente a algunos fenómenos de los tratados aquí, por ejemplo: B. PELLEQUER: *Guía del cielo*, Alianza, Madrid, 1991.

La ciencia antigua griega

obra de un solo hombre. Generalmente, el éxito en ese paso se basa en éxitos parciales anteriores que no deben ser nunca minusvalorados.

Seducidos por el éxito de los axiomas en el desarrollo de un sistema geométrico, los griegos llegaron a considerarlos como verdades absolutas. Por este motivo, en la astronomía tomaron como axiomas las nociones siguientes: 1) la Tierra es inmóvil y, al mismo tiempo, el centro del Universo. 2) En tanto que la Tierra es corrupta e imperfecta, los cielos son eternos, inmutables y perfectos. Puesto que los griegos consideraron el círculo como la curva perfecta, y teniendo en cuenta que los cielos eran también perfectos, dedujeron que todos los cuerpos celestes debían moverse formando círculos perfectos y, por tanto, se vieron obligados a considerar que realizaban tales movimientos en combinaciones cada vez más complicadas de círculos, lo cual fue formulado, como un sistema excesivamente complejo, por Claudio Ptolomeo, en Alejandría, hacia el 150 de nuestra era.

Una teoría no es nunca definitiva, ni siquiera cuando coincide en líneas generales con todos los datos conocidos. Puede ser modificada o hasta descartada a la luz de nuevos hechos. Pero la construcción de teorías, ese paso de la imaginación, es necesaria para el progreso de la ciencia; pues una teoría que coincide con los hechos ya conocidos es siempre adecuada para sugerir la existencia de hechos aún no observados ni sospechados y para promover su investigación. Hay que agradecer a los griegos el haber sido los primeros en apreciar el valor de la teoría. El hecho de que sus propias teorías de los movimientos celestes no tuvieran un éxito completo es de escasa importancia. Lo que cuenta es que sugirieron la construcción y el manejo de un arma científica nueva y poderosa.

Los antiguos griegos hicieron importantes aportaciones a la astronomía. La *Odisea* de Homero se refiere a constelaciones como la Osa Mayor, Orión y las Pléyades y describe cómo las estrellas pueden servir de guía en la navegación. El poema *Los trabajos y los días* de Hesíodo informa al campesino sobre las constelaciones que salen antes del amanecer en diferentes épocas del año para indicar el momento adecuado de arar, sembrar y recolectar.

Sin embargo, las aportaciones científicas se asocian con los nombres de los filósofos griegos. Tales de Mileto y Pitágoras de Samos, pero no se conserva ninguno de sus escritos. Hacia el año 450 a.C., los griegos comenzaron un fructífero estudio de los movimientos planetarios. Filolao (siglo V a.C.), discípulo de Pitágoras, creía que la Tierra, el Sol, la Luna y los planetas giraban todos alrededor de un fuego central oculto por una "antitierra" interpuesta. De acuerdo con su teoría, la revolución de la Tierra alrededor del fuego cada 24 horas explicaba los movimientos diarios del Sol y de las estrellas. Hacia 370 a.C., el astrónomo Eudoxo de Cnido explicaba los movimientos observados mediante la hipótesis de que una enorme esfera que transportaba las estrellas sobre su superficie interna se desplazaba alrededor de la Tierra, girando diariamente. Además, explicaba los movimientos solares, lunares y planetarios diciendo que dentro de la esfera de estrellas había otras muchas esferas transparentes interconectadas que giran de forma diferente.

El más original de los antiguos observadores de los cielos fue otro griego, Aristarco de Samos. Creía que los movimientos celestes se podían explicar mediante la hipótesis de que la Tierra gira sobre su eje una vez cada 24 horas y que junto con los demás planetas gira en torno al Sol. Esta explicación fue rechazada por la mayoría de los filósofos griegos que contemplaban a la Tierra como un globo inmóvil alrededor del cual orbitan los ligeros objetos celestes. Esta teoría, conocida como sistema geocéntrico, permaneció inalterada unos 2.000 años.

En el siglo II d. C. los griegos combinaban sus teorías celestes con observaciones trasladadas a planos. Los astrónomos Hiparco de Nicea y Ptolomeo determinaron las posiciones de unas 1.000 estrellas brillantes y utilizaron este mapa estelar como base para medir los movimientos planetarios. Tomaremos como referencia el orden cronológico en que se fueron produciendo las distintas contribuciones.

1.1. La astronomía de los presocráticos

Corrientemente se admite que la ciencia griega se originó en las ciudades jónicas del Asia Menor, particularmente en Mileto, donde era más estrecho el contacto con las antiguas civilizaciones y en las nuevas colonias que los griegos habían fundado en Italia y en Sicilia. El gran valor del primer período del pensamiento griego reside en que intentó responder a todas las cuestiones de un modo sencillo y correcto.

Las investigaciones de los filósofos presocráticos abarcan una considerable diversidad de temas. El haber abierto un número tal de campos de investigación es, en efecto, uno de los logros más notables de estos filósofos, y ellos fueron los primeros en plantearse como problemas cuestiones como la naturaleza de los cuerpos celestes, las causas de fenómenos del tipo de los terremotos, los eclipses, el trueno y el relámpago, el origen de los seres vivos en general y del hombre en particular, la naturaleza de la sensación y otros equivalentes. Si examinamos la práctica seguida por los filósofos griegos en las teorías y explicaciones que efectivamente aducían, podemos observar ciertas características constantes en su tratamiento de los fenómenos naturaleza.

Los primeros testimonios a los que hemos de atenernos corresponden a los filósofos milesios. No sin razón cabe atribuir a los milesios los primeros intentos sistemáticos de dar explicaciones de una amplia diversidad de fenómenos naturales. En los escritores prefilosóficos se halla implícita alguna noción de la naturaleza del relámpago o del trueno o de la enfermedad. Sin embargo -por dar un nombre-, Homero no muestra tanto interés en discutir la naturaleza de los fenómenos o las circunstancias generales que presiden su aparición, como en contarnos por qué un fenómeno concreto ha tenido lugar en una ocasión concreta, y las causas que podríamos llamar próximas de muchos fenómenos de ese tipo se encuentran por lo regular en un plano sobrenatural, radican en el *fiat* de los dioses.³ Los filósofos jónicos, en cambio, centraron su atención no ya en este o aquel resplandor particular de un relámpago, sino en la naturaleza del

³ Cfr. G.E.R. LLOYD: *Polarity and Analogy*, Cambridge University Press, 1966, p. 298.

La ciencia antigua griega

resplandor mismo del relámpago, suprimiendo de sus planteamientos la referencia a los dioses o a motivaciones divinas, aunque sus explicaciones suelen ser bastante rudimentarias. Muchas de sus teorías parecen consistir principal o enteramente en una sugerencia de que un fenómeno determinado es semejante a algún otro objeto más familiar y la investigación, una vez que se ha propuesto una analogía de algún tipo, da la impresión a menudo de haber tocado a su fin.

A diferencia de la de los babilonios y egipcios, la astronomía jónica no contaba con una base sólida de observaciones. Tales⁴ fue considerado uno de los Siete Sabios de Grecia por haber previsto un eclipse total de Sol el 28 de mayo de 585 a.C., historia que parece ser apócrifa. Pero, si fue capaz de hacerlo, es porque había tenido acceso a los protocolos babilónicos, y su prestigio, en la medida en que estuviera basado en aquel éxito dependía, pues, de fundamentos que no eran suyos ni griegos. La única verdadera contribución de Grecia a la astronomía fue una idea. Los jonios concibieron la idea de que la Tierra podía sostenerse sola, sin apoyo, en el espacio vacío. Es ésta una gigantesca hazaña de la imaginación, si se tiene en cuenta que repugna al sentido común suponer que una cosa cualquiera, y menos que nada un sólido como la Tierra, pueda mantenerse sin un zócalo o base.⁵

Tales empezó a derribar el firme zócalo de la Tierra su poniendo que ésta flotaba en el Océano, y no estaba rodeada por él meramente en sentido horizontal. Anaxímenes fue más lejos, enseñando que la Tierra es “como una gran hoja que flota en el aire”. Recordemos que el aire era tan esencial para Anaxímenes como el agua para Tales. Anaximandro desató aún más completamente la Tierra. Creía que las estrellas fijas estaban en una esfera rotatoria y que la Tierra, de forma cilíndrica y aplastada, se mantenía por sí misma en el centro de esa esfera, simplemente por el hecho de que no había ninguna razón para que se moviera en un sentido determinado en vez de en otro. Esta razón dada en apoyo de su hipótesis tiene un halo notablemente moderno.

Tales fue el primer griego en mantener que la Luna brilla por reflejo de la luz del Sol, fenómeno establecido ya por la ciencia babilónica. Pero, lo que aseguró su fama fue, según la leyenda, la predicción de un eclipse total de Sol, que tuvo lugar exactamente en la fecha que él

⁴ Tales de Mileto (c. 624 a.C.- c. 546 a. C.), fue el fundador de la escuela de su ciudad natal (situada en Asia Menor). Se sabe poco de su vida y orígenes, por lo que todo lo que se le atribuye puede ser materia de discusión. A Tales la antigüedad le cuenta entre los siete sabios. Aristóteles lo llama el “padre de la Filosofía”, y Platón nos cuenta la historia de la muchacha tracia que se rió de él, porque, embebido en la consideración de las cosas supraterráneas, se cayó en un hoyo, haciendo una inelegante figura. Queriendo enseñar a los hombres lo más sublime, no vio lo que tenía a los pies. Lo cierto es que no le faltó a Tales el sentido práctico. Dirigió en Mileto una escuela de náutica, construyó un canal para desviar las aguas del Halis y dio muy acertados consejos políticos. Desempeñó un papel importante en la política de su país y, al parecer, se dedicó al comercio de aceite y aceitunas. Tales recogió los conocimientos geométricos de los egipcios, y les imprimió un carácter particular. Desarrolló los inicios de la matemática deductiva, que sería sistematizada por Euclides dos siglos y medio más tarde.

⁵ Cfr. L. W.H. HULL: *History and Philosophy of Science*, 2ª ed., Longmans, London, 1959; trad. esp.: *Historia y Filosofía de la ciencia*, Ariel, Barcelona, 1989, p. 34.

anunció⁶. Cuando ocurrió, medos y lidios, que estaban a punto de lanzarse a la batalla, lo interpretaron como una señal de los dioses, y los ejércitos se retiraron. Parece ser que la hazaña de Tales tuvo precedentes, pues los babilonios habían descubierto métodos para la predicción exacta de los eclipses, por lo menos dos siglos antes. Sin embargo, para predecir la ocurrencia de un eclipse solar y su visibilidad desde determinado punto geográfico, se requiere más conocimientos astronómicos y sobre la forma de la propia Tierra de los que dispuso Tales. La predicción, por tanto, se debería alinear junto con la atribuida a Anaxágoras sobre la caída de un meteorito y otra endosada a Anaximandro sobre la ocurrencia de un terremoto. Creemos que la explicación más plausible la aporta Neugebauer y a ella nos remitimos. Esta explicación, claro está, cambia el *explanandum*, no se trata de explicar cómo fue posible la predicción del eclipse por parte de Tales, sino de dar cuenta de cómo se le pudo llegar atribuir tal logro.

En dos ocasiones, Aristóteles atribuye a Tales la doctrina de que la Tierra flota sobre el agua. En *Metaphysica*⁷ dice que Tales “declaró que la Tierra descansa sobre el agua”, si bien en *De Caelo*⁸ se muestra más cauto al atribuir esta idea a Tales. Si aceptamos la versión de Aristóteles -y no hay una buena razón para no hacerlo así-, Tales pensaba que la Tierra es algo que flota, la haya comparado específicamente o no a un trozo de madera. Si nos cuestionamos por qué razón sostuvo esta opinión, la respuesta puede ser que tratase de explicar por qué la Tierra no “cae”, o bien puede que hubiera querido poner en relación la Tierra con la sustancia primordial, el agua, y dar a entender la prioridad que corresponde a esta última. En cualquier caso, la idea de que la Tierra flota está expuesta a objeciones obvias. Aristóteles ya advirtió que quedaba abierta la cuestión de qué es lo que, a su vez, sostiene el agua sobre la que reposa la Tierra, y señaló asimismo que, de hecho, las porciones de tierra (a diferencia de los trozos de madera) no flotan en el agua.⁹

Aristóteles agrupa a Anaxímenes, junto con Anaxágoras y Demócrito, entre los filósofos que mantenían que la razón de la aparente estabilidad de la Tierra estriba en que es plana: “porque no corta el aire situado debajo de ella, sino que se asienta sobre él al modo de una tapa, como evidentemente hacen los cuerpos planos”.¹⁰ Otras fuentes añaden una serie de ilustraciones relativas a esta teoría. En Aecio,¹¹ por ejemplo, la Tierra “tiene forma de tabla”, y en otro lugar¹² el sol es “plano como una lámina”.

Las metáforas concretas de una tabla, una lámina o una tapa pueden haber sido originales o no, en todo caso es claro que la teoría en su conjunto se funda sobre una analogía con objetos planos de algún tipo. Exactamente como Tales parece haber planteado en el caso

⁶ Para la explicación del eclipse de Tales, recomendamos, por ejemplo, GILLISPIE, C. C.: *The Edge of Objectivity; an Essay in the History of Scientific Ideas*, Princeton New Jersey, 1960.

⁷ Cfr. ARISTÓTELES: *Metaphysica* 983 b 21 ss.; DK 11 A 12.

⁸ Cfr. ibídem, 294 a 28 ss.; DK A 14.

⁹ Cfr. ídem: *De Caelo* 294 a 32 ss.

¹⁰ Ibídem, 294 b 13 ss.; DK 13 A 20.

¹¹ Cfr. AECIO: III 103; DK A 20.

¹² Cfr. ibídem, II 221; DK A 20.

La ciencia antigua griega

de la Tierra sobre la base del conocimiento de que ciertos cuerpos sólidos flotan en el agua, así Anaxímenes hace uso de otro fenómeno familiar, el de la resistencia que el aire ofrece a los objetos planos, para explicar por qué la Tierra y algunos cuerpos celestes no “caen” en el espacio. Su explicación de los movimientos de los cuerpos celestes también descansa, en parte al menos, sobre el supuesto de que están sostenidos por el aire. En suma, Tales de Mileto y Anaxímenes fundaron al parecer sus interpretaciones de por qué la Tierra no “cae” sobre dos observaciones comunes, a saber: la de que ciertos objetos sólidos flotan en el agua y la de que los objetos planos tienden a ser sostenidos en el aire. Sin embargo, según todas las apariencias, ambos filósofos han ignorado la analogía negativa: ninguno de ellos da muestras cabales de haberse planteado seriamente la cuestión de cómo sus analogías pueden aplicarse efectivamente a la Tierra.

