

BREVE HISTORIA DE LA FÍSICA



Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra sin contar con autorización de los titulares de la propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (arts. 270 y sigs. Código Penal). El Centro Español de Derechos Reprográficos (www.cedro.org) vela por el respeto de los citados derechos.

BREVE HISTORIA DE LA FÍSICA

Agustín Udías Vallina



EDITORIAL
SÍNTESIS

Consulte nuestra página web: **www.sintesis.com**
En ella encontrará el catálogo completo y comentado

Reservados todos los derechos. Está prohibido, bajo las sanciones penales y el resarcimiento civil previstos en las leyes, reproducir, registrar o transmitir esta publicación, íntegra o parcialmente, por cualquier sistema de recuperación y por cualquier medio, sea mecánico, electrónico, magnético, electroóptico, por fotocopia o por cualquier otro, sin la autorización previa por escrito de Editorial Síntesis, S. A.

© Agustín Udías Vallina

© EDITORIAL SÍNTESIS, S. A.
Vallehermoso, 34. 28015 Madrid
Teléfono 91 593 20 98
www.sintesis.com

ISBN: 978-84-9171-418-7
Depósito legal: M. 31.462-2019

Impreso en España - *Printed in Spain*

Índice

Prólogo	13
1. La física nació en Grecia	15
1.1. Razonando sobre la naturaleza	15
1.1.1. <i>Matemáticas y astronomía en Egipto y Mesopotamia</i>	16
1.2. Filosofía y ciencia en Grecia	18
1.2.1. <i>El principio último de la naturaleza</i>	20
1.2.2. <i>Un último principio racional</i>	21
1.3. Primera idea de los átomos	22
1.3.1. <i>Átomos y vacío</i>	22
1.4. Tradiciones platónica y aristotélica	24
1.4.1. <i>Platón. El mundo de las ideas</i>	24
1.4.2. <i>Aristóteles y su física</i>	26
1.4.3. <i>Cosmología y meteorología</i>	27
1.5. Desarrollo de las matemáticas	28
1.5.1. <i>Pitágoras y su escuela</i>	28
1.5.2. <i>La escuela de Atenas</i>	29
1.5.3. <i>La escuela de Alejandría. Euclides</i>	29
1.6. Primeros modelos astronómicos	31
1.6.1. <i>La escuela geocéntrica, Eudoxo e Hiparco</i>	32
1.6.2. <i>Tolomeo, el Almagesto</i>	33
1.6.3. <i>Astronomía no geocéntrica. Aristarco</i>	34

1.7.	Tamaño de la Tierra, de los astros y el universo	34
1.7.1.	<i>El tamaño de la Tierra</i>	35
1.7.2.	<i>Las dimensiones del espacio astronómico</i>	36
1.8.	Física matemática. Óptica y mecánica	37
1.8.1.	<i>Óptica</i>	38
1.8.2.	<i>Mecánica</i>	39
2.	<i>El interludio medieval</i>	41
2.1.	Enciclopedias romanas	41
2.1.1.	<i>Las enciclopedias de Plinio, Séneca y Lucrecio</i>	42
2.1.2.	<i>La educación en Roma</i>	43
2.2.	Matemáticas en la India	44
2.3.	Ciencia árabe	45
2.3.1.	<i>Las matemáticas. Alkarismi</i>	46
2.3.2.	<i>La astronomía. El astrolabio</i>	47
2.3.3.	<i>La óptica y la mecánica. Alhazen</i>	48
2.4.	Ciencia en la Europa cristiana	49
2.4.1.	<i>Isidoro y Beda</i>	50
2.5.	Traducciones de la ciencia griega y árabe	51
2.6.	Creación de las universidades	53
2.6.1.	<i>Filósofos y teólogos y el estudio de la naturaleza</i>	54
2.7.	Astronomía medieval	55
2.7.1.	<i>Astrónomos medievales</i>	56
2.8.	Primado de Aristóteles y su crítica	57
2.8.1.	<i>Tomás de Aquino</i>	58
2.8.2.	<i>La teoría del impetus</i>	58
3.	<i>El origen de la ciencia moderna.</i>	
	<i>La nueva astronomía</i>	61
3.1.	Copérnico y el heliocentrismo	61
3.1.1.	<i>El sistema heliocéntrico</i>	63
3.1.2.	<i>La difusión del sistema copernicano</i> ..	64
3.2.	Observaciones y el sistema de Tycho Brahe ..	65
3.2.1.	<i>El sistema geoheliocéntrico</i>	66

Índice

3.3.	Kepler y las leyes del movimiento de los planetas	67
3.3.1.	<i>Las leyes del movimiento planetario</i>	68
3.3.2.	<i>El mecanismo del movimiento de los planetas</i>	69
3.4.	Galileo. La lucha por el heliocentrismo	70
3.4.1.	<i>Los comienzos de la ciencia experimental</i>	71
3.4.2.	<i>Las dos polémicas astronómicas</i>	72
3.5.	Problemas de Galileo y del heliocentrismo	74
3.5.1.	<i>La puesta en el Índice del libro de Copérnico</i>	74
3.5.2.	<i>La defensa de Galileo del heliocentrismo</i>	75
3.5.3.	<i>La condena de Galileo</i>	76
3.6.	Gilbert y el magnetismo terrestre	77
4.	<i>Las nuevas mecánica y óptica</i>	81
4.1.	Galileo y el estudio del movimiento	81
4.1.1.	<i>La vuelta al atomismo</i>	83
4.1.2.	<i>La caída de los cuerpos</i>	84
4.1.3.	<i>El movimiento de un proyectil</i>	84
4.1.4.	<i>Las leyes de la cinemática</i>	85
4.2.	Visión mecanicista de la naturaleza	86
4.2.1.	<i>Los continuadores de Galileo en Italia y Holanda</i>	87
4.2.2.	<i>El problema del vacío</i>	88
4.3.	Escuela francesa	88
4.3.1.	<i>Blaise Pascal</i>	89
4.4.	Mecanicismo racionalista de Descartes	90
4.4.1.	<i>La física cartesiana</i>	92
4.4.2.	<i>La cosmología cartesiana</i>	93
4.4.3.	<i>La geometría analítica</i>	93
4.5.	Nueva óptica de Huygens	94
4.6.	Escuela empirista inglesa	97
4.6.1.	<i>Robert Boyle. Las leyes de los gases</i>	98
4.6.2.	<i>Robert Hooke y las escuelas de Oxford y Cambridge</i>	99
4.7.	Academias y sociedades científicas	101

