

LA INVESTIGACIÓN
EN LA GRAN INDUSTRIA
EL CONTEXTO EUROPEO



LA INVESTIGACIÓN
EN LA GRAN INDUSTRIA
EL CONTEXTO EUROPEO

Ángel Martín Municio

Con la colaboración de:

Pedro García Barreno

Alberto Galindo Tixaire

Juan Pérez Mercader

Daniel Martín Mayorga

Guillermo García Alcaine

José Luis Sotelo Sáncho

Mercedes Martín-Municio de Montaud

ACADEMIA EUROPEA
DE CIENCIAS Y ARTES



ESPAÑA

La Academia de Ciencias y Artes - España quiere testimoniar su reconocimiento al Ministerio de Ciencia y Tecnología por su apoyo, que le ha permitido llevar a buen puerto los Proyectos encuadrados bajo la denominación de "El reto tecnológico". Son éstos, además del presente: "Beneficios fiscales en las relaciones investigación-empresa", "Indicadores de I+D en la Industria" y "Nuevas tecnologías de la comunicación". Todos ellos dirigidos por el Profesor Ángel Martín Municio.

LA INVESTIGACIÓN EN LA GRAN INDUSTRIA.
EL CONTEXTO EUROPEO

EDITA:
© Academia Europea de Ciencias y Artes - España

DISEÑO: INEEDIT

DIBUJOS: Alicia Cañas Cortazar

I.S.B.N.: 84-607-9584-5
DEPÓSITO LEGAL: M-52.619-2003

IMPRIME: Sociedad Anónima de Fotocomposición
Talisio, 9. 28027 Madrid

P R O P Ó S I T O

LA ACADEMIA EUROPEA DE CIENCIAS Y ARTES pretende que este libro, *LA INVESTIGACIÓN EN LA GRAN INDUSTRIA. EL CONTEXTO EUROPEO*, que recoge uno de los últimos trabajos impulsados por el Profesor Ángel Martín Municio, cofundador y Vicepresidente de su Delegación Española, contribuya a recordar su memoria como un gesto más de reconocimiento a su ingente labor científica y humanística.

Nacido en Haro (La Rioja) en 1923, era catedrático en Ciencias Químicas y doctor en Farmacia. Becario del Consejo Superior de Investigaciones Científicas y del Ministerio de Asuntos Exteriores, amplió estudios de su especialidad en los años cincuenta en el Laboratorio de Bioquímica de la Universidad de Utrecht en Holanda, en el Instituto Nacional de Investigaciones Médicas de Londres, y en el Instituto Max Planck de Heidelberg en Alemania. En 1963 investigó también en los Laboratorios Twyford de Mill Hill, en Londres.

Desempeñó sucesivamente las funciones de colaborador e investigador científico y jefe de la Sección de Bioquímica en el Instituto Alonso Barber del CSIC. En 1967 obtuvo por oposición la recién creada Cátedra de Química Fisiológica de la Facultad de Ciencias de la Universidad Complutense, fue encargado de la asignatura de Bioquímica de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Madrid y, más tarde,

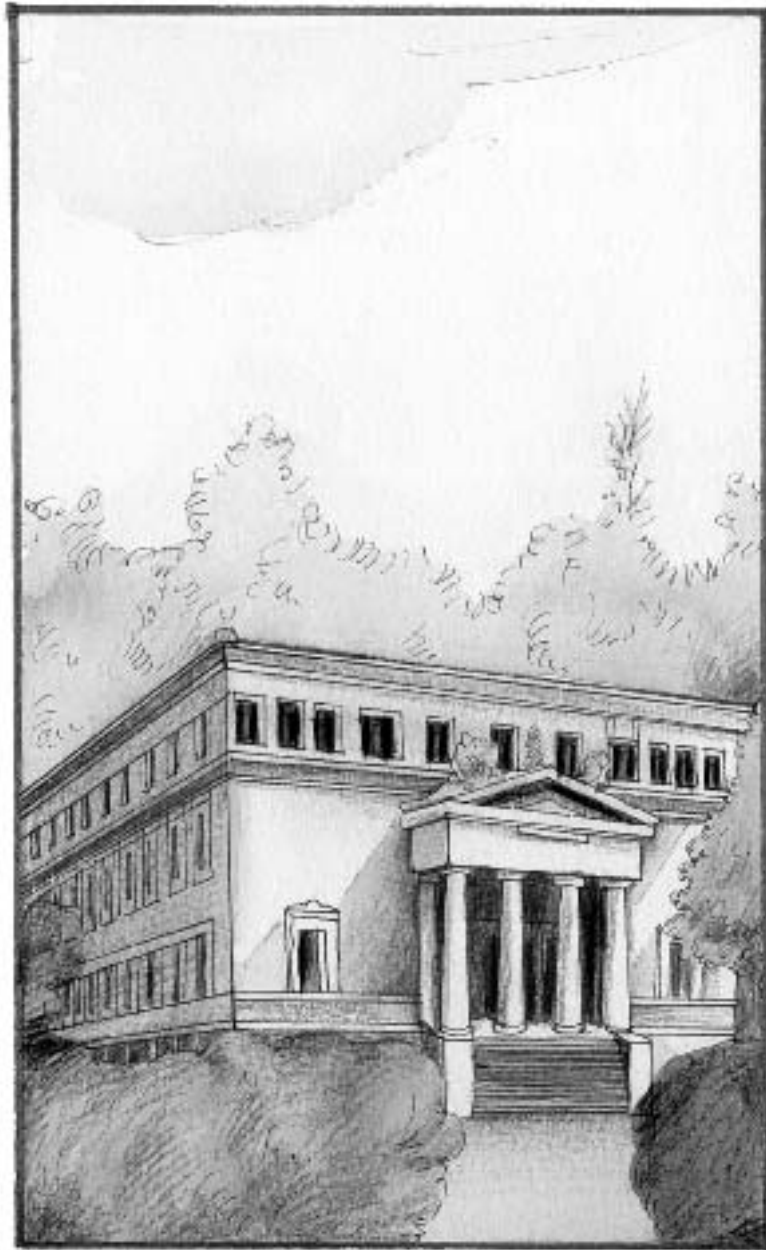
director de su Departamento de Bioquímica. En 1971 se convirtió en el primer miembro español de la Organización Europea de Biología Molecular, simultaneando su trabajo con el de vicepresidente de la Conferencia Europea de Biología Molecular, en cuya fundación participó.

Fue elegido Académico de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales en 1967, Presidente en 1985 y reelegido en 1994. Imposible olvidar sus importantes contribuciones en el campo de la terminología de la ciencia y en la difusión de la cultura científica.

Miembro de la Real Academia Española de la Lengua desde 1982, de la que sería posteriormente vicedirector. Su discurso de ingreso, en el que disertó sobre “La biología del habla y del lenguaje” tuvo lugar en 1984. Fue uno de los miembros más activos del Seminario de Terminología Científica de esa Real Academia y autor del primer volumen del *Vocabulario Científico y Técnico*, participando activamente en la incorporación de nuevos términos. Entre sus aportaciones al estudio del idioma destaca la renovación tecnológica, así como la coordinación de trabajos de lingüística y léxico computacional, de terminologías científicas, y de vocabulario científico y técnico. Destacó y colaboró en el principio de que las ciencias y las letras no sólo no son excluyentes sino que se complementan al necesitar de la creatividad y de las metáforas para transmitir conocimiento con claridad y rigor.

Formó parte de los patronatos de importantes Fundaciones españolas y colaboró estrechamente con la Fundación BBV, desde su creación en 1990, como miembro de su Comité y en calidad de asesor científico.

Ángel Martín Municio defendió siempre que la cultura no debe tener una señalización territorial sino “una calidad



La Real Academia Española cuya constitución fue aprobada por Felipe V el 3 de octubre de 1714 colocándola bajo su “amparo y Real Protección”.

más extensa que suponga la totalidad de las formas de dedicación del hombre, con inclusión tanto de las ciencias y la tecnología como de las humanidades”. Su gran obsesión, en este sentido, fue la de rellenar la vaguada que ha existido tradicionalmente entre la ciencia y las humanidades, una separación real pero innecesaria, como solía decir.

No es éste el escenario más adecuado para enumerar sus muchos méritos, ni sus incontables publicaciones, así como los resultados de toda una vida dedicada incansablemente a la investigación y a la propagación de la ciencia. Pero sí lo es para recordar en su justa medida la importancia de un hombre que se había constituido en salvaguarda de la Cultura con mayúscula. Porque ese fue su gran papel. El de impulsor, incitador incansable hacia las formas más nobles de la Cultura en cualesquiera de sus manifestaciones, porque como él decía, “es que me gusta todo” y a todo se dedicaba con igual ímpetu, con igual intensidad, con igual empeño. Él, que siempre decía “el dinero no es nunca el problema”, se ocupaba de conseguirlo debajo de las piedras para dotar generosamente los proyectos en los que se embarcaba enrolando las tripulaciones más heterogéneas.

Con fama bien ganada de exigente, e incluso duro, predicaba con el ejemplo. Nunca llegó tarde. Siempre se fue el último. Nunca escatimó un esfuerzo ni horas de trabajo, ni dedicación. Pero tan importante o más que lo que hizo, con ser mucho, es lo que consiguió que los demás hicieran.

Fue un inagotable instigador de ideas, de proyectos, de ambiciones en el más noble sentido de la palabra. Profesor hasta la médula, la docencia y el sentido pedagógico trascendían toda su actividad.

PROPÓSITO

Ángel Martín Municio acababa de regresar de Puerto Rico y China donde había participado, respectivamente, en el Congreso de la Asociación de Academias de la Lengua Española y en la preparación del Congreso Anual de las Academias de Ciencias mundiales. Pocos días después emprendería su último gran viaje.

Sírvanos ahora su memoria, ya que no su presencia, de acicate en nuestro empeño de conservar y acrecentar la cultura científica y artística de Europa.

*Academia Europea de Ciencias y Artes
España*

Madrid, noviembre de 2003

P R Ó L O G O

EN el trabajo que sigue, el Profesor D. Ángel Martín Mucio analiza el complejo mundo de la investigación científica y su relación con la sociedad, con especial énfasis en lo concerniente a Europa.

La obra contiene un resumen histórico, un análisis de la situación actual y recomendaciones para el futuro. En la parte histórica se enfatiza el papel protagonista que Europa ha jugado en el nacimiento y desarrollo de la filosofía, la matemática, la física, la química, la biología, la medicina y la tecnología desde la Grecia clásica hasta la actualidad, en la que dicho papel está compartido con el resto del mundo, en especial los Estados Unidos de América. En el análisis de la situación actual se estudia la relación de la ciencia con la economía, el bienestar material e intelectual de la sociedad, y la cultura en general, a través de numerosos ejemplos. Finalmente se utilizan elementos de las dos partes anteriores para proponer qué características debe poseer la investigación científica contemporánea para no sólo alcanzar sus objetivos propios de ampliación del conocimiento sino contribuir también al bienestar general de la sociedad. A tal fin se estudia la forma en que los estados, y en particular la Unión Europea presente y futura, deben apoyar, encauzar y organizar dicha investigación.

El autor era profundamente optimista, y mantenía una fe sin fisuras en la eficacia de la ciencia para moldear benefi-

PRÓLOGO

ciosamente nuestra sociedad y mejorar la vida de los ciudadanos. Resulta reconfortante esta actitud en una época en la que con frecuencia se acusa a la ciencia del mal uso posible de sus descubrimientos, olvidando que incluso las cosas más útiles son susceptibles de ser pervertidas. ¿Deberíamos renunciar al fuego por las terribles consecuencias que a veces tiene? Más sutilmente perniciosa es quizás la indiferencia o incluso desdén ante la ciencia que a veces exhiben algunos intelectuales y políticos, o la exigencia de rentabilidad inmediata de los nuevos descubrimientos, olvidando toda la historia pasada. Este trabajo proporciona abundantes argumentos a favor de la investigación científica y de sus aplicaciones tecnológicas.

El fallecimiento del Profesor Martín Municio dejó algunos capítulos sin la extensión que seguramente habrían alcanzado, y a la obra sin su revisión final. Al hacernos cargo de ésta hemos tratado de respetar al máximo las opiniones del autor y la estructura del trabajo, añadiendo solo algunos detalles que nos han parecido necesarios y que seguramente habría incluido el autor de haber dispuesto de tiempo. Algunos acontecimientos posteriores a la terminación del original aparecen en notas al final del libro.

Desearíamos que los lectores de este trabajo encontrasen en él tantas satisfacciones como las que nosotros hemos obtenido revisándolo.

*Pedro García Barreno, Alberto Galindo Tixaire,
Daniel Martín Mayorga, Juan Pérez Mercader,
Guillermo García Alcaine, José Luis Sotelo,
Mercedes Martín-Municio de Montaud*

Madrid, noviembre de 2003

SUMARIO

PROPÓSITO	7
PRÓLOGO	13
INTRODUCCIÓN GENERAL	17
I. EUROPA Y LOS ORÍGENES DE LA CIENCIA MODERNA	
1. Los orígenes de la Filosofía y la Ciencia en Europa	19
2. Europa y la Revolución de la Química. La Ciencia en el siglo XVIII	33
3. El nacimiento de la Ciencia moderna en España y las riquezas americanas de las expediciones españolas en el siglo XVIII	37
II. EUROPA Y LA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL. INICIACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN INDUSTRIAL AMERICANA	49
III. EUROPA Y LA QUÍMICA ORGÁNICA. LA CIENCIA FUNDAMENTAL EN EL SIGLO XIX	57
IV. LA CIENCIA Y LAS GRANDES INSTALACIONES CIENTÍFICAS EN EL SIGLO XX	63
V. LA CONJUNCIÓN CIENCIA-ECONOMÍA	81
VI. LA CONTRATACIÓN DE CIENTÍFICOS EXTRANJEROS EN LOS ESTADOS UNIDOS. LAS FUNDACIONES AMERICANAS	89
VII. CIENCIA, TECNOLOGÍA, SOCIEDAD, POLÍTICA Y ECONOMÍA. LA INVESTIGACIÓN FUNDAMENTAL Y EL PROCESO DE INNOVACIÓN	93

VIII. POSICIÓN CENTRAL DE LA INVESTIGACIÓN BÁSICA. SU REPERCUSIÓN ECONÓMICA	
1. Introducción	119
2. Beneficios económicos de la investigación básica	123
3. Evaluación económica de la investigación básica	126
4. La experiencia europea	136
IX. CRECIMIENTO ECONÓMICO A TRAVÉS DE LA INNOVACIÓN	143
X. LA COMPRENSIÓN SOCIAL DE LA CIENCIA	
1. Introducción. Ciencia, cultura y progreso	171
2. Ciencia, cultura y sociedad en Europa y España	176
3. Ciencia y sociedad contemporáneas	180
NOTAS	189
BIBLIOGRAFÍA	193
BIOGRAFÍAS	201

I N T R O D U C C I Ó N G E N E R A L

ESTE estudio sobre la situación de la investigación en el entorno general de la Ciencia, la Técnica y la Innovación consta de diez capítulos. Su argumento vertebral consiste en mostrar, primero, que el “origen” de la ciencia moderna tuvo lugar en Europa, tanto en sus iniciales planteamientos filosóficos como en la totalidad de los aspectos empíricos, desde la revolución francesa de la Química en el siglo XVIII hasta las expediciones españolas a América. La revolución industrial a lo largo del siglo XVIII, el formidable desarrollo de la gran Química Orgánica en el siglo XIX, y la gran Física del siglo XX se produjeron también en Europa. La investigación básica desarrollada inicialmente en Europa dio paso en los Estados Unidos a la investigación industrial, a la contratación de científicos europeos y a la utilización militar de la investigación.

En segundo lugar, la globalización actual de las relaciones “Ciencia-Tecnología-Economía” impone un nuevo tratamiento y nuevas exigencias a la investigación científica, convirtiendo a la “innovación”, en toda su amplitud y complejidad, en la herramienta fundamental del crecimiento económico. En el seno de esta globalización, la Ciencia y la Tecnología deben considerarse a la luz de los condiona-

mientos políticos y económicos que han ido imponiendo las sucesivas etapas de la Unión Europea, y en general, en los contextos políticos y económicos europeo y mundial actuales. Todo ello centrado en la mundialización de la economía y en la progresiva actualización del “espacio de investigación europeo”, expresado principalmente a través de los Programas Marco; merecerán atención los elementos políticos y los objetivos a largo plazo de dichos programas, junto con la cuantificación económica de sus actividades, sobre todo en lo que respecta a las ciencias de la vida y a las ciencias y técnicas de la información y la comunicación. Finalmente convendrá comparar la situación europea actual con la voluntad de predominio de los Estados Unidos en todos los sectores, traducida en los presupuestos federales para la ciencia de la Administración norteamericana.

De todo ello, y del examen de múltiples situaciones particulares en los campos de la Ciencia y la Tecnología, se concluirá la posición central e indispensable de la investigación básica en cualquier planteamiento de la competitividad de la nueva Europa. Esta posición central ha de formar parte del análisis de la investigación y desarrollo (I+D) en la industria, tanto en su conjunto como particularizada a sus más importantes y dinámicos sectores.

Dada la complejidad del problema no será fácil ni quizás conveniente considerar aisladamente cada aspecto en un solo capítulo. Por muy simplificada que sea la naturaleza de cada tema, siempre habrá conexiones imprescindibles que enriquezcan su tratamiento y originen una sutil red que, con solapamientos, recubra la totalidad del asunto. Muchos subtemas están conectados con varios temas principales y aparecerán más de una vez.

I. EUROPA Y LOS ORÍGENES DE LA CIENCIA MODERNA

1. Los orígenes de la Filosofía y la Ciencia en Europa

TRAS la “revolución del Neolítico”, el conocimiento incluyó de forma esencial la transmisión de procedimientos con un primitivo carácter tecnológico, aunque muy distantes aún de la ciencia. Así, los métodos para la elaboración y conservación de los alimentos y la fabricación de utensilios y recipientes para manejarlos, el paso de la recolección a la producción agrícola y todas aquellas prácticas relacionadas con el asentamiento estable y sedentario de pequeñas poblaciones en el territorio. Hace diez o doce mil años estos cambios sociales iniciaron las artes culinarias y diversas prácticas biotecnológicas. Varios milenios antes de Cristo las grandes civilizaciones de la Antigüedad dejaron documentos, pinturas, tradiciones y mitos acerca de las *fermentaciones* utilizadas en la obtención del pan, el vino y la cerveza.

El hombre sintió desde antiguo el impulso de explorar el universo y su propia naturaleza. La primera manifestación cultural de la humanidad fue no sólo de naturaleza tecnológica sino también artística: si el hombre tuvo que movilizar toda su inteligencia para asegurar su subsistencia frente

a un ambiente por completo hostil, cabe pensar que también sintió la necesidad de exhibir su espíritu creativo. De esta manera, el sentido utilitario de la cultura tecnológica se mostró en equilibrio con el deleite sensual de la cultura artística desde los balbuceos mismos de la civilización.

Conviene examinar aunque sea brevemente la evolución histórica y las relaciones de la filosofía, la ciencia y la tecnología, y en particular los hechos científicos más sobresalientes acaecidos en Europa durante los últimos siglos, sobre todo en los campos de la Física, la Química y la Biología, así como la manera en que la transformación de la ciencia y la tecnología en poder político y militar de los Estados afecta a las relaciones internacionales económicas y políticas, y a la misma “comprensión pública del fenómeno científico”.

La mayor conexión entre *ciencia* y *filosofía* se manifiesta en el ejercicio simultáneo de ambas, porque —afirmó el filósofo francés Paul Ricoeur— “la filosofía se agota en sí misma cuando pierde el contacto con las ciencias [...] y cuando la filosofía no dialoga con las ciencias se repite a sí misma [...] y se recluye en un debate sobre su propio pasado”. Pues bien, en el centro de este primer círculo de relaciones entre el filósofo y la ciencia, en el que el filósofo es a la vez creador de ciencia, encontramos a Aristóteles, al que acompañarían mucho más tarde Descartes y Leibniz, y, más recientemente, Russell y Whitehead. Hubo otros que sin cultivar expresamente la ciencia se aplicaron a conocerla desde dentro para poder construir sus elaboraciones metafísicas o reales, la materia, el universo o la vida. Así, Kant utilizó la ciencia de Newton; Comte se sirvió de diversas ciencias de su tiempo; Schelling estudió en Leipzig matemáticas, química, botánica y fisiología, que fueron la base de sus obras físico-naturales;

Bergson fue buen conocedor de las teorías biológicas y cosmológicas, etc. Así ha ocurrido también recientemente con Zubiri, Merleau-Ponty y García Bacca.

Ciencia y filosofía formaron durante bastantes siglos una unidad cultural que se resistió a su fragmentación. En el siglo IV a.C. Aristóteles recopiló el saber científico de su época sobre el movimiento de los cuerpos celestes, sobre la clasificación sistemática de los seres vivos, el estudio del desarrollo embrionario y los cambios evolutivos, y sobre la lógica matemática. Sus ideas no fueron reemplazadas definitivamente hasta Galilei (siglo XVII), Darwin (siglo XIX), o Boole (siglo XIX), respectivamente.

Aristóteles no estuvo solo; en el establecimiento y conservación de esta unidad le precedieron o acompañaron entre otros: Tales de Mileto (siglo VI a.C.), polifacético investigador de la naturaleza, que realizó demostraciones astronómicas y estudió por primera vez el magnetismo; Pitágoras (siglo VI a.C.), filósofo, matemático y astrónomo, que descubrió el teorema que lleva su nombre, demostró la esfericidad de la Tierra y situó la teoría de los números en el centro de la filosofía, buscando el secreto y la armonía del universo en las relaciones numéricas entre sus componentes; Empédocles (siglo V a.C.), que anticipó la moderna teoría de la evolución al proponer que el nacimiento de los seres vivos se originó en los organismos inferiores a los que siguieron los superiores, primero las plantas, y luego los animales y los seres humanos, y reunió la teoría de los cuatro elementos—fuego, agua, aire y tierra—; Demócrito (siglos V y IV a.C.), que aseguró que los átomos diferían entre sí físicamente y que en esta diferencia había que buscar la explicación de las distintas propiedades de las sustancias, de forma que estos

diminutos corpúsculos indivisibles, inalterables, de tamaño y peso diferentes, eran el fundamento de las cualidades de las cosas; y Platón (siglo IV a.C.), que se interesó por las abstracciones matemáticas a las que consideró la forma más elevada del pensamiento.

En su diálogo *Timeo*, Platón expuso su filosofía de la naturaleza al reseñar el origen de los seres naturales, desde los cuerpos celestes a los seres vivos de la Tierra, y en *La República* afirmó: “El estudio de las ciencias a las que hemos pasado revista –aritmética, astronomía, geometría [...]– produce exactamente los mismos efectos: eleva la parte más noble del alma a la contemplación más excelente de todos los seres”. Lo que ha hecho exclamar a Simone Weil en sus comentarios sobre el mito de la caverna en Platón (*La source grecque*, 1953): “Grecia ha tenido una mística cuya contemplación se apoya en las relaciones matemáticas”.

La influencia de la filosofía aristotélica fue escasa durante la primera Escolástica, y no alcanzó su apogeo hasta la alta Escolástica, cuando a lo largo de los siglos XII y XIII se hizo accesible a la Europa cristiana a través de las traducciones árabes. Los siglos iniciales de la Edad Media contemplaron la labor de los primeros Padres de la Iglesia empeñados en armonizar la filosofía griega y la ciencia alejandrina con la fe cristiana. La influencia de Aristóteles fue perdiéndose gradualmente; casi nadie se acuerda de él en el siglo VI, y durante siete siglos apenas se consideran algunos comentarios sobre su *Lógica*. La exagerada actitud escatológica de la patrística, con el Fin del Mundo a las puertas, la venida inminente del Reino de Dios y los misterios del Juicio Final, favorecían bastante poco el deseo de investigar la naturaleza. A propósito de lo cual decía San Ambrosio que “la esperanza

de la vida futura no puede edificarse sobre la naturaleza y la posición de la Tierra”.

Aún bajo la debilitada influencia aristotélica, la vinculación de la ciencia a la filosofía se conservó en la época árabe merced a la obra de los cordobeses Averroes y Maimónides. En el seno de los largos siglos de decadencia europea sobresale en el siglo XIII el enorme esfuerzo asimilador de los dominicos Alberto Magno y Tomás de Aquino en el redescubrimiento de Aristóteles. Los escritos de Alberto Magno alumbraron a sus contemporáneos la totalidad de la filosofía aristotélica, y recogieron y adaptaron al pensamiento cristiano medieval todos los conocimientos científicos de su tiempo, incluida su propia obra en los campos de la química, la botánica y la zoología. Fue Alberto Magno el pensador de mentalidad más científica que produjo la Edad Media; continuador de la obra embriológica aristotélica, su preocupación crucial fue definir el momento en el que el alma entra en el embrión —lo que tampoco sería un problema fácil en nuestros días—. Pero el tomismo no se preocupó tanto por prolongar la obra científica de Aristóteles cuanto por integrar bajo una perspectiva teológica sus categorías con elementos de Platón y San Agustín.

Pese a su gran unidad de origen, la *ciencia* comenzó a liberarse tímidamente de la filosofía desde su principio, desarrollándose de forma independiente. Hipócrates (siglos V y IV a.C.), padre de la medicina, sistematizó las ideas médicas de su época. El nombre de Euclides (siglo IV a.C.) está ligado a la geometría; fue el matemático más importante de la Edad Antigua, junto con Apolonio y Arquímedes (siglo III a.C.). El matemático Diofanto de Alejandría (siglos III y II a.C.) introdujo el álgebra simbólica y el concepto de incógnita (a la

que llamó *aritmós*), resumiendo sus conocimientos en los 13 volúmenes de su *Aritmética*. Hiparco (siglo II a.C.) midió la distancia al Sol y a la Luna y sus tamaños. Dioscórides (siglo I) viajó con el ejército romano de Nerón y recopiló en cinco libros la primera farmacopea sistemática con el nombre de *De Materia Medica*. El médico griego Galeno (siglo II) fue la primera autoridad en anatomía, conservando su prestigio hasta los tiempos de Vesalio en el siglo XVI. Zósimo (siglo IV), el alquimista helenístico más importante, reunió en 28 libros el saber alquímico de la Antigüedad, etc.

Fue sin embargo en la Edad Media cuando los franciscanos de Oxford, representados por Roger Bacon (siglos XVI y XVII), se esforzaron en independizar la rudimentaria ciencia física de la filosofía y teología medievales, preparando el giro que el espíritu europeo experimentaría en la transición de la Edad Media a la Edad Moderna. El comienzo de la observación y la experimentación condujo en seguida a un aumento del comercio y a mejoras en la producción agrícola, en los medios de transporte y en general en todas las artes mecánicas. Duns Escoto (siglo XIII) y Guillermo de Occam (siglo XIV) siguieron el ejemplo precursor de Bacon y contribuyeron en gran medida a la independencia de la ciencia de sus lastres escolásticos, desarrollando la pretensión de Bacon de una ciencia fundada exclusivamente en la experiencia inmediata y en la observación de la naturaleza, lo que iniciaría el despegue de la poderosa ciencia natural de Occidente. Entre los acontecimientos más ricos en consecuencias de esta época de transición se cuentan tres grandes inventos: la brújula, la pólvora y la imprenta, que trastocaron el orden medieval y transformaron la visión social, política y cultural de Europa.

Ocurría además que el entorno medieval de la ciencia venía siendo terriblemente limitado y permitía pocas alegrías científicas, de un lado por los vaivenes de la economía feudal y de otro por la vinculación casi exclusiva de la ciencia al alumbramiento de las verdades teológicas y a una sabiduría global al servicio de Dios. Esta situación dificultó los avances que incluso la *alquimia* podría haber permitido. Todos a una lanzan sus sátiras y sus condenas sobre los alquimistas: la *Divina Comedia* les tortura en las regiones más profundas del infierno, los *Cuentos de Canterbury* los ridiculizan, y Enrique IV de Inglaterra y Carlos V de Francia promulgan edictos contra ellos, persiguen sus prácticas e incautan los instrumentos de sus operaciones. En 1317, el Papa Juan XXII decreta que “la alquimia fuese prohibida y castigados los que la practicasen y considerados criminales si no pudieran satisfacer las penas económicas impuestas; los clérigos perderían todos sus beneficios y serían inhabilitados para percibir cualquier otro”. Ejemplos palpables de la situación que la época ofrece en cuanto a la “comprensión pública de la ciencia”.

Seguramente que es este buen momento para sacar a relucir el comentario de Eugenio D’Ors en su obra *La Civilización en la Historia*, cuando afirma: “El Renacimiento, a la vez que intensifica la actividad científica del hombre y hace adelantar los conocimientos de la ciencia, rompe su unidad. De todo el saber, la Edad Media como la Antigüedad formaban una síntesis: tan Filosofía era entonces la Astronomía como la Botánica [...]. Y es que la actividad científica del hombre nace de dos fuentes: una, el libre juego de la curiosidad, que tiende a averiguarlo todo, a observarlo y experimentarlo todo; y, sin curar de que las adquisiciones logradas por observación y experimentación sean racionales o absur-

das, opera como un francotirador de la ciencia y le trae, cuando se ejerce libremente, un rico botín; la otra fuerza es la ordenación del saber en conjuntos homogéneos, su unificación racional, lo que llamaríamos su legalidad”.