La versión de la cosmogonía de Anaximandro¹³ ofrecida por el pseudo-Plutarco contiene este pasaje: “dice que lo que produce lo caliente y lo frío a partir de lo eterno fue segregado al generarse este mundo y que, a raíz de esto, una esfera de llamas creció en torno al aire que circunda la Tierra como la corteza en torno a un árbol. Cuando ésta (es decir, la llama) se escindió y quedó encerrada en algunos círculos, se formaron el sol y la luna y los astros”.¹⁴ Muchos estudiosos convienen en que algunas de las ideas contenidas en esta versión proceden de Anaximandro mismo. Hipólito de Roma, Aecio y el pseudo-Plutarco coinciden en atribuir a Anaximandro la teoría de que la Tierra es cilíndrica, comparándola, por ejemplo, a una columna de piedra. Cuando, en el pasaje que nos ocupa, viene parangonada implícitamente con el tronco de un árbol, la alusión puede ser bastante afortunada. Así pues, los cuerpos celestes sol, luna y astros, forman una serie de círculos concéntricos en torno a este núcleo cilíndrico, y es tentador pensar que aún puede haber aquí otro punto en el que la analogía del árbol casa con la teoría astronómica de Anaximandro. Nos referimos al crecimiento regular de un árbol en anillos concéntricos, lo cual viene a ejemplificar el desarrollo de los distintos círculos de los cuerpos celestes, que también se disponen en distancias uniformes a partir del centro. Anaximandro, por consiguiente, parece haber elaborado con cierto detalle los puntos de semejanza entre el crecimiento de un árbol y el desarrollo del mundo.

¹³ Anaximandro vive igualmente en Mileto y casi contemporáneamente con Tales. Comparte con él unas buenas relaciones con las ciencias naturales. Parece haber llevado a cabo la construcción de un mapa de la Tierra, de un globo celeste y de un reloj de sol. En la determinación del principio de las cosas va por otro camino. El *arjé* para él es el *ápeiron*, que puede traducirse por lo espacialmente infinito (desde el punto de vista cuantitativo) y lo infinitamente indeterminado o indefinido (desde el punto de vista cualitativo). Lo indefinido es omniabarcante, divino e imperecedero. Lógicamente concibe el principio del ser de un modo más general y abstracto que Tales, pues si se pretende señalar el principio originario que valga para todo ser, es justo pensarlo de un modo tan indeterminado que pueda convertirse en cualquier ser. Dada su naturaleza indefinida y puesto que no es un elemento, tiene que ser o un intermedio o una mezcla. Prescinde de todo ser particular, y llega así a su *ápeiron*. Anaximandro camina, sin duda, por el sendero abierto por Tales, pero quizás ha ido demasiado lejos, pues lo totalmente indeterminado no puede ser algo real ni explicar la realidad. Se han interferido las dos esferas, lógica y ontológica.

¹⁴ Cfr. PSEUDO-PLUTARCO: *Stromateis* II; DK 1 2a A 10.

En alusión a la teoría sobre los cuerpos celestes, Hipólito de Roma refiere que “los cuerpos celestes se generan como un círculo de fuego (...) envuelto por niebla. Y hay aberturas, unos conductos en forma de flauta, a través de las cuales se muestran los cuerpos celestes”.¹⁵ Por su parte, Aecio¹⁶ dice que el sol es “un círculo semejante a una rueda de carro que tiene la banda, esto es, la llanta, ahuecada, llena de fuego, y en determinado punto hace visible el fuego a través de una abertura como si fuera a través del tubo de un fuelle”. Si nos atenemos a estas caracterizaciones, los cuerpos celestes son considerados como ruedas o círculos de fuego atravesados por aberturas a través de las cuales aparecen el sol, la luna y los astros. Las ruedas mismas no son visibles por hallarse rodeadas de niebla. Anaximandro desarrolló su concepción con cierto detalle y la aplicó a los cuerpos celestes en general. Su modelo de ruedas provistas de aberturas no sólo servía para explicar algunos movimientos aparentes de los cuerpos celestes, sino para explicar otros fenómenos que tienen lugar en los cielos. Hipólito de Roma¹⁷ recoge la tesis de que las fases creciente y menguante de la luna obedecen a los procesos de apertura o cierre del orificio a través del cual se hace visible. La teoría de los círculos deja muchos problemas pendientes de solución: cabe preguntar, por ejemplo, cómo pueden verse el Sol y la Luna a través de los anillos opacos de los astros que se hallan más próximos a la Tierra. Sin embargo, la importancia de la teoría estriba en esto: es el primer intento de construir un modelo mecánico para describir por medio de él los movimientos de los cuerpos celestes y una diversidad de fenómenos que tienen lugar en los cielos.

En su conjunto, los méritos del sistema astronómico diseñado en el tiempo que va desde Pitágoras hasta Filolao no son escasos. Se presentarán, en consecuencia los elementos del sistema pitagórico y se aludirá a su trayectoria histórica posterior: unos, los más inverosímiles, fueron abandonados (por ejemplo la anti-tierra, y el fuego central); otros han muerto y renacido varias veces, reencarnados en distintos sistemas (por ejemplo, la Tierra esférica, excéntrica y planetaria); otros perduraron con modificaciones o desarrollos durante más de un milenio (la circularidad de las órbitas y la esfericidad de los orbes); y de otros, aún se nutre la ciencia (la convicción de que el universo, aun siendo histórico y no cíclico, presenta algún tipo de regularidad que lo hace cognoscible).

La astronomía pitagórica era especulativa, igual que la de los jonios. Contiene importantes ideas que más tarde han renacido. Pero esas ideas se apoyaban muy poco en razones científicas serias, y estaban mezcladas con muchas conjeturas sin valor. Los pitagóricos creían que la Tierra era esférica. Ofrecían dos argumentos en apoyo de esa tesis, ante todo el argumento de la analogía del Sol y la Luna. El segundo argumento era de tipo místico: la esfera, decían, es la más perfecta de todas las figuras, más perfecta incluso que el dodecaedro. Por tanto, todos los cuerpos celestes tienen que ser esféricos. Como hemos dicho, se trataba de una ciencia en la que no había necesidad de mirar y ver el mundo.

¹⁵ Cfr. HIPÓLITO DE ROMA: *Refutación de todas las herejías*, 1 6 4; DK A 11.

¹⁶ Cfr. AECIO: II 20 1; DK A 21.

¹⁷ Cfr. HIPÓLITO DE ROMA: *Refutación...*, op. cit., 1 6 5; DK A 11.

La ciencia antigua griega

Los pitagóricos pensaban además que la Tierra no era el centro de todas las cosas. Al igual que el Sol, la Luna y los planetas, la Tierra se mueve según ellos alrededor de un fuego central. Las órbitas eran necesariamente circulares, a causa de que el círculo es tan perfecto en el campo de las dos dimensiones como la esfera en el de tres. El Sol, la Luna, la Tierra, el fuego central y los cinco planetas entonces conocidos suman nueve elementos. Pero los pitagóricos estaban convencidos de que, aparte de las estrellas fijas, tenía que haber precisamente diez cuerpos celestes. Tenían un particular afecto por el número triangular diez. Consiguientemente añadieron a su sistema una imaginaria “anti-Tierra”. Creían que las distancias de los varios cuerpos celestes respecto del fuego central se encontraban en razones numéricas simples, y también que el sistema sentía música. Explicaban que no podemos percibir esta música de las esferas porque nuestro oído está acostumbrado a ella desde nuestro nacimiento. Sus tres ideas más importantes fueron: que la Tierra es esférica, que no está en el centro del universo y que se mueve. La primera se generalizó entre los científicos griegos. Las otras dos no fueron tomadas realmente en serio hasta que Copérnico las resucitó en el siglo XV. Incluso entonces les resultó difícil imponerse.¹⁸

De modo más detallado expondremos la astronomía y cosmología de los pitagóricos, dada la importancia histórica de la misma, pues, por desarrollo de sus planteamientos, surge tanto la línea heliocentrista como la geocentrista de la astronomía griega, y aún en el nacimiento de la astronomía moderna la influencia pitagórica fue más que notable. Las posibilidades que la astronomía de los pitagóricos ofrece a la reflexión filosófica son también dignas de atención. Su sistema surge de modo claramente especulativo, conectado con ideas cosmológicas, cosmogónicas, metafísicas, estéticas, psicológicas, religiosas y morales. Los problemas empíricos que presenta y las vías de solución intentadas, mediante la introducción de hipótesis *ad hoc* o desplazamiento de la explicación de las anomalías a otra zona del saber, deben ser estudiados.

El pluralista Anaxágoras¹⁹ creía que el Sol era una masa de metal incandescente y que la Luna tenía montañas y valles igual que la Tierra. Notó que la parte iluminada de la Luna es siempre la que está enfrentada al Sol, y dedujo de ello que la Luna es fría y no tiene más luz que la que refleja del Sol. Esto le permitió una explicación correcta de las fases de la Luna, las cuales se deben a los cambios de posición de la Luna respecto del Sol y de la Tierra. También interpretó que los eclipses de Luna tienen lugar cuando el satélite se encuentra en la sombra de la Tierra, y los solares cuando la Tierra se encuentra en la sombra de la Luna.

Anaxágoras emitió también una ruda hipótesis nebular, afirmando que los cuerpos celestes se habían formado por condensación a partir de una masa caótica en remolino. Creía que había otros mundos habitados por seres vivos, además del nuestro. La realidad primera de

¹⁸ Cfr. *ibídem*, pp. 50-51.

¹⁹ Nacido en Clazomene, cerca de Mileto, Anaxágoras establece su escuela en Atenas, donde permanece 30 años, invitado por Pericles, del que era amigo y maestro, hasta que es desterrado a Lámpsaco por impiedad, donde muere el año 428 a. C. Sus opiniones astronómicas eran materialistas.

la que todo procede sería una mezcla indefinida de infinitas sustancias, cada una de ellas ilimitadamente pequeñas en cantidad, invariables, inertes, cualitativamente distintas entre sí y eternas. Serían las semillas de todas las cosas, que el denominó "*Homeomerías*" (esto es, cosas que aun pudiéndose subdividir, siempre darían partes cualitativamente idénticas). Queda así explicado el origen de la pluralidad. ¿Pero cómo se explica el movimiento? ¿Cómo empezó a moverse esta masa compacta originaria de modo que las partículas fueran separándose y uniéndose para dar lugar a los distintos seres? Anaxágoras recurre a una causa exterior, el *entendimiento*, el *nous*, o mente que imprimió a esta masa inerte un movimiento de remolino. El recurso por parte de Anaxágoras al entendimiento abre perspectivas nuevas que más tarde serán recogidas por Platón y Aristóteles. En Anaxágoras aparece por vez primera, de modo explícito, la idea de Dios como principio rector del universo. Esto parecía llevar a una concepción del orden del universo como resultado de una inteligencia que actúa conforme a fines, de tal modo que el resultado de los procesos naturales sea siempre la consecución de lo mejor, de la máxima perfección y belleza.

El sistema de Anaxágoras contaba con más elementos que los de sus predecesores. No es necesario enumerar aquí todos ellos. Para apreciar su diversidad, bastará decir que entre esos elementos se encontraban el fuego, la sangre, el plomo y también la mente. Anaxágoras pensaba que ésta última era un constitutivo de todos los seres vivos. Pero en la teoría recurría a la mente lo menos posible, prefiriendo explicaciones materiales cuando podía elaborarlas. Sócrates y Platón, para los cuales la mente era el elemento supremo de la realidad, tenían por esa razón un concepto más bien pobre de Anaxágoras.

Uno de los libros que más fuertemente impresionaron a Sócrates fue *La Mente*, cuyo autor era Anaxágoras. En ese libro se explicaba cómo los cambios se suceden en las diversas partes de la naturaleza, en el cielo, en el aire, e incluso, en el cuerpo humano. El saber, por ejemplo, que las nubes siguen a los días calurosos, las lluvias a las nubes, que los días calurosos disminuirán las inundaciones y así sucesivamente, era no sólo interesante, sino verdadero. Esta secuencia parecía reflejar una mente superior que concertara y planeara todos estos cambios de un modo agradable y ordenado. La física de Anaxágoras revelaba en apariencia cosas incluso más recónditas. Él afirmó que la gran piedra negra que inesperadamente cayó sobre Aegospotami alrededor del año 464 a. C., era un pedazo de la Luna o del Sol o del algún otro astro. Evidentemente, esto resultaría mucho más agradable a cualquier mente deseosa de secuencias ordenadas que la posibilidad de que Júpiter o algún otro dios caprichoso arrojara una piedra desde el Monte Olimpo. A Sócrates le agradó mucho, probablemente tanto como a un estudiante de segundo año que por primera vez entienda la dinámica de la circulación atmosférica y los eclipses de la Luna y del Sol. La primera es una secuencia puramente temporal, o por lo menos así puede parecerlo; y la segunda es una mera relación espacial entre el Sol y la Tierra.

Anaxágoras, como veíamos, había admitido una pluralidad de partículas originalmente mezcladas en una masa compacta. Al no admitir el vacío, estas partículas quedaban "aprisionadas"

La ciencia antigua griega

en la masa originaria compacta e inerte. Admitido el vacío, por el contrario, los átomos pueden moverse libremente en él. La pregunta: ¿por qué y cómo se inició el movimiento? tiene sentido en el caso de Anaxágoras (lo inició el *Nous* o Entendimiento), pero no tiene sentido ninguno en el atomismo: el movimiento no se inició en ningún momento, los átomos se mueven eternamente en el vacío. Como Empédocles o Anaxágoras, los atomistas Leucipo²⁰ y Demócrito²¹ admiten la pluralidad del principio, pero lo consideran cualitativamente indiferenciado. Para ellos, el fundamento de todo lo real serían los átomos -elementos positivos de toda la realidad-. Los atomistas rehabilitan el vacío para poder explicar con estos dos elementos -átomos y vacío- el movimiento y la multiplicidad del mundo de los fenómenos. Los innumerables átomos se distinguen entre sí por su forma, situación y disposición. Estos átomos son imagen perfecta del Ser de Parménides. Carecen de cualquier propiedad que no sea la extensión. Así cualquier nacer y perecer depende del acercamiento o separación de los átomos, el cambio de una cosa se explica por el cambio de posición y situación de sus átomos. En ese nacer y perecer, en ese cambio, rige una necesidad (*anankhé*), precursora de la ley natural. El papel desempeñado por el vacío es decisivo. No solamente hace posible la pluralidad, sino también el movimiento.

La doctrina democrítea es como sigue: los átomos son indivisibles e indestructibles. Se mueven en todas direcciones en el seno de un espacio vacío. Todo lo que existe es átomo y vacío. Hay diferentes tipos de átomos, distinguibles por diferencias de forma, y todos los átomos son tan pequeños que escapan a la percepción sensible. Las cosas que vemos o tocamos se componen de átomos agrupados y ordenados. El cambio físico no es más que la redistribución de los átomos. No hay alteración en el átomo mismo. Una vez puestos los átomos en movimiento, enseñan los atomistas antiguos, sus movimientos ulteriores están determinados por leyes mecánicas inmutables. El estado del universo en un momento determinado depende sólo de sus estados previos, y su futuro está determinado por su presente. El movimiento del átomo se mantiene uniforme hasta que choca -sin duda con otro átomo, puesto que la teoría niega la posibilidad de cualquier otra entidad con la que un átomo pueda chocar. De todas las ideas del atomismo antiguo ésta de la uniformidad del movimiento del átomo es la más importante, pues constituye una anticipación mental de la ley de la inercia más tarde formulada por Galileo.