5. Isaac Newton	105
5.1. Vida y obras	105
5.2. <i>Principia</i>	108
5.2.1. <i>La publicación de Principia.</i> <i>Edmond Halley</i>	108
5.2.2. <i>Las leyes de la mecánica</i>	109
5.2.3. <i>El movimiento con fuerzas atractivas</i>	110
5.2.4. <i>El movimiento en medios resistentes</i> ..	111
5.3. Gravitación y movimiento planetario	112
5.3.1. <i>La forma de la Tierra y las mareas</i>	113
5.3.2. <i>Las órbitas de los cometas</i>	114
5.3.3. <i>Escolio general</i>	114
5.4. Ley de la gravitación	115
5.4.1. <i>De Aristóteles a Descartes</i>	115
5.4.2. <i>Algunos precursores</i>	116
5.4.3. <i>La naturaleza de la gravitación</i>	117
5.5. Óptica. La naturaleza de la luz y los colores ..	118
5.5.1. <i>La descomposición de la luz blanca</i>	119
5.5.2. <i>La naturaleza corpuscular de la luz</i>	120
5.6. Composición atómica de la materia	121
5.7. Cálculo infinitesimal	122
5.7.1. <i>La controversia con Leibniz</i>	123
5.8. Filosofía de la ciencia	125
6. El primado de la mecánica	127
6.1. Trabajo y energía	127
6.1.1. <i>Aportaciones de d'Alembert</i>	128
6.1.2. <i>Fuerza, energía y trabajo</i>	129
6.1.3. <i>Conservación de la energía</i>	129
6.2. Mecánica analítica	130
6.2.1. <i>Las aportaciones de Euler</i>	130
6.2.2. <i>La formulación de Lagrange</i>	131
6.2.3. <i>Las ecuaciones canónicas de Hamilton</i> ..	133
6.3. Mecánica de cuerpos elásticos y fluidos	134
6.3.1. <i>Las aportaciones de Navier, Cauchy</i> <i>y Poisson</i>	135

Índice

6.3.2.	<i>Los desarrollos posteriores de la teoría de la elasticidad</i>	136
6.3.3.	<i>La mecánica de fluidos</i>	137
6.3.4.	<i>La propagación del sonido</i>	138
6.4.	Calor y temperatura	139
6.4.1.	<i>El termómetro y las escalas</i>	139
6.4.2.	<i>La conducción del calor. Fourier</i>	140
6.4.3.	<i>La naturaleza del calor</i>	141
6.4.4.	<i>El calor en los químicos: el flogisto y el calórico</i>	142
6.4.5.	<i>El equivalente mecánico del calor</i>	143
6.4.6.	<i>Joule y Kelvin</i>	144
6.5.	Leyes de la termodinámica	145
6.5.1.	<i>La relación entre trabajo y calor</i>	146
6.5.2.	<i>La entropía, Rudolf Clausius</i>	147
6.5.3.	<i>William Thomson, lord Kelvin</i>	148
6.6.	Teoría cinético-molecular de los gases	149
6.6.1.	<i>James Maxwell y Ludwig Boltzman</i>	150
7.	<i>La luz, la electricidad y el magnetismo</i> ..	153
7.1.	Teoría ondulatoria de la luz	153
7.1.1.	<i>Los trabajos definitivos de Fresnel y Arago</i>	155
7.2.	Electricidad, fluido y carga	156
7.2.1.	<i>Benjamin Franklin y Charles de Coulomb</i>	157
7.3.	Corriente eléctrica	159
7.3.1.	<i>La ley de Ohm</i>	160
7.3.2.	<i>La capacidad y la autoinducción eléctrica</i>	161
7.4.	Magnetismo	162
7.4.1.	<i>Carl Friedrich Gauss</i>	163
7.5.	Unificación de la electricidad y el magnetismo	164
7.5.1.	<i>Ampère y Faraday</i>	165
7.5.2.	<i>Formulación matemática y aplicaciones</i>	167
7.6.	Ecuaciones del electromagnetismo de Maxwell	168
7.6.1.	<i>Las contribuciones de Lorentz</i>	170

7.7.	Experimentos con ondas electromagnéticas	171
7.8.	Campo magnético terrestre, interno y externo	172
7.8.1.	<i>El origen del campo magnético terrestre interno y el paleomagnetismo</i>	173
7.9.	Desarrollo de la electrónica	174
7.9.1.	<i>Las lámparas o válvulas de radio y los semiconductores</i>	175
7.9.2.	<i>La microelectrónica</i>	176
8.	<i>La teoría de la relatividad</i>	179
8.1.	Nacimiento de una nueva física	179
8.2.	Desarrollos precursores de la relatividad	180
8.2.1.	<i>El experimento de Michelson y Morley</i> ..	181
8.2.2.	<i>La contracción de Lorentz-Fitzgerald</i>	182
8.2.3.	<i>Las interpretaciones de Larmor y Poincaré</i>	183
8.3.	Albert Einstein. Vida y obras	183
8.3.1.	<i>Publicación de las teorías especial y general de la relatividad</i>	184
8.3.2.	<i>Sus últimos años en Estados Unidos</i> ...	185
8.4.	Teoría especial de la relatividad	186
8.4.1.	<i>Espacio, tiempo y masa dependen de la velocidad</i>	188
8.5.	Teoría general de la relatividad	189
8.5.1.	<i>La geometría del espacio-tiempo</i>	190
8.6.	El mundo absoluto de Minkowski	192
8.7.	Aceptación de la teoría de la relatividad	193
8.8.	Comprobación experimental	194
9.	<i>La física cuántica</i>	197
9.1.	Planck, el cuanto de acción	197
9.1.1.	<i>La cuantificación de la radiación</i>	199
9.1.2.	<i>La cuantificación de otros fenómenos</i>	200
9.2.	Einstein y el fenómeno fotoeléctrico	200
9.3.	Bohr y la cuantificación del átomo	202
9.3.1.	<i>Otros desarrollos y consecuencias</i>	203
9.4.	Dualidad partícula-onda	204