La mayor contribución de la época a la construcción de la ciencia moderna, que ya se vislumbraba, fue el empleo de las matemáticas en la cuantificación de los fenómenos naturales y la promoción de la *ciencia experimental* por encima de las construidas sobre la mera especulación. Como asegura Crombie, “toda la historia de la ciencia europea de los siglos XVI y XVII puede considerarse como la historia de la penetración gradual de las matemáticas, al lado de la metodología experimental, en los dominios que se pensaba pertenecían antes de modo exclusivo al dominio de la física”. La idea de que solo lo que es calculable matemáticamente aporta un conocimiento claro surgió como consecuencia de las nuevas teorías. Kepler sostenía que un conocimiento perfecto debe ser matemático, y en efecto, los éxitos alcanzados por el método matemático se acomodaban a una cierta estructura matemática de la naturaleza.

La emancipación conseguida a través de la adquisición empírica del saber constituyó una verdadera orgía intelectual, en cuya primera línea sobresalieron Copérnico (1473-1543), Kepler (1571-1630), Galilei (1564-1642), Bacon (1561-1626), Hobbes (1588-1679) y Locke (1632-1794). La publicación en 1543 de la obra de Copérnico *De revolutionibus orbium coelestium* contribuyó grandemente a la crítica de la concepción aristotélica del universo. Las ideas de Kepler se fundaron en la regularidad armónica del universo y la sujeción de todo lo creado a leyes. El climax antiaristotélico se alcanzó con Galilei, al medir éste la velocidad de caída de los

cuerpos, rechazar el estudio de la esencia de las realidades para concentrarse en la descripción de los fenómenos, y advertir que el comportamiento de las cosas depende de su estructura geométrica. Hobbes se dedicó a construir un nuevo sistema del mundo basado en la teoría de Copérnico, y en oposición directa a Aristóteles estableció una fractura entre el pensamiento y la realidad. Se llegó a la conclusión de que las categorías del ser desarrolladas por Aristóteles eran solo artilugios verbales, y no una clasificación irreductible de las realidades de la naturaleza.

No deja de ser notable que la misma filosofía que 20 siglos antes acaparó la casi totalidad de la incipiente ciencia y consolidó aquella extraordinaria *unificación cultural*, fue después la que, en otras manos igualmente cultivadoras de ambas, filosofía y ciencia, iba a liberar a la ciencia de sus cortapisas y a crear el pensamiento racionalista. Ello se produjo bajo la influencia del método y las doctrinas de Descartes (1596-1650) y del optimismo universal de Leibniz (1646-1716). Por su parte, las investigaciones de Newton suponen el rechazo de la especulación metafísica, el esparadazo a la observación de que “las cosas suceden como ...”, frente a la búsqueda del “por qué” último de las cosas, actitud manifestada en su sentencia “*hypotheses non fingo*”. Curiosamente Descartes, Leibniz y Newton tienen también un puesto entre los matemáticos de todos los tiempos, el primero por el invento de las coordenadas y de la geometría analítica, y los dos últimos por su invención del cálculo diferencial.

Gracias a la introducción de los modos y las demostraciones matemáticas, y también a los descubrimientos experimentales, la ciencia se liberó de las doctrinas filosóficas y

religiosas. Tras este desamarre y desvinculación de la filosofía, la ciencia va a desenvolverse a sus propias expensas, teniendo que cuajar sus propias doctrinas, y debiendo organizar sus propias instituciones de investigación y administración, y las relaciones con su entorno social.

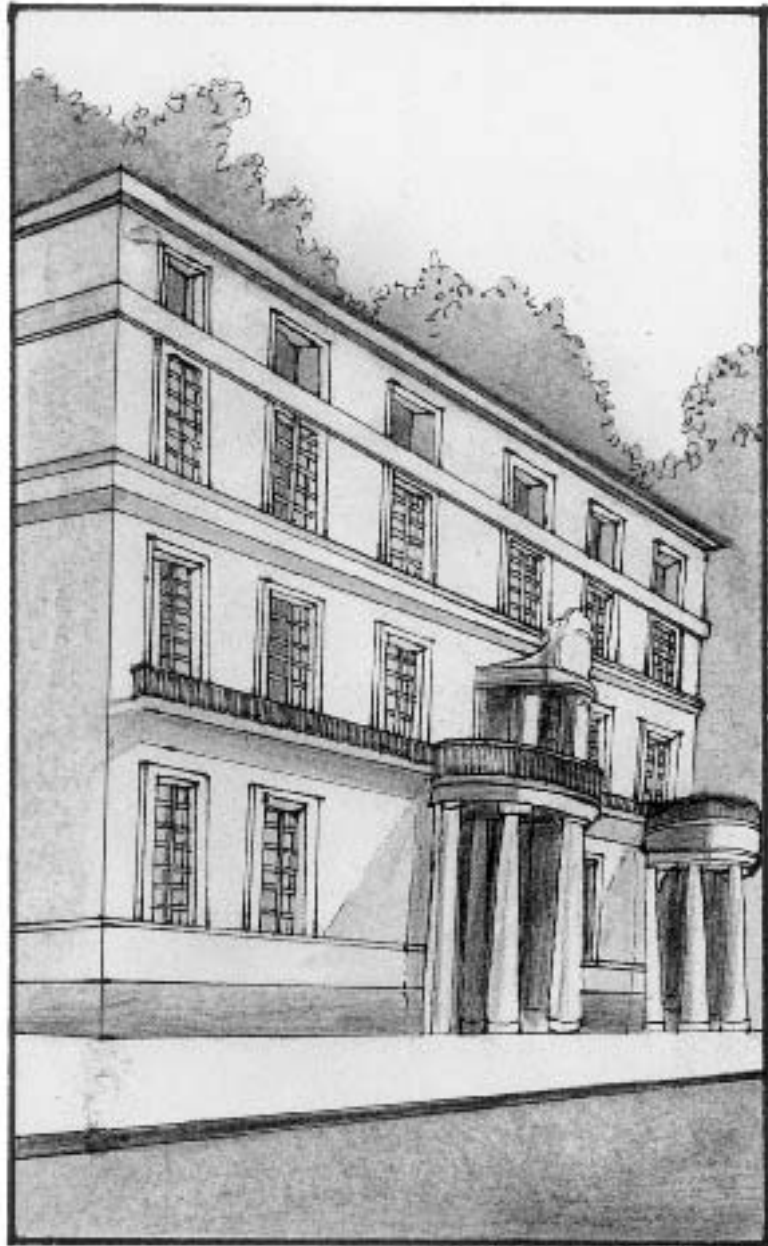
Con posterioridad Kant (1724-1804) introdujo la idea de una construcción dinámica de la materia, manteniendo que ésta, en sus diversas manifestaciones, es resultado del equilibrio entre las dos fuerzas fundamentales y universales de la atracción y la repulsión; bajo esta hipótesis dinámica resulta rechazada la existencia de los átomos y la concepción atomística del espacio. Para Kant no hay más ciencia que la física: la biología, la química y la medicina son consideradas saberes no científicos, cuyos fenómenos no resultan explicables por los principios generales de la física; Kant no sitúa la cuestión de la vida en el seno de las ciencias de la naturaleza. Más tarde Schelling recogerá en su totalidad la concepción kantiana y dará un paso adelante preguntándose por el origen de las fuerzas y de la materia.

Volviendo a la transición al siglo XVII, Francis Bacon, que no descubrió ni inventó nada, proclamó simplemente que la ciencia podía salvarnos, y con su obra *Novum Organum* en 1620 fue el preceptista de la ciencia experimental moderna. Aunque sólo fuera en esbozo, Bacon dejó preparado el terreno para el ulterior desarrollo del *cientificismo*, asegurando que "... una vez los hombres sepan cómo funciona la naturaleza, podrán explotarla en su propio beneficio, superar la escasez con innovaciones científicas en la agricultura, superar la enfermedad con la investigación científica en medicina, y mejorar en general la vida del hombre mediante todo tipo de avances en tecnología e industria".

Entre unos y otros fue rechazada la filosofía aristotélica en las ciencias naturales, como lo serían después sus concepciones relativas a las realidades materiales. Las razones de este vuelco fueron la existencia de errores manifiestos en la cosmología de Aristóteles y la aparición de una nueva imagen del mundo con el Sol como centro del Universo. Las formas sustanciales que ocupaban un lugar central en la teoría aristotélica de la naturaleza fueron de reemplazadas por la teoría atómica.

En la segunda mitad del siglo XVII tuvo lugar la introducción con Newton del cálculo infinitesimal, herramienta definitiva en la metodología científica moderna, y el invento al que más debe la humanidad en opinión de Wigner. Curiosamente el mismo Newton dedicó más tiempo a la investigación química que a la matemática y la física que le hicieron famoso. Con Newton se penetra en la ciencia natural moderna, pero su obra fundamental se titula todavía *Philosophiae naturalis principia mathematica*. En esta época del siglo XVII aun no se ha descubierto el oxígeno; la revolución de la química a manos de Lavoisier está a casi un siglo de distancia, y se considera válida la teoría del flogisto para coordinar un gran número de fenómenos diversos, a pesar de su falsedad reconocida posteriormente.

El desarrollo del nuevo *espíritu científico*, origen de la ciencia moderna, no fue pues una simple cuestión de cantidad de conocimiento, sino consecuencia cualitativa de la aparición de un parámetro decisivo: “la manera de distinguir la verdad del error”. La ciencia se establece sobre la base inatacable del hecho experimentalmente verificable, y la confusión y la duda van dejando paso a la creencia de que lo desconocido es tan sólo lo que aún no ha sido descubierto;



La Royal Society del Reino Unido, fundada el 28 de Noviembre de 1660 para “promover la enseñanza experimental Físico-Matemática”.

poco a poco va tomando cuerpo la convicción de la capacidad del hombre de manejar su propio destino. Este *nuevo espíritu* iba a permitir la *revolución científica* del siglo XVIII —con sus avances en la física y la química—, que constituye el mayor cambio de pendiente cultural de la humanidad tras la *revolución neolítica*; por ejemplo, la interpretación de la combustión, la respiración y la producción de calor, basadas en la nueva teoría del oxígeno, trastocaron las ideas establecidas y urgieron el inmediato desarrollo de la química y la biología. También pudieron esclarecerse la naturaleza biológica y las transformaciones químicas de las *fermentaciones*, cuyos entresijos tanto habían desesperado a la humanidad; el gran debate sobre la naturaleza de las fermentaciones estuvo en el trasfondo que engarza la Ilustración con la revolución industrial del siglo XIX y con sus corolarios, el capitalismo y la industrialización.

Además de las aportaciones científicas concretas, el nuevo espíritu tiene otras consecuencias en el entorno social de la época. La ciencia logra convertirse en la única beneficiaria de la razón; fuera de sus límites sólo permanece lo irracional. Desde entonces lo racional y la ciencia forman un poderoso universo que se extiende sin fronteras, vence a fanatismos y religiones, y llega hasta el poder político. La ciencia en si misma se convierte en un hecho social que la acerca al poder.

Fue en este ambiente en el que Huygens (1629-1695) estudió el choque elástico, inventó el reloj de péndulo y descubrió el primer satélite de Saturno (Titán), Colbert fundó la Academia de Ciencias de Francia (1666), Leeuwenhoek publicó los resultados de sus observaciones microscópicas (1681), se observó el cometa *Halley* (1682), se fundaron la Academia de Ciencias de Moscú (1681), la Academia Leopold-

dina de Viena (1682) y la Academia de Bolonia (1690), se creó el Banco de Inglaterra (1694), y apareció la primera edición del *Diccionario de la Academia Francesa* (1694). Ya en el siglo XVIII se crearon la Real Academia Española y el Observatorio de Berlín; nacieron y vivieron La Condamine (1701-1774), Franklin (1706-1790), Euler (1707-1783), Buffon (1707-1788), Linneo (1707-1778), Lagrange (1736-1813) y Laplace (1749-1832); Halley escribió el *Tratado de los cometas* (1710); se utilizó por primera vez el carbón de coque en la metalurgia del hierro y del acero; y Fahrenheit inventó el termómetro de mercurio (1714).

Según estamos viendo, los ingredientes de la ciencia práctica acumulados hasta la Edad Moderna desde la remota antigüedad de Oriente y de Grecia, recalaron en Europa a través de la latinidad y de los árabes, y se añadieron a los propios de las naciones europeas de la época. Así tuvo lugar en Europa el nacimiento de la Ciencia moderna, con la aceptación del método experimental y las consiguientes revoluciones de la física, la química y la industrialización. Europa permaneció en esta situación de práctica exclusividad hasta la época entreguerras del siglo XX, que marca el advenimiento de los Estados Unidos de América como la primera potencia científica e industrial del mundo. Primacía tecnológica de los Estados Unidos bajo la que han nacido y se están desarrollando las grandes direcciones de la ciencia y la tecnología actuales, entre ellas la biotecnología, las telecomunicaciones y las grandes instalaciones de la física.

Una serie de grandes etapas, conceptualmente independientes aunque solapantes y con algunos ingredientes comunes, van a confirmar en el siglo XVIII el origen europeo de la ciencia moderna. Para poder evaluar de forma crítica la posi-

ción excepcional de Europa, se incluyen a continuación algunas de las contribuciones europeas a los más importantes campos del conocimiento científico. Esta reafirmación es más que nunca necesaria dado que la situación actual de Europa, en sus Estados y como conjunto, ofrece un panorama mucho menos brillante de lo que cabría esperar de su pasado liderazgo.

2. Europa y la Revolución de la Química La Ciencia en el siglo XVIII

EN la historia del siglo XVIII juega un papel esencial la Revolución Francesa, no solo por los cambios políticos, económicos y sociales que produjo, sino también en lo que se refiere a la ciencia, los científicos y sus instituciones. Sobre este telón de fondo sobresale la figura gigante de Antoine Laurent Lavoisier (1743-1794), miembro de la Academia de Ciencias de Francia a los 25 años, artífice central de la gran *revolución de la química*. En el dossier nº 380, destinado a Lavoisier en la Academia de Francia, existe un borrador de un *curso de química* en el que se recogen todos los fundamentos químicos anteriores a 1766, que comienza definiendo la química “como el arte que enseña a separar las diferentes sustancias que componen los cuerpos, a examinarlas, reconocerlas y combinarlas para recomponer los cuerpos analizados o para formar otros nuevos”. La parte más original del curso de Lavoisier es la dedicada a la investigación de la naturaleza del fuego y la electricidad. En 1766 comenzó su interés por la química de los gases y desarrolló las observaciones de Stahl sobre la calcinación y la combustión. En noviembre de 1772 señaló: “Hace ocho días descubrí que el azufre, al

quemarse, lejos de perder peso, lo gana... Este descubrimiento que he establecido en experimentos decisivos, me ha llevado a creer que lo que se observa en la combustión del azufre o del fósforo pudiera muy bien tener lugar en todas las sustancias, que ganan peso por combustión y calcinación: estoy persuadido que el aumento de peso de los residuos metálicos se debe a la misma causa... Este descubrimiento me parece uno de los hechos más interesantes desde los tiempos de Stahl". Al año siguiente, en 1773 había estructurado el desarrollo futuro de la química bajo los tres apartados siguientes: 1. Examinar el papel químico jugado por el aire; 2. Formular una teoría capaz de explicar los fenómenos que no contemplaba la teoría de Stahl; 3. Diseñar una nueva nomenclatura para la química de los gases.

El 23 de septiembre de 1777 Lavoisier leyó ante la Academia de Ciencias la Memoria *Considérations générales sur la nature des acides*. Fue su primer ataque directo a la teoría del flogisto y en ella estableció los fundamentos de su alternativa. En esta Memoria substituyó por razonamientos lógicos la intuición inicial de que el "principio general de la acidez" era la clase de aire conocida como "aire eminentemente respirable", denominado por Priestley "aire desflogisticado" y que acabaría siendo el elemento oxígeno. El 12 de noviembre del mismo año leyó en la Academia una comunicación sobre el fenómeno de la combustión de la que forma parte el siguiente párrafo: "Los hechos, las observaciones y los experimentos son los materiales de un gran edificio. Pero al ensamblarlos no debemos encumbrar nuestra ciencia. Al contrario, tenemos que dedicarnos a clasificarlos, a distinguir lo que pertenece a cada orden, a cada parte del conjunto a la que pertenecen".

Los años 1785 a 1789 marcaron un giro definitivo en la historia de la química moderna: el 28 de junio de 1785 Lavoisier leyó en la Academia de Ciencias la comunicación *Réflexions sur le Phlogistique*, ataque más a la teoría del flogisto que a la obra del patriarca de la química Stahl, cuyos descubrimientos y observaciones sobre la calcinación y la combustión de los metales supusieron –en expresión del mismo Lavoisier– una *cierta revolución de la ciencia*. Puso así contra las cuerdas a una teoría que era compartida por todos los químicos de Europa, contraponiéndola con su propia teoría rival y exigiendo a la comunidad científica bajar a la arena de la controversia para elegir entre ambas. Como fue ya obvio para el mismo Lavoisier, el paso del flogisto al oxígeno fue la conclusión de un proceso histórico que implicó una constante referencia y comparación con los resultados experimentales.

En la primavera de 1787, Guyton de Morveau se convirtió al nuevo sistema, y se dispuso a colaborar con Lavoisier en la redacción de una nueva nomenclatura química. Ya lo habían hecho poco antes Fourcroy, Berthollet y Van Marum. Todos ellos participaron en el proyecto *Méthode de nomenclature chimique*, terminado en agosto de 1787 y presentado a la Academia por Lavoisier el 29 de agosto. Se trataba de una colección de monografías y un diccionario de química; la primera fue la de Lavoisier, con el título de *Mémoire sur la nécessité de réformer et de perfectionner la nomenclature chimique*. Lavoisier estaba firmemente convencido del poder de la extensión semántica del método analítico, que él unió a la reforma entera del lenguaje de la química. Así lo describió: “Este método, necesario para el estudio y la enseñanza de la química, está íntimamente conectado con la reforma de la nomenclatura; un lenguaje bien compuesto, un lenguaje de

acuerdo con el sucesivo orden natural de las ideas, tiene que ocasionar una inmediata revolución en los métodos de enseñanza; no permitirá a los profesores de química desviarse de la línea de la naturaleza y tendrán que rechazar la nomenclatura o seguir irresistiblemente la trayectoria delineada”.

Como contexto es interesante considerar la singular posición epistemológica que la química ocupaba en las últimas décadas del siglo XVIII. Así, la *Encyclopédie, ou Dictionnaire raisonné des Sciences, des Arts et des Métiers* (1751-1772), la famosa *Enciclopedia* de Diderot que pronto se convirtió en aglutinadora del conocimiento científico, filosófico y político, contiene en su tercer volumen (1753) el artículo “Química” a cargo del químico y médico Gabriel-François Venel, alumno del patriarca de la química Hilaire Rouelle. En el mismo año Diderot llevó a cabo un análisis en los *Pensées sur l'interprétation de la nature* en el que aboga por que los que *piensan* se dignen asociarse a los que *actúan*, los que tienen *muchas ideas y ningún instrumento* aprendan a colaborar con los que tienen *muchos instrumentos y pocas ideas*; y en el que denuncia el menosprecio que los que piensan demuestran para los que aprenden a partir de la experiencia. El mismo Diderot, en los *Principes philosophiques sur la matière et le mouvement*, señalaría en 1770: “¡Qué me importa que consideréis la materia homogénea o heterogénea! ¡Qué me importa que, haciendo abstracción de sus cualidades y limitándoos a su existencia, la consideréis en reposo! ¡Qué me importa que, como consecuencia, busquéis la causa de su movimiento! Haréis de la geometría y de la metafísica lo que os plazca; pero yo, que soy físico y químico, que tomo los cuerpos de la naturaleza y no de la imaginación, compruebo su existencia, su diversidad, los veo dotados de propiedades y de

acción, agitándose en el Universo como en el laboratorio... Para que la materia entre en movimiento se precisa una acción, una fuerza; bien exterior a la molécula, o bien inherente, esencial, íntima a la molécula, que constituya su naturaleza de molécula ígnea, acuosa, nitrosa, alcalina, sulfurosa... La fuerza exterior que actúa sobre la molécula se agota; la fuerza íntima no se agota jamás. Es inmutable, eterna”. Estos sentimientos de Diderot no eran sino un reflejo de la pasión por el objeto y las singularidades de la química, con reconocimiento de su posición a la cabeza de la ciencia moderna, exaltación de su papel en el descubrimiento de los secretos y las leyes de la naturaleza, y venganza también del menosprecio y los ridículos sociales de la época alquimista.

En los comienzos y a lo largo del siglo XIX la química, modelo de ciencia positiva en torno al cual se articulan la ciencia pura y sus aplicaciones, empieza a vanagloriarse de ser una ciencia autónoma y desinteresada, fiel a sus inquietudes y planteamientos racionales, aunque para ello tenga que mantenerse en el filo de la navaja para deslindar la independencia de sus aplicaciones y su sometimiento a los intereses sociales y económicos.

3. El nacimiento de la Ciencia moderna en España y las riquezas americanas de las expediciones españolas del siglo XVIII

LA revolución de la química francesa indujo a la incipiente política científica de otros países a enviar sus científicos a Francia para llevar a cabo una ampliación –o quizás mejor iniciación– de sus estudios químicos, comenzando con ello

una práctica moderna en el ejercicio de la ciencia internacional. Fue así cómo la química pudo encontrar en España un ambiente propicio para su desarrollo a finales del siglo XVIII. Ambiente al que contribuyó, de un lado, la política de la nueva Corona Borbónica de formación de jóvenes científicos españoles en instituciones extranjeras de renombre, principalmente en Francia, y de otro, el reclutamiento de científicos y técnicos extranjeros para la dirección de explotaciones mineras e industriales, o para el ejercicio de la docencia en España. A ambas actuaciones centrales de una inicial política de la ciencia se uniría la intensificación de la creación de sociedades científicas, escuelas, gabinetes, laboratorios, etc. Conjunto de acciones que, como hoy es bien sabido, actúan cooperativamente en el fortalecimiento del ejercicio de la ciencia. Este nuevo orden científico se integraba en el nuevo orden político y social de la Corona como un ingrediente de prestigio y de poder en la institucionalización del nuevo Estado, sin olvidar la importancia que esta política científica tenía en las relaciones políticas y económicas con los países americanos.

Entre los ejemplos más notables de esta identificación política y social con la nueva ciencia figura Ramón María de Munibe, hijo del Conde de Peñaflores y fundador de la Real Sociedad Bascongada de Amigos del País y del Seminario Patriótico de Vergara. Munibe siguió un curso de química en París con Rouelle, el maestro de Lavoisier, estudió luego en Upsala y otros lugares de Suecia, y fue en 1772 el primer alumno español de la famosa Escuela de Minas de Friburgo, a la que más tarde asistirían los hermanos Elhuyar, del Río, y más de una veintena de otros químicos españoles.

Hay otros casos dignos de reseñar: Carbonell estudió en Montpellier con Chaptal; Aréjula lo hizo en París con Four-

croy, gran divulgador de la teoría antiflogística de Lavoisier; Garriga y San Cristóbal lo hicieron con Vauquelin, descubridor de diversos productos naturales, la asparagina entre otros (1805); Juan José y Fausto Elhuyar siguieron estudios en París en aquellos años de la revolución de la química y viajaron por Europa formando parte del servicio de inteligencia científica de Carlos III.

Junto a esta participación del gobierno en el desarrollo de la ciencia promocionando la formación de científicos españoles en el extranjero, es fácil identificar –hace más de dos siglos– aspectos tan actuales como las relaciones internacionales, la movilidad de los científicos, la traducción de buen número de obras extranjeras famosas, la aparición de revistas nacionales, el fomento de la industria y en particular de la minería, la transferencia de tecnología, la conexión investigación-industria, la participación de la iniciativa privada, las repercusiones económicas de la investigación básica, la atención al equipamiento instrumental y la selección de temas prioritarios. Estos simples ejemplos muestran cómo ya entonces funcionaba en Europa en general y en España en particular una conexión entre las instituciones estatales, y de cómo tuvo lugar una serie de actuaciones que comenzarían a formar parte de lo que hoy conocemos como las políticas científicas bilaterales.

La marcada *aceptación política* de la institucionalización de la ciencia en España en el siglo XVIII se expresó en numerosas acciones particulares: la fundación del Jardín Botánico de Migas Calientes por Fernando VI en 1755, convertido por Carlos III en 1774 en el Jardín Botánico del Paseo del Prado, la creación del Real Gabinete de Historia Natural en 1776, y las expediciones botánicas a América, importante aporta-

ción española a la ciencia europea sobre la que volveremos enseguida.

Es muy posible que este ambiente no fuera ajeno a los descubrimientos de elementos químicos realizados por españoles en esta época –y nunca más repetidos ni en nuestra historia ni en la del sistema periódico de los elementos químicos–: el wolframio por los hermanos Elhuyar; el eritronio –más tarde rebautizado como vanadio– por Andrés Manuel del Río, y el platino por Ulloa cuando participaba en la expedición hispano-francesa de La Condamine.

Estas consideraciones históricas no son obvias ni fuera de lugar. No son obvias como demuestra el gran cambio negativo de actitud que se produciría nada más comenzado el siglo XIX; tampoco están fuera de lugar, porque la *aceptación política* constituye una etapa imprescindible para la *educación en la ciencia*, su *difusión* y *popularización*, como medios de conseguir la *comprensión pública*.

Las expediciones botánicas a América constituyen un hito importante en la historia de la ciencia española. Las noticias sobre el interés de las plantas americanas ya se habían concretado en las mismas fuentes colombinas, y, posteriormente, en las *Decades* de Pedro Mártir de Anglería (1457-1526), las *Cartas de Relación* (1519-1526) de Hernán Cortés, y, sobre todo, en la obra de Gonzalo Fernández de Oviedo (1478-1557) *Historia general y natural de las Indias*, y en la *Crónica del Perú* (1535-1550) de Pedro Cieza de León. Habida cuenta de la fantástica naturaleza americana y una vez institucionalizados adecuadamente los estudios botánicos en España, resulta lógico que se produjera una serie de expediciones que, además de mejorar las relaciones de la Corona con los países americanos, manifiestan el naciente espíritu

científico en la Química, la Medicina y las Ciencias Naturales españolas del último tercio del siglo XVIII.

Tres fueron las más importantes expediciones que estudiaron la flora americana durante esta época, y que en mayor o menor medida penetraron en el siglo XIX: la expedición botánica del Perú (1777-1815), la expedición botánica de Nueva Granada (1783-1816) protagonizada por José Celestino Mutis, y la expedición botánica a Nueva España (1787-1803) dirigida por Martín Sessé, siguiendo los pasos de la que había realizado Francisco Hernández (1571-1577) dos siglos antes enviado por Felipe II. Estas expediciones científicas, complicadas en su planificación y organización y costosas en sus dotaciones, calificadas de botánicas aunque sin responder a un modelo uniforme, cumplieron de hecho un conjunto de variadas actividades de índole tecnológica –de minas y pesquerías, sobre todo–, desarrollaron iniciativas científicas, económicas, antropológicas y también políticas, y contribuyeron al fortalecimiento de las relaciones entre las instituciones universitarias de ambos lados del Atlántico. Ya en la iniciación del siglo XIX un nuevo viaje, la Real Expedición filantrópica de la vacuna, fue una primera –y seguramente única– manifestación del impacto social que la nueva ciencia causaría a través de las expediciones ultramarinas.

La primera expedición botánica llegó al Callao en abril de 1778, y de ella formaron parte los botánicos Hipólito Ruiz y José Pavón, acompañados del médico francés Joseph Brunete, botánico teórico y práctico muy experimentado. Durante los dos primeros años herborizaron los terrenos cercanos al litoral del área de Lima, y, más tarde, se trasladaron a Huanuco donde descubrieron varias especies de *quina*. Aparte de la gran labor de descripción, dibujo y reco-

lección de plantas de diversas regiones, la expedición llevó a cabo intensas actividades científicas y culturales entre las que destacan el descubrimiento de géneros y especies nuevas, incluidas las de la *quina*; la creación de *cátedras de botánica* –en 1797, la de la Universidad de San Marcos, y, en 1808, la del Colegio de Cirugía de San Fernando de Lima– y la del Jardín Botánico de Lima; y muy primordialmente la publicación de extraordinarias colecciones, llenas de magníficas descripciones y láminas. Entre estas destaca la obra de Ruiz y Pavón *Flora Peruviana et Chilensis*, la obra fundamental de la expedición, que incluyó la *Flora Huayaquilensis* de Juan José Tafalla, con 600 descripciones y 300 láminas en color. Además de estas obras de carácter general hay que resaltar las referidas particularmente a las quinas, entre otras la *Quinología* de Ruiz, publicada en 1792, y el *Compendio histórico-médico-comercial de las quinas*, también de Ruiz, escrita en 1808.