Los atomistas desarrollaron teorías análogas a las del materialismo del siglo XIX. No disponían de medios para probar experimentalmente sus opiniones, y éstas tenían en aquella época tan escaso fundamento como las de los demás especuladores griegos. Por tanto, debe considerarse puramente casual el que mucho de lo que los dos enseñaron haya resultado luego confirmado científicamente. No obstante, si la ciencia griega hubiera seguido la trayectoria trazada por los atomistas, habría avanzado mucho más rápidamente. Pero no debe asombrarnos que el

²⁰ De Leucipo se sabe poco, excepto que era milesio y que floreció hacia el 440 a. C. Fue el creador de la escuela y de la doctrina atomista.

²¹ Demócrito, que llegó de Abdera (Tracia) y era un muchacho cuando Anaxágoras frisaba la vejez, desarrolló el sistema iniciado por Leucipo y lo dio a conocer. Visitó Atenas en tiempos de su contemporáneo Sócrates, pero consiguió escasa atención en la ciudad. Es posible que el desprecio del atomismo en Atenas se debiera a la influencia de Sócrates y de Platón, los cuales sin duda condenaban una concepción tan resueltamente materialista.

atomismo fuera pasado por alto en el mundo griego. Por buena que sea, una teoría no es por sí misma de utilidad para la ciencia mientras sus cultivadores no se convencen de que pueden usarla como hipótesis de trabajo. Y los atomistas griegos carecieron de los necesarios medios de persuasión. La teoría atómica nos parece plausible a nosotros a causa de que hemos sido educados en ella y hemos visto sus éxitos en la previsión de los fenómenos físicos. Pero seguramente es difícil imaginar una concepción que sea a primera vista menos aceptable por el sentido común. Leucipo y Demócrito no podían ofrecer razones convincentes en favor de su teoría, ni poseían tampoco el prestigio con que Platón y Aristóteles podían imponer sus opiniones aun sin disponer de mejores razones que las de los atomistas.²²

1.2. El sistema de Heráclides Póntico

En la vía de desarrollo hacia el heliocentrismo se halla el sistema de Heráclides Póntico.²³ Heráclides simplificó ligeramente el sistema suponiendo que los planetas interiores, Mercurio y Venus, giraban alrededor del Sol, en vez de girar, como todo cuerpo celeste, alrededor de la Tierra. Así podía explicarse más convenientemente el movimiento aparente de esos astros. Heráclides sugirió además que la esfera de las estrellas fijas no se movía, y que el movimiento diurno de los cielos debía de ser una ilusión producida por la revolución de la Tierra alrededor de su eje.

Copérnico cita a Heráclides como precedente suyo en este punto. Se trata de un sistema mixto con una Tierra en el centro pero animada de movimiento diario y un Sol orbitando en torno a la Tierra y en torno al cual giran, al menos, Mercurio y Venus. Se debe mencionar el parecido de este sistema con el que siglos más tarde propondría Tycho Brahe, así como la inseguridad de los historiadores acerca del número de planetas que orbitan en torno al Sol. Incluso se ha llegado a suponer que Heráclides propuso un sistema plenamente heliocéntrico. Milita en contra de esta opinión el poderoso argumento de la atribución de esta idea a Aristarco por parte de Arquímedes.

²² Cfr. L. W. H. HULL: *Historia y Filosofía de la ciencia*, op. cit., p. 64.

²³ Heráclides de Heraclea (388 - 310), nacido en el Ponto, filósofo y matemático griego platónico de la primera generación de la Academia. Sustituyó a Platón durante el tercer viaje que éste realizó a Siracusa. Contemporáneo de Eudoxo, también se ocupó de astronomía, geometría y aritmética, además de escribir relatos literarios llenos de fantasía. Unos años después de la muerte de Platón marchó a Heraclea donde fundó una escuela. Aceptó algunas tesis de Demócrito al afirmar que el mundo se compone de corpúsculos libres en el espacio, con cuyo medio la divinidad ha construido el mundo. Sin embargo, para él, los astros son auténticas divinidades, como divino es el éter infinito que llena todo el cosmos y del cual proceden las almas. Pero, sin duda, lo más importante de Heráclides Póntico es su teoría astronómica según la cual la Tierra está en el centro del universo, aunque es ella quien se mueve y gira en torno a su eje, permaneciendo fijo el resto del cosmos, a excepción de Venus y Mercurio, que giraban en torno al Sol, y de éste mismo, que giraba alrededor de la Tierra.

La ciencia antigua griega

Es aconsejable introducir aquí en nota a pie de página, las nociones de *epiciclo*²⁴ y *deferente*.²⁵ Así, se puede entender cómo el Sol ocupa el centro de un deferente que conduce al epiciclo en que se halla, por ejemplo, Venus.

1.3. “El problema de Platón”

En un texto de Gémino se formula explícitamente, quizá por primera vez, el llamado “problema platónico”²⁶ para la astronomía: la reducción de las trayectorias aparentes a movimientos circulares y uniformes. Platón se sentía perplejo ante la irregularidad del movimiento aparente de los planetas. El único tipo de movimiento que le parecía respetable era el circular y uniforme. Platón no habría podido creer que pudieran existir en los cielos otros tipos de movimiento. Pero el movimiento aparente de un planeta está muy lejos de ser uniforme. A esta dificultad real, Platón añadió una dificultad artificial ya considerable, al insistir en que la Tierra tenía que estar inmóvil y en que todos los movimientos tenían que ser combinaciones de movimientos circulares uniformes.

Nos enfrentamos aquí con la cuestión historiográfica de si realmente es atribuible a Platón o no la formulación de dicho problema. Esta discusión nos llevará a problemas más específicamente filosóficos, pues en un fragmento de *República* (526e-531b) aparece sugerida como tarea propia del astrónomo la de buscar el orden geométrico subyacente a las trayectorias aparentes, la de “salvar los fenómenos”. No obstante, el llamado problema platónico no se expresa en ninguno de sus textos de modo explícito. Se entiende entonces la pluralidad de interpretaciones que admite (e históricamente ha tenido) la expresión con que Simplicio describe el supuesto programa platónico: “salvar los fenómenos”.

1.4. Las esferas homocéntricas de Eudoxo y Calipso

El programa platónico para la astronomía, ya fuese formulado por Platón, por algún pitagórico anterior o por Eudoxo de Cnido, fue seguido por el propio Eudoxo. Aquí nos encontramos ya ante la primera teoría astronómica completa y cuantificada para dar cuenta con intención de precisión de los movimientos de los astros. Se explicarán, por tanto, el sistema de las esferas homocéntricas de Eudoxo así como las modificaciones introducidas en el mismo por Calipso.

Eudoxo de Cnido intentó elaborar una solución detallada del problema partiendo de todos esos postulados. El mecanismo adoptado por Eudoxo es un sistema de esferas que giran uniformemente unas dentro de otras. La esfera más externa, F, con centro en la Tierra, T, gira

²⁴ Del lat. *epicyclus*, este vocablo designaba el círculo que se suponía descrito por un planeta alrededor de un centro que se movía en el deferente.

²⁵ Aplícase al círculo que se suponía descrito alrededor de la Tierra por el centro del epiciclo de un planeta.

²⁶ Los Diálogos de Platón necesarios para este tema son *Timeo*, *República*, *Leyes* y *Epinomis*; remitimos a la edición de los *Diálogos* publicada en Gredos. Sobre la ciencia en Platón nos ha parecido muy esclarecedor FRIEDLANDER, P.: *Platón. Verdad del ser y realidad de la vida*, Tecnos, Madrid, 1989; ed.or.: De Gruyter, 1964.

diariamente de este a oeste alrededor de un eje N-S. Esta es la esfera de las estrellas fijas. Los puntos N y S son respectivamente los polos celestes norte y sur, y la línea N-S pasa por los polos de la Tierra. Se necesitaban con este sistema nada menos que cuatro esferas para dar a un planeta - Júpiter, por ejemplo- un movimiento más o menos parecido al correcto. Cada planeta requería una serie de esferas semejantes a la que hemos descrito para Júpiter. Finalmente, Eudoxo concluyó su sistema con 27 esferas concéntricas: una para las estrellas fijas, tres para el Sol, tres para la Luna y cuatro para cada planeta.

Esta teoría abandonó la tesis pitagórica de que la Tierra podía ser móvil y la fijó férreamente en el centro de todas las cosas. Pero hay que tener en cuenta que no existían entonces razones de peso para pensar que esa idea pitagórica tuviera más fundamento que cualquier otra de sus fantásticas especulaciones. El gran mérito de Eudoxo consistió en que por vez primera elaboró con todo detalle un modelo de los movimientos de los astros, respetando constantemente los resultados de la observación. El resultado fue algo completamente nuevo que implicaba una habilidad matemática de primera clase, así como una comprensión correcta del verdadero lugar de la matemática en el edificio de la ciencia. Eudoxo expresa los resultados de la observación en forma manejable y ordenada, abandonando el hábito de especular en astronomía por la mera razón racionante.

Calipso de Cícico, a fin de explicar el movimiento de los planetas alrededor de la tierra y, teniendo en cuenta que el movimiento de éstos se concebía ligado a diversas esferas, postuló que el número de esferas debía ser muy superior al de los planetas. Sólo de esta manera, se podía explicar el movimiento aparente de los planetas y se exigía que cada planeta estuviese movido por diversas esferas, que darían explicación de las apariencias contrarias a un movimiento circular perfecto y uniforme alrededor de la tierra. En el cómputo del número de esferas, Calipso perfeccionó el sistema ideado por Eudoxo, añadiendo dos esferas al Sol, dos a la Luna y una más a cada uno de los restantes planetas, con lo que el número de esferas concéntricas llegó a treinta y cuatro, contando la de las estrellas fijas. Pero el perfeccionamiento de las observaciones obligó más tarde a aumentar el número de esferas y la complicación del sistema: Aristóteles necesitaba 55 esferas para explicar el "sistema terrestre".

1.5. Las esferas retrógradas de Aristóteles

Partiendo de los cálculos de Calipso, Aristóteles señala la existencia de cincuenta y cinco motores inmóviles, además del motor inmóvil de la primera esfera, ya que, a las treinta y tres esferas de Calipso correspondientes a los planetas, el estagirita añadió otras veintidós esferas en sentido contrario, pensadas para evitar los efectos perturbadores del movimiento de unas esferas con respecto a las de los planetas inmediatamente contiguos.

Las modificaciones propuestas por Aristóteles para el sistema de Calipso tienen una gran importancia desde el punto de vista del estudio filosófico de la ciencia, ya que, en definitiva, no cambian en nada el sistema en el plano fenoménico o predictivo y atienden únicamente a la voluntad de realismo, a la necesidad intelectual sentida por Aristóteles de concordar ideas

La ciencia antigua griega

físicas propias (acerca de la ausencia de vacío y de la transmisión del movimiento) con la mejor astronomía del momento. El resultado que se perseguía era que el sistema de las esferas homocéntricas pudiese ser visto como una explicación realista de la apariencia de los cielos.

Se puede comentar la ganancia en coherencia y pérdida en simplicidad que supuso la introducción de las modificaciones aquí estudiadas. También cabe apuntar que la precisión predictiva del sistema distaba de ser perfecta y que algunos fenómenos permanecían sencillamente inexplicados. Es el caso de la variación del brillo de algunos planetas. Es este un buen ejemplo de cómo las deficiencias de un sistema se pueden orillar como anomalías mientras no se formule una teoría (o programa) alternativa que dé cuenta de ellas. Se verá más adelante cómo precisamente esto es lo que sucede al ser propuesta la hipótesis heliocéntrica. De hecho, la astronomía de las esferas homocéntricas fue recuperada en el Renacimiento por algunos aristotélicos, pero no fue tomada en consideración precisamente por su ineficacia para justificar las variaciones en el brillo y tamaño aparente de algunos astros. También es buen punto para reparar en que la discusión entre teorías alternativas es más bien una discusión entre tradiciones alternativas que se prolonga largamente en el tiempo. Veremos que la polémica entre la tradición geocentrista y heliocentrista responde efectivamente a esta caracterización. Sostenemos que se pueden apreciar como razonables gran parte de las decisiones de los científicos que intervinieron en ambas tradiciones. Sobre este asunto volveremos, una vez que nos hayamos referido a Aristarco.

1.6. El heliocentrismo de Aristarco

Se estudiarán en este apartado las mediciones astronómicas formuladas por Aristarco de Samos. Pero el centro de interés del mismo no puede ser sino la explicación de su sistema heliocéntrico. Se trata, según informa Arquímedes, del primer sistema heliocéntrico propuesto seriamente por un astrónomo competente, que, sin embargo, no tuvo seguidores (salvo Seleuco del Tigris). Es importante mostrar cuáles pudieron ser los argumentos, razonables dado el contexto, en su contra: la ausencia de paralaje observable y la falta de acuerdo o bien con la mecánica vigente o bien con los fenómenos observables (la Tierra al desplazarse debería producir un viento que no se observa, las trayectorias de los proyectiles serían también ciertamente extrañas...)

Sin embargo, existieron también buenas razones para, al menos, intentar la vía heliocéntrica. Concretamente: permitía ofrecer explicación de un fenómeno que se había mostrado intratable, a saber, la variación del brillo en algunos astros. Desde este momento, la tradición geocentrista se vio obligada a tomar en consideración este fenómeno. En efecto, la utilización de epiciclos y excéntricas permite una variación en la distancia Tierra-planeta, y con ello se abre una vía para la explicación de la variación del brillo.

Aristarco²⁷ expone su concepción astronómica en un libro titulado *Sobre el tamaño y las distancias del Sol y de la Luna*. Empieza por aceptar la explicación de las fases de la Luna ofrecidas por Anaxágoras. Aseguraba que el Sol dista de la Tierra mucho más que la Luna, y también que el Sol tenía que ser mucho mayor que la Luna, puesto que ambos astros parecen del mismo tamaño a pesar de sus diferentes distancias. Según Aristarco, el diámetro del Sol es unas 20 veces mayor que el de la Luna; en realidad es unas 400 veces mayor.