9.5.	Formulación de la mecánica cuántica	206
9.5.1.	<i>Heisenberg: la formulación matricial y el principio de incertidumbre</i>	206
9.5.2.	<i>La ecuación de onda de Schrödinger</i> ..	207
9.6.	Otros desarrollos de física cuántica	208
9.6.1.	<i>Las contribuciones de Dirac</i>	210
9.7.	Mecánica estadística cuántica	211
9.8.	Teoría cuántica de campos	212
9.9.	Interpretaciones de la mecánica cuántica	213
9.9.1.	<i>El gato de Schrödinger</i>	214
9.9.2.	<i>El enmarañamiento cuántico</i>	215
9.9.3.	<i>La interpretación de Copenhague</i>	216
10.	<i>La estructura de la materia</i>	219
10.1.	Átomos y moléculas	219
10.1.1.	<i>Dalton y los átomos de los químicos</i> ..	220
10.1.2.	<i>Los elementos químicos, los compuestos y las valencias</i>	221
10.1.3.	<i>La tabla periódica de los elementos</i>	222
10.1.4.	<i>Los espectros de emisión y absorción</i> ..	224
10.2.	Radiactividad	225
10.2.1.	<i>En busca de una explicación</i>	226
10.3.	Primeros modelos del átomo	227
10.3.1.	<i>El átomo con núcleo y electrones</i>	228
10.3.2.	<i>El número atómico y el peso atómico</i> ..	229
10.4.	Modelos cuánticos del átomo	230
10.4.1.	<i>El espín o giro de los electrones</i>	231
10.5.	Modelos del núcleo. Fuerza nuclear fuerte	232
10.5.1.	<i>La fuerza débil. El neutrino</i>	233
10.5.2.	<i>Aplicaciones. La fisión nuclear</i>	234
10.6.	Física de partículas	235
10.6.1.	<i>La proliferación de partículas</i>	237
10.7.	Teoría de los cuarks	238
10.7.1.	<i>El modelo estándar</i>	239
10.8.	Física del estado sólido	241
10.8.1.	<i>Las nanociencias</i>	242
10.9.	Teorías de la unificación	243
10.9.1.	<i>La teoría de las supercuerdas</i>	244

11. Estructura del universo	247
11.1. Universo newtoniano	247
11.1.1. <i>La mecánica celeste de Laplace</i>	248
11.2. Estrellas y galaxias	249
11.2.1. <i>El filósofo Kant y el astrónomo Herschel</i>	249
11.2.2. <i>El gran debate</i>	251
11.3. Evolución del sistema planetario	251
11.3.1. <i>La nebulosa de Laplace</i>	252
11.3.2. <i>El origen de los planetas</i>	253
11.4. Evolución de las estrellas	254
11.4.1. <i>La energía de las estrellas</i>	255
11.4.2. <i>De estrellas a agujeros negros</i>	256
11.5. Modelos relativistas del universo	258
11.5.1. <i>Los universos en expansión. Friedmann y Lemaître</i>	259
11.5.2. <i>Las elaboraciones de Eddington y Gamow</i>	260
11.5.3. <i>El universo estacionario</i>	261
11.6. Descubrimientos de observación	262
11.6.1. <i>Hubble y el alejamiento de las galaxias</i>	262
11.6.2. <i>La radiación cósmica de fondo</i>	263
11.7. Modelo estándar del <i>big bang</i>	265
11.7.1. <i>La evolución del universo del big bang al presente</i>	265
11.8. Algunas cuestiones cosmológicas	267
11.8.1. <i>La pluralidad de universos</i>	268
 Epílogo	 269
 Bibliografía	 271

2

El interludio medieval

El desarrollo de las matemáticas y la ciencia griegas se ve interrumpido con el periodo en el que Grecia se convirtió en una provincia del Imperio romano. Roma estaba más interesada en extender su dominio por todo el ámbito mediterráneo, con la organización y las leyes del Imperio, y promoviendo obras públicas. El latín sustituyó al griego como lengua común, y en latín se escribieron las enciclopedias en las que se recogían los fundamentos de la ciencia griega, pero sin desarrollos nuevos. Una nueva aportación a la aritmética y el álgebra viene de la India. Más tarde, los árabes traducen la ciencia griega y hacen nuevas aportaciones, en especial, a las matemáticas y la astronomía, incorporando los aportes de la India. Después de la caída del Imperio romano, en la nueva Europa cristiana, se crean las universidades y se traducen al latín, primero desde el árabe, los textos científicos griegos. De esta forma, se erigen las bases para el desarrollo de la ciencia moderna.

2.1. Enciclopedias romanas

De alguna manera, Roma se consideraba heredera de la cultura griega. Sin embargo, preocupada por el dominio político y militar, Roma se concentró en el desarrollo del derecho y de la administración, al mismo tiempo que fomentaba las obras públicas, que aseguraban las comunicaciones. Las calzadas romanas y las rutas marítimas en el Mediterráneo formaban una red comercial y de comunicaciones que

unía todas las provincias con Roma, el centro del poder militar y administrativo. Las ciudades romanas pronto desarrollaron un alto nivel de vida con sus foros, termas, templos, teatros, anfiteatros y estadios.