La segunda gran expedición botánica comenzó en 1783. Esta expedición a Nueva Granada tuvo características muy especiales en su vinculación a la Corona, en su ambición científica e instrumentos organizativos, y en la singular personalidad del protagonista, José Celestino Mutis. Sus ilusiones y proyectos de trabajo quedaron bien documentados en el Memorial que dirigió a Carlos III, en 1763, que comenzaba así: “La importancia de unos asuntos, cuya utilidad es conocida en todas las naciones civilizadas, me alienta a poner a los pies de vuestra majestad el plan de mis ideas en el viaje que emprendí a este Nuevo Reino”. Para pasar después a describir su situación personal y la de los estudios a realizar: “No me horrorizan, Señor, –aseguraba Mutis– las incomodidades de que consigo trae el trabajoso estudio de la

naturaleza. Los sabios, en sus gabinetes o en las escuelas, pasan con toda comodidad los días enteros, recogiendo a pie quieto el fruto de su aplicación. Un naturalista debe gastar gran parte de la noche en ordenar y componer lo que por el día recogió en el campo, después de haber sufrido las alteraciones de la estación, que suele ser inconstante, las asperezas del suelo que pisa; las injurias de los insectos que le rodean; los sustos y peligros de muchos animales venenosos y horribles que le espantan, sobre la austeridad de una vida penitente que quebranta su cuerpo”. Y refiriéndose en particular a la quina subraya que “sabrà manejarse con mayor desembarazo y acierto en muchas enfermedades, cuando salgan al público mis observaciones, que para anticipado bien del género humano haré publicar en alguna de las Academias de Europa, por donde se propagan los nuevos descubrimientos”.

A su vez, la cédula que otorgaba a la expedición su protección real, señalaba como principal objetivo “el examen y conocimiento metódicos de las producciones naturales de mis dominios de América, no sólo para promover los progresos de las Ciencias físicas, sino también para desterrar las dudas y alteraciones que hay en la Medicina, tintura y otras artes importantes, y para aumentar el comercio y que se formen herbarios y colecciones de productos naturales, describiendo y delineando las plantas que se encuentran en aquellas mis fértiles provincias, para enriquecer mi Gabinete de Historia Natural y Jardín Botánico de la Corte, remitiendo a España semillas y raíces vivas de las plantas y árboles más útiles, señaladamente de las que se empleasen o merezcan emplearse en la Medicina y en la construcción naval, para que se connaturalicen en los varios climas conducentes de

esta Península, sin omitir las observaciones geográficas y astronómicas que se puedan hacer de paso en adelantamiento de estas ciencias”. Se intentaba pues asegurar la coordinación entre las instituciones peninsulares y las expediciones. Coordinación que ejerció un amplio protagonismo científico, docente, cultural y profesional, tanto en la política científica nacional como en la internacional hasta entrado el siglo XIX. En 1801, aposentada la expedición en Santa Fe, recibió la visita de Alexander von Humboldt, con indisimulado entusiasmo por parte de Mutis en lo que suponía de respaldo a su labor por parte del sabio alemán, del que recibiría después grandes elogios.

La expedición botánica a Nueva España (1787-1803), la tercera de las grandes expediciones, tuvo su ideólogo en el médico Martín Sessé, residente en Méjico, quien se dirigió al director del Jardín Botánico, Gómez Ortega, para la creación de una cátedra y un jardín botánico, que continuaran el proyecto de la expedición de Francisco Hernández, enviado por Felipe II para estudiar la historia natural de Nueva España. La Real Cédula de 20 de marzo de 1787 aprobó la expedición con objeto de que se “examinen, dibujen y describan metódicamente las producciones naturales de Nueva España ... con el objeto especial de suplir, ilustrar y perfeccionar con arreglo al estado actual de las mismas Ciencias Naturales los escritos originales que dejó el doctor Francisco Hernández por fruto de la expedición de igual naturaleza”. Esta expedición cubrió tres exploraciones parciales, en las que se identificaron 1127 especies, descritas en *Plantae Novae Hispaniae* y *Flora Mexicana*, publicados a finales del siglo XIX por la Sociedad de Historia Natural de Méjico.

Dentro de la variada finalidad de las expediciones, y ya en tiempos de Carlos IV, hay que señalar la que se conoce como Real Expedición filantrópica de la vacuna, que partió de La Coruña en noviembre de 1803, con objeto de combatir las epidemias de viruela que hacían estragos en las poblaciones indígenas de América. Hacía tan sólo cinco años que Edward Jenner había comprobado fehacientemente que la inoculación de costras de lesiones de vacas infectadas de *vaccinia* protegía de forma eficaz contra la viruela; a pesar de lo cual el hecho no fue aceptado con la prontitud debida. La obra de Jenner fue divulgada en el *Traité historique et pratique de la vaccine*, de Moreau de la Sarthe, y fué traducida al español por Balmis, cirujano militar y buen conocedor de América. Unos cuantos meses antes, en junio de 1803, Balmis presentó a la Corona un reglamento y un derrotero de la expedición que, bajo su dirección, visitaría los cuatro virreinos durante tres años, haciendo vacunaciones brazo a brazo por medio de niños que saldrían de España e irían siendo sustituidos por otros a lo largo del viaje. En Venezuela se crearon Juntas Centrales de Vacuna. Los obispos exhortaron a los clérigos a que colaborasen con los expedicionarios; el obispo de Oaxaca publicó una especie de pastoral antivariólica en la que se aseguraba: "... no habrá ninguno tan indolente que se crea desobligado y se atreva a decir groseramente que él es médico de las almas y no de los cuerpos, porque acreditaría su ignorancia y falta de caridad, debiendo saber que quien pudiendo conservar la vida corporal de su prójimo no lo hace, es como un verdadero homicida".

Desgraciadamente los materiales recogidos en todas las expediciones se vieron sujetos a diversos avatares, y final-

mente se dispersaron y pignoraron en beneficio de otros países, especialmente Francia. Entre las múltiples causas de esta pérdida hay que citar el superior –y loable– empeño de Francia por la promoción de la investigación fundamental y aplicada, y también su gran tradición química, en particular su experiencia en el análisis y la determinación de las estructuras químicas, y su indudable interés en la aplicación de los productos de interés farmacológico.

Frente a esta actitud francesa, España carecía entonces de una política que se ocupara de algo más que de la mejora de las prácticas tecnológicas utilizadas en las explotaciones mineras. La explotación de los resultados de las expediciones ultramarinas habría exigido un tratamiento distinto del simple inventario de la naturaleza, fundamentalmente con espíritu coleccionista. Se imponía la interacción multidisciplinar, esencial a la evolución del conocimiento, que estaba ya en marcha en Europa, principalmente en la química orgánica y la biología. Mientras cada día se descubría una nueva molécula en las plantas, nuestra distancia con la ciencia de otras naciones europeas continuó incrementándose a lo largo del siglo XIX, de tal manera que el mejor representante español en estos campos, Rodríguez Carracido –Rector de la Universidad Central y Presidente de la Real Academia de Ciencias entre 1922 y 1928– ha dejado escrito: “Desde el año 1887 hasta 1901 ¡durante catorce años! se explicó la Química biológica como si fuera Metafísica... Al encargarme de esta enseñanza sólo disponía de una silla para la exposición oral de las pláticas de Química biológica, careciendo de todo elemento de trabajo”.

Destacando del ruido de fondo al que nuestra ciencia y tecnología del siglo XIX permanecían adheridas hubo tam-

bién muestras de *inquietud crítica* por un despegue de la ciencia. En sus *Estudios histórico-críticos de la ciencia española*, el mismo Rector Carracido cuyo resumen demoledor se acaba de citar decía: “Mucho se aprovecharía que, en el grado que la riqueza pública lo consintiese, se la dotara de los mayores beneficios materiales [...] hoy aún algo menospreciados por las gentes que presumen de distinguidas, pero aprovecharía mucho más restringir el poder absorbente de la vida política para lo cual son todos los aplausos y consideraciones de la opinión pública [...] el hombre consagrado sólo al cultivo del saber por el puro anhelo de alcanzar la verdad ve la indiferencia por todas partes; por grandes que sean sus méritos el ambiente que respira es siempre glacial [...]. La idea de la inexcusable colaboración del medio social es la que conviene inculcar a todas las clases de nuestra patria para que presenten su concurso al cultivo de la ciencia, y así cuando florezca y fructifique podrán llamarla suya”.

El paso del siglo XIX al XX se produjo pues en una vaguada de nuestro desarrollo científico, de la institucionalización de la ciencia como actividad socioeconómica e incluso de la consideración social de la ciencia, que alcanzó sus mínimos en las últimas décadas del siglo XIX. Solo las inquietudes críticas de unos pocos y las noticias y éxitos de la ciencia que llegaban de Europa destacan en este fúnebre panorama. A comienzos del nuevo siglo XX se producirán en España algunos atisbos de ilusión social por la utilidad de la ciencia y el saber, y contribuciones individuales extremadamente valiosas, como la de Santiago Ramón y Cajal, desde las que divisar al menos el imponente rastro europeo.

II. EUROPA Y LA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL. INICIACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN AMERICANA

TRES factores dieron lugar en el siglo XVII al lanzamiento de la ingeniería, el diseño de nuevos productos y la industrialización. En primer lugar, la propia evolución de la ciencia; en 1660 se funda la Royal Society con la intención baconiana de hacer la ciencia aplicable a la tecnología, después de siglos de haber marchado por caminos separados constituyendo mundos prácticamente independientes. De esta manera la ciencia contribuiría eficazmente al desarrollo de la instrumentación y la medida como ingredientes fundamentales del nuevo *método experimental*. En segundo lugar, el interés de las pequeñas compañías deseosas de mejorar sus actividades y conseguir aumentos de productividad. En tercer término, la *mecanización* como paradigma de la tecnología emergente.

En la última década del siglo XVII (1690) Papin comenzó el desarrollo de las *máquinas de vapor*, creando el *maquinismo* como condición previa de la industrialización y dando lugar al nacimiento de la *ciencia aplicada* en íntima interacción con la *ciencia pura*. En 1709 se utilizó por primera vez el coque en los altos hornos; en la década 1712-22 Réaumur estudió la composición del acero y la conversión hierro-

acero: en 1735 tuvo lugar la primera extracción de petróleo; en 1747 comenzó la producción industrial del ácido sulfúrico, y en 1790 Leblanc desarrolló el proceso de fabricación artificial de la sosa. A finales del siglo XVIII apareció la primera locomotora de vapor por carretera (1797), se desarrolló una máquina para la fabricación de papel (1798) y la primera prensa de imprimir metálica (1800), y Watt fabricó más de 300 máquinas de vapor en Inglaterra y el resto de Europa. Ya entrado el siglo XIX, se fundaron las acerías de Krupp (1811), se industrializó el telar (1811), se introdujo la locomotora de vapor sobre raíles metálicos (1814), se comenzó la fabricación industrial del jabón (1823), y se instaló en Inglaterra la primera línea pública de ferrocarril (1825). También la Física seguía progresando de manera imparable: esta es la época de Coulomb (1736-1806), Volta (1745-1827), Young (1773-1829), Ampère (1775-1836), Oersted (1777-1851), Poisson (1781-1840), Fresnel (1788-1827), Carnot (1796-1832), Hamilton (1805-1865), Foucault (1819-1868), Kirchhoff (1824-1887), etc.

Los comienzos de la industria química tuvieron lugar en Inglaterra, con el descubrimiento por William Henry Perkin (1838-1907) de un nuevo colorante, la mauveína. Perkin renunció a su puesto en el Royal College of Chemistry, a pesar de muchos consejos contrarios —entre otros el de August Wilhelm von Hofmann, discípulo de Justus von Liebig (1803-1873) y director del Centro— y creó su propia empresa, con la que obtuvo un indudable éxito.

En Alemania, Heinrich Caro (1834-1910) participó en la creación de la Badische Anilin und Soda Fabrik (BASF), en tanto que Carl A. Martinus y Wilhelm Meister lo hicieron de la sociedad Höchst; los tres fueron discípulos de Liebig. Frie-



Real Academia de Farmacia, igualada en categoría y preeminencias, tras múltiples vicisitudes, a las otras existentes, recibió nuevos estatutos por Decreto de 7 de febrero de 1947.

drich Bayer y Johann Friedrich Weskott establecieron en 1863 otra de las primeras compañías de colorantes, tras haber obtenido de forma casi casera el colorante sintético fucsina. A la muerte de Bayer en 1880, su yerno Carl Rumpff –hasta entonces agente de la compañía en Nueva York– se hizo cargo de la dirección de la empresa, instalada ya en Elberfeld y renombrada “Farbenfabriken”. En 1884 entró en la empresa Friedrich Carl Duisberg, alumno en Gotinga y Jena, doctor en química a los veinte años, y considerado por *The Times* de Londres como el “industrial más importante que había tenido el mundo”. Nombrado a los pocos años director del programa de investigación y patentes de la compañía Bayer, la primera de sus decisiones fue que la investigación sobre medicamentos compartiera el proyecto inicial de investigación sobre colorantes. Bajo la dirección de Duisberg una compañía privada llevó a cabo por primera vez todas las etapas conducentes a la puesta en el mercado de un fármaco, creando la comunión entre ciencia y economía que tanto había de influir en el desarrollo de la industria de los medicamentos. El *ácido salicílico*, la *quinina* y la *antipirina* forman parte de la historia inicial de los descubrimientos farmacéuticos. Duisberg asumió el control total de la compañía a la muerte de Rumpff en 1890, construyendo un nuevo laboratorio de tres plantas para un centenar de químicos, con un presupuesto de 1.5 millones de marcos.

En 1896 se había construido en Elberfeld una serie de laboratorios de investigación dedicados exclusivamente al diseño, investigación y fabricación de nuevos medicamentos, que pronto habían de dar origen a una nueva división de la compañía en una sección farmacéutica, bajo la dirección de Eichengrün, y una sección farmacológica bajo la

dirección de Dreser. En la primera de ellas, Felix Hoffmann describió en octubre de 1897 en su cuaderno de laboratorio un proceso para modificar el ácido salicílico y originar el *ácido acetilsalicílico*. En enero de 1899 se acuñó el nombre comercial de *aspirina*, y cinco meses después Dreser la presentó al mundo en un tipo de promoción original hasta entonces, basada en el envío de muestras gratuitas a hospitales, universidades y clase médica con el ruego de la publicación de las cualidades farmacológicas que se encontraran en el nuevo medicamento. De esta forma, si la aspirina fuera efectiva –y, en efecto lo era– la publicidad boca a boca sería la mejor fuente de su difusión. En noviembre de 1899 F.C. Floeckinger de Texas publicó la primera información en inglés sobre la aspirina; en 1902 habían aparecido 160 estudios, por lo que un autor aseguró la existencia de “a literature so voluminous that it is scarcely possible to review it...”. Lo favorable de las conclusiones que se publicaban acerca de la aspirina permitió afirmar en 1906: “Al cabo de una década de su introducción, su popularidad no ha sido sobrepasada por ningún otro medicamento. No resultará exageración afirmar que es hoy el medicamento más apreciado entre los de nuestra fabricación”.

Desde sus comienzos tuvo la firma Bayer agentes comerciales en los Estados Unidos, que fueron siempre un magnífico mercado para sus colorantes; sus ventas se triplicaron de 1894 a 1900, pasando de 2.5 a 7.5 millones de marcos. En 1896 Duisberg pudo conocer directamente la extraordinaria eficacia de la mecanización, la organización, y la planificación americanas en todo tipo de industrias, que él mismo había intentado poner en práctica con motivo del diseño de las instalaciones de Leverkusen. Regresó en 1903 con Frie-

drich Bayer Jr. y el jefe de ingeniería de la compañía, Ludwig Girtler, con la intención de decidir la instalación americana de Bayer, que finalmente tuvo lugar en Rensselaer (Albany), al norte del valle del Hudson, por compra de la Hudson River Aniline & Color Works y la American Color & Chemical Company. Tras esta visita la aspirina Bayer tomó carta de naturaleza en los Estados Unidos y se convirtió en el producto de mayor venta de la compañía, representando el 21 por ciento de las ventas totales en 1907, porcentaje que en 1908 se elevó al 31 por ciento. En los años siguientes la aspirina Bayer mantuvo una complicada lucha de precios y de propiedad intelectual en Canadá y Estados Unidos, y sufrió los problemas sobre utilización de materias primas estratégicas durante la I Guerra Mundial, y la cesión de los bienes alemanes a los competidores de los países vencedores a su fin en 1918.

Durante el siglo XIX se introdujo una separación un tanto arbitraria y ligada a divisiones artificiales del conocimiento entre *ciencia pura* y *ciencia aplicada*, que dio lugar al aislamiento administrativo de ambas disciplinas científicas, ignorando sus orígenes comunes y sus fuertes conexiones. La *ciencia pura* ha tenido frecuentemente un origen industrial y se ha servido de los métodos instrumentales proporcionados por la tecnología, y la *ciencia aplicada* ha gozado de igual lógica, métodos y razonamientos que la ciencia académica. Ambos conceptos se interpenetran cada vez más y se distancian en el tiempo cada vez menos. Así, el tiempo transcurrido entre un descubrimiento científico, su primer empleo práctico y su pleno impacto en la sociedad se ha ido reduciendo: fueron necesarios 112 años para la fotografía, 56 para el teléfono, 46 desde la síntesis bruta del ácido acetil-

salicílico por el francés Gerhardt (1853) a la fabricación industrial de la aspirina por la Casa Bayer (1899), 35 para la radio, 15 para el radar, 6 para la bomba atómica, 5 para el transistor, 3 para los circuitos integrados, y solamente unos cuantos meses para la utilización de las enzimas de restricción en la tecnología biológica del DNA-recombinante y sus usos biotecnológicos.

La industria química fue la primera industria de alta tecnología basada en la ciencia. A finales del siglo XIX las compañías químicas habían establecido los primeros laboratorios de I+D industrial, y desde entonces los logros de la industria han ido aumentando día a día. Desde la agricultura al transporte, las comunicaciones y los nuevos materiales –por ejemplo los plásticos y otros materiales sintéticos–, la química ha transformado todos los aspectos de la sociedad.

En la últimas décadas del siglo XIX se fundaron abundantes sociedades para la investigación industrial, dedicadas a la producción de electricidad, hierro y acero, fertilizantes, azúcar, productos farmacéuticos, colorantes y petróleo. Así, la creación de la compañía ferroviaria Pennsylvania Railroad en 1875; el laboratorio de Menlo Park de Thomas Edison en 1876; la Eastmann Kodak en 1886; la Standard Oil en 1889; la Du Pont de Nemours en 1890; la General Electric en Shenectady en 1900; y la Westinghouse en 1903. En las mismas décadas tuvo lugar la 1ª Convención Internacional de Patentes (1879), se crearon la Sociedad Matemática de Nueva York y el National Geographic Magazine de Nueva York (1888), y la Sociedad Americana de Geología (1889).

Los Estados Unidos de América no habían contribuido previamente con aportaciones originales significativas a los

campos de la física o de la química básicas: la creación de empresas de investigación industrial suponía la iniciación de un doble tratamiento comercial y científico, y sería una pieza clave en la rápida e impresionante presencia americana en la ciencia y la tecnología del siglo XX. La inquietud e iniciativa americanas comenzaban así a dar respuestas a los interrogantes de la investigación industrial.

En la conjunción científico-económica estadounidense hay que señalar la presencia de otros factores decisivos como la aparición de *áreas especiales*, la *reconversión industrial* y la presencia de *capital-riesgo*. Este planteamiento empresarial, sobre el que se insistirá en los capítulos siguientes, está fundamentado desde sus orígenes en el interés y la fe del capital en su propia ciencia, y en la conexión permanente de la industria con las universidades y centros de investigación, como garantía de innovación y de éxito comercial.

III. EUROPA Y LA QUÍMICA ORGÁNICA. LA CIENCIA FUNDAMENTAL EN EL SIGLO XIX

A LO largo del siglo XIX se aislaron y caracterizaron en Europa, principalmente en Francia, una colección de *alcaloides* de origen vegetal. La *morfina* se aisló del opio por Derosne en 1803; la *quinina* de las cortezas de los árboles de la quina y la *colchicina* de los bulbos de *Colchicum autumnale* por Pelletier y Caventou en 1820; la *cafeína* del café por Runge, Pelletier y Caventou en 1820; la *nicotina* y una docena de bases más de las hojas del tabaco, *Nicotiana tabacum*, por Posselt y Reimann en 1828; la *codeína* del opio por Robiquet en 1832; la *atropina* y sus derivados de la belladona, *Atropa belladonna*, en 1833; la *tebaína* del opio por Pelletier en 1835; la *cocaína* de las hojas de *Erythroxylon coca* por Niemann en 1860; la *ergotamina* y otros derivados del ácido lisérgico del hongo *Claviceps purpurea*, por Tanret en 1875; la *efedrina* de diversas especies del género *Ephedra* por Nagai en 1887; y la *pilocarpina* de las hojas de jaborandi, *Pilocarpus jaborandi*, por Gerard y Hardy en 1875.

La segunda mitad del siglo XIX contempló el lanzamiento definitivo de la química orgánica con el *modelo de Kekulé*, la resolución del problema de la *posición de los sustituyentes* con Bayer y Fittig, y la gran versatilidad de los *fenómenos de*

condensación conducentes a los nuevos compuestos orgánicos de síntesis. Estos fueron los pilares sobre los que se edificó el impresionante desarrollo de la química orgánica del siglo XX, con su utilización de gran número de productos naturales y de síntesis sobre los que se ha construido la moderna farmacología.

En la segunda mitad del siglo XIX tuvo lugar el desarrollo de la síntesis orgánica por Berthelot (1860) y la síntesis de productos naturales como el índigo por Bayer (1879). Pasteur disputó con Pouchet sobre la *generación espontánea* (1861); se descubrió el *hombre de Neanderthal* (1856); Maxwell unificó electricidad y magnetismo en su *teoría del campo electromagnético* (1864); Nobel descubrió la *dinamita* (1866); Mendel investigó la *hibridación de las plantas* (1865); Solvay describió un procedimiento para la fabricación de la sosa (1863); Mendeleev agrupó los elementos químicos en la *tabla periódica* (1869); Golgi estudió las *fibras nerviosas* (1873); Le Bel y Van't Hoff iniciaron los estudios de la *estereoquímica* y la *química molecular* (1874); Boltzmann estableció la *teoría cinética de los gases* (1877); etc.

Durante los años 1880-82 Charcot descubrió las *enfermedades del sistema nervioso*, Pasteur obtuvo una vacuna contra el *carbunco*, y Koch descubrió el *bacilo de la tuberculosis*. En 1885 Pasteur curó a J. Meister de la *rabia*, y en 1890 Behring y Kitasato obtuvieron un *suero antitetánico*.

En 1895 Röntgen descubrió los *rayos X*, y al año siguiente Becquerel la *radiactividad*. Antes de concluir el siglo se desarrollaron la *teoría de conjuntos* de Cantor, los *cuerpos de números algebraicos de Hilbert*, las *funciones abelianas* de Appel, el *análisis funcional* de Volterra, el *cálculo tensorial* de Levi-Civita, la *lógica matemática* de Frege y los *nuevos*



Real Academia Nacional de Medicina, cuyo Reglamento fue sancionado en abril de 1861.

métodos de la mecánica celeste de Poincaré. Se descubrió también el *efecto Zeemann*, la *licuación del hidrógeno* por Dewar, las *radiaciones a y b* de Rutherford, y la medida de la *relación carga/masa del electrón* por Thomson.

La segunda mitad del siglo XIX constituyó un periodo especialmente brillante en las *ciencias básicas de la Biología*, incluida la humana, gracias a la hibridación entre química orgánica y fisiología. A ello contribuyeron de forma singular Claude Bernard en Francia y Justus von Liebig en Alemania. Ambos hicieron posible la vinculación de la Química, sus principios y sus herramientas, a los fenómenos de la vida, siendo los primeros en la extraordinaria nómina de científicos que se aplicaron en Europa a estos problemas. Las escuelas francesa y alemana, por este orden, sacaron indudable ventaja a la inglesa; en cualquier caso, fueron los modelos europeos los que vieron nacer, a semejanza suya, la fisiología americana.

Coincidente con esta emancipación de la fisiología fue la creación de cátedras propias y de revistas especializadas, y la fundación de institutos dedicados a esta rama de la Medicina. Así, en la segunda mitad del siglo XIX se crearon 16 cátedras de fisiología en Alemania, dos en Suiza y una en Austria. Algunas de las revistas aparecidas en esta época han subsistido hasta la actualidad, como *The Journal of Physiology* (Londres, 1878), *Journal of Experimental Medicine* (New York, 1896), *The American Journal of Physiology* (Boston, 1898), y *Journal de Physiologie* (París, 1899).

En la segunda mitad del siglo XIX la fisiología rusa intentó paliar su retraso con respecto a los países de Occidente enviando científicos jóvenes a trabajar con Bernard en París, o con Carl Ludwig en Leipzig. Iwan Michajlowitsch Sets-

chenoff fundó una escuela de fisiología a la que pertenecieron Paschutin, Tarchanoff, Werigo y, sobre todo, Iwan Petrowitsch Pavlov, Premio Nobel de Medicina 1904, el primero concedido a un ruso y a un fisiólogo. Pavlov desarrolló nuevas técnicas para el diseño de fistulas digestivas, y estableció correlaciones entre la secreción gástrica y señales acústicas o luminosas, denominadas *reflejos condicionados*.

Con estos antecedentes, en la segunda mitad del siglo XIX la *patología* pudo comenzar a interpretarse en los mismos términos químicos y biológicos que la fisiología; así nació la *fisiopatología*, y así surgieron numerosas situaciones interdisciplinarias, como la *patología celular* y la *anatomía patológica*. La *microbiología* permitiría una *etiología* basada en las ciencias de la naturaleza. En el último tercio del siglo XIX la investigación de laboratorio se convirtió en la fuente principal de la ciencia médica y el fundamento de la práctica clínica, reforzadas por el desarrollo de la *bacteriología* y la *inmunología*.

Rudolph Virchow, primer profesor ordinario de anatomía patológica en la Universidad alemana, introdujo el término *embolia* y estudió sus consecuencias clínicas y anatomopatológicas. Guillaume Benjamin Duchenne fue figura clave en el nacimiento de la moderna *neurología*. Etienne-Louis Fallois destacó por sus trabajos sobre *cardiopatías congénitas*. Jean Martin Charcot consagró su actividad a las enfermedades del *sistema nervioso*. Los grandes clínicos de la segunda mitad del siglo XIX –Addison, Bouillaud, Pinel, Skoda, Wunderlich, etc.– llevaron a cabo contribuciones a la *neurología*. La *neurología clínica* se instauró definitivamente desde mentalidades anatómicas –Broca, Charcot, Wernicke– y clínicas –Graves, Parkinson, Trousseau–, gracias a la anato-

mía básica –Golgi y Cajal–, la fisiología –Bell, Magendie y Hall– y la patología –Alzheimer, Spielmeyer y Virchow–.

En las últimas décadas del siglo XIX se desarrolló la *exploración neurológica* –lenguaje motilidad, sensibilidad, etc.–, junto con el estudio de los signos de lesión anatómica, los reflejos tendinosos y los procedimientos diagnósticos complementarios. Con ello pudieron definirse los diferentes tipos de enfermedades neurológicas según su naturaleza –infecciones bacterianas específicas– y localización –encéfalo, médula, nervios periféricos y músculos–.

El siglo XIX finalizó pues con un absoluto liderazgo europeo en todos los campos de la ciencia. La ciencia moderna había nacido siglos atrás en Europa, y en ella surgieron también todos los nuevos campos del conocimiento científico. Al cabo de algún tiempo muchos de dichos campos, e incluso sus propios protagonistas, se incorporarían a la ciencia americana. La ciencia y tecnología norteamericanas llegaron así a alcanzar en muy pocos años su situación actual como paradigma en el que cifran el progreso todas las naciones desarrolladas, incluida la Unión Europea.

IV. LA CIENCIA Y LAS GRANDES INSTALACIONES CIENTÍFICAS EN EL SIGLO XX

EN los últimos años del siglo XIX se descubrió la *radiactividad*, cuya importancia en las investigaciones sobre estructura de la materia se pondría enseguida de manifiesto. Tras el descubrimiento de los rayos X por Röntgen en 1895 vino el de las sustancias radiactivas por Becquerel (1852-1908) y el de los nuevos elementos *polonio* y *radio* por Pierre (1859-1906) y Maria Curie (1867-1934). Al estudiar las *radiaciones ionizantes* emitidas Ernest Rutherford (1871-1937) distinguió en 1899 los rayos alfa y los rayos beta, y Villard los rayos gamma en 1900. Los rayos beta fueron muy pronto identificados como electrones iguales a los descubiertos por J.J. Thomson (1856-1940).