El eclipse de Luna es observable sólo cuando el astro penetra en la umbría o cono de sombra. Gracias a la gran distancia del Sol, los rayos que proceden de diversas zonas de su superficie, son aproximadamente paralelos. El cono de sombra disminuye o se estrecha muy poco a poco, y la sombra proyectada por la Tierra sobre la Luna durante un eclipse tiene un diámetro aproximadamente igual al de la Tierra. Comparando el radio aparente del disco lunar con el radio de la sombra de la Tierra, Aristarco estimó que el diámetro de la Luna debía de ser aproximadamente la mitad del de la Tierra. La proporción real es de un cuarto aproximadamente. También en este cálculo fue su método correcto, pero carecía de técnica para aplicarlo con exactitud.

Cuando Anaxágoras dijo que el Sol era tan grande como el Peloponeso, los griegos creyeron que exageraba. Por eso fue tan importante el último descubrimiento de Aristarco. Su tesis fue la primera manifestación del reconocimiento de la insignificancia astronómica de la Tierra. La idea de que la Tierra giraba alrededor del Sol, en vez de ser ésta la que girara alrededor de la pequeña Tierra, tenía que nacer en la mente del hombre que se había formado por vez primera una idea cualitativamente correcta de sus dimensiones respectivas. Por el testimonio de Arquímedes, se sabe que Aristarco afirmó que el Sol era inmóvil en relación con las estrellas fijas y que la Tierra se movía a su alrededor en una circunferencia.²⁸ El Sol sería el centro del cosmos; la superficie externa, el orbe de las estrellas fijas; y el interior estaría formado por siete órbitas concéntricas: Mercurio, Luna, Tierra, Marte, Venus Júpiter y Saturno, de distintas velocidades y dimensiones.

Parece que también pensaba en una rotación diaria de la Tierra alrededor de su eje Norte-Sur. De este modo, podía explicarse por qué los planetas variaban de brillo y de trayectoria, al ser vistos desde la Tierra. Sin embargo, el paradigma heliocéntrico no prosperó, pues se oponía tanto a la física de su tiempo, como al sentido común. Por su valor intrínseco y por su ulterior influencia, la obra de los alejandrinos en astronomía y matemáticas fue más importante que todo lo demás que hicieron. Era tan moderna de espíritu, que los grandes científicos de los siglos XVI y XVII pudieron seguir con toda naturalidad la obra de los alejandrinos completándola y tomándola en el estado en que éstos la habían dejado.

²⁷ Aristarco de Samos (s. III a. C.), era alejandrino en un sentido amplio. Discípulo de Estratón de Lámpsaco, se adhirió a la orientación científico-naturalista que éste había conferido a la escuela peripatética. Fue, sin duda, el astrónomo más importante del período alejandrino, y sus descubrimientos se conocieron muy pronto en la ciudad de los ptolomeos. Su fama se debe principalmente a la formulación de la hipótesis heliocéntrica, rápidamente abandonada por la astronomía clásica a favor del geocentrismo ptolemaico.

²⁸ Cfr. L. W.H. HULL: *Historia y Filosofía de la ciencia*, op. cit., p. 103.

1.7. Los epiciclos y excéntricas de Hiparco

Las nociones de *epiciclo* y *deferente* ya han sido presentadas al hilo de la exposición del sistema de Heráclides. En este apartado se analizará el sistema geocéntrico de Hiparco, con sus teorías para el Sol, la Luna y el resto de los planetas, sus avances en el plano observacional (invención de la dioptría, fijación de la excentricidad del radio de revolución del sol y de su punto de apogeo, elaboración de un catálogo de más de 1000 estrellas), y su descubrimiento del fenómeno llamado *precesión de los equinoccios*. La actividad de Hiparco se ubica dentro del programa general marcado por el problema platónico y dentro de la exigencia pitagórica de geometrización del cosmos. Destacaremos la importancia del descubrimiento de la *precesión*, un movimiento que tiene un ciclo de casi 25.000 años. Nos interesa dicho estudio para captar la dependencia que la astronomía tiene de una larga tradición observacional y de un sistema aceptable de transmisión de la misma.

Hiparco²⁹ floreció aproximadamente hacia el 140 a. C. Estudió en Alejandría, pero hizo sus descubrimientos en Rodas. Es el rival de Aristarco entre los grandes astrónomos antiguos. Cada uno de ellos ha brillado en su propio estilo. Aristarco era teórico más agudo. Hiparco era observador preciso y fecundo. Sus medidas angulares se nos dan con un margen de error de 1/15 de grado, lo que es asombroso teniendo en cuenta los instrumentos de medida de que disponía. Hiparco midió la inclinación de la eclíptica más precisamente que Eratóstenes³⁰. Determinó la duración del año con un error de seis minutos. Dedicó mucho tiempo a establecer un catálogo de 1080 estrellas fijas, con sus posiciones relativas. Este último trabajo es de admirable detalle, pues el número de estrellas fijas que pueden verse desde Rodas sin ayuda óptica no debe rebasar mucho el de 1000.

Lo que le movió a establecer una lista de estrellas fue la aparición de una brillante estrella nueva. El fenómeno refutaba directamente la teoría aristotélica de que el ciclo de las estrellas fijas no sufre cambio. La reacción de Hiparco da testimonio de la madurez del espíritu científico de los alejandrinos. La observación de las estrellas fijas posibilitó a Hiparco su más famoso descubrimiento. El polo, alrededor del cual parecen girar las estrellas, es aquel punto de los cielos hacia el cual apunta el eje de la Tierra. Anteriores astrónomos habían fijado las posiciones de

²⁹ Hiparco de Nicea (c. 190 a. C.- c. 120 a. C.), considerado como uno de los más importantes astrónomos de la antigüedad, determinó el tamaño del Sol y de la Luna y midió la paralaje de esta última. Se le debe el establecimiento de la trigonometría esférica, así como la invención de un astrolabio que permitía la determinación directa de las latitudes y longitudes de los astros. Confeccionó además el primer catálogo de estrellas, que incluía una propuesta de clasificación de dichos objetos de acuerdo con su brillo. Enunció también la teoría de las deferentes y epiciclos para justificar las órbitas de los planetas.

³⁰ Eratóstenes (276 a. C.- 196 a. C.) era bibliotecario en la ciudad griega de Alejandría, en Egipto. Desarrolló un experimento para medir la circunferencia de la Tierra, basado en la observación de que el Sol iluminaba el fondo de un pozo, en Asuán, al mediodía del solsticio de verano. Descubrió que a la misma hora, el ángulo era en Alejandría, unos 800 kilómetros al norte Asuán, de cerca de 1/50 de círculo. Dedujo que la distancia de Alejandría a Asuán debía de ser de 1/50 de circunferencia de la Tierra, que calculó en 40.000 kilómetros. Esa conclusión estaba asombrosamente cerca de la verdad, ya que los cálculos actuales han establecido que la cifra es 40.007 km.

algunas estrellas fijas. Cuando Hiparco comparó sus resultados con los de aquellos anteriores astrónomos, halló que la posición del polo respectivo de aquellas estrellas había cambiado. Había descubierto, en efecto, que la dirección del eje de la Tierra cambia lentamente en el espacio. Este movimiento se llama “precesión”.

El nivel de la astronomía teórica y observacional de Hiparco sólo se recupera un par de siglos más tarde de la mano de Ptolomeo. Pero entre uno y otro, cabe hacer mención de las aportaciones de algunos autores afines a la tradición estoica y de la “astrofísica” de Plutarco.

1.8. La tradición estoica y la “astrofísica” de Plutarco

Aludiremos en este apartado a una serie de ideas atribuibles a Plutarco³¹ que tienen un gran interés histórico. Se trata de una serie de críticas a la cosmología aristotélica vigente que sugieren puntos de vista que no serían planteados de nuevo y desarrollados hasta la época de la revolución científica. Lo más destacado son los argumentos (mecánicos, ópticos y cosmológicos) que aduce en pro de la identidad de naturaleza entre la Tierra y la Luna. De haber sido aceptados, se habría anulado la distinción entre mundo sublunar y supralunar en favor de sólo una legalidad. Sin embargo, ni Plutarco ni ningún otro estudioso en la antigüedad logró formar un sistema apto para sustituir la física y la cosmología aristotélicas y la astronomía geocéntrica. El “retraso” en esta línea de desarrollo, dado el nivel crítico que se había alcanzado ya en tiempos de Plutarco, sólo es explicable por factores externos a la propia ciencia: por las múltiples veces que la tradición antigua hubo de ser traducida, asimilada, comentada y revisada, por diversos pueblos durante la Edad Media.

1.9. La astronomía de Ptolomeo

El primer problema para el historiador de la ciencia consiste en deslindar las aportaciones de Ptolomeo de las de Hiparco e incluso astrónomos anteriores. Esta labor no siempre es factible, pues la obra de Ptolomeo ejerció lo que podríamos llamar un “efecto resumen”, de modo que escritos anteriores se consideraron ya contenidos en ella o superados por ella y dejaron de copiarse. Se puede mencionar el fenómeno paralelo que observamos en zoología con la obra de Aristóteles, en botánica con la de Teofrasto o en geometría con la de Euclides. Este esquema reiterado nos habla de los equilibrios necesarios entre tradición e innovación en función de los límites a que están sometidos los recursos disponibles y los soportes de información.

Entraremos, tras esta digresión historiográfica y filosófica, en la explicación del sistema ptolemaico y de los recursos geométricos utilizados en él. Repararemos en la utilización de un nuevo recurso geométrico, el *ecuante*, que tendrá importancia en la revolución copernicana, ya que en opinión de Copérnico rompe con las exigencias del programa Platónico. Se apreciará, por

³¹ En SAMBURSKY, S.: *El mundo físico de los griegos*, Alianza, Madrid, 1990, existe una selección suficiente de fragmentos del libro de Plutarco *Sobre la cara de la Luna*. En general, el libro de Sambursky tiene un gran interés para nuestro tema.

La ciencia antigua griega

tanto, hasta qué punto este programa marcó el desarrollo de la astronomía geocentrista tanto como la reforma heliocentrista. Comentaremos no sólo las ideas contenidas en el *Almagesto* sino también las que Ptolomeo expone en *Las Hipótesis de los planetas*,³² obra de considerable interés filosófico por cuanto en ella se aborda la contrapartida física del sistema geométrico expresado en *Almagesto*.

Claudio Ptolomeo³³ vivió durante el siglo II d. C. y su papel dentro de la astronomía es paralelo al de Euclides en matemáticas. En su obra *Composición matemática*, conocida como “*Almagesto*” por la traducción árabe (“el gran libro” o “el más grande”), recoge todo el mundo científico cosmológico que le precede, creando la gran síntesis que ha de destruir Copérnico con su revolución en el siglo XV. Ningún sistema -aparte del de Euclides- ha durado tanto. Dentro del paradigma platónico y siguiendo la delimitación de la ciencia aristotélica, recoge, organiza y sintetiza toda la teoría cosmológica conocida como teoría de deferentes y epiciclos, que puede rastrearse desde el siglo II a. C., con autores como Heráclides, Hiparco, etc.

Al sustituir las esferas de Eudoxo por un sistema más flexible de círculos, Ptolomeo planteó una serie de círculos excéntricos, con la Tierra cerca de un centro común, para representar los movimientos generales hacia el Este alrededor del zodíaco a diferentes velocidades del Sol, la Luna y los planetas. Tal sistema nace, por tanto, como alternativa al de las esferas homocéntricas de Platón y Eudoxo, y como consecuencia del intento de explicar las irregularidades de los planetas en su movimiento de retrogradación. El problema, en rigor, tiene dos facetas: por un lado, el parecer que los planetas retroceden, y al mismo tiempo, parece que brillan más.

Para explicar las variaciones periódicas en la velocidad del Sol y la Luna y los retrocesos de los planetas, Ptolomeo postuló la creación de dos circunferencias por cada planeta, una amplia, cuyo centro es la Tierra (llamada “deferente”) y otra de giro sobre un punto imaginario dentro de la primera (llamada “epiciclo”). Mediante la elección adecuada de los diámetros y las velocidades de los dos movimientos circulares atribuidos a cada cuerpo se podía representar su movimiento observado. En algunos casos se necesitaba un tercer cuerpo.

³² De *Las hipótesis de los planetas* de Ptolomeo (1987) existe edición accesible en español.

³³ Claudio Ptolomeo (siglo II). Astrónomo, físico y filósofo alejandrino, probablemente vivió toda su vida en Alejandría, donde enseñó y efectuó observaciones astronómicas entre los años 127 al 147, aunque poca cosa más se sabe de su vida. Escribió un libro conocido como *Tetrabiblon* que fue el tratado de astrología más influyente en la antigüedad. Pero su obra más importante fue la *Composición matemática*, conocida a partir de su traducción árabe como el *Almagesto*. En *Los armónicos* también escribió sobre acústica y elaboró una teoría numérica de la música. Así mismo escribió sobre óptica y sobre geografía y su *Guía geográfica* fue reimpressa hasta el siglo XVI. En el aspecto filosófico sus obras son muestra del sincretismo que dominaba su época, de manera que aunque su orientación central es aristotélica, también se hallan abundantes influencias del estoicismo (especialmente a través de Posidonio), el platonismo y el neopitagorismo. Además de las obras mencionadas escribió: *Hipótesis de los planetas* y *Las fases de las estrellas fijas*.

Esta teoría, muy resumida, permitía la explicación de los dos problemas de la retrogradación, pero planteaba otros distintos dentro de la propia teoría que la hacían no encajar totalmente con los datos observables. Así, el movimiento del Sol sobre la elíptica es ligeramente más rápido en invierno que en verano, y para sortear la dificultad se plantearon una serie de hipótesis *ad hoc*: 1ª. Un epiciclo menor para el Sol. 2ª Un deferente cuyo centro no sea la Tierra (que geoméricamente es el equivalente al epiciclo menor), cuyo nombre es “excéntrica”. 3ª La teoría de los ecuantos, propia de Ptolomeo, en la que se dice que la velocidad de la deferente no es igual con respecto al cuerpo geométrico, sino con respecto a un punto denominado “ecuate”.³⁴

La idea fundamental (la idea de un cuerpo que se mueve en un círculo cuyo centro se mueve en otro círculo) se debía a Hiparco, igual que muchas de las observaciones correctamente recogidas por su teoría. Pero Hiparco mismo no elaboró el detalle de la teoría de los epiciclos más que para el Sol y la Luna. Por eso, el sistema se llama “ptolemaico” con justicia, pues Ptolomeo fue el que ajustó los epiciclos planetarios hasta que recogieran exactamente los hechos observados y el que escribió la descripción completa de la teoría.

Ésta fue descrita por Ptolomeo en su gran obra, el *Almagesto*, en la que elaboró y describió de manera completa el sistema astronómico geocéntrico que estuvo vigente hasta Copérnico. Otra pensadora que, como Ptolomeo, mantuvo viva la tradición de la astronomía griega en Alejandría en los primeros siglos de la era cristiana, fue Hipatia, discípula de Platón. Escribió comentarios sobre temas matemáticos y astronómicos y está considerada como la primera científica y filósofa de Occidente.