Sin embargo, la labor de autores romanos en el campo de la ciencia se limitó, prácticamente, a transmitir algunas de las ideas griegas y a la composición de obras generales, de carácter más bien divulgativo, las enciclopedias, en las que se pretendía recoger todo el saber de la Antigüedad, principalmente, el de los autores griegos, sin un criterio científico muy claro y, a veces, poco crítico.

2.1.1. Las enciclopedias de Plinio, Séneca y Lucrecio

El autor más popular de este tipo de obras generales es Gayo Plinio Segundo (23-74), conocido como Plinio el Viejo. Miembro de una familia noble romana, ocupó cargos administrativos durante el reinado del emperador Vespasiano. Murió en la erupción del Vesubio, cuando se acercaba a inspeccionar el fenómeno. Se le puede considerar como el primer científico víctima de su trabajo. Su obra *Historia naturalis* (Historia natural) está dividida en 37 libros que cubren todo el saber, desde la cosmología a la zoología. Él mismo llamó a su obra “enciclopedia”, nombre tomado del griego (*en-kyklos-paideia*, ‘instrucción en círculo’ u ‘obra en que se tratan todas las ciencias’). Sin un verdadero sentido crítico, Plinio mezcla en sus descripciones opiniones de todo género.

Lo poco que podemos incluir de física se encuentra solo en el libro segundo donde se describe el universo geocéntrico de una forma puramente cualitativa, sin ningún tratamiento matemático. Los temas tratados son variados: el movimiento y las características de los planetas, las estrellas, los eclipses y otros temas de astronomía, además de temas incluidos en los libros griegos de meteorología, como cometas, lluvia, vientos, terremotos, mareas, etc.

Otra obra de carácter enciclopédico es *Naturales quaestiones* (Cuestiones naturales), de Lucio Anneo Séneca (4-65). Nacido en Córdoba, se educó en Roma con maestros de la escuela estoica y neopitagórica. La agitada situación política de Roma le llevó al destierro en Córcega en el año 41. Al regresar a Roma en el 49, ocupó cargos públicos y fue preceptor de Nerón, quien más tarde ordenó su

muerte. Su obra es principalmente filosófica. Su obra *Cuestiones* está dividida en siete libros y en ella trata solo los fenómenos naturales incluidos en los libros griegos de meteorología: fenómenos ígneos en los cielos; de los rayos y truenos; de las aguas terrestres, del Nilo; de las nubes; de los vientos; de los terremotos y de los cometas. Séneca, como los otros enciclopedistas romanos, no es muy original, y en su obra dedica más espacio a las consideraciones generales que a los fenómenos concretos estudiados.

Tito Lucrecio Caro (98-55 a. C.) dedicó toda su vida a la composición de una sola obra: *De rerum natura* (Sobre la naturaleza de las cosas), un poema escrito en verso (en hexámetros latinos), que recoge la doctrina atomista de Epicuro, reconociendo la dificultad de su empresa. En los primeros cuatro libros describe la física y la cosmología de la teoría atomista, y, en los dos restantes, algunos tópicos de la aplicación de esta doctrina a temas concretos. Lucrecio expone, de forma resumida, la doctrina sobre el movimiento de los cuerpos celestes, siguiendo el esquema geocéntrico y algunos temas de astronomía como las fases de la Luna, los eclipses y el movimiento de los planetas. La obra de Lucrecio es muy importante pues da a conocer la teoría atomista en el ámbito de lengua latina, y por su posterior difusión en Occidente.

2.1.2. La educación en Roma

Otra obra que tendrá mucha transcendencia en la organización de la educación es la de Marco Terencio Varrón (116-27 a. C.). Varrón se educa en Roma y Atenas, ocupa varios cargos públicos y es autor de cerca de 80 obras. Entre ellas destacan *De lingua latina* (Sobre la lengua latina) y *Res rustica* (Agricultura). Aquí nos interesa su obra enciclopédica escrita hacia el final de su vida: *Disciplinae* (Disciplinas). En sus nueve libros cubre las disciplinas de gramática, dialéctica, retórica, geometría, aritmética, astronomía, música, medicina y arquitectura. Las siete primeras disciplinas constituyen lo que se conoce como las “siete artes liberales”, consideradas como la formación necesaria para todo ciudadano libre. Separadas en dos grupos, las tres primeras forman el *trivium* (trivio) y las otras cuatro (geometría, aritmética, astronomía y música) el *quadrivium* (cuadrivio). Este programa constituye el tronco de las enseñanzas durante siete

años en las escuelas del Imperio romano, y se mantendrá durante toda la Edad Media, el Renacimiento y aún más tarde.

En general, se puede decir que entre las aportaciones de los autores romanos no hay, por tanto, ninguna novedad respecto a las ideas ya presentadas por los griegos, ni en matemáticas ni en astronomía ni, mucho menos, en la aplicación de las matemáticas a la física. Las matemáticas, en especial, recibieron muy poca atención. La importancia de estas obras, escritas en latín, estriba en que, prácticamente, esta era toda la información científica de la que se disponía en los principios de la Edad Media en Occidente, donde el conocimiento de la lengua griega se había perdido. A pesar de todas sus limitaciones, estas obras sirven de enlace con los autores medievales, y les proporcionan cierto conocimiento de los logros de la ciencia griega. No se puede hablar, entonces, de una ruptura total entre la ciencia antigua y la medieval.

2.2. Matemáticas en la India

El desarrollo cultural de la India comienza con el establecimiento de los pueblos indoarios entre el 3000 y el 2000 a. C. Los documentos más antiguos están contenidos en los libros de los *Vedas*, que se pueden remontar hasta el 1500 a. C. Entre el 800 y el 500 a. C. se componen los *Upanishad* y *Arancakas*, colecciones de discursos filosóficos y religiosos. Poco se sabe de los orígenes de las matemáticas en la India. La originalidad de los matemáticos indios se debe, por lo general, al desarrollo de la aritmética y del álgebra que recibieron poca atención en Grecia, debido, probablemente, al deficiente sistema numérico. Por eso, en la India el nombre dado a las matemáticas era *ganita* ('ciencia del cálculo'). Su interés se centró en los métodos de cálculo, sin preocuparse mucho por su demostración. En gran parte, la motivación para el desarrollo de las matemáticas fue la astronomía. Hacia el siglo III a. C., los indios poseían ya un sistema numérico decimal, con símbolos distintos para cada uno de los diez primeros números, y en geometría conocían los teoremas básicos de la geometría plana.