Para explicar el espectro de radiación del cuerpo negro, Planck postuló en 1900 la discretización de su energía, introduciendo la llamada constante de Planck, h ; este hecho se considera el punto de partida de la *revolución cuántica*. En 1903 Rutherford y Soddy (1877-1956) concluyeron que la emisión de las radiaciones alfa o beta por un átomo lleva consigo su conversión en un elemento químico distinto, proceso que termina cuando la desintegración da lugar a un átomo no radiactivo. Consecuencia de todo ello fue la formulación en 1911 de la hipótesis atómica de Rutherford, que se

vio confirmada posteriormente, y sobre la cual Niels Bohr (1885-1962) propuso en 1913 su modelo del átomo de hidrógeno, mezcla de física tradicional y de elementos cuánticos. Los espectros de rayos X estudiados por H.J. Moseley confirmaron el modelo de Rutherford y la teoría de Bohr. Condiciones generales de cuantificación que desarrollaban y generalizaban las de Bohr fueron propuestas independientemente en 1915 por A. Sommerfeld, W. Wilson y J. Ishiwara.

En un increíblemente fructífero año 1905, Albert Einstein publicó tres trabajos fundamentales en tres áreas distintas de la física. En el primero introdujo la discretización de la luz en cuantos de radiación, que luego serían llamados fotones, para explicar el efecto fotoeléctrico; el premio Nobel de 1921 le fue concedido “for his services to Theoretical Physics, and especially for his discovery of the law of the photoelectric effect”. En el segundo propuso lo que hoy se llama la *teoría especial de la relatividad*, confirmando que el tiempo depende del sistema de referencia, y que la masa contribuye a la energía en reposo de una partícula, $E = mc^2$, probablemente la única fórmula de física que casi todos conocen. En el tercero explicó el *movimiento Browniano*, analizando estadísticamente las colisiones de una partícula microscópica con las moléculas de un fluido o gas. Einstein continuó con sus estudios en estos campos y el 25 de noviembre de 1915 publicó su *teoría de la relatividad general*. Sus relaciones con la mecánica cuántica que había contribuido a iniciar fueron en cambio empeorando y, sin negar su indudable éxito en explicar gran cantidad de fenómenos, creyó hasta su muerte que no era una teoría final, sino sólo una descripción incompleta, al estilo de la física estadística; el famoso artículo de 1935 “Can Quantum-mechanical

Description of Reality be Considered Complete?”, con B. Podolsky y N. Rosen, conocido abreviadamente por las siglas EPR, refleja su postura, y es probablemente el artículo de física más citado (¡más que sus artículos sobre Relatividad o sobre el efecto fotoeléctrico!).

En 1924 Louis de Broglie (1892-1987) proponía en su tesis doctoral la existencia de ondas de materia. A partir de 1925 los fenómenos atómicos se describieron mediante un nuevo cuerpo de doctrina, la mecánica cuántica propiamente dicha (para distinguirla de la vieja teoría cuántica del modelo de Bohr–Sommerfeld), desarrollada inicialmente por dos vías diferentes: la *mecánica de matrices* de Werner Heisenberg (1901-1976) y la *mecánica ondulatoria* de Erwin Schrödinger (1887-1961). P.A.M. Dirac (1902-1984) unificó ambos enfoques en 1929, demostrando que corresponden a distintas representaciones de una misma teoría general que utiliza el formalismo abstracto de espacios de Hilbert. El físico y matemático de origen húngaro J. von Neumann (1903-1957) axiomatizó y rigORIZÓ la teoría en 1932. Una formulación alternativa, basada en la llamada integración sobre caminos, fue propuesta por R. Feynman en 1948. En 1928 Dirac descubrió la ecuación relativista para partículas de espín 1/2 (electrones, protones,...) que lleva su nombre, y que predice la existencia de lo que luego se llamaron antipartículas. El positrón, antipartícula del electrón, fue experimentalmente detectado por Anderson en 1932.

Cuando intentaba encontrar el contenido intuitivo de la mecánica cuántica, Heisenberg descubrió en 1927 el *principio de indeterminación*, que refleja la imposibilidad experimental de determinar la posición y la velocidad de una partícula con precisiones arbitrariamente grandes a la vez,

y que está en la base de muchas de las diferencias entre las mecánicas clásica y cuántica. En 1925 Pauli descubrió el *principio de exclusión*, que prohíbe que dos electrones estén en el mismo estado, lo que permitió entender la estructura de los átomos de varios electrones.

Por lo que se refiere a sistemas de muchas partículas, sus componentes se denominan *bosones* –en honor de Satyandra Nath Bose (1894-1974)– y *fermiones* –en honor de Enrico Fermi (1901-1954)–, según que la función de onda total sea simétrica o antisimétrica, respectivamente; las formas de tratar estadísticamente estos sistemas se denominan estadísticas de *Bose-Einstein* o de *Fermi-Dirac*.

La *mecánica cuántica* ha sido aplicada con éxito a innumerables problemas relativos a partículas elementales, núcleos atómicos, átomos y moléculas, pero también a sistemas mesoscópicos y macroscópicos como los condensados de Bose-Einstein, la superfluidez, la superconductividad, las uniones de Josephson y, a nivel teórico, la evaporación de agujeros negros.

El advenimiento de la *mecánica cuántica* en la década de los 20 supuso el cuestionamiento de algunos de los más viejos y firmes pilares de la ciencia, como la causalidad, el determinismo y hasta la simple posibilidad de visualizar las piezas elementales de la naturaleza. En algún momento ha existido la sensación de que la ciencia había alcanzado un nuevo nivel de abstracción, próximo al mundo del arte abstracto contemporáneo¹.

Un ejemplo de la institucionalización de la ciencia europea es la creación en 1887 del Instituto Imperial de Física y Tecnología (Physikalisch-Technische Reichsanstalt), a tres kilómetros de la Puerta de Brandemburgo, merced a los

esfuerzos económicos de Werner von Siemens y bajo la presidencia de Hermann von Helmholtz (1821-1894). Este Instituto, con el que Europa conoció el nacimiento de la Gran Ciencia, fue el primero que cumplió una misión de normalización de instrumentos físicos, catorce años antes de la fundación en los Estados Unidos del National Bureau of Standards.

El enigma de la composición de los núcleos atómicos se resolvió en 1932 con el descubrimiento de los previstos *neutrones* por James Chadwick (1891-1974), lo que culminó un laborioso proceso experimental en el que intervinieron alemanes –Bothe y Becker–, franceses y polaco-franceses –el matrimonio Joliot-Curie–, e ingleses del laboratorio de Rutherford. Las reacciones nucleares producidas por los neutrones fueron estudiadas con detalle en 1934 por Fermi en Roma. Entre las reacciones nucleares producidas por los neutrones destaca por su importancia militar y económica la *fisión del uranio*, descubierta en 1938 por Otto Hahn (1879-1968) y Fritz Strassmann (1902-1980). Dada la gran cantidad de energía que se desprende en la fisión del uranio, se pensó inmediatamente en la posibilidad de encadenar la fisión de todos los núcleos de un trozo de uranio. El equipo de Joliot y sus colaboradores del Collège de France, Hans Halban y Lew Kowarski, previeron en 1940 la posibilidad de provocar una reacción en cadena que iniciara el camino hacia nuevos descubrimientos científicos y hacia la producción de energía en cantidades ilimitadas. La tarea resultó más difícil de lo esperado porque de los dos isótopos más abundantes del uranio, solo el ^{235}U –que se encuentra en una baja proporción del 0.7 por ciento– se fisiona bajo el bombardeo con neutrones lentos o térmicos, mientras que el otro

isótopo, ^{238}U , absorbe fuertemente los neutrones rápidos. En un bloque de uranio metálico natural la reacción en cadena no se produce; hubo que esperar a que en 1942 Fermi intercalase bloques de grafito entre las barras de uranio para conseguir así mantener la reacción en cadena; el grafito rebaja la velocidad de los neutrones, disminuyendo su absorción por el ^{238}U y facilitando su efecto fisiónador sobre el ^{235}U . La pila atómica o reactor de Fermi en el Laboratorio Metalúrgico de Chicago contenía 400 toneladas de grafito como moderador, 6 toneladas de uranio metálico y 58 toneladas de óxido de uranio. El 2 de diciembre de 1942 tuvo lugar en dicho reactor la primera reacción en cadena automantenida de la historia.

En la década de los 30 se habían cumplido grandes progresos en las técnicas experimentales, transformando la *física nuclear* en una empresa técnica e industrial de gran envergadura tanto en sus aspectos tecnológicos como económicos. Los físicos británicos primero y los americanos después iniciaron las técnicas de la física nuclear buscando instrumentos que fuesen capaces de suministrar cada vez mayor energía a partículas atómicas. En pocos años se perfeccionaron los contadores Geiger-Müller y nacieron los *aceleradores de partículas*. Primero fue el *acelerador RC en cascada* –Cockcroft y Walton, 1932– que utilizaba un multiplicador de tensión para alcanzar los 125 000 voltios y permitir la reacción nuclear protón+litio7 dando dos partículas alfa; luego el *generador* Van der Graff en 1933 con energías de 5 millones de voltios, y el *ciclotrón* de Lawrence en 1932-3 para estudiar la física de las *partículas elementales*.

Los primeros aparatos cabían en una habitación de tamaño mediano y podían acelerar partículas hasta unos

pocos MeV. El primer ciclotrón de Lawrence en 1932 tenía unos 30 cm de diámetro y alcanzaba el millón de voltios. En 1939 se construyó en Berkeley un ciclotrón de 150 cm de diámetro, en el que los electrones podían alcanzar una energía equivalente a 16 MeV. En 1940 la Fundación Rockefeller donó 1.4 millones de dólares para la construcción de un ciclotrón de 45 cm de diámetro. Dato interesante es la comparación con el proyecto finalmente no realizado de acelerador SSC –Supercolisionador Superconductor–, que de haber sido construido en Texas según las previsiones habría costado 8 millardos de dólares, ocupado un túnel subterráneo de 86 km de perímetro, y permitido estudiar colisiones de protones a 20+20 millones de MeV.

Para que la energía de una reacción en cadena se desprenda súbitamente es preciso disponer de ^{235}U suficientemente puro o de otra sustancia con propiedades análogas, como el ^{239}Pu que se produce en los reactores nucleares por transmutación de ^{238}U con neutrones. Estos dos métodos se utilizaron respectivamente en la primera y segunda bombas atómicas lanzadas sobre Japón en agosto de 1945. Como señala Schwarzenberg “en la millonésima parte de un segundo la humanidad presencié la terminación de una época que va desde Demócrito a Gandhi”.

El desarrollo de la bomba atómica marca el final del periodo de investigación “pura” en física nuclear. A partir de ese momento la ciencia nuclear se acompaña de factores políticos, militares y sociales impensables en todas las etapas anteriores de la evolución del conocimiento científico. La ciencia y la técnica se vuelven imprescindibles para las armas de vanguardia y para el ordenamiento tecnológico y militar de las naciones. Otros ejemplos de aplicación bélica de la

ciencia son el radar, los cohetes balísticos, los ordenadores, la teledirección, la biotecnología militar, etc.

Esta época es también un punto de inflexión trascendental en el ordenamiento social de la ciencia. Durante las etapas que dieron lugar a la revolución relativista y a la revolución cuántica la ciencia fundamental había seguido siendo europea; pero en los años que antecedieron a la II Guerra Mundial y durante el medio siglo siguiente gran parte de la elite de la ciencia mundial se acogió a la libertad política y el desarrollo económico de los Estados Unidos, cambiando por completo el escenario en el que habían de surgir las nuevas ideas científicas y técnicas. Los primeros fueron los emigrantes judíos que huían del nazismo, entre los que se encontraba una formidable selección de la física centroeuropea. Después de la guerra, el bieldo de la devastación y empobrecimiento europeos aventaron hacia América a las elites científicas en los nuevos campos de la física y la biología. La desaparición de la URSS y las dificultades económicas de su sucesora Rusia han provocado mucho más tarde un nuevo éxodo a los EEUU de físicos y matemáticos del antiguo bloque del Este.

La historia de la aplicación militar de la fisión nuclear, la separación de isótopos, la reacción en cadena del uranio enriquecido en ^{235}U , la moderación de neutrones, la metalurgia del uranio, la producción de plutonio a gran escala, la construcción de reactores atómicos autosostenidos, y de otros muchos campos de la física nuclear americana, están llenas de nombres de científicos europeos –como los de Fermi, Teller, Weisskopf, Wigner, Peierls y Bethe– y también de formidables proyectos tecnológicos, adaptados o creados *ex novo*, sin los que no hubiera sido posible llevar a buen puerto el proyecto Manhattan, o los computadores, el radar, el máser



Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, reconocida como tal por Real Decreto de 25 de febrero de 1847.

y el láser, y la *iniciativa de defensa estratégica*, llamada luego *escudo antimisiles*. El desarrollo de la aviación, los cohetes y la conquista del espacio por los EEUU fue también deudor en sus inicios de los científicos e ingenieros de la derrotada Alemania nazi, como el famoso Werner von Braun.

La ciencia y los científicos europeos tuvieron un peso importante en la elaboración de la política de la ciencia de los Estados Unidos de América a partir del segundo tercio del siglo xx. La ciencia básica y sus aplicaciones ejercen allí una inmediata influencia, como la que se manifiesta en la creación de nuevos Centros de Desarrollo como el formidable “Radiation Laboratory” del Massachusetts Institute of Technology, o los laboratorios Bell, y en el traspaso continuo entre campos aplicados del conocimiento y de éstos con la ciencia fundamental –el proyecto del radar, el descubrimiento del transistor y la física del estado sólido, los láseres y sus aplicaciones militares o médicas; la espectroscopía de microondas y los avances en cosmología, astrofísica y ciencias del espacio–. Como ejemplo de esto último bastará mencionar el lanzamiento el 7 de Abril de 2001 de la sonda *Mars Odyssey* y su puesta en órbita marciana el 24 de octubre del mismo año, tras haber recorrido 500 millones de kilómetros².

La participación europea en la ciencia y la política científica de los Estados Unidos fue devuelta a Europa en forma de ayuda al nacimiento de Centros de Investigación europeos. La creación y desarrollo del Organismo Europeo para la Investigación en Física de Altas Energías (CERN) es uno de los ejemplos más representativos de las relaciones científicas internacionales en la segunda mitad del siglo xx. La historia del CERN se remonta a los años inmediatos al fin

de la II Guerra Mundial y supuso el encuentro entre dos grandes fuerzas operativas en Europa: por un lado la necesidad de los científicos de disponer de los costosos y modernos equipos de experimentación, y por otro la búsqueda por las naciones europeas de motivos de interés común con los que exhibir manifestaciones tangibles de unidad: la rama de la ciencia elegida para este primer encuentro fue la *física nuclear y de partículas*.

Del lado de los científicos fue esencial el reconocimiento de la necesidad tanto de la posesión de equipos de física nuclear como de nuevos esfuerzos internacionales. La primera de estas necesidades se hizo patente ya en 1947, cuando comenzó a rendir la primera serie de resultados el *sincro-ciclotrón* construido en California durante la guerra sobre la base de los descubrimientos de Oliphant, Veksler y McMillan. La segunda necesidad se puso de manifiesto alrededor de 1950, al observarse que ningún país europeo parecía dispuesto a realizar las grandes inversiones exigidas para estar en primera línea de la investigación en física nuclear. La oportunidad que brindaba a los físicos europeos su contacto en el seno de la Comisión de las Naciones Unidas para el control de la energía atómica, dio pie a conversaciones privadas para explorar las posibilidades de una acción intergubernamental en este sentido. En los primeros contactos participaron J.R. Oppenheimer, H. Kramers –presidente de la Unión Internacional de Física Pura y Aplicada–, P. Auger –director del Departamento de Ciencias Naturales de la UNESCO– y el diplomático F. de Rose. Entre 1948 y 1950, un grupo de científicos y de instituciones se unió a este movimiento. Entre otros, Perrin –del Comisariado de Energía Atómica–, Dautry –administrador del Comisariado–, el

físico Isaac Rabi, G. Bernardini –de la Columbia University–, la Unión Internacional de Física y la UNESCO. Fueron Dautry, de Rose y Kowarski quienes prepararon la conexión inicial entre los círculos académicos y el poder político a favor de la creación de instituciones conjuntas en Europa occidental.

La primera manifestación pública de esta conexión tuvo lugar en diciembre de 1949, en Lausanne, con motivo de la Conferencia Cultural Europea. En ella Dautry leyó un mensaje de Louis de Broglie en el que proponía la creación en Europa de una institución internacional de investigación cuyo grado de equipamiento transpusiese las posibilidades de las naciones miembros. Aunque en dicho mensaje no se mencionase explícitamente la física nuclear, sí se hizo en la intervención de Dautry y en las resoluciones de la conferencia. Dichas resoluciones dejaron claros los aspectos pacíficos de la energía nuclear, haciendo de esta forma una referencia oblicua al dilema que obsesionaba a los científicos: no infringir directamente los tabúes de la fisión del uranio, pero llegando tan cerca de ellos que fuera posible ejercer influencias sobre los objetivos nacionales. Con estas ideas in mente, el tema más obvio y atractivo para figurar como candidato a la investigación internacional fue la *física de los mesones*. La aprobación por la Conferencia General de la UNESCO en Florencia, y la declaración de Isaac Rabi expresando públicamente la simpatía con que el proyecto de cooperación europea era visto en los Estados Unidos, dieron nuevos bríos al proyecto de creación del CERN.

La primera reunión del Comité Consultivo del CERN tuvo lugar en la UNESCO, en mayo de 1951. En él estuvieron presentes ocho países, y se marcaron dos objetivos: a

largo plazo la construcción del segundo acelerador más potente del mundo, y a corto plazo la construcción de una máquina más clásica, pequeña y económica para comenzar lo antes posible la experimentación europea en física de altas energías, contribuyendo así a cimentar la unidad europea. El *Acuerdo de Cooperación* sin reservas de ratificación fue firmado el 15 de febrero de 1952 por Holanda, Yugoslavia, y la República Federal de Alemania. A lo largo de 1952 fueron depositados en la UNESCO los instrumentos de ratificación por Francia, Suecia, Dinamarca y Suiza. Bélgica y Noruega lo hicieron en 1953 y Grecia en 1954. Este Acuerdo dio paso a la Convención definitiva para el establecimiento de una Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN) con sede en Ginebra, firmada en París el 1 de julio de 1953. Su primer director fue el físico suizo-americano F. Bloch. España no entraría a formar parte del CERN hasta 1961.

En el CERN se constituyeron cuatro grupos de trabajo: *sincro-ciclotrón*, *protón-sincrotrón*, *laboratorio* y *estudios teóricos*, este último bajo la dirección de Niels Bohr. La presencia del CERN ha incidido de manera muy eficaz sobre las relaciones internacionales, y la presencia en sus grupos de trabajo de científicos de muchas naciones ha sido una de las causas de la pujanza y extensión de la Física Teórica y Experimental europeas.

Tras once años de gran éxito en su operación, el *Large Electron-Positron Collider* (LEP) ha sido finalmente desconnectado en el año 2000. En su tiempo fue el acelerador más potente y de mayor tamaño del mundo, acelerando partículas en sentidos opuestos a lo largo de una circunferencia de 27 kilómetros hasta alcanzar casi la velocidad de la luz. Las colisiones resultantes han podido recrear las energías

disponibles en los primeros momentos del Big Bang. El desmantelamiento del LEP está permitiendo la instalación en su túnel del *Large Hadron Collider* (LHC), que será más potente y presumiblemente conducirá a descubrimientos trascendentales sobre la estructura de la materia. Estados Unidos ha cancelado un proyecto similar, y sus inversiones y las de otras naciones —entre otros, Japón, India y Canadá— van a dirigirse a su colaboración en el LHC.

En las últimas décadas el CERN ha sido uno de los pocos ejemplos en los que la física europea ha estado al nivel de la de los Estados Unidos o por delante de ella. En el CERN se confirmó experimentalmente en 1983 la existencia de los mesones W y Z, transmisores de la interacción débil; las mediciones precisas de las propiedades de la partícula Z en el LEP confirmaron el modelo estándar con solo tres familias de quarks y leptones en 1989; se sintetizaron los primeros átomos de antimateria en 1995; se demostró en 2000 la existencia del plasma de quarks y gluones, 20 veces más denso que la materia nuclear; y en 2001 se confirmó de manera directa la violación de la simetría CP (Conjugación de carga y Paridad), responsable de la preponderancia en nuestro universo de la materia sobre la antimateria.

Los avances en aceleradores, imanes y detectores desarrollados en el CERN se han incorporado a los más variados campos: terapia del cáncer, análisis de imágenes en medicina e industria, electrónica, instrumentos de medición, detección y control de radiaciones, nuevos materiales y procesos de fabricación, etc.

En 1990 se comenzó en el CERN la distribución de información entre ordenadores basada en hipertexto, desarrollada inicialmente para hacer más rápido el intercambio de datos

entre físicos de distintas Universidades del mundo. Ello daría lugar al nacimiento de la World-Wide Web, la famosa red WWW que todo el mundo utiliza hoy día y que ha cambiado esencialmente el acceso a la información más variada. Esta contribución por si sola ha producido uno de los cambios más profundos experimentados por nuestra sociedad. El CERN participa hoy en el desarrollo del sucesor de la WWW, a través del consorcio W3C.

Al reseñar las grandes instalaciones físicas quizá sea pertinente mencionar las lecciones prácticas que el editor jefe de la revista "Science" ha sacado de la paralización en 1993 por el Congreso de los Estados Unidos del programa SSC (*Superconducting Super Collider*): 1. El gran aumento de los costes de construcción, desde los 3 millardos de dólares iniciales a cerca de los 12 millardos de dólares, es una de las razones de la cancelación del proyecto. 2. Otro argumento en contra es el gran coste de mantenimiento, estimado en 1 millardo de dólares anual. 3. Dado lo necesariamente limitado de los presupuestos, la comunidad científica debe establecer sus prioridades sobre la base de los retornos científicos y sociales. 4. La física de altas energías es demasiado costosa para desarrollarse dentro de límites nacionales y en concreto para justificar la construcción de aceleradores en ambos continentes. La comunidad científica internacional debería utilizar sus instalaciones hasta la saturación de sus posibilidades: en los Estados Unidos el Fermilab y la factoría B de Stanford; y en Europa el CERN y en particular su LHC. 5. Los científicos deben explicar claramente a la sociedad los motivos por los que deben financiarse sus proyectos. La conclusión final es que cualquiera de los grandes proyectos, en física de partículas, astronomía, exploración del espacio o biología, debe articularse claramente con la sociedad.

Otro campo importante para la ciencia y la tecnología europeas es la *investigación espacial*. El programa espacial de los Estados Unidos y sobre todo los vuelos tripulados estuvieron motivados por la guerra fría, pero como consecuencia indirecta llevaron al país a la cúspide de la innovación tecnológica en miniaturización y robótica. Por el contrario Europa ha tenido un desarrollo espacial más tardío; por ejemplo será minoritaria en el *Next Generation Space Telescope* que seguirá los pasos del telescopio espacial HST (*Hubble Space Telescope*), aunque tiene un buen programa de construcción y lanzamiento de satélites de telecomunicaciones. Parece pues lógico que Europa colabore en los programas de la NASA que pretenden lanzar misiones más rápidas y baratas con objeto de monitorizar los océanos y el clima de la Tierra, tanto por medio de programas nacionales como a través de los de la agencia europea ESA (European Space Agency).

Con la puesta en marcha de los 4 telescopios de 8 metros del VLT (Very Large Telescope) del European Southern Observatory (ESO) en Cerro Paranal (Chile), Europa dispone en cambio de la mejor instrumentación óptica terrestre del mundo. ESO dispone además de otros telescopios menores, de 3,6 y 2,2 m por ejemplo, en el observatorio de La Silla, también en Chile.

Se espera que a finales de 2002 vea su “primera luz” el Proyecto del Gran Telescopio de Canarias (GTC), iniciativa española liderada por el Instituto de Astrofísica de Canarias y financiada por el Ministerio de Ciencia y Tecnología de España y la Comunidad Autónoma de Canarias con un presupuesto que en 1997 se estimaba en 80 millones de dólares. Se trata de un telescopio de espejo primario segmentado

de 10.4 m de diámetro, instalado en uno de los mejores lugares del hemisferio Norte: el Observatorio del Roque de los Muchachos, en la isla de La Palma de las Islas Canarias³.

Un interés particular ha tenido la creación en la última década del primer Associated European Laboratory (AEL) que reúne los proyectos del Instituto de Astronomía de Cambridge, el Instituto Astrofísico de París y el Observatorio de la Universidad de Leiden (Holanda). De esta forma, pueden nacer estructuras de colaboración con los grandes proyectos tipo CERN, que son esenciales a la europeización de la ciencia.

Por mandato del Consejo Europeo de Ministros de Educación, la Comisión Europea inició en noviembre de 2000 negociaciones con Rusia y Japón para la construcción y operación del International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER), la etapa previa necesaria para la obtención de energía por fusión controlada. El Consejo de Ministros instó a la Comisión a realizar un detallado informe acerca del estado actual y direcciones futuras de las investigaciones sobre fusión –coste, impacto ambiental, calendario para su realización y lugar del programa de investigación en los Programas Marco de la Unión– para tomar una decisión sobre la construcción de ITER que, bajo su configuración inicial, costaría 5.8 millardos de dólares. La investigación europea sobre fusión costaría anualmente alrededor de 4.5 millardos de dólares, de los que el 40% procedería del presupuesto de la Unión y el resto lo sería de los estados miembros. A pesar de la incertidumbre existente sobre la factibilidad de la energía de fusión, todos los estados miembros han aprobado el acuerdo⁴.

V. LA CONJUNCIÓN CIENCIA - ECONOMÍA

LA conjunción científico-económica iniciada en los Estados Unidos de América en el siglo XIX se ha visto potenciada en el siglo XX de manera extraordinaria, como demuestran los siguientes ejemplos.

Los Laboratorios Bell han sido pioneros de los centros de investigación industrial de todo el mundo desde su lanzamiento en 1925 por la American Telephone & Telegraph (AT&T). Desde su base de Murray Hill, New Jersey, los científicos de los Laboratorios Bell han logrado importantes descubrimientos como los transistores, los láseres, las comunicaciones por satélite, la transmisión de datos digitales y el sistema operativo UNIX. Los investigadores de Bell han sido reconocidos con varios Premios Nobel, justamente por sus aportaciones en la interfaz entre la física fundamental y las altas tecnologías. Sus alrededor de 3000 científicos, matemáticos, ingenieros y técnicos constituyen en la actualidad una plantilla dedicada preferentemente a aspectos básicos, precursores de ulteriores desarrollos aplicados. El Premio Nobel de Física 1997, Steve Chu, que pertenece a los Laboratorios Bell desde 1978 ha podido afirmar: "The joy and excitement of doing science permeated the halls, and the cramped labs and offices forced us to interact with each other. Management supplied us with funding, shielded us from extrane-

ous bureaucracy and urged us not to be satisfied with doing merely ‘good’ science. Life in Bell Labs was practically perfect”.

Algunos proyectos actuales de “Lucent Technologies”, empresa matriz de los laboratorios Bell, incluyen el *papel electrónico* –hojas que pueden desplegar series de diferentes documentos a una señal dada– (*Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 98, 4835-4840, 2001), y los *materiales plásticos semiconductores* (*Nature*, 410, 189-192, 2001). Ante el anuncio reciente de dificultades financieras para Lucent, los investigadores de Bell Laboratories reclaman el seguimiento de la tradición para ejercer la libertad de exploración de las áreas que estimen conveniente [...] y contrarrestar los malos tiempos con mejores ideas (*Nature* 412, 578-579, 2001).

Otro de los ejemplos más significativos de esta conjunción ciencia-economía es la compañía IBM, cuyo primer centro de investigación se creó en 1945. Al cabo de medio siglo, con un presupuesto anual de 5 a 6 mil millones de dólares, tres mil científicos, nueve laboratorios en todo el mundo, y cinco Premios Nobel, este gigante de la tecnología mundial ha elegido la investigación fundamental, al lado o más aún que la investigación directamente aplicada. En las últimas décadas se deben a IBM el descubrimiento del *disco magnético* para el almacenamiento de datos informáticos, la sustitución del aluminio por el cobre en los microprocesadores, los nuevos *microdiscos duros* del tamaño de una caja de cerillas y los *PCs portátiles* con la potencia de los grandes ordenadores tradicionales; todo ello unido al cultivo de la física y la óptica, y al desarrollo de la tecnología web.

Las empresas americanas han optado en buena medida por una estrategia basada en el reparto a compañías subsidiarias de la investigación sobre ciertos productos. A modo de ejem-

plo, la diminuta pantalla del tamaño de un ojo, utilizada en la fabricación del PC de bolsillo por IBM, es fruto de la innovación de la japonesa Olympus.