2. La biología griega

Dedicaremos este apartado a los precedentes de la biología aristotélica dentro de la cultura griega, y a la propia biología de Aristóteles. El objetivo de esta exposición, además del interés que pueda tener en sí misma la biología griega y la aristotélica en particular, es doble. Por una parte, facilitarán la comprensión posterior de la biología del diecinueve; por otra, nos ayudarán a plantear la filosofía de la ciencia de Aristóteles en contraposición con su práctica científica. De dicho contraste pueden emerger consecuencias filosóficas interesantes.

2.1. La biología griega anterior a Aristóteles

La obra biológica previa a la aristotélica se refleja, de modo sumario, en los siguientes tópicos:

³⁴ El ecuate es un punto excéntrico al círculo deferente, que se convierte en el punto en torno al cual gira un planeta (por ejemplo, Júpiter) alrededor de la Tierra.

La ciencia antigua griega

a) Conocimientos populares obtenidos en la práctica de la pesca, caza, agricultura, cría de ganado, muchas veces conservados en obras de arte (decoración de ánforas, literatura homérica ...), sabiduría popular griega sobre los caracteres de los animales, y medicina y farmacia popular griega cuyos orígenes hay que buscar en los conocimientos de los recolectores de raíces medicinales (*rizotomoi*) y vendedores de remedios (*pharmakopoi*).

b) Primera historiografía jonia, con sus observaciones geográficas y etnográficas ligadas al comercio, colonización y primeros viajes de exploración. Cabe mencionar, en especial, a Demócrito y Heródoto o Ctesias. El saber biológico obtenido durante estos viajes se incorporaba a los periplos o descripciones de costas.

c) Los escritos de los filósofos presocráticos. Existe una auténtica biología presocrática, cargada de implicaciones filosóficas que esperan ser rescatadas del olvido, pero que Aristóteles conoció muy bien. Hay que destacar a Anaximandro de Mileto, Jenófanes de Colofón, Pitágoras y el pitagórico Alcmeón de Crotona, Parménides, Empédocles de Acragas, Anaxágoras, Diógenes de Apolonia y Demócrito de Abdera.

d) Los estudios clasificatorios que se llevaron a cabo en la Academia, bajo la dirección de Platón y Espeusipo, muy criticados por el propio Aristóteles.

e) La medicina científica griega, de modo destacado la escuela hipocrática.

f) Las doctrinas sobre la procreación y la herencia de varios de los presocráticos y de médicos como Pólipo o Hipón de Regio.

g) Los escritos sobre cría y selección de caballos, las obras sobre dietética y la literatura botánica especializada.

Muchas de las teorías particulares que los filósofos presocráticos propusieron en relación con fenómenos biológicos, fisiológicos y médicos, se basaban en opuestos. Hay ejemplos notables entre las teorías ofrecidas para explicar la diferenciación sexual. Parménides mantuvo probablemente la opinión de que el sexo del niño viene determinado por el lugar que ocupa en el lado derecho o en el lado izquierdo del útero de la madre (la derecha corresponde al sexo masculino; la izquierda, al femenino)³⁵. Empédocles parece haber sostenido que el factor determinante es la temperatura del útero en el momento de la concepción del embrión (los embriones masculinos se forman cuando el útero está más caliente; los femeninos, cuando está más frío)³⁶. Anaxágoras hace una tercera sugerencia, la de que el factor predominante es el lado desde el que se ha secretado el semen del progenitor masculino (el derecho se reserva una vez más para los varones; el izquierdo, para las hembras)³⁷.

³⁵ Cfr. PARMÉNIDES: *De la Naturaleza*, en G. S. Kirk y J. E. Raven: *Los filósofos presocráticos*, op. cit., frag. 17.

³⁶ Cfr. EMPÉDOCLES: *De la Naturaleza*, en *Los filósofos presocráticos*, op. cit., frag. 65 y 67.

³⁷ Cfr. ARISTÓTELES: *Sobre la generación de los animales*, 763 b 30 ss.

Fue un lugar común de la teoría médica griega la opinión de que la salud consiste en el equilibrio entre ciertos factores opuestos existentes en el cuerpo. Una doctrina así parece haber sostenido Alcmeón (s. VI a. C.), pues Aecio informa que este autor mantuvo que la salud estriba en la isonomía o “iguales derechos de factores opuestos diversos en el cuerpo: húmedo-seco, frío-calor, amargo-dulce, etc.”, y que la enfermedad proviene de la monarquía o “gobierno supremo” de una de ellos. El término “isonomía” se asocia a menudo con ideales democráticos, lo que no nos debe llevar necesariamente a inferir del uso de ese lenguaje que Alcmeón era un demócrata o estuviera apelando encubiertamente a la democracia. Sencillamente, como advierte Lloyd, no tenemos evidencia de sus inclinaciones políticas en ningún sentido.³⁸

La medicina antigua está dominada por la figura de Hipócrates de Cos. Nació Hipócrates el 460 a. C., de tal modo que fue contemporáneo de Pericles, Sócrates y Platón y algo posterior a Empédocles. Hipócrates creía ante todo en la importancia del estudio clínico, de la observación paciente a la cabecera del enfermo. Pensaba que el cuerpo estaba hecho con los cuatro elementos de Empédocles: tierra, aire, agua y fuego. Con esos elementos estaban asociados los cuatro humores: bilis negra, bilis amarilla, sangre y flema. Esos humores existen en el cuerpo en ciertas proporciones, y cada uno en su lugar. La enfermedad consiste en la desproporción, el desplazamiento o la impureza de los humores.

El cuerpo tiene una tendencia natural a curarse por sí mismo, eliminando humores superfluos, desplazados o impuros. La enfermedad se hace grave sólo cuando esos humores no pueden ser eliminados con la rapidez suficiente. El médico, dice Hipócrates, no puede eliminar la malformación originaria de los humores. Su tarea consiste en vigilar el curso de la enfermedad, observar cómo la naturaleza intenta liberarse de los humores perjudiciales y apoyarla entonces intentando multiplicar sus esfuerzos mediante la administración de los medicamentos o del tratamiento adecuados. El elemento esencial del éxito es la oportunidad de la acción del médico en cada fase de la enfermedad. El método tiene que identificar el momento en que la enfermedad hace crisis mediante la observación cuidadosa de los síntomas del paciente; en ese momento su ayuda sería sumamente eficaz. En resolución, el médico tiene que sorprender el momento en que la naturaleza está haciendo su esfuerzo decisivo, y ayudarla enérgicamente en él.

Hipócrates prestó también alguna atención a la medicina preventiva, prescribiendo una dieta adecuada y ejercicio como medios de evitar la enfermedad. Su práctica, que realmente manifiesta la mano maestra del gran artista de la ciencia, estaba tajantemente basada en la observación, eliminando tanto la superstición cuanto la común tendencia griega a establecer principios generales aventurados. Tenía la flexibilidad y la sensibilidad suficientes para recoger los cambios de situación, virtudes que son características de la medicina propiamente científica. Su medicina fue efectivamente la creación más científica de la época.

³⁸ Cfr. G.E.R. LLOYD: *Adversaries and Authorities. Investigations into Ancient Greek and Chinese Science*, op. cit., p. 131.

La ciencia antigua griega

Los tratados hipocráticos hicieron amplio uso de los pares de opuestos en teorías y explicaciones y suministran muchos ejemplos de teorías que presentan una configuración general similar. Hipócrates propone una teoría cosmológica basada en lo caliente, lo frío, lo húmedo y lo seco. El autor afirma que la generación sólo puede tener lugar cuando esos opuestos se hallan debidamente equilibrados y que, al morir, cada uno de los cuatro opuestos coexistentes en el cuerpo retorna a su elemento afín, “lo húmedo a lo húmedo, lo seco a lo seco”.³⁹

Sobre la dieta I es una obra, entre otras varias, que formula teorías acerca de los elementos de que se componen nuestros cuerpos. Su autor dice que todos los seres vivos están hechos de Fuego y Agua, siendo el primero caliente y seco (aunque “hay humedad en el Fuego”), y la segunda fría y húmeda (si bien “hay sequedad en el Agua”). Incluso en *Sobre la medicina antigua*, un tratado que impugna el uso en medicina de teorías basadas en lo caliente, lo frío, lo húmedo y lo seco, se sostiene que el cuerpo consta de componentes de muchos tipos, entre los que el autor incluye pares de opuestos tales como lo dulce y lo amargo, lo astringente y lo insípido.

2.2. La obra biológica de Aristóteles⁴⁰

Aquí se estudian las obras biológicas de Aristóteles⁴¹, que abarcan desde el terreno de la anatomía, fisiología, reproducción y etología de los animales hasta ciertas ideas sobre ecología. Y es que gran parte de lo mejor de Aristóteles se encuentra en el terreno de la biología. Fue ésta la primera biología teórica importante y sus grandes trazos siguieron influyendo sobre el desarrollo de esta ciencia hasta el siglo XIX. Éste fue el campo primordial en el que hizo uso de la observación. Después de abandonar la Academia platónica y antes de convertirse en preceptor de Alejandro, pasó bastante tiempo en el Asia Menor estudiando y disecando animales y plantas. Estudió también embriología y el problema de la herencia. Escribió luego sobre diversos temas zoológicos y botánicos. Sus conocimientos son considerablemente precisos cuando se basan en

³⁹ CORPUS HIPOCRATICO: *Sobre la naturaleza del hombre*, c. 3. L VI 36 17 ss.

⁴⁰ Aristóteles (Estagira, 384 a. C. - Calcis, 322 a. C.), polifacético pensador griego del siglo IV a. C., destacó por la amplitud de sus intereses y por el alcance de sus logros. Fue él quien inventó la lógica formal. Sus contribuciones a la filosofía de la ciencia, a la filosofía del lenguaje y a la filosofía de la mente fueron fundamentales, al igual que lo fueron sus trabajos en ética, política y metafísica. Su cosmología y su filosofía natural probablemente han ejercido más influencia que las de ningún otro pensador. En crítica literaria y teoría retórica sus ideas fueron con mucho las más sistemáticas e intelectualmente provocadoras de las producidas en la antigüedad. Y, en cuanto biólogo, Aristóteles supo más sobre los animales que ninguna otra persona antes que él en la cultura grecorromana y, por cierto, también más que cualquiera hasta el siglo XIX.

⁴¹ Acerca de las obras científicas de Aristóteles, puede resultar útil la obra de J. Mosterín: *Historia de la Filosofía*, vol. IV, Alianza, Madrid, 1984. En especial, para la biología, puede verse DEVEREUX, D. y PELLEGRIN, P., (eds.): *Biologie, Logique et Métaphysique chez Aristote*, C.N.R.S., París, 1990; A. GOTTHELF y J. LENNOX (eds.): *Philosophical Issues in Aristotle's Biology*, Cambridge University Press, Cambridge, 1987; A. MARCOS: *Aristóteles y otros animales. Una lectura filosófica de la Biología aristotélica*, prefacio de G.E.R. Lloyd, P.P.U., Barcelona, 1996; y JAHN, I., LOTHER, R. y SENGLAUB, K.: *Historia de la biología*, Labor, Barcelona, 1989.

observaciones personales suyas, pero admitió además algunas observaciones de menor confianza, por testimonio de los acompañantes de Alejandro en las campañas de Oriente.

De la obra aristotélica conservada, una gran parte está constituida por escritos de carácter biológico. Tres de ellos son grandes tratados a los que solemos referirnos por el nombre latino: *Historia Animalium* (Historia de los animales), *De Partibus Animalium* (Sobre las partes de los animales) y *De Generatione Animalium* (Sobre la generación de los animales). A éstos hay que añadir el tratado *De Anima* (Sobre el alma), que puede ser considerado como un puente entre la biología general, y la metafísica y la ética. Conservamos también dos pequeñas monografías: *De Incessu Animalium* (Sobre la locomoción de los animales) y *De Motu Animalium* (Sobre el movimiento de los animales).

Historia Animalium,⁴² con sus diez libros, fue, al parecer, el primero de los escritos biológicos de Aristóteles, redactado en su exilio en Asia Menor, cuando gozó de tiempo libre para dedicarse a la zoología. En rigor, constituye un tratado sólo descriptivo y ofrece una amplia clasificación del reino animal. Por eso, será la base de los otros escritos biológicos de Aristóteles, en lo que el Estagirita explicará lo que aquí está solamente descrito. La primera parte –libros I a IV– expone los modos de clasificación de los seres vivientes y luego estudia sus anatomías, comenzando por el hombre, puesto que “es más fácil de conocer”. La segunda parte –libros V a VII– muestra las diversas maneras en que los seres vivientes se reproducen, terminando por la reproducción del hombre que es la más compleja –a la que consagra la totalidad del libro VII–. Finalmente, en los libros VIII y IX, Aristóteles describe la manera en que viven los animales, su nutrición, costumbres, enfermedades hábitos y caracteres. El libro X –*Sobre la esterilidad*– no formaba originalmente parte de la obra, sino que se añadió tardíamente.

Aristóteles ha creado la anatomía comparada y ha empezado la clasificación sistemática de los seres vivos según su estructura. Su clasificación fue respetada hasta el siglo XVI, y fue la base de partida desde la cual Ray y Linneo desarrollaron el sistema moderno. Distinguía entre “animales con sangre” y “animales sin sangre”, clases que corresponden a las modernas de vertebrados e invertebrados. Los animales con sangre se dividían en cuatro subclases: mamíferos, aves, reptiles y peces. También indicaba cuatro clases de animales sin sangre: animales de cuerpo blando, animales con escamas (crustáceos), animales de concha e insectos.

De Partibus Animalium enuncia las causas de los fenómenos que la *Historia Animalium* no había hecho más que describir y clasificar. El tratado consta de cuatro libros, cuya autenticidad no ha sido puesta en duda, aunque sí su cronología. De los cuatro libros, el primero –como suele suceder con las introducciones– fue el último en ser redactado. En este tratado, Aristóteles llega a establecer una de las leyes que regulan la formación de los seres vivientes al descubrir que la naturaleza actúa respetando el principio del equilibrio: el enriquecimiento de ciertos órganos implica, según este autor, el empobrecimiento de otros. Se adopta una concepción “termodinámica” del funcionamiento del organismo. El ser vivo consta de un polo caliente, el

⁴² Cfr. ARISTÓTELES: *Investigación sobre los animales*, (trad. de J. Pallí), Gredos, Madrid, 1992.

La ciencia antigua griega

corazón, centro también de la sensación, y de dos sistemas de refrigeración que mantienen el equilibrio térmico: la respiración y la acción refrigerante del cerebro.