El primer autor conocido, muy posterior, es Aryabhata (476-550), matemático y astrónomo natural de Patna, en cuya obra, que trata de astronomía y matemáticas, aparece ya el sistema decimal, con

símbolos para los números del cero al nueve, y la utilización de la posición para designar de qué múltiplo de diez se trata en cada caso. Los símbolos utilizados, a través de la versión árabe, resultarán finalmente en los números utilizados hoy en día. No sabemos el origen del sistema, ya que Aryabhata lo da por conocido. Este autor presenta, también, unas nociones de álgebra, con la solución general de la ecuación de segundo grado y algunos elementos de trigonometría, con tablas de senos y algunas relaciones entre funciones trigonométricas.

Un tratado más extenso es el de Brahmagupta (598-668), director de la escuela y observatorio de Ujjain, que está contenido en su obra de astronomía, *Brahmaphutasiddhanta*, con capítulos separados sobre aritmética y álgebra. En la parte dedicada a la aritmética se dan las reglas de las operaciones con números positivos (fortunas) y negativos (deudas) y, en especial, con el uso del cero. Brahmagupta propone algoritmos para efectuar las cuatro operaciones: suma, resta, multiplicación y división. En álgebra expone los métodos de solución de ecuaciones de primer y segundo grado, y de sistemas de dos ecuaciones con dos incógnitas.

Mucho más tarde, a principios del siglo XII, destaca la figura de Bhaskara (1115-1185), conocido como Bhaskaracharya o Bhaskhara, el maestro, también director del observatorio de Ujjain. Fue autor de seis libros, dos dedicados a aritmética y al álgebra, y el resto a aplicaciones de las matemáticas a la astronomía. En ellos se recogen de forma sistemática muchas aportaciones que pueden remontarse a autores indios anteriores y se describe, ya de forma completa, el sistema decimal y los símbolos utilizados para los números. La actividad científica en la India empieza a declinar a partir del siglo XIII, y no se da ya ningún nuevo desarrollo de las matemáticas hasta la época moderna. Los desarrollos indios iniciales de la aritmética y del álgebra fueron utilizados por los matemáticos árabes y por esta vía llegaron a Europa.

2.3. Ciencia árabe

En el siglo VII, Mahoma, con la predicación de su mensaje religioso, logra la unificación de las tribus árabes y establece su capital en La Meca. Entre el 661 y el 750 los califas omeyas trasladan la capital a Damasco, se extienden por el norte de África y se asientan en

España. Sus sucesores, los abasíes, trasladan la capital a Bagdad en el siglo VIII, y los omeyas, exiliados, fundando un califato independiente en Córdoba y El Cairo. Bagdad y Córdoba se convierten pronto en los dos focos culturales más importantes de esta época, creándose grandes bibliotecas y centros en los que se desarrolla sobre todo la astronomía y las matemáticas. A partir del año 800, empieza la gran labor de traducción de obras griegas al árabe, entre ellas las de Euclides, Tolomeo, Arquímedes y Aristóteles, y la composición de comentarios a ellas. En unos 100 años, se traducen al árabe la práctica totalidad de las grandes obras científicas griegas.

2.3.1. *Las matemáticas. Alkarismi*

Antes del final del siglo VIII, los árabes estaban ya en posesión de un buen sistema numérico, tomado de los indios, en especial de la obra de Brahmagupta, y durante el siglo IX traducen las mejores obras de los matemáticos griegos. De esta forma pueden llevar a cabo una integración de las dos tradiciones, la aritmética y el álgebra indias y la geometría griega. El primero, y en muchos casos, el más importante de los matemáticos árabes fue Alkarismi (Al-Khwarizmi o Al-Juarismi) (c. 780-830). Sus dos obras principales son: una de aritmética, conocida en Occidente por su traducción al latín con el título, *Algoritmi de numero indiorum* (Algoritmo sobre el número de los indios; la primera palabra es una corrupción de su nombre y se ha convertido en un término muy usado en computación), y la segunda de álgebra, con el título *Álgebra (Al-djabr wa'l mukabala*, ‘restauración y simplificación’), que ha venido a significar esta parte de las matemáticas.

En la primera obra, Alkarismi presenta el sistema decimal indio, el uso del cero y los procedimientos para las cuatro operaciones y la extracción de raíces cuadradas y cúbicas. En la obra de álgebra se define su objeto como el arte de relacionar una cantidad o número desconocido con otros conocidos, expresándolos en forma de una ecuación. Aunque todavía no se utiliza la escritura simbólica para representar las ecuaciones, se usa ya una designación distinta para la incógnita que para los otros parámetros que son siempre números. Alkarismi presenta la solución a ecuaciones de primer grado y seis casos de ecuaciones de segundo grado de coeficientes positivos, reconociendo la existencia de las dos soluciones de estas últimas.

El más importante de sus discípulos es Thabit ibn Qurra (835-901), matemático y astrónomo que traduce al árabe las obras de Euclides, Apolonio, Arquímedes y Tolomeo. Escribe, también, sobre las propiedades de los números, sobre paraboloides y sobre un método de sumas para calcular áreas y volúmenes, inspirado en el de Arquímedes, que constituye un precursor de las integrales. Otro matemático árabe importante es Al-Battani (877-929), al que se debe el perfeccionamiento de la trigonometría a partir de las ideas ya presentes en los autores indios y griegos. La trigonometría es, precisamente, uno de los campos en los que los árabes hacen más aportaciones.