En la historia de la conjunción científico-económica en los Estados Unidos, hay que señalar la presencia de otros factores decisivos. Por un lado, la presencia del *capital riesgo*, y por otro las exigencias de reconversión industrial y la aparición de áreas especiales –del tipo de las de la *biotecnología*– propicias a la creación de nuevas empresas. Así en el Estado de Texas nacieron en la década de los 80 múltiples compañías, como *Houston Biotechnology, Inc.* (HBI), *LifeTech Industries Ltd*, *GES Pharmaceuticals*, *Triplex Pharmaceutical Company*, *LifeCell Corporation* y *Texas Biotechnology Corporation*. En 1984, Dominic Man-Kit Lam y Jared M. Emery, profesores de oftalmología en la Universidad Baylor, descubrieron un producto para impedir la recurrencia de las cataratas basado en un anticuerpo monoclonal, y fundaron la HBI que se estableció en los *Woodlands* de los alrededores de Houston en 1986; el producto estrella de la empresa HBI fue una inmunotoxina –un anticuerpo monoclonal conjugado con una toxina vegetal– diseñada para destruir selectivamente las células epiteliales que subsisten tras la eliminación quirúrgica de las cataratas, y cuyas ventas alcanzaron en 1997 los 600 millones de dólares. Lam fundó también las compañías *LifeTech Industries Ltd* y *GES Pharmaceuticals* y fue nombrado en 1991 director ejecutivo de *Agri Star, Inc.*, compañía de biotecnología agrícola dedicada en sus comienzos a la fabricación de un sistema de membranas para la clonación y micropropagación de plantas. La *Triplex Pharmaceutical Company* se constituyó en 1989, también en los *Woodlands*, para el desarrollo terapéutico de oligonucleóti-



Real Academia de Jurisprudencia cuyos definitivos estatutos se aprobarían por decreto de 27 de junio de 1947.

dos formadores de *triples hélices* que inhiben la expresión de fragmentos de DNA a los que se unen, y, por tanto, inhiben la transcripción y la formación de las proteínas correspondientes; la tecnología basada en la formación de *triples hélices* tiene una aplicación inmediata en los tratamientos antivirales como en el de la inmunodeficiencia humana (HIV) y el del herpes simple. *Life Cell Corporation* se formó en 1986 para comercializar una técnica de enfriamiento a ultra-baja temperatura para células y tejidos biológicos, de acuerdo con una tecnología desarrollada por la Universidad de Texas; esta tecnología se ha extendido a los trasplantes de los injertos de piel, y su utilización para el tratamiento de grandes quemados, y al desarrollo de conductos vasculares para la cirugía cardiovascular. En 1986 Nancy y Tse Was Chang crearon *Tanox Biosystems, Inc.* para la obtención de anticuerpos monoclonales para el tratamiento de HIV, alergias y enfermedades autoinmunes. *Texas Biotechnology Corporation*, localizada en el campus del Texas Medical Center, ha desarrollado nuevos agentes bioterapéuticos para el tratamiento de enfermedades cardiovasculares, aterosclerosis e hipertensión; esta compañía se encuentra asociada al M.D. Anderson Cancer Research Center, al Texas Heart Institute y al University of Texas Health Science Center, de Houston.

La investigación industrial se desarrolla hoy en un ambiente global cambiante y altamente competitivo. Desde el final de la II Guerra Mundial hasta los 70s, la investigación y el desarrollo tecnológico de los Estados Unidos dominaron internacionalmente, pero durante los últimos 20 años ha surgido con fuerza una competitividad global, caracterizada por unos ciclos de vida de los productos de alta tecno-

logía cada vez más cortos. Precisamente por esta presión del tiempo, las compañías buscan la colaboración de otras y se embarcan en licencias cruzadas y *joint ventures* de capital.

Otra característica de la competitividad industrial ha sido la instalación de laboratorios de investigación en otros países, para modificar la naturaleza de los productos de acuerdo con el gusto particular del país anfitrión, o para reducir costos; ejemplo de ello es el traslado a la India de los centros de desarrollo informáticos de algunas compañías americanas. En 1994, las compañías americanas dedicaron a I+D 115 millardos de dólares, de los que 83 millardos de dólares fueron inversiones propias distribuidas en: 72% dedicados al desarrollo de nuevos productos o procesos; 24% a investigación aplicada; y 4% a investigación básica. Cuando una compañía invierte en investigación básica responde en general a la necesidad de resolver algún problema propio y no al simple interés por el avance del conocimiento. En la actualidad Estados Unidos compite con éxito en los más diversos campos de la innovación en alta tecnología; en concreto es líder en los campos de la *biotecnología*, la manufactura de *chips* avanzados como los microprocesadores y el mercado mundial de *semiconductores*, aunque gran parte de la producción en serie de chips de memoria se desarrolle en países de mano de obra más barata, como Taiwan o Corea del Sur.

En el siglo XXI la nueva gran ciencia serán las ciencias de la vida, uno de cuyos mejores ejemplos es el gran proyecto “genoma humano” para secuenciar el genoma humano completo. En diciembre de 1999 se publicó la secuencia del primer cromosoma humano, el cromosoma 22, mucho antes de lo que se había previsto en el diseño inicial del proyecto. Un primer borrador de la secuencia genética completa se

publicó en Junio de 2000, seguido de análisis más detallados en Febrero de 2001⁵. Promovido en sus comienzos bajo la ayuda pública del US National Cancer Institute (NCI), la competición privada de la compañía Celera de Craig Venter está dando lugar a una duplicación de esfuerzos en vez de a la colaboración y coordinación que hubieran sido deseables.

Existen 12 grupos establecidos por el NCI y la European Organization for Research and Treatment of Cancer con sede en Bruselas. La misma deseable cooperación debería extenderse a proyectos tales como el recientemente anunciado *EuroVac*, consorcio europeo de investigación sobre el *sida*, financiado por la Unión Europea con 9.2 millones de dólares, que competirá con el AIDS Vaccine Research Center –dependiente de los US National Institutes of Health–, la International AIDS Vaccine Initiative –organización privada financiada por el Banco Mundial, el Gobierno Británico y Bill Gates–, y con otros proyectos nacionales del tipo de la South African AIDS Vaccine Initiative en el intento de lograr una vacuna para el VIH.

El 19 de enero de 2000 el presidente Clinton anunció en el *Instituto de Tecnología de California (Caltech)* la creación del *Programa Nacional USA de Nanotecnología* –que en el 2001 ha recibido más de 500 millones de dólares–, como motor de la revolución industrial del siglo XXI. Dicho programa promoverá la introducción de nuevos materiales más ligeros y resistentes, la *electrónica molecular* como alternativa del silicio, la eliminación de contaminantes, y el aumento de rendimiento de las células de energía solar. Se podrán implantar en el cuerpo humano nanosensores de múltiple utilización biomédica para controlar los parámetros bioquímicos, el diagnóstico y la liberación de medica-

mentos. La incorporación de los biopolímeros a los chips aumentará extraordinariamente su capacidad de memoria, a la vez que disminuirá el tamaño de los futuros procesadores.

VI. LA CONTRATACIÓN
DE CIENTÍFICOS EXTRANJEROS
EN LOS ESTADOS UNIDOS.
LAS FUNDACIONES AMERICANAS

EL cultivo de la ciencia en los Estados Unidos, e incluso el nacimiento mismo de algunas de sus ramas, se benefició de la llegada masiva de científicos, particularmente del Este y el Centro de Europa, pero también de Asia. Esta llegada se produjo como consecuencia de la atracción política y económica norteamericana sobre la comunidad científica, y fue acelerada por las guerras y persecuciones que ahuyentaron a las gentes de ciencia de otras partes del mundo durante la mitad central del siglo xx. Buena prueba de ello es la abundante presencia de nombres de las más variadas procedencias tanto en las nóminas de la excelencia científica en los tres cuartos de siglo últimos –los Premios Nobel, por ejemplo– como en las listas de los protagonistas de la reciente innovación tecnológica.

La prensa francesa recogió hace algún tiempo una serie de ejemplos, como el caso de Arun Netravali de Bombay, emigrante a los Estados Unidos que hoy es director de los legendarios Laboratorios Bell. El texto de “Le Monde” (Sylvie Kauffmann, 26 de enero de 2000) dice textualmente: “Comme immigré, comme technologiste, et comme dirigeant d’une entreprise qui a remarquablement rebondi dans la nouvelle

économie de la fin des années 90 [...]. Arun Netravali est un multiple symbole de la réussite économique américaine. Pays d'immigrés, l'Amérique continue chaque jour à attirer les plus talentueux des candidats ... et leur offre, s'ils savent le mériter, un accès unique aux postes de décision”.

En esta acogida social de la ciencia americana juega un papel fundamental la *filantropía privada*. A finales del siglo pasado Andrew Carnegie y John D. Rockefeller crearon una nueva forma del mecenazgo, del que se benefició extraordinariamente la naciente investigación científica americana. Durante la primera mitad del siglo xx la idea de una *filantropía estratégica*, que responde tanto a las necesidades como a las oportunidades de inversión productiva, guió la aparición de toda una serie de fundaciones privadas. Con motivo de la creación de la Fundación “Josiah Macy Jr.”, Kate Macy Ladd escribió: “Experience seems to show that in an enlightened democracy private organized philanthropy serves the purposes of human welfare best by investigating, testing, and demonstrating the value of newer ideas”.

Durante 1890-1940, las fundaciones privadas constituyeron la principal fuente independiente de financiación de toda la investigación biomédica; en 1940 su contribución supuso el 27% de los 45 millones de dólares invertidos en el sector de las ciencias de la salud. Tras la II Guerra Mundial, las agencias federales asumieron el papel principal en la financiación de la investigación científica, cuyo presupuesto total alcanzó los 14.8 millardos de dólares a mediados de la década de los 80. Las Fundaciones, el sector académico privado y las asociaciones de voluntarios contribuyeron al 5% del presupuesto total de la investigación científica. En el informe de 1995 del Centro de Fundaciones de Nueva York

se señala que el 50% de las ayudas de Fundaciones se destinaron a la educación y servicios sociales y de salud, y solamente el 2% al soporte de la investigación científica. En la transición hacia el siglo XXI, la participación de las Fundaciones privadas ofrece la novedad de su colaboración mutua y con agencias federales y corporaciones industriales.

VII. CIENCIA, TECNOLOGÍA,
SOCIEDAD, POLÍTICA Y ECONOMÍA.
LA INVESTIGACIÓN FUNDAMENTAL
Y EL PROCESO DE INNOVACIÓN

EN un artículo aparecido en los *Comptes Rendus* de la Academia de Ciencias de París podía leerse: “La ciencia es tan antigua como la conciencia; nació el día en que el hombre dedicó por primera vez un instante a la observación de una gota de agua, leche o sangre, de un trozo de piedra, piel, o fruto, y se hizo preguntas al respecto. Al confiar después sus interrogantes a otro se crea la información; su reflexión y transmisión constituyen la cultura”. La *manifestación cultural* de la ciencia ha ido variando en cada momento desde esta observación inicial de la Naturaleza hasta la ciencia en su concepción actual. *Ciencia, tecnología, cultura y sociedad* son variables de una ecuación compleja, un toma y daca que dura ya miles de años y cuya resultante es una evolución cultural cuyo ritmo va siendo cada vez más rápido, y en la que el cambio de las estructuras sociales está fuertemente influido por los avances científicos y tecnológicos.

El clima intelectual actual en el mundo civilizado está determinado por la ciencia; el conocimiento científico es la clase más respetada de conocimiento. La imagen del mundo de la gente culta viene conformada por los descubrimientos científicos, de forma que se habla de la *imagen científica del*

mundo, aunque tampoco pueda ignorarse la emergencia en tiempos recientes de actitudes anticientíficas, incluso entre los considerados intelectuales.

Ocurre frecuentemente que las lenguas son invadidas por vocablos de nuevo cuño con los que se intenta identificar los conflictos de la época y tomar parte en las disputas sociales del momento. Hoy día se pretende a veces desmerecer nuestra civilización y desconsiderar nuestra época calificándola peyorativamente como *tecnológica*; como si la *tecnología* fuera un suceso reciente o moderno y no un proceso vinculado a la propia especie humana y a su cultura. La cultura ha sido un factor en la selección natural de las sociedades humanas durante miles de años, hasta el punto de haberse propuesto la coevolución de la cultura y el cerebro humano. Al igual que las células y los organismos, las sociedades son también fenómenos emergentes y el comportamiento social bien pudiera ser resultante de la evolución por selección natural de ciertas cualidades humanas. García Bacca asegura en su *Elogio de la técnica* que “la humanización de la técnica actual –el vivir, moverse y ser desembarazadamente, y andar cual Pedro por su casa por el primer paisaje artificial que el hombre se ha dado con su propio esfuerzo e inventiva real, y no imaginaria– se consigue por la conciencia histórica, por la historia de la técnica, por museos de historia de los inventos... estela de inventos, o racionalidad retrospectiva de la historia real”.

El hombre es un ser *cultural*, y puesto que la *tecnología* existió ya en la Edad de Piedra, no es extraño que haya dejado huella en la propia evolución humana. A través de los siglos la Humanidad ha exhibido distintas sensibilidades frente a este proceso, que ha culminado en los tiempos más recien-

tes con la asimilación del avance de la ciencia al del progreso social. La ciencia y su expresión de lo útil, la tecnología, son inseparables del desarrollo social, aunque no siempre hayan caminado en paralelo.

El hombre del Paleolítico superior fue capaz de dar expresiones rituales a la materia pintando sobre las rocas la recolección de la miel; el *néctar de los dioses* quedó así registrado como el primer producto biotecnológico de la humanidad. Los primeros hombres se encontraron con la necesidad de afrontar las exigencias de la alimentación, la protección frente a la intemperie y la defensa frente a otras especies animales. La primera gran transformación de la sociedad, la revolución cultural del Neolítico, presencié la domesticación de los animales, el paso de la recolección a la producción agrícola, y la aparición de las primeras tecnologías para la elaboración y conservación de los alimentos. Varios milenios antes de Cristo las grandes civilizaciones de la Antigüedad dejaron objetos, documentos, pinturas, tradiciones y mitos acerca de los materiales tecnológicos puestos a punto por ellas. Las tecnologías de la alimentación, la cerámica y los metales fueron convirtiéndose en símbolos de una primitiva sociedad de consumo ligada a las exigencias de la vida sedentaria. La manufactura de utensilios para la defensa, la agricultura y el comercio permitían a la vez un primer reflejo de las ideas artísticas del hombre. Las fermentaciones, la cerámica y la metalurgia son fenómenos culturales característicos de cada sociedad humana, y sirven de referencia para deducir datos históricos, económicos, religiosos y populares de las poblaciones que los fabricaron y utilizaron.

La escritura sumeria tenía una palabra para el *alcohol* y los egipcios documentaron el fenómeno de la palatabilidad

y el aumento del valor nutritivo de los cereales cuando se los fuerza a germinar; éste proceso, el malteado actual, se empleó en la fabricación de la cerveza. Los más famosos colorantes utilizados en la tinción de las lanas –*tekhelet*, *argamán* y *tola'at-shani*, según el texto hebreo del Antiguo Testamento– fueron de origen animal y alcanzaron durante siglos gran importancia en el comercio y la economía.

La cerámica apareció desde muy antiguo en las civilizaciones del valle del Indo, en Mesopotamia y Egipto, y también en las civilizaciones maya y azteca. Los vasos griegos alcanzaron su apogeo técnico y decorativo en los siglos VI al V a.C., con periodos caracterizados por diferentes diseños: el geométrico, el decorado oriental con dibujos de vegetales y animales, y el ático basado en figuras humanas. Los contrastes cromáticos se lograban merced a la selección de las arcillas, el empleo de atmósferas oxidantes y reductoras en los hornos durante el proceso de cocción, y una manipulación de la temperatura para conseguir la formación de pigmentos de hierro rojos o negros. El producto cerámico que en la Antigüedad clásica siguió a los vasos griegos fue la *Terra sigillata*, característica de los romanos desde el siglo I a.C. Los recipientes de *Terra sigillata* se recubrían de una fina capa de arcilla que sinterizaba fuertemente al cocer, adquiriendo un brillo mate característico con una cocción oxidante a unos 950 °C. La influencia de la química árabe impregnó el arte cerámico peninsular y europeo medieval, con la introducción de los vidriados transparentes de plomo o estanníferos y de los reflejos metálicos. Pero las técnicas de vidriado exigían elevadas temperaturas a las que los óxidos colorantes utilizados se descomponían: a mediados del siglo XVIII el empleo de fundentes permitió realizar los

vidriados a temperaturas inferiores, logrando colores fijos e intensos.

La *metalurgia* se había incorporado como arte precientífico a la cultura de Mesopotamia alrededor de cuatro mil años a.C. El oro y el cobre formaron parte de sus utensilios y hábitos funerarios, que no se extenderían a Egipto hasta una docena de siglos más tarde. El desarrollo de la metalurgia acompaña al establecimiento de la civilización urbana y a la aparición de los primeros imperios de la historia. Los metales arman al guerrero, proporcionan gustos al vanidoso cortesano, llenan las arcas del mercader, y hacen posible la conquista y la riqueza, difíciles de concebir hasta entonces en la civilización neolítica. El comienzo de la metalurgia se identifica con la reducción de las menas y el descubrimiento de la fusibilidad de los metales obtenidos, aunque con anterioridad existiera durante milenios una etapa previa de utilización de los metales nativos —oro, plata y cobre principalmente—, diez mil años antes de su consideración como elementos químicos. La fusión de mezclas de menas, o de menas y metales, permitió el descubrimiento inicial de las aleaciones. La aparición del hierro unos 1500 años a.C. significó una nueva etapa en el desarrollo de la metalurgia, a la vez que una revolución de la sociedad al poderse fabricar armas, herramientas y utensilios con un material barato y extremadamente apto. Las aleaciones con carbono mostraron su sensibilidad a los tratamientos térmicos, dando lugar a los procesos de carburación, recocido, temple y revenido, cuyos fundamentos científicos no se comprenderían hasta descubrir en el siglo xx las propiedades alotrópicas del hierro. Estos procesos empíricos harían del acero un material de propiedades extraordinarias, con productos tan notables como los aceros de Damasco, Toledo, o Japón.

La metalurgia del plomo y la plata comenzó en el tercer milenio a.C. en Asia menor, desde donde llegaría a las costas orientales de la península ibérica. Se cuenta que los fenicios encontraron tanta plata en aquella zona que utilizaron lingotes de plata como lastre de sus barcos. La experiencia anterior con el cobre se adaptó a la metalurgia del plomo y de la plata. La copelación apareció en la metalurgia del plomo 2500 años a.C. y se realizaba primero en crisoles y más tarde en solera, con revestimiento de sustancias porosas resistentes a la acción corrosiva de las escorias.

Aunque la primera manifestación cultural de la humanidad fuera de índole tecnológica, a la par fue también artística. Al movilizar toda su inteligencia para desarrollar aquella tecnología inicial con la que asegurar su subsistencia frente a un ambiente por completo hostil, la naturaleza humana tuvo también que sentir la necesidad de exhibir su espíritu de trascendencia y de creación, y de alimentar con la belleza esta muestra. Cultura tecnológica y cultura artística caminaron de la mano desde los balbuceos mismos de la civilización. Christian Langlois, miembro de la Academia de Bellas Artes de Francia, ha escrito: “En la variedad de razas, de etnias y de pueblos, el hombre ha conocido las más diversas condiciones; de la extrema miseria a la opulencia, de la dulzura de la vida al reino de la ferocidad; ha conocido los éxodos y las masacres, los cataclismos terroríficos y las epidemias exterminadoras, la dominación y la esclavitud. Pero, jamás, aun en los peores momentos de su historia, se ha prescindido del arte y de la belleza”. A lo largo de la historia de la humanidad, lo útil y lo bello se manifiestan conjuntamente en la evolución cultural y social.

Desde los primeros balbuceos de la ciencia, su desarrollo ha sido inseparable de la marcha de la *sociedad* en la que está

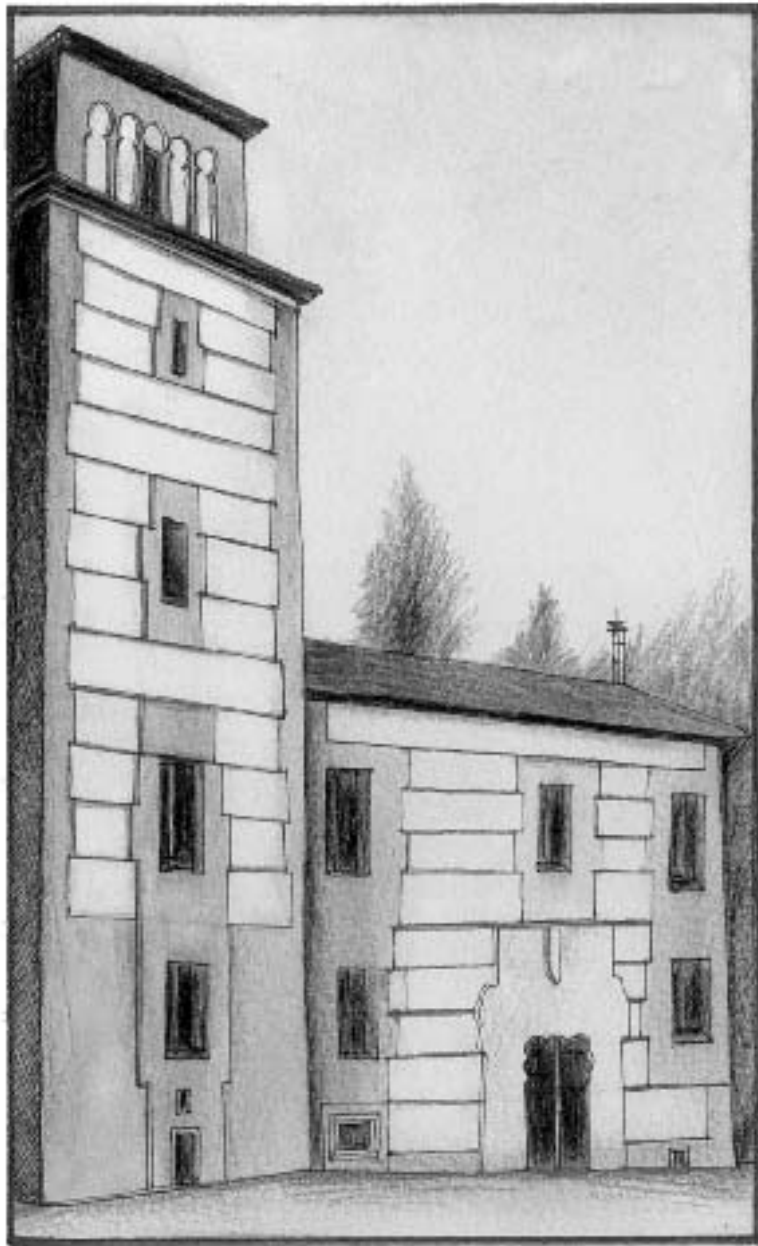
inmersa. La ciencia cointerpreta la posición del hombre en el universo y es ingrediente esencial de la fábrica de la cultura, el arte, la literatura, la ética y las instituciones sociales. Con la revolución industrial y la revolución política de las últimas décadas del siglo XVIII se iniciaría el estudio de los aspectos *sociales* y *culturales* del comportamiento humano bajo los ángulos de la antropología, la política, la economía y la historia misma.

Queda muy lejos la introducción en el mundo medieval de la energía hidráulica, el arado, la pólvora y el estribo, vinculados a la transformación de las instituciones feudales, pero la memoria colectiva occidental está repleta de tradiciones sobre estos advenimientos, que muestran la eficacia de la tecnología como fuerza motora de la historia. Las *artes mecánicas* de Vives, Vesalio, Bodin o Agricola favorecieron a lo largo del siglo XVI el empeño de artesanos, médicos y científicos en alcanzar un mejor conocimiento de la Naturaleza. A mediados del setecientos Voltaire introdujo en su obra *El siglo de Luis XIV* un capítulo dedicado a la ciencia, en el que se menciona cómo el público “se asombraba de aprender una química que no buscaba la piedra filosofal, ni el arte de prolongar la vida más allá de los límites naturales; de estudiar una astronomía que no predecía los acontecimientos del mundo, y una medicina independiente de las fases de la Luna”. El mismo Voltaire en su diálogo *Los antiguos y los modernos* de 1765 resalta el descubrimiento de América gracias a la brújula o el barómetro, de forma que los agentes de la civilización habrían sido Newton y Locke. El papel de las artes mecánicas como agente motor del cambio ha sido incorporado en las versiones populares de la historia moderna.

La *imprensa* contribuyó a la causa de la Reforma popularizando la lectura de la Biblia y su interpretación personal. El invento de la *despepitadora del algodón* provocó la falta de rentabilidad de las operaciones manuales y con ello la migración de trabajadores agrícolas negros desde los campos del sur a las ciudades del norte, produciendo una convulsión en la utilización de los esclavos africanos que fue ingrediente fundamental de la Guerra de Secesión americana. Posteriormente el *automóvil* permitiría la creación de zonas residenciales alejadas de los lugares de trabajo, la píldora anticonceptiva provocaría una revolución sexual, y el ordenador, Internet o el teléfono móvil obligarían a reconfigurar las actividades cotidianas para adecuarlas a las extraordinarias capacidades de las nuevas técnicas.

Como ocurrió con la primera revolución tecnológica protagonizada por la máquina de vapor, la *revolución política* y el *idealismo social* se entrecruzan en la historia del pensamiento del siglo XIX, dando lugar a nuevas tendencias intelectuales que las aceptan o rechazan total o parcialmente. Para ello se redefinen o se acuñan nuevas voces a través de las que se perciben los cambios de las relaciones sociales: industria y democracia; proletariado, masas y utilidad; capitalismo, crisis y progreso; investigación y desarrollo; tecnología, innovación y calidad de vida; etc. Todo ello contribuye a diseñar el panorama de las relaciones sociales y de la sociología de la ciencia en los últimos siglos.

En las edades moderna y contemporánea el saber se libera de actitudes metafísicas frente a las realidades naturales, emergiendo una ciencia empírica en la que abundan los cambios bruscos y radicales del orden establecido, como los debidos a Copérnico, Galileo, Newton, Darwin, Mendel,



Real Academia de Ciencias Morales y Políticas aprobada por Real Decreto de 30 de septiembre de 1857.

Einstein o Watson y Crick, que servirán para apellidar las correspondientes *revoluciones*, utilizando una metáfora política. Estas discontinuidades de la ciencia han impactado fuertemente sobre los cambios tecnológicos y sobre la cultura de las sociedades modernas. En el seno de la cultura contemporánea, la ciencia es un paradigma del saber que va ganando terreno a lo desconocido, sigue acumulando datos y teorías, y engarza con los cambios sociales superando de manera crítica muchas doctrinas establecidas.

La teoría electromagnética, la mecánica cuántica, la relatividad especial y la relatividad general, la teoría de la evolución, los mecanismos de la herencia y la estructura del DNA, han tenido consecuencias cualitativas tanto sobre la estructura interna de la ciencia y de la filosofía de la ciencia como sobre fenómenos sociales como la riqueza, el empleo, el liderazgo, la solidaridad, la calidad de vida, etc.

Caminamos hoy por la *tercera revolución tecnológica*, definida por la informática en toda su extensión –comunicación, robótica, sistemas expertos, inteligencia artificial, redes neurales y modelización matemática–, y con las puertas abiertas a la *revolución de la biotecnología*. Los últimos siglos constituyen una *edad de la ciencia* en la que la trilogía *investigación científica, desarrollo tecnológico y cambio social* domina la cultura occidental. Por otro lado la ciencia se va acomodando a las nuevas estructuras sociales, penetra en la sociedad y en el poder, se vincula de forma próxima a los avances tecnológicos y a la economía, ve crecer el número de los que se dedican a ella, e incluso va a utilizar al hombre mismo como objeto de investigación.

El progreso en la ciencia y el progreso en la tecnología no pueden ya disociarse, ni siquiera como cuestión acadé-

mica. Ciencia y tecnología se solapan y entrecruzan: la ciencia conduce a los avances tecnológicos, y la tecnología pide ayuda a la ciencia para la resolución de sus problemas prácticos concretos, a la vez que da lugar a nuevos instrumentos que facilitan los siguientes avances científicos. En algunos campos, como por ejemplo la aerodinámica, es muy leve la distinción entre ciencia y tecnología; también hay un solapamiento sustancial en campos como la farmacología.

Las aplicaciones siguen rápidamente a los descubrimientos científicos: así ha sucedido en las últimas décadas con las impresionantes aplicaciones de los láseres, la *catálisis homogénea*, los métodos del *DNA-recombinante*, los *radioinmunoensayos clínicos*, las *fibras ópticas*, etc. Y estos mismos avances tecnológicos son a su vez instrumentos del propio avance científico.

Década tras década se ha acelerado el ritmo del progreso tecnológico iniciado por los ferrocarriles, los barcos de vapor, las máquinas-herramienta, la electricidad, las estructuras de hierro y acero, etc. Desde mediados del siglo XIX los grandes avances del conocimiento científico básico dieron lugar a la llegada sucesiva de la tecnología química, eléctrica, aeronáutica y espacial, nuclear, electrónica y biológica. En el siglo XX especialmente la ciencia se ha convertido en una condición previa indispensable para la existencia de una tecnología eficaz.