Tras convertir los nutrientes en sangre, mediante un proceso de cocción alimentado por el calor que se origina en el corazón y llevado a cabo en el estómago, aquélla se transforma, también mediante algo parecido a la cocción, en los diversos tejidos que forman los órganos y los miembros. También el semen es visto como un residuo elaborado mediante procesos de cocción a partir de la sangre. El fujo menstrual responde a semejante origen pero tras una cocción realizada a más bajas temperaturas, dado que, según Aristóteles, el corazón de la hembra es más frío. Sobre esta concepción fisiológica, comenta Jesús Mosterín, catedrático de Lógica y profesor de Historia y Filosofía de la Ciencia en la Universidad de Barcelona, que “es totalmente falsa, pero no irracional. No contiene elementos misteriosos o sobrenaturales, ni apela a otros conceptos o principios que los habituales en el estudio de los fenómenos empíricos”.⁴³

*De Generatione Animalium*⁴⁴, con sus cinco libros, está considerado una prolongación del tratado *Historia Animalium*, puesto que en él se estudian las modalidades de un fenómeno que éste último no hacía más que describir: la reproducción. Su estructura es la siguiente: El libro I versa sobre la reproducción en general, estableciendo algunas precisiones sobre la teoría de la causalidad, donde se caracteriza al macho como causa formal y a la hembra, como causa material en la reproducción. El libro II examina la reproducción de los animales vivíparos y el III la de los ovíparos y no sanguíneos. El libro IV se centra en la embriología y en la herencia, aludiéndose a la diferenciación del sexo durante el desarrollo del embrión, a cuestiones relacionadas con los errores hereditarios y otros asuntos próximos. El libro V trata de los caracteres congénitos, muchos de los cuales –color de los ojos, timbre de voz o aspecto del pelo- pueden no responder a causa final discernible, y deben ser explicados, en ese caso, únicamente en virtud de la necesidad y la eficiencia.

Como su propio nombre indica, *De Anima*⁴⁵ está consagrada al estudio del alma, su esencia, atributos y facultades. A continuación de una exposición general y de una breve historia de las doctrinas sobre el alma que han precedido a la suya, el Estagirita descarta la hipótesis del alma automotriz para avanzar su propia definición: el alma es sustancia, “entelequia” (potencia y acto), o también noción, forma, por oposición a materia, substrato. El alma es vegetativa, sensitiva o racional. En fin, el alma es “los seres mismos”. El tratado se compone de tres libros. El libro I expone programáticamente las cuestiones. Con *Historia Animalium* constituye un tratado sólo descriptivo y ofrece una amplia clasificación del reino animal. Por eso, será la base de los otros escritos biológicos de Aristóteles, en lo que el Estagirita explicará lo que aquí está solamente descrito. Recorre y critica las opiniones de sus predecesores, la teoría platónica, la del alma como armonía y la que le atribuye una constitución material, al tiempo que establece la posibilidad de la psicología (como saber acerca del alma). El libro II ofrece la teoría del alma sustentada por el propio Aristóteles. Sobre las

⁴³ J. MOSTERÍN: “Aristóteles”, *Historia de la Filosofía*, vol. IV, op. cit., p. 261.

⁴⁴ Cfr. ARISTÓTELES: *Reproducción de los animales*, (Trad. de E. Sánchez), Gredos, Madrid, 1994.

⁴⁵ Cfr. ídem: *Acerca del alma* (trad. de T. Calvo), Gredos, Madrid, 1994.

nociones de acto y potencia, de materia y forma, edifica el Estagirita su doctrina del alma como sustancia y de su unidad con el cuerpo. Tras esto comienza el estudio de las facultades del alma, la nutritiva, el conocimiento sensible y los cinco sentidos. El libro III trata de la sensibilidad común, de la imaginación, de la memoria y de la facultad pensante. Establece aquí la famosa distinción entre el intelecto activo y el pasivo, y su conexión con la imaginación y la sensación. Trata también acerca del movimiento y la voluntad e introduce observaciones suplementarias sobre nutrición y percepción.

Para Aristóteles, no existe una entidad global llamada “vida”, de la que cada viviente sería una ejemplificación, sino, al contrario, para él, el mundo está poblado básicamente por vivientes concretos, cuyo ser es vivir y lo despliegan en forma de nutrición, crecimiento y reproducción, percepción y locomoción, o conocimiento intelectual, cada uno a su modo. Comprenderlos y explicarlos implica saber de cada ser qué es y cómo ha llegado a ser y, en orden a ello, captar las causas de su ser y de su devenir.

Aristóteles estaba firmemente convencido de *que todos los seres naturales tienden a alcanzar la perfección que les es propia*: así, por ejemplo, un embrión realiza un proceso complejo de operaciones vitales (nutrición, desarrollo, etc.) encaminadas a la consecución de la forma y perfección característicos del adulto. Esta convicción fundamental de que los seres naturales tienden a alcanzar su propio estado de perfección surgió y fue elaborado por Aristóteles bajo la influencia de sus estudios biológicos. Aristóteles no albergó ninguna duda de que los procesos biológicos se encuentran presididos por una finalidad interna que los orienta y dirige. El modelo aristotélico de *physis* -basado en la biología- es, pues, un modelo teleológico. Aristóteles fue discípulo y colaborador de Platón durante 20 años y jamás abandonó el espíritu del platonismo. Abandonó, eso sí, la teoría de las Ideas cuando llegó a su madurez intelectual. Negada la existencia de las Ideas, no podía ya concebirse el bien del mundo como una realidad trascendente, es decir, existente fuera del mundo y que desde fuera se proyecta sobre él. En consecuencia, el bien pasó a ser interpretado por Aristóteles como el cumplimiento de la tendencia que lleva a todos los seres a su propia perfección. En la filosofía aristotélica la teleología es, pues, inmanente, es decir, el fin al que tienden los seres naturales es interno a ellos mismos, no es otra cosa que su propia perfección.

Entre los actuales filósofos de la biología e historiadores del darwinismo es frecuente la caracterización de la biología aristotélica como la antítesis del evolucionismo. Se le atribuye habitualmente una concepción fijista y esencialista de la especie. No obstante, una lectura más meditada de la obra del Estagirita está alejando a sus estudiosos progresivamente de ese cliché que se despacha a menudo con demasiada ligereza. Así, D. Balme considera que la calificación de la biología aristotélica como esencialista y fijista debe atenderse a severos matices, o incluso

La ciencia antigua griega

ser abandonada.⁴⁶ J. Lennox concibe que el no evolucionismo es, en la obra del Estagirita, menos radical de lo que frecuentemente se ha sugerido⁴⁷.

3. La medicina helenística

En el siglo III a. C., durante la época helenística, se llevaron a cabo grandes investigaciones sobre anatomía y fisiología, gracias a la protección dada por Ptolomeo Filadelfo para realizar disecciones y vivisecciones. Sus descubrimientos no tienen una superación seria hasta el siglo XVI, ya que también crearon los manuales principales que se siguieron utilizando y fueron una de las fuentes fundamentales de Galeno.

Herófilo de Calcedonia y Erasítrato de Cos, ambos de mediados del s. III a. C., son médicos afamados que basaron en la observación y experimentación sus investigaciones anatómicas y fisiológicas, llevadas a cabo en el Museo; se les atribuye no sólo la práctica de disección de cadáveres, sino también de vivisección de malhechores, realizada con autorización del monarca. A Herófilo se debe el hecho de considerar el cerebro, y no el corazón, el órgano central de la vida; el descubrimiento de la utilidad clínica del pulso, y la distinción entre nervios sensitivos y motores. A Erasítrato, la distinción entre venas y arterias (éstas transportadoras de aire y aquéllas de sangre), así como la importancia de las circunvoluciones cerebrales. Tras ellos, no obstante, surgió la generación de médicos llamados “empíricos”, que despreciaban la teoría y se fiaban sólo de la práctica. La medicina helenística reflorece en su período tardío, ya en la época romana, con Galeno, en el s. II d.C.

4. Las matemáticas griegas

Los griegos tomaron elementos de las matemáticas de los babilonios y de los egipcios. La innovación más importante fue la invención de las matemáticas abstractas basadas en una estructura lógica de definiciones, axiomas y demostraciones. Los dos elementos principales de las matemáticas elementales son la geometría y la aritmética. La aritmética trata de los números. La geometría se ocupa de la distribución de los hechos en el espacio y en el tiempo. Aritmética y geometría están en conexión a causa de que los intervalos de tiempo y las distancias se pueden medir y pueden, por tanto, representarse mediante números. Las demás ramas de las matemáticas

⁴⁶ Cfr. D. BALME: “Aristotle’s Biology was not essentialist”, en A. GOTTHELF y J. LENNOX (eds.): *Philosophical Issues in Aristotle’s Biology*, op. cit.

⁴⁷ J. LENNOX: “Are Aristotelian Species Eternal?”, en *Aristotle on Nature and Living Things*, Mathesis Publications y Bristol Classical Press, Pittsbrugh, 1985.

elementales no hacen más que poner algún acento sobre aspectos particulares de la aritmética y de la geometría.

Para entender la obra aritmética de los griegos debemos saber algo de la aritmética griega en general. Una buena notación es, en aritmética y en álgebra, esencial para el éxito. Los griegos no dispusieron nunca de una buena notación; tenían al principio una mala y luego la dejaron por otra peor. En el período clásico utilizaban un sistema análogo al romano, con símbolos que significaban 1, 5, 10, 100 y 1000; hacían combinaciones para representar los números intermedios. Esto era adecuado para expresar resultados, siempre que los números no fueran muy grandes, pero se trataba de un sistema incomodísimo para representar números muy grandes; y no puede decirse precisamente que facilitase el cálculo. No obstante, en Alejandría, modificaron esa notación para crear otra aún más incómoda y desmañada.⁴⁸

Los griegos consiguieron en geometría sus éxitos más brillantes, éxitos que pueden atribuirse, principalmente, a su desarrollo en dos técnicas: la abstracción y la generalización. Veamos un ejemplo: Los agrimensores egipcios habían hallado un sistema práctico de obtener un ángulo: dividían una cuerda en 12 partes iguales y formaban un triángulo, en el cual, tres partes de la cuerda constituían un lado; cuatro partes, otro, y cinco partes, el tercero (el ángulo recto se constituía cuando el lado de tres unidades se unía con el de cuatro). No existe ninguna información acerca de cómo descubrieron este método los egipcios y, aparentemente, su interés no fue más allá de esta utilización. Pero los curiosos griegos siguieron esta senda e investigaron por qué tal triángulo debía contener un ángulo recto. En el curso de sus análisis llegaron a descubrir que, en sí misma, la construcción física era solamente incidental; no importaba que el triángulo estuviera hecho de cuerda o de lino o de tablillas de madera. Era simplemente una propiedad de las líneas rectas, que se cortaban formando ángulos.

Al concebir líneas rectas ideales independientes de toda comprobación física que pudiera existir sólo en la mente, dieron origen al método llamado “abstracción”, que consiste en despreciar los aspectos no esenciales de un problema y considerar sólo las propiedades necesarias para la solución del mismo. ¿Podría hallarse alguna propiedad común que describieran todos los triángulos rectángulos? Mediante detenidos razonamientos, los griegos demostraron que un triángulo es rectángulo únicamente en el caso de que las longitudes de los lados estuvieran en la relación $x^2 + y^2 = z^2$, donde z es la longitud del lado más largo. El ángulo recto se formaba al unirse los lados de longitud x e y . Por ese motivo, para el triángulo con lados 3, 4 y 5 m., al elevar al cuadrado su longitud, daba por resultado $9+16 = 25$.

Este es únicamente un caso de entre una infinita posibilidad de ellos. Lo que intrigaba a los griegos era el descubrimiento de una prueba de que la relación debía satisfacerse en todos los casos. Y prosiguieron el estudio de la geometría como un medio sutil para descubrir y formular generalizaciones. Varios matemáticos griegos aportaron pruebas de las estrechas relaciones entre

⁴⁸ Cfr. L. W. H. HULL: *Historia y Filosofía de la ciencia*, op. cit., p. 113.

La ciencia antigua griega

las líneas y los puntos de las figuras geométricas. La que se refería al triángulo fue, según la opinión general, elaborada por Pitágoras de Samos hacia el 525 a. C., por lo que aún se llama, en su honor, “teorema de Pitágoras”. Este último enseñó la importancia del estudio de los números para poder entender el mundo. Algunos de sus discípulos hicieron importantes descubrimientos sobre la teoría de números y la geometría, que se atribuyen al propio Pitágoras.

Según los cronistas griegos, este avance comenzó en el siglo VI a.C. con Tales de Mileto y Pitágoras de Samos. Le fue atribuido a Tales el descubrimiento de ciertos teoremas geométricos específicos; por ejemplo, que el diámetro de una circunferencia la divide en dos partes iguales, que los ángulos de lados perpendiculares dos a dos son iguales, y que los ángulos de la base de un triángulo isósceles son, asimismo, iguales. Durante las guerras médicas, la obra científica griega fue continuada por los pitagóricos en el ambiente, menos agitado, de la Italia meridional. En el siglo V a. C., algunos de los más importantes geómetras fueron el filósofo atomista Demócrito de Abdera, que encontró la fórmula correcta para calcular el volumen de una pirámide, e Hipócrates de Cos, que descubrió que el área de figuras geométricas en forma de media luna limitadas por arcos circulares son iguales a las de ciertos triángulos. Este descubrimiento está relacionado con el famoso problema de la cuadratura del círculo (construir un cuadrado de área igual a un círculo dado). Otros dos problemas bastante conocidos que tuvieron su origen en el mismo periodo son la trisección de un ángulo y la duplicación del cubo (construir un cubo cuyo volumen es dos veces el de un cubo dado). Todos estos problemas fueron resueltos, mediante diversos métodos, utilizando instrumentos más complicados que la regla y el compás. Sin embargo, hubo que esperar hasta el siglo XIX para demostrar finalmente que estos tres problemas no se pueden resolver utilizando solamente estos dos instrumentos básicos.

Platón tenía dos motivos principales de interés por la matemática. Ante todo, acaso no haya habido otro hombre que haya admirado tanto las matemáticas por su carácter no mundanal, no sensorial, por su contexto de ideas y no de cosas. En segundo lugar, Platón consideraba las matemáticas como el mejor de todos los instrumentos de educación. En la puerta de la Academia había, según la tradición, un letrero que decía “Nadie entre aquí que no sea geómetra”. Platón prescribe los estudios matemáticos como primera preparación para los guardianes, la clase gobernante de su República. Consideraba la matemática como una disciplina académica, y estableció un código que precisaba lo que no debe hacer un matemático respetable: no debe rebajarse al cultivo de la matemática aplicada, no debe considerar curvas diversas del círculo, curvas a las que Platón denominaba “Mecánicas”, con un término que en su lenguaje es claramente condenatorio. De ello se seguía que los únicos instrumentos legítimos del geómetra eran la regla y el compás. No hay duda de que en este código platónico para matemáticos distinguidos hay un eco de la mística admiración pitagórica por el círculo.