2.3.2. La astronomía. El astrolabio

La astronomía conoce en el ámbito árabe un gran desarrollo. Entre el 813 y el 838 el califa Al-Mamún manda construir dos observatorios en Bagdad y Damasco, y más tarde en otras ciudades importantes. Los astrónomos árabes siguen el sistema geocéntrico, ajustándose a la obra de Tolomeo, cuya primera traducción se llevó a cabo a finales del siglo VIII. La astronomía, al modo griego, es considerada como parte de las matemáticas, de ahí que no haya una separación clara entre las dos ciencias.

Uno de los logros de los astrónomos árabes es el perfeccionamiento del astrolabio, instrumento ya conocido por los griegos, hasta el punto de considerársele en Occidente como un instrumento árabe. El astrolabio, útil para muchos tipos de observaciones astronómicas, consiste en dos discos que pueden girar uno sobre el otro, sobre un eje común, con proyecciones estereográficas sobre el plano del ecuador de las esferas celeste y terrestre gravadas y una visual. Alkarismi compone un comentario sobre el astrolabio y unas tablas astronómicas con las posiciones de planetas y estrellas.

Qurra, como astrónomo, se ajusta a la obra de Tolomeo, cuya traducción revisa. Al-Battani fue, también, un cuidadoso observador astronómico, que construye algunos instrumentos como un gran cuadrante mural y compone unas tablas astronómicas. A partir de sus observaciones, corrige algunos valores de Tolomeo de las posiciones del Sol, la Luna y los planetas. Otro astrónomo influyente en la Edad Media es Al-Farghani (~830), quien perfecciona el astrolabio y determina el valor del grado del meridiano equivalente a $56 \frac{2}{3}$

millas árabes o 111,818 km (una milla árabe es igual a 1973,5 m), valor citado por Tomás de Aquino (siglo XIII) y otros autores posteriores. De Al-Farghani es la obra *Elementos de astronomía*, con nuevas tablas. Entre los astrónomos árabes en España, destaca en Toledo Azarquiel (Al-Zarqali) (1029-1087), quien compone las tablas astronómicas toledanas que servirán de base a las tablas alfonsinas. Azarquiel diseña también un nuevo tipo de astrolabio conocido como el “zafeo de Azarquiel”. En su época, Córdoba y Toledo se convirtieron en dos centros importantes de observaciones astronómicas.

2.3.3. La óptica y la mecánica. Alhazen

Las matemáticas aplicadas a los problemas de óptica y mecánica, al modo griego, reciben, también, la atención de los matemáticos árabes. Entre los primeros autores sobre óptica se encuentra el filósofo Al-Kindi (~870), quien no se contenta con comentar las obras griegas, sino que añade nuevas y originales precisiones y pruebas a las demostraciones en ellas expuestas. El autor más importante de óptica es Alhazen (Al-Haytham) (987-1038), matemático y comentarista de Euclides, Apolonio y Arquímedes. Su obra de óptica *Kitab al manazir* es traducida al latín con los títulos: *De aspectibus* (Sobre los aspectos) y *Opticae thesaurus Alhazeni arabis* (compendio de óptica del árabe Alhazen). Alhazen introduce el concepto del rayo de luz como una partícula lanzada por el cuerpo luminoso que incide en el ojo, corrigiendo a Euclides y a otros autores griegos, que la habían considerado un cono de rayos que sale del ojo. Alhazen propone, por lo tanto, una teoría corpuscular de la luz, al estilo de los atomistas griegos. También indica que la velocidad de la luz es finita y distinta para cada medio. Trata sobre la reflexión de la luz en espejos planos, esféricos, cilíndricos y cónicos y establece las leyes de la reflexión para todos los casos. Establece que el rayo incidente y reflejado está en un mismo plano, normal al plano del espejo (plano de incidencia), y que los ángulos de incidencia y reflexión son siempre iguales. Su obra tiene mucha influencia en Europa en los siglos XV y XVI, no aparecerá nada nuevo en esta materia hasta la publicación de la óptica de Kepler en 1610. En mecánica, los árabes tratan, siguiendo la tradición de Arquímedes, de los problemas

de estática e hidrostática, también de los del movimiento de los cuerpos. Los autores árabes de óptica y mecánica continúan la línea, iniciada en Grecia, de la aplicación de las matemáticas a los problemas físicos. Muchas de sus obras, traducidas al latín, contribuyen al desarrollo de la ciencia en Europa a finales de la Edad Media.

2.4. Ciencia en la Europa cristiana

La caída del Imperio romano en Occidente en el 476 supone un cataclismo histórico que a veces no se valora lo suficientemente. No fue solo la desaparición de un sistema político, sino de toda una cultura y forma de vida. Las distintas invasiones de los pueblos bárbaros, contenidos durante algunos siglos al este del Rin por las legiones romanas, arrasan las estructuras políticas, sociales y culturales romanas. Poco a poco, estas son sustituidas por los nuevos reinos, formados por los pueblos que ocuparon las distintas regiones de Europa: los germanos en el centro, los francos en Francia y los visigodos en España. Se crean nuevos reinos estables, en los que la clase dirigente pertenece casi exclusivamente a estos pueblos. Sin embargo, poco a poco, la cultura grecorromana va influyendo en los nuevos reinos.

Como ya se ha visto, la ciencia nunca ocupó un lugar importante en la parte occidental del Imperio romano, cuya lengua común era el latín, y esto constituyó un problema para el desarrollo científico de los pueblos instalados en esa parte del Imperio. Un factor importante en el nuevo orden de cosas es el papel preponderante que adquirió la religión cristiana en los nuevos reinos. Poco a poco, los nuevos reinos fueron adoptando la religión cristiana y la Iglesia fue adquiriendo una relevancia social cada vez mayor. En estas nuevas sociedades, en las que la clase dirigente pertenecía a los pueblos germánicos, de pobre bagaje cultural, la civilización romana y el latín como lengua culta solo se conserva a través del estamento eclesiástico, que adquiere pronto un papel cultural predominante.