No menos importante es que la tecnología proporcione con frecuencia un valor añadido a muchas cosas que de otra manera serían de escaso valor tangible. Así, en los nuevos contextos tecnológicos algunos biotopos marinos o atolones deshabitados han adquirido valor comercial o militar; los genes son objeto de patentes o licencias industriales; la

sangre, el plasma, el semen, los óvulos y los órganos se venden, a la par que se alquilan los úteros. A los clásicos factores de producción –suelo, trabajo y capital– se han añadido las posibilidades de acceso a la maricultura, la minería submarina, los casquetes polares, los corredores espaciales, las órbitas geoestacionarias y las frecuencias del espectro de ondas de radio. Las habilidades humanas se complementan con robots, programas de computación o mutantes bacterianos de producción.

La transferencia de tecnología se ha convertido en un factor de extraordinaria importancia en la política económica de las naciones, a la vez que los sistemas de I+D son ingredientes de planificación estratégica para conseguir objetivos nacionales o corporativos, y se embeben en los sistemas sociales. Como ejemplo de esta incrustación social de la tecnología, la revolución verde en Asia implicó no solamente un aumento extraordinario de la producción de arroz, sino una constelación de cambios en fertilización, regadíos, control de plagas y recolección. La producción y uso de las fuentes de energía unen a sus aspectos científicos una serie de complicaciones económicas y políticas que exigen una elección y control social. Estos ejemplos ponen de manifiesto, como escribió Marx en *La ideología alemana*, que “un determinado modo de producción o escenario industrial siempre va unido a otro modo de cooperación o escenario social”, porque al cambiar el modo de producción se cambia la forma de vivir, y de paso todas las relaciones sociales.

Hasta hace dos o tres cuartos de siglo el progreso de la ciencia había venido marcando sus propios objetivos. Pero desde entonces las apetencias generalizadas de una sociedad de consumo, de bienestar material e intelectual, dirigen las

estrategias científicas y técnicas de las naciones, las instituciones y las empresas. El hombre y la sociedad están embarcados en un proceso imparable e irreversible pero que puede ser controlado seleccionando, orientando y encauzando el progreso científico hacia un mejor rendimiento social de sus consecuencias. Este progreso integral, el *desarrollo*, entraña riesgos inevitables que hay que valorar cuidadosamente y tratar de atenuar al máximo, junto con otros riesgos que pueden salvarse mediante normas sociales y de gobierno.

De vez en cuando disminuye el entusiasmo por la ciencia y se suscitan inquietudes y desconfianzas lógicas, como por ejemplo ante los posibles asaltos a la ética social por parte de las técnicas informáticas y de la comunicación, o las manipulaciones génicas. Estos peligros y desconfianzas exigen por parte de la sociedad una mayor reflexión que las épocas de complacencia y éxito. Pero como asegura el historiador francés Pierre Thuillier "... la ciencia es una empresa que engrandece al hombre por su racionalidad y su acción liberadora. Si por algún motivo entrara en declive sería una gran catástrofe". Más aún, Frederick Reines, premio Nobel de Física 1958 por el descubrimiento (con Clyde Cowan, muerto antes de la concesión del premio) del neutrino en 1956, que junto con otros detectó la emisión de neutrinos en la supernova SN1987A, y barítono de la orquesta sinfónica de Cleveland, declaró poco antes de morir en 1998: "La ciencia es un intento de comprender mejor la naturaleza de una manera coherente, lógica, concisa y bella. Hay que estar dispuesto a intentarlo todo, a perderlo todo con tal de alcanzarla".

El cientifismo es una confianza y un ambiente; es la impregnación por la ciencia de hechos familiares, su total vinculación a los problemas económicos, sociales y cultu-

rales. La nueva visión del pensamiento científico echa sus raíces en la tradición intelectual de la ciencia, a la vez que se difunde y embebe en la trama de la sociedad y tiene en cuenta los costes sociales. La primera revolución industrial comenzó cuando las máquinas comenzaron a sustituir el trabajo del hombre, produciendo un desplazamiento progresivo desde la producción hacia el trabajo intelectual. El proceso actual de mecanización y automatización ha influido en el incremento de la población, los cambios en las condiciones y modos de trabajo, la transformación de la propiedad, los problemas de la urbanización y la medicalización de la vida, etc., fenómenos todos con profundas repercusiones sobre el carácter de la sociedad.

Como resumen podemos traer a colación los principios en los que Isaiah Berlin basa su obra *El fuste torcido de la humanidad*, dejando al descubierto los supuestos básicos compartidos durante milenios por el pensamiento utópico en la cultura occidental, y que son los postulados ideológicos del cientificismo: “la ciencia como cuerpo de conocimiento fidedigno que avanza inexorablemente hacia la verdad, una verdad que, a través de la tecnología, nos proveerá de la realización material de los ideales ilustrados”. Esto se funda en la creencia de que la aplicación correcta del método científico ha de conducir al logro de soluciones para los problemas planteados, de acuerdo con lo que podríamos llamar la *imagen científica del mundo natural*.

De todos estos comentarios puede apreciarse la importancia de la *actividad técnica como guía social*, y dentro de ella la posición fundamental del apoyo político y financiero institucional, público y privado, a la investigación y el desarrollo. Dentro de esta especie de *guía social*, cualquier

sistema científico-tecnológico más o menos parcial, más o menos perfecto, puede ser tanto una causa como un efecto; puede configurar una sociedad y ser configurado por ella.

Una de las principales características del estado democrático moderno es la eficaz participación de las instituciones y organizaciones de la sociedad civil en el juego político. El estado contribuye a la potenciación externa pero no exclusiva de aquellos sistemas nacionales que, como el sistema de educación, el de salud o el de ciencia y tecnología, necesitan también complementos privados, no reglados, para encauzar objetivos singulares. Entre estos elementos no estatales que deben colaborar en la selección de prioridades temáticas en la investigación científica y técnica podemos citar las Fundaciones, los museos, las exposiciones, y las organizaciones dedicadas a fines específicos como la detección y estímulo de la precocidad científica en los jóvenes, la divulgación y promoción de la cultura científica, o la formación continuada o especializada.

Los avances de la medicina y la biología nos han acostumbrado a incesantes progresos. Para limitarnos al campo de la visión en el que nuestro premio Nobel Santiago Ramón y Cajal fué pionero, baste citar hoy los *trasplantes de retina*, el estudio del *envejecimiento neuronal* y la *terapia génica*, las *cataratas* y el *estrés oxidativo*, la *neuroanatomía de la corteza* y los *déficit visuales*, la regulación de las *células fotorreceptoras por calcio*, las *proteínas ligantes de calcio* en la transducción de señales, la estructura y la función de las *cristalinas* y su relación con las proteínas de estrés, las *retinas artificiales*, las *neuronas electrónicas*, los *componentes optoelectrónicos biológicos*, y los *sistemas alternativos de acceso a la información*. Se trata de un ejemplo, ligado a nuestra mejor histo-

ria, de las repercusiones sociales de los resultados científicos y tecnológicos.

Lo mismo puede decirse de la medicina en general con sus recientes avances: la *terapia génica* como nueva forma de medicina, expandida ahora a las enfermedades adquiridas como cáncer, sida y trastornos neurodegenerativos tipo Parkinson y Alzheimer; la *secuenciación del DNA genómico*, incluido el humano; la *amplificación del DNA*; la potencial eficacia de las terapéuticas basadas en la *manipulación de embriones* fecundados *in vitro*; los imprevisibles resultados de las *especies transgénicas*, vegetales y animales, como sistemas de producción de materiales humanos; las grandes perspectivas de la manipulación de los *vectores virales*, las *vacunas-DNA* y la acción inhibidora de los *polinucleótidos antisentido*; el estudio de los *sistemas complejos*; los *biomateriales*; etc.

Las repercusiones sociales de las aportaciones científicas han llevado a Stewart Brand a afirmar: “La ciencia es lo único noticiable. Cuando uno ojea un periódico o una revista, todos los contenidos de interés humano son el mismo ‘él-dijo-ella-dijo’ de siempre, la política y la economía son los mismos lastimosos dramas cíclicos, las modas una patética ilusión de novedad; hasta la tecnología es previsible si uno sabe algo de ciencia. La naturaleza no cambia demasiado; la ciencia sí, y los cambios se acumulan alterando el mundo de manera irreversible”.

Así es la cultura actual basada en el conocimiento científico, fundamental en la estabilidad y desarrollo de una sociedad erigida cada vez más sobre el desarrollo tecnológico. Pocas situaciones sociales tan globales en su extensión y planteamientos como las exigencias que surgen de las actitudes

éticas individuales y sociales ante el alargamiento de la vida, el crecimiento del ocio y la manipulación de la propia evolución biológica, o ante el determinismo molecular de la salud, la enfermedad e incluso de las cualidades del hombre: a su resolución van encaminadas de manera directa o indirecta las políticas nacionales e internacionales de Ciencia y Tecnología.

Si las relaciones macroscópicas entre los ingredientes del *sistema ciencia-tecnología-industria* ofrecen pocas dudas, no sucede lo mismo al profundizar en la estructura fina de las interacciones parciales entre sus componentes, a la que se dedicarán los siguientes párrafos.

En los preludios de la ciencia moderna a finales del siglo XVII tuvo lugar el descubrimiento de la máquina de vapor, comienzo de la nueva era de la mecanización como paradigma de la emergente tecnología, condición precisa de la industrialización y substrato fundamental de la ingeniería. La investigación básica dirigida a la ampliación del conocimiento comienza pronto a distinguirse de la investigación aplicada cuya finalidad es la creación de conocimiento útil para el desarrollo de nuevos productos o procesos.

El conocimiento adquirido a través de la investigación básica y la investigación aplicada, junto con la experiencia práctica, puede utilizarse bajo la forma de *investigación de desarrollo*, para la *innovación* creadora de nuevos productos o procesos, o la mejora de los ya existentes. Pudiera pensarse que la mejor descripción del proceso de innovación fuese un *modelo lineal* del tipo investigación básica-investigación aplicada-desarrollo; sin embargo con gran frecuencia la innovación no procede de tal manera unidireccional, y ofrece más bien una relación compleja e indirecta. Ello obliga a anali-

zar el *proceso de innovación* en su conjunto, como algo que puede originarse en cualquiera de las etapas de la práctica científica, y que combinado con ella origina salud, bienestar y empleo. El proceso de innovación se alimenta de las ideas y el conocimiento básico, y de los recursos económicos y de gestión; de aquí la importancia de fomentar tanto la excelencia científica previa como el clima y los incentivos para que florezca la innovación. La protección de los Gobiernos al proceso de innovación debe pasar por la inversión en ciencia básica y por establecer canales que permitan y faciliten el flujo del conocimiento científico a la sociedad a través de industrias, mercados y empleo —en la salud, los servicios públicos y el ambiente—, junto con favorecer la conexión entre los sectores público y privado.

Como características generales de los avances tecnológicos pueden señalarse los siguientes:

El apoyo en una rica historia previa de ciencia básica, cuyos resultados son amplios, dispersos y utilizables en campos muy diversos.

La combinación de diversos campos en un mismo proceso. Uno de los mejores ejemplos recientes es el de la conjunción de la tecnología de rayos X, las ecuaciones diferenciales y los avances en computación para lograr el magnífico desarrollo médico de la tomografía computerizada.

La utilización de la nueva instrumentación para llegar a nuevos descubrimientos básicos.

La innovación no es un fenómeno exclusivo de la economía moderna. Aunque sea una actividad esencial a la dinámica industrial y al desarrollo de las naciones actuales, también es fruto del aprendizaje y de la investigación en general. La innovación contribuye a la organización interna

y a las realizaciones de las empresas, a la vez que las integra con universidades y centros de investigación. Por su parte la investigación básica participa en la generación de beneficios económicos a través del aumento de la información, la creación de nuevas profesiones, la aplicación a nuevos campos de conocimiento, el desarrollo de nuevos métodos y la resolución de problemas tecnológicos. Estos aspectos se ampliarán en los capítulos siguientes.

Hay que insistir en que la ciencia trata del conocimiento, mientras que la tecnología versa sobre la forma de aplicarlo; esta distinción es quizás más clara que la que pueda establecerse entre investigación básica e investigación aplicada o entre investigación aplicada y desarrollo. La investigación básica es la actividad que conduce a avances y descubrimientos en el conocimiento fundamental, motivada tanto por la simple curiosidad como por el alcance social de sus aplicaciones. Evaluar la ciencia con la simple medida de su importancia para la innovación tecnológica da una pobre perspectiva de su papel en la sociedad moderna. Así figura en un informe de la Comisión Europea (“The globalising learning economy: implications for innovation policy”, European Communities 1999) que afirma: “Science has become an integrated part of modern culture, and the insight it gives into the laws of nature should be seen as a constituent element of a developed and civilised society. It also represents a critical reflection on society and the way we interact with nature, which may be said to be part of a modern democracy. In this sense science may be regarded as a kind of basic commodity in any highly developed society. So, even if scientific endeavour gave no economic benefits at all it

would still be worth continuing to fund a fair amount for cultural and political reasons”.

Existen numerosos ejemplos de la dificultad de anticipar las ramificaciones prácticas de la investigación básica, algunos de los cuales irán apareciendo en varias partes de esta exposición. La investigación básica tiene como objetivo desarrollar una comprensión más profunda de los fenómenos naturales, sobre la que edificar el conocimiento ulterior con independencia en principio de sus aplicaciones concretas. Pero de esta simple curiosidad como eje de la investigación básica se han derivado increíbles avances tecnológicos como pueden ser los máseres y láseres, la resonancia magnética nuclear, la determinación de la estructura macromolecular y los procedimientos biotecnológicos, por ejemplo el del DNA-recombinante y la reacción en cadena de la polimerasa (PCR).

Un simple análisis retrospectivo evidencia el papel fundamental de la investigación básica, tanto en el desarrollo de innovaciones tecnológicas como en su repercusión académica, económica y social. El conocimiento básico de nuevos mecanismos biológicos en el metabolismo, la defensa inmunológica, la replicación viral, la variada y compleja transducción de señales, el ciclo celular, la apoptosis, la angiogénesis, etc. han dado lugar a la identificación de numerosos blancos de acción para el diseño de nuevos medicamentos. Los láseres tienen una enorme herencia de investigación básica, desde la teoría de las *emisiones estimuladas* de Einstein en 1917 a los estudios que llevaron a la construcción en 1960 del primer láser en los laboratorios Bell; su gama de aplicaciones incluye las telecomunicaciones, la cirugía, las herramientas de precisión, e influye incluso en la vida diaria en la mayoría de los hogares de las naciones indus-

trializadas (lectores de CD y DVD). Los *semiconductores*, descubiertos en 1886 por el químico alemán Clemens Winkler, fueron una curiosidad de laboratorio hasta su aplicación en 1948 a los *transistores* –desarrollados en los laboratorios Bell por los físicos americanos Walter Brattain, John Bardeen y William Shocley–; al sustituir a las válvulas de vacío los transistores revolucionaron la electrónica llegando a estar presentes en todos los dispositivos eléctricos imaginables –instrumentos de diagnóstico, radio, televisión, teléfono, ayudas a la navegación aérea, robots, etc.–; posteriormente los transistores han sido a su vez reemplazados por los circuitos integrados y los microprocesadores. La demostración en 1986 por los investigadores de IBM Georg Bednorz y Alex Müller de la *superconductividad* a altas temperaturas ha sido el comienzo de una serie de trabajos académicos con importantes aplicaciones industriales en ciernes, desde la transmisión eficiente de energía a la levitación de trenes. Las contribuciones matemáticas del físico Cormack hicieron posible la revolución que ha supuesto en medicina la *tomografía computarizada* (CT) de rayos X, aplicación que también se ha extendido a la detección de defectos de fatiga en materiales y de microcircuitos electrónicos. La *resonancia magnética nuclear* descrita en 1946 por Felix Bloch de la Universidad de Stanford y Edward Purcell de la Universidad de Harvard, se aplicó inicialmente a la física y a la química orgánica; como en el caso de la CT de rayos X, el empleo de potentes herramientas matemáticas ha permitido reconstruir una imagen (MRI) que discrimina con precisión entre los diferentes tipos de tejidos y entre los tejidos sanos y los patológicos, logrando hoy la localización y estudio en tiempo real de ciertas *funciones* (fMRI), como las cere-

brales y vasculares, e incluso la localización detallada en el cerebro de diversas *funciones cognitivas*.⁶ Las aplicaciones industriales y militares iniciales de los *ultrasonidos* condujeron al desarrollo del SONAR durante la II Guerra Mundial; en la década de los 50 la cooperación de ingenieros y clínicos permitió el desarrollo de *técnicas ultrasónicas diagnósticas* en condiciones normales y patológicas, cuyo especial valor en ginecología y obstetricia fue rápidamente reconocido, y que constituyen en la actualidad una prueba rutinaria en los controles obstétricos.

Los desarrollos tecnológicos en el terreno de la Biología ofrecen peculiaridades singulares, dignas de ser tenidas en cuenta en la formación de las nuevas generaciones de científicos. Deberán planificarse nuevos centros interdisciplinares no tradicionales, con una estrecha relación entre biólogos, matemáticos, ingenieros, físicos y especialistas en computación. Los métodos del DNA-recombinante, base de prácticamente toda la industria biotecnológica, han derivado de estudios acerca de los *mecanismos bacterianos de defensa frente a los fagos*, la *replicación del DNA* y el *ciclo biológico de los retrovirus*. La técnica de la *reacción en cadena de la polimerasa* tiene hoy multitud de usos, desde investigaciones arqueológicas y evolutivas impensables hasta hace poco, a nuevas técnicas forenses y a multitud de aplicaciones genéticas y clínicas. Su diseñador Kary Mullis, técnico de la compañía "Cetus Corporation", se dedicaba en la década de los 80 a mejorar la secuenciación de DNA cuando casualmente imaginó el método que ha llevado a estas aplicaciones.

Existen muchos otros ejemplos de la utilización de la investigación básica en aplicaciones tecnológicas y creación

de empresas industriales, como la secuenciación de DNA, la síntesis de oligonucleótidos, la obtención y uso de anticuerpos monoclonales, la clasificación de células, la espectrometría de masas biológica, y la obtención de especies transgénicas.

A veces parece como si los únicos protagonistas de las nuevas revoluciones científicas y sociales de nuestra época fueran los biólogos con sus genomas y proteomas y los físicos con sus agujeros negros y sus modelos del universo, sus partículas elementales, y su información y computación cuánticas. Con el sistema periódico y los diversos tipos de compuestos y reacciones firmemente establecidos se tiene la impresión de que la Química es incapaz de exhibir nuevas metas y nuevas fronteras. Nada más lejos de la realidad: Stephen Lippard, director del departamento de Química del Massachusetts Institute of Technology, ha compilado recientemente una lista de nuevas fronteras de la Química en sus aspectos básicos e industriales, insistiendo en que su lenguaje subyace en los avances en múltiples áreas de conocimiento, como la Medicina, la Biología, la Agricultura, la Ingeniería y las modernas Biotecnología y Nanotecnología, ayudando por ejemplo a secuenciar el genoma humano. La investigación en química básica hará avanzar otros campos del conocimiento y ayudará a evolucionar el lenguaje de la ciencia.

Entre los nuevos temas de investigación básica en las fronteras de la Química se han señalado: 1. La creación de nuevas entidades químicas cuyos componentes sirvan como *receptores* para ligandos determinados. 2. La creación de moléculas autorreplicantes y reacciones químicas autocorregibles: se incluyen en esta categoría las reacciones catalíticas en las que se corrigen los errores detectados. 3. El control de la este-

reoquímica de los catalizadores heterogéneos. 4. La síntesis automática en paralelo o *química combinatoria*, basada en la explotación de los métodos de prueba y error para mejorar de forma evolutiva las transformaciones químicas. 5. La comprensión de los movimientos internos de las moléculas de forma que un pulso de energía electromagnética aplicado en un instante adecuado pueda disociar específicamente un enlace determinado de la molécula. 6. La comprensión de la estructura y la dinámica de las interacciones moleculares de forma que puedan predecirse y controlarse sus propiedades. 7. La búsqueda de procedimientos para convertir sustancias naturales abundantes en pequeños bloques moleculares utilizables químicamente, y viceversa. 8. El desarrollo de reacciones químicas sin disolventes. 9. La creación de productos químicos y procesos que utilicen fuentes renovables y no requieran la generación o empleo de sustancias peligrosas. 10. El diseño de moléculas autoensamblables en estructuras supramoleculares cuyas propiedades mejoren las de las moléculas existentes. 11. La obtención de cristales de cualquier tipo de moléculas y la incorporación de dopantes que mejoren sus propiedades físicas y químicas. 12. El progreso de la química de las especies en forma *de caja* mediante la liberación a voluntad de las sustancias atrapadas por la acción de sustancias químicas o campos eléctricos o magnéticos. 13. El planteamiento de nuevas teorías acerca de las reacciones y los enlaces químicos, y su comprobación en sistemas químicos reales.

Finalmente, hay que mencionar la importante participación de los *consumidores* –la sociedad, por tanto– en el *proceso de innovación*. El consumidor no es un agente final del proceso tan pasivo como pudiera creerse. Como el caso

del teléfono y más recientemente la telefonía móvil o Internet muestran, son finalmente los consumidores los que deciden el éxito o el fracaso de los productos innovados. En el terreno de la política europea, el mercado común de 300 millones de consumidores ha puesto a las compañías de Europa en pie de relativa igualdad con las de Estados Unidos. Relativa solamente, dada la necesidad de una mayor desregulación de los mercados europeos; por ejemplo en el campo de los productos farmacéuticos hay un retraso de 1 a 4 años entre el lanzamiento de un nuevo medicamento en Estados Unidos y su comercialización en Europa.

VIII. POSICIÓN CENTRAL DE LA INVESTIGACIÓN BÁSICA. SU REPERCUSIÓN ECONÓMICA

1. Introducción

INVESTIGACIÓN *básica* es tanto la *orientada por la curiosidad*, sin otro objetivo que la adquisición de nuevo conocimiento, como la *estratégica* que se realiza buscando aplicaciones, aunque se desconozca la naturaleza precisa que acabará teniendo el resultado final. La investigación básica constituye la vía de acceso más importante a las *nuevas tecnologías*, que a su vez son capaces de revertir su impacto sobre ella.

Las principales diferencias entre investigación básica y aplicada son la *perspectiva de aplicabilidad*, el *tiempo previsible para alcanzar beneficios* y la *probabilidad de acierto*. La investigación básica –que no debe confundirse con aislada de la realidad– es sin duda la más útil y con mayores recompensas a largo plazo, pero también la que implica una apuesta más fuerte y una menor probabilidad de alcanzar resultados. La investigación aplicada también busca nuevos conocimientos, pero con un objetivo práctico en sus planteamientos. Finalmente el *desarrollo tecnológico* utiliza conocimientos previos con el fin de obtener nuevos productos, equipos, procesos o servicios para mejorar los ya existentes. Al evaluar

los parámetros económicos o sociales implicados en cada una de estas clases de investigación, habrá que ser consciente de que su solapamiento imposibilita el considerarlas por separado.

Merece especial atención la relación entre la investigación básica financiada con fondos públicos –en universidades, hospitales y otros organismos– y sus consecuencias económicas en la *productividad*, en la *I+D industrial*, y en el impacto sobre *industrias específicas*. Los beneficios económicos de la investigación básica pueden considerarse desde dos puntos de vista: en cuanto *bien público* la investigación básica suministra información utilizable por cualquiera –aunque con frecuencia no fácilmente– en cualquier desarrollo o aplicación; por otro lado los nuevos conocimientos adquiridos por individuos y organizaciones les permiten una contribución más fructífera a la comunidad nacional e internacional. Los beneficios económicos han de considerarse en una forma amplia: aunque no se incluyan directamente los beneficios sociales o ambientales difíciles de cuantificar, sí deben considerarse las repercusiones económicas del aumento en la *calidad de vida*, como son la prolongación de la edad laboral, la disminución de la pérdida de días de trabajo, la disminución de las estancias hospitalarias, etc. Estos motivos por sí solos justificarían la acción pública a favor de la investigación básica.

No existe un criterio sistemático para cuantificar la relación entre apoyo público a la investigación básica y beneficios económicos de la misma. En la mayoría de los países industrializados de Occidente se da una excelente protección de la investigación básica como motor fundamental de la innovación tecnológica, la competitividad industrial y el desarrollo

económico y social. La cuantificación de esta protección depende de la percepción pública de la importancia del papel de la investigación básica en relación con el desarrollo y la explotación de las nuevas tecnologías, pero también intervienen las cambiantes ideologías de los gobiernos y la influencia de los aspectos internacionales. La protección pública de la investigación básica responde actualmente a una especie de *compromiso social*, asentado sobre la base de las grandes expectativas de beneficios económicos y sociales.

En la actualidad algunos sectores políticos están promoviendo el desplazamiento de la actividad investigadora hacia el desarrollo rápido de productos tecnológicos. La globalización en las tecnologías de la información y la comunicación hacen que la comercialización anticipada de un determinado producto tenga gran importancia en su éxito económico. Pero como ha señalado Hubert Markl, Presidente de la Sociedad Max Planck, “Anyone who neglects basic research today is behaving as if he already knows everything that is worth knowing. Such people are usually called narrow-minded or conceited, or may be both”. Y en otro lugar añade: “The future belongs to those institutions of teaching and research that appear attractive to talented people from all over the world because they give them more or less equally good opportunities for the development of their abilities and that also facilitate their switching from one institution to another across national frontiers”.

Las universidades tienen que estar a la vanguardia del esfuerzo para construir la *economía del conocimiento*. Solamente cumplirán su misión si saben conjugar la excelencia docente e investigadora con la suficiente imaginación comercial para transformar la ciencia en productos y servicios de



Real Academia de la Historia aprobada por Real Orden el 18 de Abril de 1738.

uso general, al amparo de una infraestructura y unos medios adecuados.

2. Beneficios económicos de la investigación básica

LOS beneficios económicos de la investigación básica financiada públicamente pueden considerarse a través de dos tipos de enfoques. El primero se basa en el concepto de *bienes públicos*, capaces de crear nuevas fuentes de información permanente, económicamente útil y utilizable por el resto de la sociedad para sus propios fines. El segundo subraya la participación individual, independientemente o como miembro de una colectividad, en la formación y aprendizaje, la definición de metodologías, y la creación de redes de expertos. El apoyo público a la investigación básica deberá tener en cuenta ambos aspectos.

Los beneficios económicos de la investigación básica incluyen:

- El ser fuente de nueva información útil.
- La creación de nueva instrumentación y métodos.
- La creación de redes de expertos y de información accesibles.
- La movilidad de los investigadores portadores de conocimientos necesarios.
- La formación de personal para la resolución de cuestiones tecnológicas complejas.
- La creación de compañías mixtas.

La importancia relativa de cada uno de estos aspectos depende en gran medida del campo científico concreto, sin

que pueda establecerse un modelo único dada su gran heterogeneidad. Pero todos están conectados y se apoyan mutuamente; una correcta formación graduada ha de promover el desarrollo profesional en su conjunto, a la vez que facilitar la transferencia de nueva información hacia la industria.

El valor económico de la *investigación básica* no reside solo en la creación de conocimientos útiles, incorporables directamente en nuevos productos o procesos, sino también en la formación de investigadores con capacidad para resolver problemas tecnológicos complejos. A esta formación contribuye el fomento de las habilidades investigadoras, la familiarización con métodos, técnicas e instrumentación, y la participación en las redes nacionales e internacionales de investigación. La siguiente cita de Vannevar Bush (*Science: The Endless Frontier*, National Science Foundation, Washington, DC. 1960) refleja este hecho: “... the responsibility for the creation of new scientific knowledge –and for most of its applications– rests on that small body of men and women who understand the fundamental laws of nature and are skilled in the techniques of scientific research”; y en otro lugar: “Basic research creates the fund from which the practical applications of knowledge must be drawn. New products and new processes do not appear full-grown. They are founded on new principles and new conceptions, which in turn are painstakingly developed by research in the purest realms of science”.

Un énfasis excesivo en la importancia económica de la nueva información ignora las importantes contribuciones indirectas mencionadas, aunque sean de más difícil medida. Por ejemplo, la política de la ciencia de los Estados Unidos del último medio siglo se ha conformado en gran medida

por la experiencia del papel decisivo de la ciencia en la II Guerra Mundial. Vannevar Bush resumió en 1945 los fundamentos de esta idea en los tres principios siguientes: 1. La ciencia contribuye a servir las necesidades nacionales más críticas. 2. La financiación pública de la investigación es una función principal de la administración. 3. Los beneficios de la ciencia se extienden a través de los mecanismos naturales del mercado.

Estas ideas de *política de la ciencia* se vieron sustentadas por los indudables éxitos de los años siguientes, desde la salud a la defensa. La gran expansión de la financiación pública federal de la investigación y el desarrollo coincidió con una productividad y una creatividad extraordinarias. Pocos ejemplos de la contribución de la ciencia a la economía americana de la posguerra como la que supusieron cada una de las etapas del desarrollo de la microelectrónica, que desde hace años forma parte de la vida diaria de la mayoría de los ciudadanos del mundo desarrollado.