A finales del siglo V a. C., un matemático griego descubrió que no existe una unidad de longitud capaz de medir el lado y la diagonal de un cuadrado, es decir, una de las dos cantidades es *incommensurable*. Esto significa que no existen dos números naturales m y n cuyo cociente sea igual a la proporción entre el lado y la diagonal. Dado que los griegos sólo utilizaban los

números naturales (1, 2, 3...), no pudieron expresar numéricamente este cociente entre la diagonal y el lado de un cuadrado (este número, $\sqrt{2}$, es lo que hoy se denomina *número irracional*). Debido a este descubrimiento, se abandonó la teoría pitagórica de la proporción, basada en números, y se tuvo que crear una nueva teoría no numérica. Ésta fue introducida en el siglo IV a. C. por el matemático Eudoxo de Cnido, y la solución se puede encontrar en los *Elementos* de Euclides.

El máximo matemático del siglo IV a. C. fue precisamente Eudoxo de Cnidos. Eudoxo fue fundador de la teoría de las proporciones aplicables a todas las magnitudes y descubrió el método de *exhaustión* o de aproximaciones sucesivas para la medición de líneas y superficies que, ampliada por Arquímedes, es la base del cálculo infinitesimal. En este contexto tenemos que citar también a Menecmo, miembro de la escuela de Eudoxo y también preceptor de Alejandro Magno. Menecmo ha sido el primer matemático del que sabemos con seguridad que ha estudiado las secciones cónicas. Estas curvas son resultado de secciones del cono. En el momento de su creación, la geometría de las cónicas carecía de utilidad científica. Se cultivó durante generaciones en Grecia por un interés puramente matemático. En el siglo XVII recibió inesperadamente una aplicación llena de éxitos en astronomía. Si no hubiera existido la teoría de las cónicas, es posible que la gran revolución científica moderna hubiera muerto estrangulada apenas nacida.

El siglo posterior a Euclides estuvo marcado por un gran auge de las matemáticas, como se puede comprobar en los trabajos de Arquímedes de Siracusa y de un joven contemporáneo, Apolonio de Perga. Arquímedes utilizó un nuevo método teórico, basado en la ponderación de secciones infinitamente pequeñas de figuras geométricas, para calcular las áreas y volúmenes de figuras obtenidas a partir de las cónicas. Éstas aparecían como tema de estudio en un tratado de Euclides; sin embargo, la primera referencia escrita conocida aparece en los trabajos de Arquímedes. El siracusano también investigó los centros de gravedad y el equilibrio de ciertos cuerpos sólidos flotando en agua. Casi todo su trabajo es parte de la tradición que llevó, en el siglo XVII, al desarrollo del cálculo. Su contemporáneo, Apolonio, escribió un tratado en ocho tomos sobre las cónicas, y estableció sus nombres: elipse, parábola e hipérbola. Este tratado sirvió de base para el estudio de la geometría de estas curvas hasta los tiempos del filósofo y científico francés René Descartes en el siglo XVII.

En paralelo con los estudios sobre matemáticas puras hasta ahora mencionados, se llevaron a cabo estudios de óptica, mecánica y astronomía. Muchos de los grandes matemáticos, como Euclides y Arquímedes, también escribieron sobre temas astronómicos. A principios del siglo II a.C., los astrónomos griegos adoptaron el sistema babilónico de almacenamiento de fracciones y, casi al mismo tiempo, compilaron tablas de las cuerdas de un círculo. Para un círculo de radio determinado, estas tablas daban la longitud de las cuerdas en función del ángulo central correspondiente, que crecía con un determinado incremento. Eran similares a las modernas tablas del seno y coseno, y marcaron el comienzo de la trigonometría. En la primera versión de estas tablas —las de Hiparco, hacia el 150 a.C.— los arcos crecían con un incremento de $7\frac{1}{2}^\circ$, de 0° a 180° . En tiempos del astrónomo Tolomeo, en

La ciencia antigua griega

el siglo II d.C., la maestría griega en el manejo de los números había avanzado hasta tal punto que Tolomeo fue capaz de incluir en su *Almagesto* una tabla de las cuerdas de un círculo con incrementos de $\frac{1}{2}^\circ$ que, aunque expresadas en forma sexagesimal, eran correctas hasta la quinta cifra decimal.

Mientras tanto, se desarrollaron otros métodos para resolver problemas con triángulos planos y se introdujo un teorema —que recibe el nombre del astrónomo Menelao de Alejandría— para calcular las longitudes de arcos de esfera en función de otros arcos. Estos avances dieron a los astrónomos las herramientas necesarias para resolver problemas de astronomía esférica, y para desarrollar el sistema astronómico que sería utilizado hasta la época del astrónomo alemán Johannes Kepler.

4.1. La escuela pitagórica

La escuela pitagórica está plenamente vinculada a la persona de Pitágoras, de quien se conocen pocos datos biográficos⁴⁹. Los pitagóricos tenían el entusiasmo propio de los primeros estudiosos de una ciencia en pleno progreso y les cautivó la importancia del número en el cosmos. El número es el *arjé* de todas las cosas. Con ello se pone el principio de los seres no en la materia, como hasta entonces, sino en la forma. El número es lo que da forma, lo que hace de lo indeterminado algo determinado. Los pitagóricos fueron, ante todo, matemáticos. Supusieron que todos los seres del Universo eran formulables matemáticamente. Y esto es así porque —pensaban— los principios de las matemáticas son también los principios de los seres reales. Y como los principios de las matemáticas son los números, éstos constituyen la naturaleza del universo.

El interés de los pitagóricos por la aritmética fue considerable. Pitágoras atribuía una importancia mística a los números enteros, y la aritmética pitagórica era más teórica que práctica. No se interesaba la escuela por métodos de cálculo, sino que empezó a cultivar lo que hoy llamaríamos teoría de números, teoría que pertenece más a la parte artística de la matemática que a su vertiente científica. Para los pitagóricos, los elementos o principios de las cosas son opuestos. De la consideración aritmética del número se tiene la siguiente pareja de opuestos elementales: lo

⁴⁹ Nacido en Samos en 570 a. C., hacia los 40 años emigró a Crotona, sur de Italia, donde desplegó su principal actividad. Se estableció por fin en Metaponto y allí murió en 496. Su figura está aureolada por la leyenda. No debió de escribir nada. Pero, en torno a él, reunió a un grupo de hombres, formando una especie de comunidad o asociación, que conservó fiel y tenazmente las ideas del maestro y las transmitió oralmente. La comunidad tenía una estructura filosófica y ético-religiosa, con un fuerte tono ascético. De la fisonomía espiritual de esta sociedad hemos de concluir que Pitágoras se movió en la dirección del dualismo órfico, que tomó de los órficos la doctrina de la transmigración de las almas, que cultivó toda clase de ciencias y que personalmente poseyó un marcado temperamento de jefe moral y político. El orfismo estaba en conexión con el culto de Dioniso, culto que pasó a Grecia procedente de Tracia o la Escitia y era ajeno al espíritu del culto olímpico, aunque su carácter “entusiasmador” y “extático” halló eco en el alma griega. Pero no es en lo “entusiástico” de la religión dionisiaca lo que vincula al orfismo con el pitagorismo sino, más bien, el que los iniciados órficos, eran instruidos en la doctrina de la transmigración de las almas, de tal modo que, para ellos, lo importante del hombre era el alma y no el cuerpo que la aprisiona. De aquí la importancia de ejercitar el alma y de purificarla, ascetismo que incluía preceptos tales como el de la abstención de carnes, la práctica del silencio, la influencia de la música y el estudio de las matemáticas.

par y lo impar, con ello se establece una explicación dualista de la naturaleza. Desde el punto de vista geométrico, los números están constituidos de lo Ilimitado (que se corresponde con lo Par) y de lo Limitado (que se corresponde con lo Impar). La unidad, el uno, procede de ambos (pues es a la vez, par e impar), y el número procede del uno.

Parece cosa clara que los pitagóricos consideraron los números espacialmente. No quiere decir esto que los pitagóricos afirmasen una recíproca reductibilidad entre la aritmética y la geometría, sino más bien, que descubrieron algunos isomorfismos entre ellas. Así, la unidad es el punto, el dos la línea, el tres la superficie, el cuatro el volumen, etc. Decir, por tanto, que todas las cosas son números significaría que “todos los cuerpos constan de puntos o unidades en el espacio, los cuales, cuando se los toma en conjunto, constituyen un número”.⁵⁰ Que los pitagóricos consideraban así los números lo indica la *tetraktys*, figura que se tenía por sagrada. Esta figura muestra que el 10 resulta de sumar: $1+2+3+4$, que es la suma de los cuatro primeros números enteros. Cuando se trató de asignar un número determinado a cada cosa concreta, quedó campo abierto para toda suerte de fantásticas arbitrariedades. Así, el 2 lo femenino, el 3 lo masculino, el 4 la justicia, el 5 el matrimonio, el 6 el principio vital, el 7 la salud, etc. No obstante, a pesar de todas estas fantasías, los pitagóricos contribuyeron positivamente al desarrollo de las matemáticas.

Debió de ser en extremo simple la observación que originariamente condujo a la consideración del número como fundamento de todo lo existente. En la música se podía apreciar cómo los diferentes sonidos estaban en una relación determinada con la longitud de las cuerdas de la lira y, particularmente, cómo las armonías del sonido se caracterizaban por ciertas relaciones fijas y numéricas. Sin embargo, como dice Heisenberg, “el descubrimiento pitagórico hay que contarlo entre los más decisivos impulsos que ha recibido la ciencia humana”. Pues bien, lo mismo que la armonía musical depende del número, se puede pensar que la armonía del universo depende también del número. Las esferas cósmicas, al moverse, producen un sonido armónico. Diez es el número de cuerpos o esferas celestes, puesto que la década es el número perfecto absolutamente; por esta razón, inventaron la *antitierra*. La Tierra no ocupa el centro del universo. La Tierra y los planetas giran -a la vez que el Sol- en torno al fuego central o “corazón del Cosmos” (identificado con el número Uno). El mundo aspira aire de la masa sin límites que lo envuelve, y se habla del aire como de lo Ilimitado. Vemos aquí la influencia de Anaxímenes.

Es abundante la documentación existente en los fragmentos de los filósofos presocráticos que tiende a corroborar la utilización de polaridades en la elaboración de sus doctrinas. Alcmeón de Crotona, filósofo y naturalista griego, presunto alumno de Pitágoras, concibe lo real como compuesto de caracteres antagónicos (bien, mal, finito e infinito, etc.). La doctrina general de que “la mayoría de las cosas humanas van en parejas” es atribuida por Aristóteles a Alcmeón, comparando la teoría de éste con la tabla de Opuestos de los pitagóricos. Según Filolao “todas las cosas que se conocen tienen número; sin éste no sería posible pensar ni

⁵⁰ STÖCKL cit. en F. COPLESTON: *A History of Philosophy*, vol. I: *Greece and Rome* ; trad. esp.: *Historia de la Filosofía*, vol. I, Grecia y Roma, 2ª ed., Ariel, Barcelona, 1986, p. 47.

La ciencia antigua griega

conocer nada”.⁵¹ Para los pitagóricos, los elementos del número son, por tanto, como apunta Aristóteles, elementos de todas las cosas, ya que todo el universo es armonía y número. Dichos elementos son, ante todo, lo impar y lo par, a los que corresponden lo determinado (*péras*) y lo indeterminado (*ápeiron*). Un grupo de pitagóricos hizo referencia a diez pares concretos de principios opuestos: limitado e ilimitado, par e impar, uno y múltiple, derecha e izquierda, macho y hembra, en reposo y en movimiento, recto y curvo, luz y oscuridad, bien y mal, cuadrado y rectángulo.⁵² La teoría de Alcmeón, por su parte, era menos categórica y recurría a “oposiciones cualesquiera”, como “blanco y negro, dulce y amargo, bueno y malo, grande y pequeño”.⁵³

Elaborar un cuerpo doctrinal como consecuencia inevitable de una serie de axiomas (deducción) es un juego atractivo. Los griegos, alentados por los éxitos de la geometría, se entusiasmaron con él hasta el punto de cometer dos serios errores. En primer lugar, llegaron a considerar la deducción como el único medio respetable de alcanzar conocimiento. Tenían plena conciencia de que, para ciertos tipos de conocimiento, la deducción resultaba inadecuada; por ejemplo, la distancia desde Corinto a Atenas no podía ser deducida a partir de principios abstractos, sino que forzosamente tenía que ser medida. No obstante, siempre se avergonzaron de esta necesidad, y consideraban que el conocimiento más excelso era simplemente el elaborado por la actividad mental. Tendieron a subestimar aquel conocimiento que estaba demasiado directamente implicado en la vida diaria. Grecia no fue estéril por lo que se refiere a contribuciones prácticas a la civilización, pese a lo cual, hasta su máximo ingeniero, Arquímedes de Siracusa, rehusó escribir acerca de sus investigaciones prácticas y descubrimientos; para mantener su *status* de aficionado, transmitió sus hallazgos en forma de matemáticas puras. Y la carencia de interés por las cosas terrenas fue sólo uno de los factores que limitó el pensamiento griego. El énfasis puesto por los griegos sobre el estudio en geometría los condujo al segundo gran error y, eventualmente, a la desaparición final.

En el ámbito de la geometría, Tales se había dedicado a estudiar la posibilidad de deducir teoremas menos obvios de premisas de más fácil aceptación. Pero sus cortas cadenas de razonamientos estaban aisladas las unas de las otras; cada demostración se presentaba por sí misma. Tales nunca hizo el intento de derivar todo teorema de un conjunto único de proposiciones, ni de reducir al mínimo ese conjunto. Pitágoras y sus discípulos se dispusieron, en cambio, a construir un sistema coherente en el que todos los teoremas se siguieran demostrativamente de unos pocos axiomas explícitamente afirmados. Si los axiomas eran verdaderos, lo serían entonces todas las demás proposiciones. No habría logros inconexos en el conocimiento. El gran sistema lógico de la geometría ofrecido más tarde al mundo por Euclides era una versión revisada y ampliada del sistema pitagórico, pero idéntica con éste en espíritu.

⁵¹ FILOLAO DE CROTONA: Diels-Kranz, 44 B 11.

⁵² Cfr. ARISTÓTELES: *Metaphysica*, A 5 986 a 22 ss.

⁵³ *Ibidem*, 986 a 31 ss.

La geometría pitagórica ha sido el arquetipo de todos los sistemas deductivos, y es, por tanto, la primera matemática genuina. Es fácil comprender por qué los intelectuales griegos consideraron tan atractiva la nueva geometría. Ante todo, los círculos perfectos y las rectas perfectas de que se ocupaba esa nueva geometría eran ideas existentes sólo en el espíritu de los geómetras. No eran objetos sensibles, aunque existían seres físicos que se les parecían groseramente. Por tanto, la geometría era una empresa connatural con aquella cultura de hombres amantes de la vida de contemplación, o que consideraban que el trabajo práctico era contrario a la dignidad del hombre distinguido en una sociedad esclavista. Además, la matemática parecía ofrecer certeza. Sin duda, la da hasta cierto punto, pero no al modo como han creído muchos pensadores griegos. En conclusión, los pitagóricos cultivaron la geometría deductiva con un éxito asombroso, como naturalmente ocurre con todo aquel que se dedica de todo corazón a algo para lo cual está muy bien dotado.⁵⁴

4.2. Euclides

Euclides⁵⁵ es uno de los primeros científicos que se establecen en Alejandría y se aprovecha de las condiciones favorables que se dan. Sistematiza en el Museo toda la obra matemática que le precede en la más famosa obra de matemáticas de todos los tiempos: *Stoikheia* (Elementos). Se trata, fundamentalmente, de una obra que reúne de forma sistemática el conjunto del saber matemático de la antigüedad, expuesto en forma deductiva, de acuerdo con el concepto de ciencia expresado por Aristóteles en sus *Analíticos Posteriores*; partiendo de axiomas, postulados y definiciones se deducen teoremas o se resuelven problemas. La materia de su exposición se debía en su mayor parte a matemáticos anteriores tales como Pitágoras, Eudoxo e Hipócrates de Cos.