Poco a poco, en los nuevos reinos se va experimentando, entre los siglos VII y XI, un lento despertar del interés científico, y para ello son cruciales las instituciones eclesiásticas, en especial, los monasterios y las escuelas catedralicias, de las que nacerán las futuras universidades. Las ideas principales que introduce el pensamiento cristiano

en la visión del mundo están derivadas, principalmente, de considerarlo creado por Dios. Los pocos contenidos científicos se basan en las enciclopedias romanas. Durante el Imperio romano tardío, en la parte occidental, el conocimiento del griego se fue haciendo cada vez más raro, lo que alejó aún más a la clase culta de los textos científicos griegos. Después de la caída del Imperio romano de Occidente, esta situación se agudizó, al quedar el Imperio de Oriente (Bizancio) aislado de Occidente. Para los nuevos reinos emergentes en Europa, los únicos textos científicos disponibles eran aquellos escritos en latín, es decir, las enciclopedias, como las de Plinio y Séneca. Esta pobreza de textos científicos en latín repercutirá en las dificultades del desarrollo de la ciencia en la alta Edad Media.

Entre los autores medievales tempranos destaca Casiodoro (490-585), pues influyó en la dedicación a las artes y las ciencias de los nacientes monasterios de la regla de San Benito, fomentando la instalación de bibliotecas y la copia de manuscritos. Esta labor de copia no se limitaba a textos tan solo de carácter religioso, también se extendió a textos de autores latinos que abarcaban otras materias, con lo que se aseguró su conservación. Casiodoro estructuró para las nuevas escuelas cristianas los estudios del trivio y el cuadrivio romanos, cuyo programa se convirtió en la base de los estudios elementales desde el comienzo de la Edad Media. Se debe destacar que tres de las cuatro disciplinas que se incluían en el cuadrivio son matemáticas, lo que indica que aún en esta época, considerada como oscura, el interés por la ciencia no estaba del todo ausente.

2.4.1. Isidoro y Beda

Una de las primeras obras de temas propiamente científicos de un autor eclesiástico es obra de Isidoro, obispo de Sevilla (560-636), el autor más importante de su época. Su obra principal, las *Etimologías*, pretende ser un compendio de todo el saber conocido en su tiempo. La parte dedicada a la astronomía es bastante extensa, y en ella se encuentran ya las líneas generales de la estructura del universo geocéntrico. Mucho más resumido, y dedicado solamente a lo que podemos llamar las ciencias naturales, es su pequeño tratado *De natura rerum* (Sobre la naturaleza de las cosas), en el que se resumen las ideas básicas sobre el conocimiento de la naturaleza. En esta obra

Isidoro se basa, como en la anterior, sobre todo en las obras de Plinio y Séneca, y en ella acepta el modelo cosmológico geocéntrico con siete esferas celestes. La obra de Isidoro tuvo una gran difusión en toda Europa y sus copias formaban parte de las primeras bibliotecas de los monasterios.

Sobre la obra de Isidoro, se basa la de Beda el Venerable (672-735), exponente del floreciente monacato inglés, también con el mismo título: *De rerum natura*. Como en el caso de Isidoro, Beda toma también gran parte de sus conocimientos de Plinio. En su obra aparece ya plenamente explicado el modelo cosmológico geocéntrico y la esfericidad de la Tierra, proponiéndose varios argumentos en su defensa. La obra de Beda, como la de Isidoro, tuvo una gran difusión en Europa y a ella se añadieron pronto comentarios.

2.5. Traducciones de la ciencia griega y árabe

Un elemento importante en el desarrollo de la ciencia en la Edad Media son las traducciones al latín de obras científicas griegas, primero desde su versión árabe, y de las traducciones al latín de obras de autores árabes (a través de los cuales se introduce también la matemática india), y, después, desde los textos griegos (entre los siglos XII y XIII). Esto supone una aportación de textos científicos que Occidente no había conocido, ni siquiera durante la época romana. La importancia de dichas traducciones para el desarrollo de la ciencia es incalculable. Sin duda, este hecho constituye un hito fundamental y decisivo para el desarrollo posterior de la ciencia. La llamada revolución científica del Renacimiento no puede entenderse sin este paso previo de la introducción en Europa, a través de sus traducciones al latín, de la ciencia griega y de las trascendentales aportaciones de los autores árabes.

El centro de traducciones más importante es el de Toledo, donde conviene destacar a Juan de Luna y Domingo Gundisalvo, quienes, además de textos griegos en versión arábiga, tradujeron la obra de Alkarismi, introduciendo así el sistema decimal y el álgebra en Occidente. El más fecundo traductor afincado en Toledo fue, sin duda, Gerardo de Cremona (1114-1187), con más de 70 traducciones, entre ellas el *Almagesto*, de Tolomeo, los *Elementos*, de Euclides, las *Cónicas*, de Apolonio, y textos de Arquímedes, además de los de

filosofía natural de Aristóteles y sus comentaristas árabes. Otro centro de traducciones fue Sicilia y el sur de Italia, una vez expulsados los árabes de aquellas regiones, a finales del siglo XI. Dichas regiones habían pertenecido durante algún tiempo al Imperio bizantino y el contacto con él no se perdió nunca del todo. Allí, en los siglos XII y XIII, se hicieron traducciones directamente del griego de obras como las de Tolomeo, Euclides, los diálogos de Platón y los tratados de Aristóteles. En 1202, Leonardo de Pisa (1175-1212) traduce las obras de Alkarismi, con las que introduce los números árabes y el sistema decimal en Europa.