Francis Narin –director de la compañía de patentes “CHI Research”– y Baruch Lev –profesor de contabilidad de la New York University– han desarrollado el criterio de la *actividad de patentes* como dato predictivo y cuantificable de la repercusión en el campo bursátil. Narin ha llevado a cabo durante 20 años un estudio de alrededor de 1 millón de patentes, y ha definido con gran detalle el perfil tecnológico de las compañías que patentan sus invenciones, demostrando que la dedicación corporativa a I+D depende crecientemente de la investigación básica académica, manifestada en el número cada vez mayor de citas a trabajos fundamentales en las solicitudes de patentes. Los mismos autores han estudiado la repercusión de las patentes de 398 compañías

–químicas, electrónicas, farmacéuticas y de equipos industriales y de transporte– sobre la magnitud de los retornos económicos y los valores de mercado de las compañías, clasificando el uso de las patentes según cuatro criterios: por volumen, por la duración del ciclo tecnológico, por su impacto y por su conexión científica (medida ésta por el número de referencias científicas). Los resultados muestran la existencia de cuatro tipos de relaciones: *bajo* impacto científico–*bajo* impacto de patente; *bajo* impacto científico–*alto* impacto de patente; *alto* impacto científico–*bajo* impacto de patente; y *alto* impacto científico–*alto* impacto de patente. Estas cuatro categorías se compararon con los valores de la relación M/B (valor de mercado/valor contable); los autores encontraron que los valores extremos correspondían, de un lado, a las compañías químicas del tipo *bajo–bajo* con una relación M/B de 2,099, y, de otro, a las compañías del tipo *alto–alto* con una relación M/B de 2,627. Los autores concluyeron que a la vista de la importancia de la investigación básica en el éxito comercial de las compañías en las economías tecnológicamente intensivas, los gobiernos deberían diseñar nuevas series de indicadores de las realizaciones industriales, añadiendo que los simples gastos en I+D no lo dicen todo a propósito del capital intelectual de las empresas.

3. Evaluación económica de la investigación básica

SE han descrito tres aproximaciones principales a la evaluación de los beneficios económicos de la investigación básica: en primer lugar los *estudios econométricos* y la medida de los retornos; en segundo la consideración de *casos parti-*

culares, con el análisis de las innovaciones resultantes de ciertas descubrimientos fundamentales; y en tercer lugar una *visión general* basada en la impresión personal de los gestores de la I+D industrial.

La aproximación econométrica ha resultado adecuada para obtener una visión de los efectos globales de la investigación científica nacional, y descansa en el análisis estadístico de grandes bancos de datos. Este procedimiento presenta sin embargo numerosas dificultades empíricas para medir la contribución del conocimiento científico al progreso económico, y en particular para evaluar cómo la información derivada de la ciencia básica repercute sobre cada tipo de innovación particular. A ello hay que añadir que la investigación básica no suele ir dirigida de forma directa hacia objetivos aplicados concretos, y por ello su contribución inmediata es más pequeña que la de la investigación aplicada, el desarrollo, la producción y la comercialización. Resulta difícil así establecer una relación directa entre el apoyo económico a la investigación básica y su contribución al desarrollo de la tecnología. Esta falta de correlación directa entre los niveles nacionales del gasto en investigación básica y sus correspondientes realizaciones económicas —por ejemplo, los aumentos en la exportación y en la productividad— se contraponen con las buenas correlaciones existentes entre la economía y las actividades de I+D empresariales. En cambio es importante la correlación entre los niveles nacionales de investigación básica y los de I+D empresariales.

Muchos estudios econométricos han tratado de evaluar el impacto de la investigación sobre la productividad y otros parámetros económicos, sobre la base de resultados sociales y políticos; prácticamente todos ellos muestran retornos

positivos, incluso relativamente elevados, de los fondos utilizados en la promoción de la ciencia básica. Uno de ellos concluye: “The econometric literature on localisation effects and spill-overs suggests that advanced industrial countries need their own, well-developed basic research capabilities in order to sustain technological development. Personal links and mobility are vital in integrating basic research with technological development”.

Entre los problemas que presenta tal tipo de estimación de los retornos económicos se encuentran el carácter complementario de los gastos en investigación básica con las inversiones en general muy superiores en desarrollo, producción y comercialización. Otra dificultad proviene de la naturaleza compleja e indirecta de las aportaciones de la investigación básica a la tecnología, cuyo balance varía según los campos científicos y las tecnologías industriales.

En resumen: las limitaciones de los métodos econométricos para una correcta estimación de los beneficios de la investigación básica hacen desaconsejable su utilización en la toma de decisiones sobre la subvención pública de esta investigación.

Los otros dos métodos de evaluación de los beneficios económicos de la investigación básica permiten llevar a cabo una estimación más correcta de la contribución de la investigación básica a la obtención de productos y procesos. El examen de las relaciones entre ciencia y tecnología suministra un panorama del papel variado y frecuentemente indirecto y sutil de la investigación básica en el proceso global de innovación. El estudio de sectores o tecnologías particulares permite la consideración detallada de gran número de casos particulares y de la evolución histórica de las relaciones de

la ciencia con sus aplicaciones, que proporcionan valiosos datos para evaluar los beneficios de la investigación básica subvencionada públicamente. Los estudios TRACES de la National Science Foundation en los Estados Unidos durante las décadas de los 60 y 70, y el estudio europeo PACE, han sido llevados a cabo bajo estas perspectivas.

Tras numerosos estudios se ha concluido que existen formas muy variadas de beneficio económico derivado de la investigación básica, entre los que el nuevo conocimiento útil en sí no es necesariamente el principal. Otros aspectos deben tenerse en cuenta en la evaluación cuantitativa de sus beneficios: la creación de nueva instrumentación y métodos, y su *transferencia* a la industria; la formación de investigadores con nuevas capacidades para resolver problemas complejos de naturaleza científica y técnica; las posibilidades de acceso a las fuentes y redes nacionales e internacionales, etc. Las conclusiones fundamentales son que la investigación básica produce beneficios reales y sustanciales, tiene una gran variedad de consecuencias, y que su rentabilidad depende de una organización eficiente del sistema nacional de investigación.

Pese a ello la política de la ciencia de los países industrializados cede con frecuencia a presiones para reducir la subvención pública de la investigación básica en favor de trabajos más aplicados. En contra de lo que se afirma con frecuencia estas presiones no se deben a la falta de percepción social de las ventajas de los nuevos conocimientos, sino que proceden de “entendidillos” que cuestionan la rentabilidad económica del gasto público en investigación básica.

Aunque sea difícil anticipar las futuras aplicaciones prácticas de la investigación básica actual, la historia de la cien-

cia nos muestra la variedad de aplicaciones de los descubrimientos fundamentales y la rapidez con la que los han seguido. Recordemos algunos ejemplos.

El desarrollo de la energía nuclear se basa en el descubrimiento en 1938 de la fisión nuclear por Otto Hahn, Premio Nobel de Química en 1944, y en la construcción del primer reactor nuclear en 1942, bajo la dirección del físico italiano emigrado a los Estados Unidos Enrico Fermi. La gran concentración de científicos en el *proyecto Manhattan* condujo pronto a la bomba atómica, utilizada sobre Japón en 1945. La producción de energía de fisión para usos pacíficos comenzó en los 50s.

La tecnología de los semiconductores está basada en la invención del transistor a finales de la década de los 40s por los americanos Walter Brattain, John Bardeen y Maurice Shockley, Premios Nobel de Física 1956. La miniaturización electrónica y la revolución de los computadores se basan en esta tecnología.

En base a trabajos de Maurice Wilkins y Rosalind Franklin, y por motivos de estricta curiosidad científica, Francis Crick y James Watson descifraron en 1953 la *estructura en doble hélice del DNA*, por lo que recibieron el Premio Nobel de Medicina 1962. Las aplicaciones clínicas y terapéuticas de la *alteración del material genético* y las posibilidades de su sustitución son hoy de la mayor actualidad.

Pero incluso admitiendo la dificultad para estimar los beneficios económicos nacionales de la inversión en investigación básica, parece probado que países con récord en esta investigación como el Reino Unido se han desarrollado tecnológica y económicamente en menor medida que otros como Alemania y Japón. Ello plantea la disyuntiva de si el



Real Academia de Ciencias de Suecia.

apoyo público a la investigación básica es un instrumento de promoción del cambio tecnológico, o si por el contrario la relación causal va en sentido opuesto, desde el cambio técnico hacia la investigación fundamental.

Esta disyuntiva entre el conocimiento básico y su aplicación viene ofreciendo en los últimos años un enfrentamiento conceptual entre la política de los Estados Unidos y las de Japón, Singapur, Hong Kong y otras regiones del Pacífico. Japón se cita siempre como ejemplo de país que se ha beneficiado de la investigación básica sin realmente invertir mucho en ella. Desde la década de los 80 Japón ha prestado en cambio una especial atención al desarrollo de productos de gran calidad, basados en aportaciones tecnológicas inventadas y comercializadas inicialmente por los Estados Unidos como la televisión, el vídeo, las pantallas de cristal líquido, la memoria DRAM (Dynamic Random Access Memories), etc. Esta pérdida de mercado por los países que más han invertido en la financiación pública de la investigación básica es uno de los factores que han agudizado la disyuntiva. Otras economías asiáticas del Pacífico, como Singapur –que en menos de una generación ha adquirido el rango de país desarrollado y cuya velocidad de crecimiento económico es en la actualidad tres veces superior a la de los Estados Unidos– y Hong Kong –otra de las economías más agresivas de la región– han alcanzado espectaculares niveles económicos prácticamente sin inversiones en investigación básica – un gasto del orden del 0.03 por ciento del PIB–. Lo que ha llevado a la afirmación asiática de que “la investigación es un lujo que sólo pueden permitirse los países ricos”.

Cabría preguntarse pues si estos ejemplos asiáticos contradicen el papel primario de la investigación básica en la obten-

ción de beneficios técnicos y económicos a largo plazo. Si la única finalidad de la inversión pública en investigación y desarrollo fuera la obtención de productos comerciales, ¿no cabría abandonar a las fuerzas del mercado libre la asignación de fondos?; o en todo caso, ¿no bastaría simplemente con reducir la fiscalidad y dejar a la industria la responsabilidad de la inversión en I+D?

Pues bien: los ejemplos asiáticos no entran en contradicción con la importancia primordial de la investigación básica. En primer lugar porque Japón y los países asiáticos no han renunciado al conocimiento básico, sino que han preferido adquirirlo –por el procedimiento que fuera– a producirlo. En segundo lugar, porque los datos económicos demuestran que la política tecnológica de adquisición y uso de resultados de investigación ajenos por parte de los países asiáticos es menos eficiente que la de Estados Unidos; al doblar Japón su inversión de capital debería haber doblado, al menos, su velocidad de crecimiento económico, lo que no ha sido el caso. En tercer lugar, porque la medida del éxito o fracaso de una política de ciencia y tecnología no puede apreciarse a un plazo excesivamente corto; a modo de ejemplo, en la actualidad la velocidad de crecimiento del Japón ha descendido fuertemente. En cuarto lugar, por la complejidad del retorno social de las inversiones en I+D: algunas de las inversiones en I+D como la investigación básica originan un gran retorno social, aunque las ganancias no reviertan directamente sobre la institución inversora sino que se distribuyan ampliamente en la sociedad. Aparte de la ya citada influencia trascendental del cálculo diferencial de Newton y Leibniz, otros ejemplos pudieran ser la *teoría del campo electromagnético* de Maxwell y la *mecánica cuántica*, desarro-

lladas por amor al conocimiento, pero que mucho después han permitido las comunicaciones inalámbricas y la moderna industria electrónica. Posiblemente ninguno de estos avances fundamentales hubiera encontrado una adecuada inversión privada inicial, al menos sin haber podido adivinar claramente sus futuras aplicaciones. En quinto lugar, porque si el moderno progreso científico está en general imprescindiblemente vinculado al desarrollo de herramientas tecnológicas –la biología moderna sería inconcebible sin las herramientas de la física y la química: resonancia magnética, difracción de rayos X, espectroscopías, microscopía electrónica, electroforesis, cromatografías, tecnologías enzimáticas, reacción en cadena de la polimerasa (PCR), etc.–, algunos desarrollos industriales de hoy se basan en innovaciones inseparables de la investigación fundamental, principalmente en las ciencias de la salud.

Puede recordarse a este respecto el descubrimiento de la *antibiosis* en 1878 por Vuillemin, de los *antibióticos* en pleno siglo XX, y posteriormente, de sus *mecanismos de acción*, gracias a los conocimientos básicos sobre biosíntesis de proteínas y ácidos nucleicos; con lo que el tratamiento médico de las infecciones se vincula íntimamente a los descubrimientos de la ciencia básica. El diseño de nuevos medicamentos –y su desarrollo industrial, por tanto– está en la actualidad profundamente conectado con la investigación básica, e incluso con el nacimiento de nuevos campos del conocimiento como la *proteómica*, la *genómica* y la *bioinformática*. Casos particulares importantes son el *DNA-recombinante*, la *hibridación antisentido*, la *transducción de señales*, la *ingeniería de proteínas*, la utilización de *células madre en la clonación terapéutica* y en la *clonación reproductiva*, y los

nuevos *mecanismos reguladores* –*angiogénesis, apoptosis, etc.*–, la *modificación enzimática* –por ejemplo a través de *telomerasas, caspasas, etc.*– importante en el terreno de las investigaciones frente al cáncer, el envejecimiento, las enfermedades neurodegenerativas y la obtención de proteínas humanas. Todo lo cual ha permitido que el número de los *blancos de acción* de los medicamentos haya pasado de 500 a 10000.

La transformación de las ideas de la ciencia en productos de uso y valor, o lo que es igual, la aplicación de la investigación básica a la innovación tecnológica con la aparición de *nuevas industrias* y el *progreso económico*, necesita ser promocionada, bien por la administración pública con una política de protección económica y fiscal a la promoción del conocimiento, o bien por la comunidad empresarial privada. Y por lo que se refiere al primer caso, ¿qué fondos deberían los gobiernos asignar a la ciencia básica?, ¿con qué criterios debería distribuirse la asignación entre los diferentes campos científicos?

Como resumen de la justificación tradicional de la subvención pública de la ciencia básica hay que señalar los siguientes argumentos:

La investigación básica constituye una fuente excepcional de oportunidades tecnológicas (A.K. Klevorick, R. Levin, R.Nelson y S.Winter, “On the sources and significance of inter-industry differences in technological opportunities”. *Research Policy*, 24, 185-205, 1995).

La investigación básica suministra una gran variedad de nuevas interacciones que aumentan extraordinariamente la diversidad tecnológica (M.Callon, “Is Science a Public Good”, *Science, Technology and Human Values*, 19, 395-424, 1994).

La investigación básica es origen de especiales aptitudes para la explotación y transferencia de nuevos conocimientos, la solución de problemas tecnológicos más o menos complejos a nivel nacional o internacional, y la participación en los ámbitos selectos del poder de decisión científico (K.Pavitt, “What Makes Basic Research Economically Useful?”, *Research Policy*, 20, 109-119, 1991).

4. La experiencia europea

TRAS cuatrocientos años de desarrollo de la ciencia en los campos de la matemática, la física, la química y la biología, Europa encara el siglo XXI fragmentada y llena de Consejos Nacionales de Investigación, fundaciones e industrias nacionales, suplementadas recientemente por sus análogos comunitarios. Durante estos siglos Europa ha sido la sede del progreso del conocimiento fundado en la investigación básica, intelectualmente incalculable pero también económicamente inútil sin sus aplicaciones. En esto radica el dilema de la política pública de la ciencia; la investigación básica ha dado lugar en el pasado a productos de utilidad espectacular, pero la investigación orientada constituye una exigencia de las demandas sociales actuales.

La sinergia creada por la hibridación de ideas entre diferentes campos de investigación básica ha sido una característica fundamental del cultivo de la libertad de pensamiento en un ambiente científico sin trabas. Muchos ejemplos dan fe de este valor de la investigación básica, del que resultan innumerables contrapartidas socioeconómicas. Así, la inves-

tigación de cómo el sistema inmune es capaz de producir tan gran número de diferentes anticuerpos condujo a los inmunólogos a tratar el problema mediante el desarrollo de líneas celulares inmortalizadas –los híbridos mieloma-linfocitos– que produjeran anticuerpos homogéneos frente a un antígeno determinado. En la actualidad, tras muchos años de investigación y desarrollo en diferentes direcciones y campos –de la biología celular y molecular, la genética, la inmunología, la oncología, etc.– los anticuerpos monoclonales son una herramienta indispensable en el diagnóstico y la terapéutica médica, así como en otras numerosas aplicaciones.

Otros ejemplos en los que Europa fue pionera demuestran el valor científico y económico de la investigación básica; así, el descubrimiento de la organización del material genético de las bacterias y de la recombinación genética abrió el camino a desarrollos de importancia incalculable como la producción de proteínas recombinantes. Diversos campos de la biología molecular – por ejemplo la genética, la replicación viral y la transducción de señales biológicas– han dado lugar a variadas aplicaciones en las ciencias de la salud, desde las vacunas y el tratamiento de las enfermedades infecciosas hasta la prevención de las caries dentales.

En el momento actual de armonización administrativa de la Unión Europea existen varios niveles, –regional, nacional y europeo–, en los que se ejerce una política científica que incluye la ciencia básica, con una gran diversidad en las relaciones entre dichos niveles. Pese a la tendencia europea a la descentralización de las acciones públicas, los gobiernos nacionales siguen jugando el papel principal en la financiación de la investigación básica y en el establecimiento de los correspondientes *sistemas nacionales*. En España y en

otros países de la Unión los gobiernos regionales tienen a su cargo el sistema universitario y con ello la posibilidad de acceder a la financiación de la *investigación académica*. Desde mediados de los 80 se dispone de dos programas a nivel europeo: el Programa Marco de la Unión Europea y el Programa Eureka que estimula la cooperación científica entre los diversos países de la Unión. Pero las políticas nacionales y los sistemas nacionales de innovación, con sus peculiaridades y sus grandes diferencias de todo tipo, siguen siendo hasta el momento los elementos centrales de la escena europea. Ello justifica el reciente establecimiento de la idea de *espacio europeo de investigación* (European Research Area, ERA), desarrollada a principios de 2000 por el Comisario Busquin, que se detallará en el capítulo IX.

Aunque la ciencia europea alcance frecuentemente la excelencia en sus descubrimientos, no abunda tanto su utilización por empresas rentables. Resulta rara la existencia de inversores dispuestos a afrontar los riesgos de la comercialización de los nuevos hallazgos. Sería de desear que la financiación por el *capital riesgo* prestara una especial atención a las aplicaciones potencialmente útiles de las nuevas ideas científicas, con su conversión en negocios como en los Estados Unidos de América. También ayuda el que las universidades creen parques científicos que contribuyan a la comercialización de los productos intelectuales de sus departamentos. Estas interacciones de la comunidad científica con la sociedad empresarial están siendo objeto de atención preferente por universidades, sociedades profesionales y organismos de investigación. Desgraciadamente la práctica habitual en los países europeos difiere todavía bastante del modelo americano.

Las características del capital riesgo americano se resumen en los siguientes aspectos: 1. Científicos y empresarios se vinculan al éxito o fracaso del proyecto. Las compañías de capital riesgo han recibido retornos medios anuales del 20 por ciento, e incluso los fondos de pensiones participan en ellas. 2. Suele tratarse de inversiones a largo plazo. La empresa se beneficia de recomendaciones técnicas, colaboración de personal altamente especializado, nuevos tipos de relaciones laborales, consejos económicos, posibilidad de acceso a otras financiaciones, etc. 3. Es mucho más participativo que las demás inversiones de capital, con relaciones más intensas entre el inversor y la compañía. 4. La financiación se puede escalar en una serie de tramos: *seed capital* (25 a 50 mil dólares) imprescindible para evaluar las posibilidades de aplicación; *start-up capital* (50 000 a medio millón de dólares), requerido para el equipamiento de laboratorios y oficinas y para mantener un equipo técnico inicial durante un año; *early-stage development* (alrededor de medio millón de dólares) necesario para tener una expectativa razonable de éxito; y *later stage of development* (un millón de dólares) para que la compañía alcance el estadio final de producción. El riesgo es inversamente proporcional a la cantidad invertida, de forma que el *capital de siembra* es el que exhibe la mayor probabilidad de fracaso. Al finalizar la década de los 90 existían en los Estados Unidos unas 700 firmas de capital riesgo, mientras que en el Reino Unido apenas si llegaban a un centenar, cantidad no muy incrementada con la adición del resto de Europa.

El otro aspecto esencial en la transformación de las ideas y descubrimientos de la ciencia en productos de consumo es el apoyo público al progreso científico y tecnológico,

capaz de afectar a las más diversas áreas, desde las ciencias de la salud, el medio ambiente o la biotecnología, al diseño de semiconductores o a las industrias de la lengua –traducción simultánea, reconocimiento de voz, “minería de datos”, etcétera–.

En relación con el presupuesto del año fiscal 1999, el director del Office of Management and Budget de los Estados Unidos de América Franklin D. Raines requería la ayuda de la comunidad científica para mantener los niveles de I+D, invitando a los científicos a responder a una serie de cuestiones: “How large a scientific enterprise does the United States need?, How can we set priorities in the nation’s R&D enterprise?, How can we measure the success of our nation’s research programs?, How can we strengthen the government-university partnership?, How do we engage the American people in the excitement and wonder of science?”. Todos estos interrogantes podrían plantearse a los responsables de la política y la administración de la ciencia europea, y sus respuestas y comentarios podrían ser del siguiente tipo: “Hemos oído muchas veces argumentaciones retóricas sobre el establecimiento de prioridades... pero si la comunidad científica permanece silenciosa, serán hechas desde fuera de ella... Habrá que conocer no solamente las propuestas de nuevos programas y nuevas áreas, sino cómo serán realizados de la manera más eficiente posible... La comunidad científica tiene que clarificar su mensaje a la sociedad... y si la ciencia no se comunica a los políticos de manera fácilmente comprensible, terminarán por no apoyarla... La comunidad científica tiene que aprender a ser más eficiente en la explicación de su empresa, en cómo establecer sus prioridades y cómo medir su éxito”.

A propósito de la situación de la investigación en Europa pueden destacarse algunos fragmentos del *Rapport biennal sur la science et la technologie en France. Synthèse 1998-2000*, de la Academia de Ciencias de Francia. Bajo el epígrafe de “Una situación preocupante” afirma: “L’Académie des sciences souhaiterait appeler l’attention sur la situation de la recherche fondamentale qui, par certains aspects, notamment au regard des efforts actuellement réalisés dans les pays d’économie comparable aux nôtres, pourrait, en l’absence des mesures nécessaires, devenir préoccupante et avoir des conséquences négatives quant à l’indépendance scientifique et technique de la France et à son image au plan international [...]. Tout d’abord, le budget de la recherche civile française qui avait connu un accroissement sensible il y a deux décennies, a par la suite subi, dans sa progression, des réductions de taux plus ou moins marquées: en effet, le BCRD, qui est une composante des dépenses publiques, ne s’accroît pas, comme il serait souhaitable, au regard de l’évolution rapide des sciences et des progrès technologiques, comme des besoins en instrumentation, et, plus encore, en chercheurs... Ainsi, apparaît-il que lorsque les dépenses publiques connaissent des réductions substantielles de progression au niveau global, la recherche ne figure plus parmi les priorités dans la loi de finances [...]. On se trouve ainsi loin de l’objectif qui avait été de faire passer l’effort de recherche du pays de 2.3 à 2.5% du PIB! On peut déplorer le fait que la recherche ne figure dans les priorités des efforts de l’État, à une période charnière de ce début de millénaire, où cette activité s’avère désormais prépondérante pour que la France maintienne son rang à l’intérieur d’une compétition technologique qui s’avère particulièrement âpre, notamment dans des

secteurs tels que la génomique, les biotechnologies et les technologies de l'information et ces communications. Cette situation est de nature à nourrir les préoccupations d'une communauté académique comme la nôtre, laquelle a précisément la mission, avec les pouvoirs publics, de veiller à ce que le niveau scientifique du pays soit à la mesure de ses ambitions. S'il faut saluer les efforts actuels du gouvernement en faveur de l'éducation et de l'emploi (sans oublier, certes, d'autres secteurs essentiels), il apparaît pour le moins dommage, si non regrettable, que, dans un contexte de nette reprise de la croissance économique nationale, la part du PIB consacrée à la recherche n'ait connu cette année, qu'un accroissement des plus faibles! Parmi les nations européennes, la France se situe à un niveau inférieur à celui de l'Allemagne. Nous sommes aujourd'hui, en considérant l'ensemble: recherche privée-recherche publique, à 2.17% du PIB ce qui est nettement inférieur aux attentes, et aux engagements”.

Los españoles nos referimos a Francia muchas veces con cierta envidia por su desarrollo científico. ¿Qué podríamos pensar al observar su descontento teniendo en cuenta que su 2.17% del PIB en inversiones de I+D es más del doble del español? Quizá la cita anterior pueda servir de acicate a los científicos y a los políticos para ver en el fomento de la cantidad y la calidad de la investigación fundamental el auténtico núcleo del esfuerzo innovador científico e industrial, base hoy del prestigio y poder de las naciones.

IX. CRECIMIENTO ECONÓMICO A TRAVÉS DE LA INNOVACIÓN

LA innovación se ha definido como la búsqueda, el descubrimiento, la experimentación, el desarrollo, la imitación y la adopción de nuevos productos, nuevos procesos de producción y nuevos sistemas de organización. Comprende todas las etapas del proceso de investigación, tanto desde el punto de vista científico como organizativo, hasta que un nuevo producto o un nuevo proceso de producción llega al mercado.

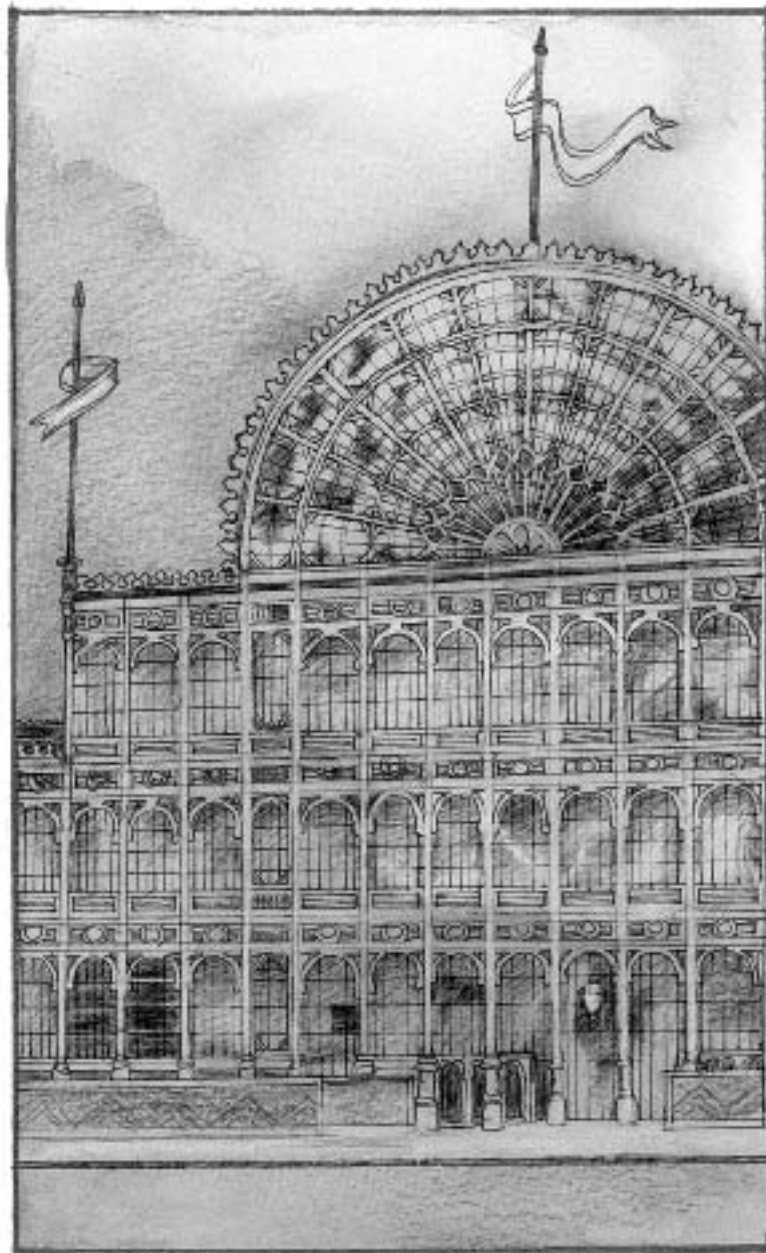
La política de innovación ha de dirigirse a la armonización de los ingredientes de ciencia, tecnología y política industrial conducentes al desarrollo y uso eficiente de nuevos productos, servicios y procesos útiles en sectores como comunicaciones, transporte, energía, ambiente y desarrollo humano, además de los específicamente propios de la ciencia y la tecnología. Junto a la distinción entre *política industrial* y *política tecnológica* que cada vez se va haciendo menos pronunciada, va surgiendo la idea de los sistemas nacionales de innovación como piedra maestra de la moderna estrategia industrial, conjunto de factores encargados de estimular las instituciones educativas y de investigación y los actores económicos, de regular la adaptación permanente a las condiciones y demandas de la economía, y de desarrollar

instrumentos de estímulo y políticas de integración y coordinación entre los diferentes subsistemas.