La principal contribución de Euclides es obra de su genio para la organización y la disposición lógica del material. Ensambló los teoremas conocidos cubriendo hiatos lógicos y suministrando nuevas demostraciones cuando le resultaba necesario, y llegó así a construir un gran sistema deductivo. Redujo considerablemente el número de proposiciones indemostradas de las que depende el resto demostrado. Estableció un nuevo criterio de rigor y también, a veces, de elegancia en la demostración. La importancia de este autor supera el campo de las matemáticas para convertirse en el creador del espacio que ha de regir toda la física moderna. Sin su obra, la mecánica clásica carecería de fundamento, por lo que, cuando se plantea la teoría de la relatividad, como limitación de los planteamientos newtonianos, primero se destruye el mundo geométrico

⁵⁴ Cfr. L. W. H. HULL: *Historia y Filosofía de la ciencia*, op. cit., p. 42.

⁵⁵ Euclides de Megara (c. 330 a. C. - c. 277 a. C.). Probablemente, es el más famoso matemático de la antigüedad. Poco se sabe con seguridad de su vida. Es probable que se educara en Atenas y que estudiase en la Academia platónica. Sí está constatado que enseñó en Alejandría durante el reinado de Ptolomeo I Soter. De Euclides se recuerda, entre otras, la anécdota de haber respondido a la pregunta de su monarca Ptolomeo acerca de si no habría otra forma más fácil de acceder a las matemáticas que leyendo sus *Elementos*, diciendo que "no hay una vía regia para la geometría". Oportuno es también recordar que mandó dar limosna a un alumno que le preguntaba si todo aquello servía para algo. Además de *Elementos*, Euclides escribió los tratados *Fenómenos*, sobre astronomía, *Óptica*, sobre perspectiva, y *Cálculos*.

La ciencia antigua griega

que Euclides nos había dejado, en el que se basa toda su forma de interpretar y comprender la naturaleza. Los *Elementos* son la obra clásica y el texto por excelencia de la historia de las matemáticas, que ha mantenido su valor conceptual hasta el s. XIX y, en algunas partes, hasta comienzos del XX.

De acuerdo con el testimonio de Proclo, Euclides incorporó numerosos descubrimientos de Eudoxo y de Teeteto; así, la teoría de la proporción es del primero, mientras que el segundo es el autor de buena parte de lo que se dice a propósito de los poliedros regulares. Se ha defendido, incluso, que la obra podría ser el resultado de reunir las contribuciones de toda una escuela de matemáticos que trabajaran bajo la dirección de un fundador, o que siguieran desarrollando sus enseñanzas tras su desaparición.

Los trece libros que componen sus *Elementos* contienen la mayor parte del conocimiento matemático existente a finales del siglo IV a.C., en áreas tan diversas como la geometría de polígonos y del círculo, la teoría de números, la teoría de los inconmensurables, la geometría del espacio y la teoría elemental de áreas y volúmenes. En síntesis, el programa de la obra era el siguiente: teoría de planos (libros I-IV), teoría de proporciones (V), aplicación de la teoría de proporciones a los planos (VI), teoría de los números (VII-IX), irracionalidad de los números no algebraicos (X) y teoría de la geometría del espacio (XI-XIII). Los seis primeros libros corresponden a lo que hoy se entiende todavía como geometría elemental; los libros del séptimo al décimo tratan de cuestiones numéricas y los tres restantes se ocupan de la geometría de los cuerpos sólidos, concluyendo la obra con la construcción de los cinco poliedros regulares y sus esferas circunscritas. Diversos autores de la antigüedad, como Proclo y Simplicio, escribieron comentarios a los *Elementos*; la revisión de la obra a cargo de Teón de Alejandría en el s. IV de nuestra era introdujo algunas variaciones y añadidos, y fue la base de todas las demás hasta bien entrado el s. XIX.

Euclides desarrolló en su obra una serie de principios sobre los que se fundamentó la geometría hasta tiempos recientes, en que fueron modificados con la aparición de las geometrías no euclidianas. Se trata de los cinco postulados siguientes: En el primero se establece que, dados dos puntos cualquiera, siempre se puede trazar una línea recta que los une. El segundo postula que toda línea recta se puede prolongar infinitamente. Según el tercero, dado un punto cualquiera, se puede trazar una circunferencia de radio cualquiera tomando dicho punto como centro de ésta. El cuarto establece que todos los ángulos rectos son iguales. Finalmente, el quinto enuncia que dada una recta y un punto exterior a la misma, sólo se puede trazar una recta, y sólo una, que pase por dicho punto y sea paralela a la recta dada. Este último postulado es precisamente el que se modifica en las geometrías no euclidianas.

El procedimiento utilizado en los *Elementos* es el del cálculo axiomático. Es un método basado en unos principios indemostrables (axiomas), a partir de los cuales siguen necesariamente otras afirmaciones, concatenadas estructuralmente. Este procedimiento está inspirado en la lógica aristotélica, que había sido completada y perfeccionada con los estoicos. Este sistema implicaba definiciones, axiomas y postulados específicos para cada ciencia. Las definiciones sirven para

calibrar los términos que entran en cada razonamiento, los axiomas son concreciones del principio de no contradicción, principio en el que ha de basarse todo discurso lógico según Aristóteles. Los postulados son supuestos fundamentales de carácter intuitivo (indemostrables y no mediables por otro concepto) que configuran el substrato último de la argumentación.

Las líneas de argumentación seguidas son: a) la reducción al absurdo, método que era ya famoso desde Zenón con sus *Elenchos*. Parte de la negación de lo que suponemos, para llegar a una contradicción, y así poder afirmar aquello que habíamos negado y, por tanto, confirmar nuestra suposición. b) el método de “exhaustiones”, aplicado, sobre todo, en sus últimos libros. Se formula de forma paradigmática en el Libro X del siguiente modo: “Suponiendo que tenemos dos magnitudes desiguales, si se sustrae de la mayor una magnitud más grande que la mitad de ésta; a lo que queda se le quita otra magnitud mayor que la mitad y así sucesivamente, quedará una magnitud menor que la que se ha dado o supuesto como menor”. Por este procedimiento, somos capaces de encontrar una magnitud más pequeña que cualquiera dada, por lo que existe un continuo, ya que no hay mínimo.

4.3. Arquímedes

Arquímedes de Siracusa⁵⁶ ha sido el matemático más fino de la antigüedad, y acaso la inteligencia más aguda de toda la humanidad hasta el Renacimiento. Para comprender, en efecto, la profundidad y la agudeza de su mente hay que ponerse a resolver con potentes métodos de cálculo moderno los difíciles problemas que él resolvió sin esos métodos. Arquímedes ha hecho inventos y descubrimientos en cuatro campos: geometría, aritmética, física e ingeniería. En geometría llegó a ser el más grande matemático de la época y, anticipándose en el cálculo, inventó métodos generales para encontrar las áreas de figuras planas de contorno curvilíneo (cuadratura de la parábola) y los volúmenes limitados por superficies curvas. Aplicó estos métodos a muchos casos especiales, tales como el círculo, la espiral, la esfera, y a superficies de revolución engendradas por rectángulos (cilindros), triángulos (conos), parábolas (paraboloides), hipérbolas (hiperboloides) y elipses (esferoides), al girar alrededor de sus ejes

⁵⁶ Arquímedes (Siracusa, Sicilia, 287 a.C.-íd. 212 a.C.) fue físico, matemático e inventor griego. Sus aportaciones en física, a las que debe su fama por encima de todo, se centran en la mecánica y en la hidrostática. En la memoria colectiva ha quedado su aforismo sobre la aplicación de la ley de la palanca por él descubierta: “Dadme un punto de apoyo y levantaré el mundo”. A él se debe, además, la invención de máquinas simples como el tornillo y el polipasto, empleado para mover cuerpos pesados. Pero el descubrimiento más conocido es el llamado principio de Arquímedes: “Todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta un empuje hacia arriba igual al peso del volumen del fluido desalojado”. Para defender la ciudad inventó la polea compuesta y los espejos ustorios, mediante los cuales incendió la flota romana. Murió a manos de un soldado en el saqueo romano de Siracusa comandado por Marcelo. Mucho después, cuando Cicerón ocupó el cargo político de cuestor en Sicilia (75 a.C.), hizo restaurar la tumba de Arquímedes y manifestó gran admiración por el sabio. Su figura y sus obras, poco conocidas en la Edad Media, fueron redescubiertas durante el Renacimiento y ejercieron gran influencia sobre Galileo, Torricelli y Huygens, en especial sus tratados sobre los centros de gravedad y sobre los fluidos. Otras obras destacables son: *Sobre la esfera y el cilindro*; *Sobre la medida del círculo*; *De la cuadratura de la parábola*; *Sobre las espirales* y *El método, o carta a Eratóstenes*.

La ciencia antigua griega

principales; todo ello fundamental para el posterior estudio de las matemáticas. También mejoró el sistema griego de numeración.

En su obra utilizó con asombrosa habilidad el método de *exhaustiones* inventado por Eudoxo. Podemos considerar brevemente cómo lo aplicó para hallar la circunferencia y el área del círculo. Se inscribe en el círculo un hexágono regular, ABCDEF. Trazando tangentes al círculo por los puntos A, B, C, D, E, F, podemos formar otro hexágono regular que está circunscrito al círculo. Los perímetros de los hexágonos circunscrito e inscrito son respectivamente mayor y menor que la circunferencia del círculo. Por tanto, calculando esos perímetros, podemos poner un límite superior y un límite inferior a la circunferencia del círculo. En sus obras *Sobre la esfera y sobre el cilindro* y *Sobre los conoides y los esferoides*, planteó las secciones utilizando elementos de la geometría euclidiana y legándonos su estudio sobre las espirales.

Concibió la ciencia como un método deductivo y recurrió a los llamados experimentos mentales. En su *Arenario*, o *El reloj solar*, plantea el problema de qué cantidad de granos de arena podría contener la esfera de las estrellas fijas e indicaba que, por muy grande que fuese este número (que él calculó), se trataría siempre de un número determinado. Este libro fue de gran importancia para la aritmética, ya que, en él, Arquímedes ideó un nuevo simbolismo para expresar números muy grandes, superando el sistema griego que daba a cada cifra una palabra. (Históricamente por este libro se conoció la hipótesis heliocéntrica de Aristarco de Samos).

Arquímedes fue el primero en obtener resultados de problemas de medición por métodos experimentales, como la pesada. De modo que tenía ya una noción bastante precisa de la solución antes de empezar a construir la demostración matemática. Dos sólidos del mismo material tienen pesos proporcionales a sus volúmenes, de modo que el volumen desconocido de uno de ellos puede ser estimado a partir del volumen conocido del otro mediante pesadas. Este método de descubrimiento “matemático” habría sido sin duda objeto de los más furiosos anatemas por parte de Platón, pero Arquímedes era hombre moderno en materia de libertad heurística. Sus demostraciones matemáticas eran, por lo demás, impecables cuando llegaba a ellas.

Además de gran matemático, Arquímedes destacó como ingeniero e inventor. Ideó máquinas balísticas para la defensa de Siracusa del asedio romano y, en dicho asedio, aplicó sistemas de espejos ustorios para quemar a distancia las velas de las naves romanas, aprovechando la concentración de los rayos solares. También construyó un planetario, que más tarde fue transportado a Roma. Se le atribuyen, además, otros varios inventos mecánicos. Descubrió el principio de flotación y las densidades relativas, hallando que la corona del rey Hierón, según cuenta la tradición, había sido falseada⁵⁷. En su *Tratado sobre los cuerpos flotantes*, establece los principios de la hidrostática y da una base teórica para explicar la construcción de barcos.

⁵⁷ La historia recuerda cómo celebró Arquímedes haber descubierto que la corona de Hierón II había sido adulterada: observando el agua que, al bañarse, rebosaba de su bañera y saltando desnudo a la calle gritando éureka: “¡lo encontré!”.

En el campo de la mecánica, sus investigaciones se centraron en el equilibrio de planos, donde establece las bases teóricas de la estática y en particular las leyes de la palanca. Establece que un plano recto apoyado sobre un punto y con dos puntos iguales en sus extremos, a distancias iguales del centro los pesos mantendrán un equilibrio; a distancias desiguales del centro, se inclinarán hacia el peso más alejado del centro. Arquímedes descubre, mediante estas investigaciones, la proporcionalidad entre las distancias y los pesos específicos en una palanca. Desde esta teoría, desarrolló los aspectos técnicos con los que hacía sus máquinas. Arquímedes, a pesar de ser un hombre especialmente dotado para la mecánica, no pudo escapar de su tiempo, y se consideró más un matemático que otra cosa. Por ello, se muestra más orgulloso de sus estudios de matemáticas que de las obras que tanto impresionaron.

4.4. Apolonio de Pérgamo

El otro gran matemático es Apolonio de Pérgamo (260-200). Estudió en Alejandría, enseñó en Pérgamo y, al igual que Euclides, se dedicó a estudiar, sistematizar y replantear problemas anteriores. Menecmo y Euclides se habían limitado a iniciar el estudio del tema de las secciones cónicas. En su obra sobre secciones cónicas, considerada como un documento base actualmente, Apolonio lo replantea a fondo, introduciendo la terminología necesaria para la explicación de estas secciones, nombrándolas como elipses, parábolas e hipérbolas. Gracias a Apolonio, esta rama de la geometría estuvo lista cuando la necesitaron los astrónomos.

Después de Euclides, Arquímedes y Apolonio, Grecia no tuvo ningún geómetra de la misma talla. Los escritos de Herón de Alejandría en el siglo I d. C. muestran cómo elementos de la tradición aritmética y de medidas de los babilonios y egipcios convivieron con las construcciones lógicas de los grandes geómetras. Los libros de Diofante de Alejandría en el siglo III d. C. continuaron con esta misma tradición, aunque ocupándose de problemas más complejos. En ellos Diofante encuentra las soluciones enteras para aquellos problemas que generan ecuaciones con varias incógnitas. Actualmente, estas ecuaciones se denominan *diofánticas* y se estudian en el *análisis diofántico*.