La traducción de las obras científicas y filosóficas griegas al latín, así como de las obras de los autores árabes, produce una verdadera revolución del saber en los siglos XII y XIII. En el ámbito árabe este proceso se había dado tres siglos antes. Desde el punto de vista de las matemáticas, la traducción de la obra completa de Euclides, y de las obras de Apolonio, Arquímedes, Proclo y otros autores supone un adelanto enorme al hacerse asequible la rica geometría griega. Por otro lado, la traducción, sobre todo, de la obra de Alkarismi y de sus continuadores árabes introdujo en Europa el sistema decimal y el álgebra procedentes de la India. De esta forma, se une la geometría griega con la aritmética y el álgebra de indios y árabes. Respecto a la física, hay que destacar la traducción de las obras de óptica y mecánica de Euclides y Arquímedes y de los autores árabes como Alhazen y Al-Farisi. Tenemos, por tanto, puestas las bases para el desarrollo posterior de la aplicación de las matemáticas a los fenómenos naturales, de la que nacería más tarde la física actual.

No hay que olvidar que con la traducción de las obras de Aristóteles, entre ellas las dedicadas a la filosofía natural, entra también esta otra manera de orientar el estudio racional de la naturaleza que es la doctrina aristotélica. El enorme prestigio que adquirió pronto dicho autor hace de sus obras la fuente última del saber. Los autores medievales, deslumbrados por tan magna obra y tan extraordinario pensador, consideraron que todo lo que quedaba por hacer era, solamente, repetir y comentar las obras del gran filósofo. Esta actitud llevará con el paso del tiempo a un cierto estancamiento de la ciencia. Finalmente, la línea de la física matemática terminará por imponerse, después de una larga batalla con la física aristotélica.

2.6. Creación de las universidades

Otro de los fenómenos que más contribuyen en Occidente al desarrollo de la ciencia en esta época es la creación de las universidades. Aunque en todas las culturas existen escuelas, más o menos organizadas, para la enseñanza y la transmisión del saber, en Europa estas adquirieron, a partir de la Edad Media, unas características especiales que las convirtieron en los focos privilegiados del desarrollo científico. En Europa, en la Edad Media, las universidades nacieron a partir de las escuelas establecidas en los monasterios y las catedrales cuya organización se remonta al siglo IX. En estas escuelas se estudiaban las artes liberales, de acuerdo con los programas del trivio y cuadrivio. En el desarrollo posterior de estas escuelas, el primer nombre que reciben es el de *studium* ('estudio') y *studium generale* ('estudio general'), cuando tenían más de una facultad, para indicar la diversidad de disciplinas impartidas. Más tarde, se acuña el término *universidad* para referirse al conjunto de profesores y alumnos (*universitas magistrorum et scholarium*), y se divide en cuatro facultades: filosofía, teología, derecho y medicina. Las universidades así establecidas conferían a sus miembros derechos y privilegios, reconocidos tanto por las autoridades civiles como por las eclesiásticas.

Las primeras tres grandes universidades medievales son las de Bolonia, París y Oxford, la primera más dedicada al derecho y a la medicina y las otras dos a la filosofía y a la teología. Los estudios de filosofía natural en las dos últimas constituirán un factor importante en el desarrollo de la ciencia. La universidad más importante es, sin duda, la establecida en París entre 1150 y 1170. En España, los primeros estudios generales se crean en el siglo XII. Salamanca adquiere el rango de universidad en 1218, y se convierte pronto en la universidad de mayor prestigio. Otras universidades se crean más tarde, como la de Valladolid, en 1260, y la de Sevilla, en 1254.

En general, las universidades medievales estaban formadas por conjuntos de colegios, cada uno con su propio rector, además de tener un rector de toda la universidad. Los grados conferidos por las universidades eran tres: bachiller (*baccalaureatus*), con derecho a enseñar bajo supervisión, maestro (*magister*), con derecho pleno a la enseñanza, y doctor. Los grados se conferían después de un examen público. El primer título superior, el de *Magister Artium* (Maestro de Artes), abarcaba el estudio de la filosofía en la que una gran parte

la constituía la filosofía natural. Después de conseguir este título se pasaba a las facultades superiores de teología, medicina y derecho. Los estudios que hoy llamamos de ciencias, por tanto, se estudiaban en la facultad de filosofía. La filosofía se solía dividir en tres partes: filosofía natural, metafísica y moral. A la facultad de filosofía correspondían, también, las cátedras de lógica, física y matemáticas. Las cátedras de matemáticas incluían la enseñanza de la astronomía, la óptica, la mecánica y la música, disciplinas que se consideraban de matemáticas aplicadas. Hasta el siglo XIII los estudios estaban centrados en la teología, para la que la filosofía se consideraba una preparación.

2.6.1. Filósofos y teólogos y el estudio de la naturaleza

Es importante el hecho de que para cursar los estudios de teología se tenían que haber cursado antes los de filosofía: de esta forma, todos los alumnos que iban a proseguir sus estudios de teología habían tenido que pasar antes por los de filosofía. Poco a poco, la filosofía fue adquiriendo su propia autonomía, y dentro de ella una parte importante era la filosofía natural, en la que se incluían las disciplinas que hoy consideramos pertenecientes a las ciencias naturales. Para muchos la filosofía se convirtió entonces en el fin de sus estudios, unos estudios que ya se podían separar de la teología.

Entre los primeros autores medievales que se plantean el estudio de la naturaleza separado de la teología se encuentran Thierry de Chartres (1100-1150) y Adelardo de Bath (1090-1160). Ambos afirman que toda la explicación racional del universo depende del conocimiento matemático y defienden la autonomía de la ciencia frente a la autoridad, argumento que se utilizaba en teología.

Un autor importante es el franciscano inglés Guillermo de Ockham (1284-1349), iniciador de la crítica a la doctrina aristotélica. Interesado sobre todo por la lógica y la teología, se opuso a las especulaciones de la filosofía escolástica. Utilizó frecuentemente el principio de que en filosofía la explicación más sencilla o más simple es la que debe aceptarse, lo que hoy se conoce como “la navaja de Ockham”.

En un sentido amplio en los autores medievales, la filosofía natural abarcaba lo que hoy se entiende como las ciencias de la