Uno de los hechos más notables de la economía del último cuarto de siglo es la transición hacia la *globalización*, como proceso dinámico, asimétrico, no distribuido al azar, interrelacionado con los mercados financieros y comerciales y con la producción industrial. La globalización afecta a las economías nacionales y locales a través de las inversiones extranjeras, los mercados financieros internacionales y las compañías multinacionales; viene acompañada por la liberalización del mercado de capitales y por el rápido crecimiento de algunas economías como las asiáticas; es fruto complejo de la competencia internacional y de decisiones políticas y desarrollos tecnológicos; viene facilitada por las modernas telecomunicaciones; tiene efectos sociales, económicos, políticos, educativos y culturales interrelacionados; y depende directamente de la *velocidad de innovación*. Innovación y globalización son fenómenos profundamente conectados, sin que sea fácil deslindar causas y efectos entre ellos.

Los hechos políticos más sobresalientes en la política internacional de la última década son la desaparición del sistema bipolar mundial y la transformación política y económica de los países del Este de Europa. La próxima integración en la Unión Europea de muchos de dichos países plantea un fuerte reto, con importantes repercusiones en la política científica europea.

Los análisis estadísticos confirman la existencia de una *diferencia tecnológica* entre las regiones más y menos desarrolladas de la Unión Europea que es el doble de la *diferencia de cohesión*, medida en término de las diferencias en ingre-



El Palacio de Cristal donde tuvo lugar en Londres la Gran Exposición de 1851, escaparate de la potencia industrial, militar y económica del Reino Unido en aquel momento.

sos, productividad y empleo. Reducirlas es uno de los principales retos en las políticas sociales y económicas de la Unión Europea. Resulta pues importante potenciar las infraestructuras, adaptar el sistema educativo y el de I+D, y hacer progresar la tecnología. El manejo adecuado de las políticas de innovación a escala nacional y europea es por otra parte un factor imprescindible para la competitividad tecnológica con el resto del mundo.

Ya se ha mencionado que los primeros laboratorios industriales de I+D fueron los químicos, a finales del siglo XIX. Desde entonces la industria química ha contribuido a la transformación de la sociedad a través de su participación en los medios de transporte, la construcción, la agricultura, los medicamentos, etc. En la actualidad fabrica en todo el mundo alrededor de 70 000 productos, casi todos comercializados durante los últimos 150 años. La industria química americana es la mayor del mundo y el mayor sector industrial de manufactura del país. Esta formidable expansión, basada en descubrimientos e invenciones pasados, no es suficiente sin embargo para satisfacer las necesidades del siglo XXI: la tarea crítica de la industria para asegurar su éxito futuro será el hallazgo de nuevos descubrimientos y su transformación en soluciones del mercado.

Renée Mauborgne y W. Chan Kim han examinado el impacto de la innovación sobre la rentabilidad de las compañías en un estudio multisectorial publicado en *Harvard Business Review*; la conclusión es que solamente el 14% de los productos lanzados fueron auténticas innovaciones; el 86% restante fueron simples mejoras de otros ya existentes. ¡Sin embargo la auténtica innovación fue responsable del 38% de los ingresos y el 61% de los beneficios!.

R.M. Gross, de la Dow Chemical, ha escrito a propósito de la presencia de la innovación en la industria: “The opportunity as we enter the 21st century is to better connect the knowledge and solutions that come out of R&D to the marketplace. To accomplish this goal, chemical research and the chemical industry need to center around innovative, knowledge-based solutions, not just products offered. We need to become more expansive in our thinking and set new expectations for R&D. We also cannot lose sight of the fact that innovation is a business process: it does not occur until we realize the first commercial use of a new technology”.

En los últimos años han surgido diversas iniciativas –entre otras, el proyecto LOK del gobierno danés– encaminadas a potenciar directa o indirectamente la innovación, tanto por medio de cambios en la organización y gestión empresarial y en los sistemas educativos y profesionales, como a través del fomento del diálogo entre los principales ingredientes del *sistema de innovación* –cuerpos académicos públicos y privados, colectivos empresariales y representantes sociales–. Las llamadas *redes de innovación*, fundadas en la reciprocidad, la coordinación y la cooperación, pretenden facilitar el acceso a la información por medio de acuerdos contractuales, compartiendo responsabilidades intelectuales o financieras y realizando conjuntamente actividades de I+D. Las redes de innovación pueden adoptar una relación *horizontal* entre varias empresas o entre empresas y centros de investigación para llevar a cabo actividades comunes de I+D, en tanto que la explotación comercial de los resultados se lleva a cabo de manera independiente por cada uno de los socios. La relación *vertical* se establece entre los productores y los usuarios de los nuevos productos o los nuevos procesos. Estas

relaciones selectivas juegan un importante papel en los distintos niveles –internacional, nacional y regional– de la cooperación para la innovación.

A escala regional pueden darse diferencias significativas en la promoción del proceso de innovación por parte de Agencias de Desarrollo regional que agrupen compañías y Universidades de una zona geográfica determinada. El Ministerio de Economía británico ha anunciado la provisión de 90 millones de dólares para potenciar este tipo de estrategias de I+D en el año 2000. Algunas de las iniciativas empresariales desarrolladas por universidades del Reino Unido son las siguientes: El *White Rose Consortium* de las Universidades inglesas de Leeds, Sheffield y York, que potencia la cooperación regional y que en sus primeros 18 meses de actividad ha tenido unos ingresos de 3.5 millones de dólares bajo la forma de licencias de explotación, etc. Las Universidades escocesas de Dundee, Edimburgo, Glasgow, Heriot-Watt y Strahclyde han desarrollado cursos prácticos de gestión tecnológica y dirección empresarial en el seno del Institute of Enterprise for Scotland. La Universidad de Oxford ha creado en 1988 la *Isis Innovation*, compañía de transferencia de tecnología que hasta 1997 había desarrollado un centenar de patentes y gestionado una docena de nuevas compañías, entre ellas *Oxford Asymmetry*, *Oxford Biomedica*, *Oxford Glycoscience*, *Oxford Molecular* y *Powderject Pharmaceuticals*, con una capitalización de alrededor de 1.8 millardos de dólares y creación de unos 3 000 nuevos empleos. La Universidad de Cardiff ha creado en 1996 el *Innovation Network* para facilitar la transferencia de tecnología desde las instituciones académicas, con lo que más de 500 compañías han establecido nuevas conexiones con la Universidad.

Junto a las exigencias de estabilidad en las finanzas públicas, en la cumbre europea de Amsterdam de 1997 se aprobó una resolución sobre la ampliación de las orientaciones anuales de política económica. Se decidió considerar como primer objetivo el *empleo*, e incluir también la *innovación tecnológica*, la *educación*, la *formación*, el *mercado de trabajo* y la *competitividad*. Ello es de sustancial importancia porque se prevé que la unificación económica y monetaria europeas no podrán lograrse sin una convergencia efectiva en estas cuestiones fundamentales, y porque el mantenimiento de la capacidad económica e industrial de Europa exigirá a largo plazo niveles competitivos en ciencia y tecnología.

Todos los Estados, y en mayor medida a los pertenecientes a la UME, deberán perseverar en el cumplimiento de las políticas de estabilidad. Ello exigirá en muchos casos *reformas estructurales*, en particular en lo referente al *crecimiento sostenido de la producción*, y también en actividades educativas y de I+D; adaptación a las nuevas tecnologías –en especial de la salud pública, la energía, el ambiente, los nuevos modelos agrarios, la información y las comunicaciones–; y *liberalización de la competencia*. En resumen, la firme unificación de las políticas económicas ha de asentarse sobre una profunda armonización de las estructuras sociales, laborales y científico-tecnológicas.

El Tratado de Maastricht ha significado un punto de inflexión en la cambiante evolución política, científica y tecnológica de Europa. El preámbulo del Tratado de Roma señaló como objetivo la prosperidad basada en la tecnología y el desarrollo económico, para alcanzar a los Estados Unidos y el Japón. Desde entonces se han hecho familiares a la comunidad científica las siglas de una colección de proyectos,

como *tecnología de la información* (ESPRIT), *comunicaciones de banda ancha* (RACE) y *tecnología de semiconductores* (JESSI).

Tras Maastricht, la Comunidad Europea de 12 naciones y 350 millones de ciudadanos intentó una nueva estrategia científico-tecnológica para encarar el siglo XXI: hacer de Europa un líder mundial indiscutible, combinando el dinamismo industrial con la calidad de vida. La política basada en los Programas Marco para el Desarrollo Científico y Tecnológico (Framework Program for Research & Technological Development) se enfrenta al ambicioso reto de cambiar por completo la ciencia, la ingeniería y la cultura industrial de Europa por medio de nuevas formas de cooperación y de sinergia científicas, junto con una combinación de políticas sociales y tecnológicas. La administración europea lo definía en 1993 de la manera siguiente: “Research and development have been moving into a different context in Europe since the Framework Program began. The sort of research and technology that we want to support has to meet a number of criteria. It has to be damn good science and technology. That’s a given. But it’s also got to be something that industry really needs or that helps society”.

El Programa Marco correspondiente a 1994–1998 tuvo un presupuesto de 15.7 millardos de dólares (13.1 millardos de ECUs) para cubrir todos los ámbitos de la ciencia, la tecnología y las ciencias sociales; esta cantidad supuso el 4% del total de los presupuestos individuales de I+D de los 12 países. Aunque el espíritu de la ciencia europea sea voluntarioso, un vistazo a la Europa de nuestros días sugiere que no existe una institución financiadora con autoridad y

competencia suficientes para lograr la necesaria unificación de la ciencia pan-europea.

El esfuerzo económico que la Unión Europea y sus Estados miembros dedican a la investigación –fondos públicos y privados conjuntamente– representa en la actualidad el 1.8% en términos de PIB; mientras que el de los Estados Unidos asciende al 2.8%, y el del Japón al 2.9%. Estos porcentajes significan enormes disponibilidades económicas en términos absolutos.

Se ha mencionado el CERN como uno de los mayores triunfos de la colaboración científica en Europa, pero su identidad exclusivamente europea va desapareciendo por la participación de otros países, principalmente Estados Unidos y Japón. Posiblemente sea inevitable dada la enormidad de los gastos para nuevos equipamientos y mantenimiento, junto con la propia naturaleza internacional de la física de altas energías. Otras realizaciones europeas han sido el Instituto Laue-Langevin y la *European Synchrotron Radiation Facility* (ESRF) en Grenoble.

Paolo Fasella, director general de Ciencia, Tecnología y Desarrollo de la EC Comisión, ha declarado: “What we are attempting is something quite new. We’re adding value by incorporating the different national cultures in our programs. But those traditions, plus the economic cultures, must remain independent”. La Comisión ha intentado evitar los efectos más negativos de la soberanía absoluta de las naciones, posible responsable del fallo de la industria europea en su competitividad frente a los Estados Unidos y Japón. El director de la unidad de investigación industrial de la Comisión ha declarado: “The problem we have in Europe is insufficient integration. All the European industries are

accustomed to working alone. Never has the chemical industry, for example, tried to cooperate with the auto industry in order to jointly find solutions to common problems. They are two different worlds. And that is the real problem. You find the same problem even within the same industries. Research is not integrated with marketing or production. We have to integrate all the actors, all the instruments”.

Uno de los instrumentos para el ejercicio de la ciencia pan-europea es la *European Science Foundation*, que se esfuerza en los últimos años en lograr una identidad política y financiera con la que conseguir la reputación imprescindible y la independencia necesaria de las Agencias nacionales.

Se impone conciliar a los ciudadanos con la ciencia, seguir el ritmo vertiginoso de su evolución, hacer atractivo para los científicos nuestro espacio europeo, reorganizar el funcionamiento de sus estructuras, y disminuir la diferencia entre los 11 millardos de dólares anuales pagados a Estados Unidos en concepto de derechos de propiedad intelectual y los 4 que Europa recibe. Frente a la globalización de la economía debe crearse una dimensión europea, no solo con un mercado y una moneda únicos, sino unida también en la investigación, si no queremos que aumente la distancia respecto a los Estados Unidos.

El dominio de una *política europea* debería evitar solapamientos con las políticas nacionales, armonizando las diferencias y a la vez explotando la variedad tecnológica de Europa. Un ejemplo de este tratamiento sería la deseable estandarización del sistema universitario; sobre la que ha escrito Jan Fagerberg: “The European knowledge base is characterized by a high degree of diversity. In an innova-

tion policy context, this may be a strength, since diversity breeds innovation. But this is only so as long as the knowledge base remains integrated, characterized by a high degree of interaction between the constituting parts. As emphasised by Schumpeter, innovation consists of new combinations of existing elements. A disintegrated knowledge base may hamper innovation (i.e. new combinations) in spite of considerable diversity. The university system, and education more broadly, plays an important role in unifying the knowledge base. It is therefore imperative that the university system acquires a European dimension. Although universities will remain a national responsibility, it will be an important task for the European institutions to support the creation of a European dimension within the university system. This should not be limited to exchange of students and teachers, but should also include more ambitious attempts to foster European cooperation in this field, such as the creation of European curricula, degrees, etc.”

Así debería ser el sistema universitario europeo, tanto en su armonización estructural como en la facilidad para experimentar nuevas soluciones de organización que respondan al diseño de nuevas especialidades y nuevos campos interdisciplinarios con los que rebajar barreras entre las competencias que la industria necesita y la formación que las universidades dispensan.

El sistema universitario europeo, profundamente heterogéneo, exigirá una cuidadosa política para darle mayor coherencia, reemplazando el control de los gobiernos nacionales o regionales por el de la Unión. El Tratado de Roma no hacía mención alguna de las universidades, y el Acta Única Europea de 1986 mencionaba la investigación pero no la educa-

ción superior; el Tratado de Maastricht permite sin embargo a la Comisión Europea tomar parte en los asuntos educativos dentro de los términos definidos por los estados miembros.

Los tres primeros Programas Marco estuvieron vigentes durante aproximadamente 10 años, y su política hizo énfasis en la *investigación precompetitiva*, esto es, aquella investigación no vinculada directamente al mercado pero que actúa antes que él. Se dedicó especial atención a las nuevas tecnologías, incluyendo informática, telecomunicaciones, producción industrial, biotecnología, etc. En el Tercer Programa Marco figuró como punto más importante la incidencia de la biotecnología en el sector agroindustrial.

Los sucesivos Programas Marco han tratado más de objetivos y estrategias que del apoyo en sí a la investigación y el aprendizaje. El Tercer Programa (1991-1994) estableció áreas prioritarias en investigación y tecnología, en concreto en biotecnología, materiales, informática, computación y comunicaciones. El documento de 1992 *Research after Maastricht* establecía la necesidad de modificar el Tercer Programa para mejorar y simplificar los procedimientos de gestión y decisión; estas modificaciones se han introducido en el Cuarto Programa.

Se consideró imprescindible la vinculación de los proyectos de investigación a la competitividad industrial y a la calidad de vida. La investigación básica se dejó casi totalmente al arbitrio de cada uno de los países individuales, salvo la perteneciente a áreas cuyo cultivo fuera deficiente o ignorado. Los recursos financieros del Cuarto Programa no debían utilizarse en competencia con los de los Estados miembros, sino como complemento de los mismos y a favor

de disminuir las diferencias estructurales entre la investigación de los diversos países y regiones de la CE. Se intentó promover la creación de redes de centros de investigación al estilo del CERN a través de las cuales subvencionar el trabajo en colaboración, para contrarrestar la debilidad europea para convertir los resultados de la investigación en aplicaciones industriales.

Con independencia de los programas particulares, los objetivos a largo plazo como la mejora de la competitividad industrial de Europa no podrán alcanzarse sin que los *criterios de excelencia* gobiernen la evaluación y apoyo del trabajo científico. Con este fin, F. Gros, C. Rubbia e I. Prigogine actuaron como asesores del Cuarto Programa en los campos respectivos de ciencias de la vida, física de altas energías y matemáticas aplicadas.

La característica diferencial del Programa de Ciencia y Tecnología es el énfasis en la integración social, aunque los objetivos de bienestar social en sí mismos correspondan a otras direcciones de la EC. Entre sus finalidades está incidir sobre la exclusión y la pobreza, estableciendo mejores nexos entre las necesidades de información, comunicaciones, servicios públicos, educación, aprendizaje y empleo.

El Cuarto Programa Marco consideró centrales para el desarrollo de la CE las tecnologías de la información y la comunicación, por su conexión con la biología, la ciencia de los materiales, la salud y el ambiente, la educación, la administración, la vivienda y el transporte, el empleo, el ocio, y las manufacturas; y dentro de cada una de estas áreas con multitud de aplicaciones concretas como las aplicaciones multimedia, la ingeniería de las lenguas, la integración de sistemas de alto nivel, la miniaturización, la tecnología de soportes lógi-

cos y los sistemas inteligentes de diagnóstico médico. El Programa contemplaba también los *aspectos sociales y humanos de la tecnología*, pretendiendo crear la infraestructura necesaria para evitar la aparición de un analfabetismo científico tan pernicioso si cabe como el tradicional.

Otra parte fundamental del Cuarto Programa Marco es la de las ciencias de la vida, cuyas áreas principales son la biotecnología, la investigación biomédica y la investigación en ciencias de la salud –desarrollo y aprobación de nuevos medicamentos, nuevas técnicas de diagnóstico óptico y electrónico, investigaciones sobre el cerebro, etc.–. También incluye las aplicaciones a la agricultura, pesquerías y bosques, sobre todo en lo que se refiere al desarrollo de las áreas rurales de Europa.

El área de biotecnología se ha considerado prioritaria y comporta los siguientes aspectos: 1. Extender el concepto de *factoría celular* al desarrollo de los nuevos procesos industriales; logrando la integración de áreas de conocimiento biológicas, tecnológicas y de la computación. 2. Potenciar la capacidad de secuenciación del genoma humano. 3. Extender a las aplicaciones agrícolas y agroindustriales los conceptos y los métodos de la biología vegetal. 4. El desarrollo técnico de la cristalografía de rayos X, la espectroscopía de resonancia magnética, y la microscopía electrónica. 5. Expandir el área de las neurociencias.

En investigación biomédica y ciencias de la salud se pretende: la predicción de las funciones biológicas a partir de los motivos estructurales de proteínas y ácidos nucleicos, con posibilidades de interferir en la formación de estructuras subcelulares y en las interacciones célula-célula; el conocimiento de los procesos morfogénéticos y el desarro-

llo de estructuras particulares, y su influencia en los procesos de regeneración, cicatrización y reparación del sistema nervioso; la descripción de las cascadas de respuesta que regulan las actividades de los factores de transcripción que dirigen los esquemas adaptativos de la expresión génica; el conocimiento de las bases genéticas de las enfermedades hereditarias monogénicas –talasemias, fibrosis quística, etc.– y multigénicas –cáncer, enfermedades cardiovasculares, Alzheimer, etc.–; el descubrimiento de nuevos vectores para las futuras aplicaciones de la terapia génica somática; la creación de modelos animales para los experimentos de transferencia génica; el desarrollo de nuevas vacunas; la introducción en plantas de genes especiales para la obtención de productos finales específicos, etc. Se intenta reunir las ventajas de la superespecialización con las de un nuevo enfoque multidisciplinar, siguiendo los pasos de la gran investigación biomédica de los Estados Unidos en áreas como el sida, las enfermedades cardiovasculares, el cáncer, las alteraciones neurológicas y degenerativas, y el envejecimiento.

El Programa referente a *materiales y tecnologías industriales* intenta aplicar la matemática y la física a los sistemas industriales, desarrollar nuevos métodos de organización y mejorar la ingeniería de materiales. Una de sus áreas, la tecnología de materiales, es prioritaria en la investigación de materiales estructurales, biomateriales y materiales superconductores, y en la atención a las nuevas materias primas y al reciclado de productos de deshecho.

El documento *Research after Maastricht* señala: “Overall, community research is characterized by the insufficient number of real technological priority projects. The lack of selectivity, the tendency to disperse rather than to concen-

trate, the excessively weak perception of the true nature and real size of the technological challenges posed at world level must be deplored across the board”. La importancia de estas consideraciones estratégicas para la competitividad de los proyectos industriales, se manifiesta en el ejemplo de los circuitos integrados: “A hundred research applications for projects involving integrated circuits in the most varied areas have, of course, positive effects. They encourage process and product innovation. But if community industry allows itself to be left behind in the area of the production of integrated circuits, the harm done is double: the community becomes a pure demand market for this product, and a basic know-how is lost”. De acuerdo con las resoluciones de Maastricht, en 1992 se adoptaron políticas tecnológicas especiales en cuanto a las decisiones financieras, de producción y mercado, particularmente las referidas a la tecnología de la información y la comunicación.

En la preparación del Quinto Programa Marco para el periodo 1998-2002, la *European Science and Technology Assembly*, comité asesor de la Comisión Europea formado por un centenar de miembros representantes de la industria y la comunidad académica, recomendó en 1996 una mayor presencia de la investigación básica. La situación a este respecto ha cambiado en los últimos años, y la responsabilidad de los países individuales ha pasado en gran medida a los programas europeos. Programas como el de Movilidad de los Investigadores han tenido especial repercusión en los jóvenes científicos dedicados a la investigación básica. La citada Asamblea solicitó de la Comisión que cada uno de los programas del Quinto Programa Marco incluyera un componente de investigación básica y que se desarrollaran objeti-



Sede en España de la Academia Europea de Ciencias y Artes.

vos científicos comunes entre las Agencias y Consejos de Investigación nacionales y las instituciones europeas de investigación, como el European Laboratory for Particle Physics (CERN), el European Molecular Biology Laboratory de Heidelberg, y el European Southern Observatory. En el seno de la Asamblea se ha constituido un grupo –dirigido por François Gros, director del Instituto Pasteur de París– para ayudar a la Comisión a decidir prioridades en la conexión entre industria y comunidad académica en el área biológica.

El Quinto Programa Marco fue diseñado en el coloquio ministerial que tuvo lugar el 28 de abril de 1998 en Londres, y ha contado con el asesoramiento de 17 Grupos Asesores Externos y 4 grupos adicionales relacionados con áreas genéricas; su presentación se llevó a cabo el 25 de febrero de 1999 bajo la presidencia alemana del Consejo. Este Quinto Programa define las prioridades estratégicas de la UE para el periodo 1998-2002 en investigación, desarrollo tecnológico y actividades de demostración (RTD). Su objetivo es responder a retos socioeconómicos como la competitividad industrial, la creación de empleo y la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos⁷. Se presta un énfasis especial en ayudar a las empresas a enfrentarse con los procesos de innovación en el siglo XXI, traduciendo la investigación de la UE en beneficios tangibles para toda la sociedad en campos como la salud, la nutrición, el ambiente y las comunicaciones. Para conseguir un impacto máximo, se concentra en un número limitado de áreas de investigación en las que se combinan aspectos tecnológicos, industriales, económicos, sociales y culturales.

Una de las mayores innovaciones del Quinto Programa Marco es el concepto de “acciones clave” dentro de cada uno

de los cuatro programas temáticos, con las que movilizar el mayor número posible de disciplinas científicas y tecnológicas en el tratamiento de problemas comunes, a la vez que se eliminan barreras tanto entre diversos campos de conocimiento como entre programas e instituciones. Se intenta *potenciar la coordinación* entre diferentes programas, entre las actividades de investigación europeas y las nacionales, entre los programas de investigación y otras actividades de la Unión Europea, entre la política de los fondos estructurales y otras políticas de la Unión, y entre las actividades de asistencia técnica y las de asistencia económica.

El Quinto Programa Marco incluye una financiación importante de la investigación genómica, como: ayuda al *European Bioinformatics Institute* (EBI) y al *European Mouse Mutant Archives* (EMMA); programa dedicado a la *formación y movilidad de los investigadores en Europa*; financiación de coloquios, seminarios, conferencias, etc. dedicados a los temas científicos propios del Programa Marco; y ayuda a la investigación en los países en vías de desarrollo.

El *European Bioinformatics Institute*, establecido en las cercanías de Cambridge, ha recibido una ayuda de la Comisión de 16.6 millones de dólares para los próximos tres años; además de otras ayudas como la de 7.6 millones de dólares anuales del European Molecular Biology Laboratory, y los 1.6 millones de dólares del Wellcome Trust. El *European Mouse Mutant Archives*, establecido en Roma y consagrado al estudio de los ratones transgénicos, recibirá de la Comisión 3.6 millones de dólares. La potenciación de este tipo de programas pretende el apoyo a la genómica funcional a gran escala y el ensayo de nuevos temas para su inclusión en el próximo Sexto Programa Marco.

El *Centro de Investigación conjunta* supondrá una posibilidad para: a) suplementar el Programa Marco; b) disponer de expertos imparciales en el asesoramiento de las políticas de la Unión; c) poner la investigación al servicio de los ciudadanos en las áreas de la salud, la seguridad, el ambiente, la protección del consumidor y la prevención de los fraudes; d) dar continuidad a las concepciones básicas de la conexión con la industria, la competitividad, etc.

La política internacional de la Comunidad Económica Europea tuvo inicialmente como objetivo fundamental la política comercial entre sus miembros y las relaciones con otros socios extracomunitarios. Estas relaciones no han sido fáciles, sobre todo con los Estados Unidos. La CEE ha deseado tradicionalmente una mayor cooperación con los Estados Unidos en relación con grandes proyectos del tipo de la fusión nuclear, el cambio ambiental global o el proyecto genoma humano, pero la dispersión de las compañías europeas ocasiona en la práctica restricciones notables a la colaboración con la parte americana. El director de la sección internacional de desarrollo científico y tecnológico afirmaba en 1993: “We in the EC feel we are rather open in regard to access because we consider American companies located here to be European. And the restrictions are getting worse. The situation, of course, strengthens those here in Europe who would like to restrict American participation”. Se ha llegado a pensar que los Estados Unidos huyen de los acuerdos bilaterales con la CEE, al tiempo que promueven acuerdos similares con países europeos aislados. A estos problemas generales en las relaciones comerciales internacionales de la CEE hay que añadir otros dos particulares pero muy importantes: las objeciones USA a los subsidios europeos al *airbus*

y la agricultura, y las alegaciones de *dumping* comercial del acero. También tienen características especiales las relaciones comerciales con Japón y los países del Este europeo; en el caso del Japón las relaciones vienen dificultadas por el hecho de que la investigación se lleve a cabo allí principalmente por la industria, mientras que en la CEE se realiza por instituciones públicas o es apoyada por ellas.

El Comisario europeo para la investigación Philippe Busquin se ha enfrentado recientemente con esta situación global con motivo de su comunicación a la Comisión de 18 de enero de 2000, preconizando la creación de un auténtico *Espacio Europeo de Investigación*. Sus conclusiones para una mejor integración y coordinación de las actividades de investigación a nivel europeo han sido adoptadas por la Cumbre Europea de Lisboa de marzo del mismo año. Los líderes de los gobiernos europeos han requerido de la Comisión la confección de un programa que estimule y asista la emergencia de un nuevo espíritu creativo y empresarial en el sistema europeo de investigación e innovación. De mayor trascendencia aun son las críticas dirigidas al espíritu mismo de la política europea de investigación y desarrollo tecnológico, cuando el artículo 163 del Tratado de Amsterdam afirma: “La Comunidad tiene como objetivo reforzar las bases científicas y tecnológicas de su industria, así como favorecer el desarrollo de la competitividad internacional y la promoción de las acciones necesarias para el cumplimiento de los artículos del presente Tratado”. Europa ha desarrollado durante el último cuarto de siglo su mercado único, su unidad monetaria, y ha avanzado en las políticas comunes de defensa y de armonización fiscal y judicial; la organización de la investigación y la ciencia permanece en cambio

fragmentada y reiterativa, sin que prácticamente se haya obtenido ventaja alguna de los resultados económicos y políticos en otros campos.

La competitividad europea ha de depender inevitablemente de la transferencia efectiva de ideas desde la generación de conocimiento hacia su aplicación y explotación comercial. La industria y el comercio deberían dar la bienvenida a un plan dirigido a la mejora del sistema europeo de ciencia, que dará lugar a una mejor ciencia y unos mejores científicos e ingenieros. Dicho plan habrá de prestar especial atención a la educación superior, en especial en aquellas ramas de mayor dinamismo actual. La creación de estas condiciones contribuirá a una mayor colaboración entre la ciencia y la industria.

La situación actual de Europa dista mucho de aquella a la que debería aspirar por su historia, su presencia en la génesis de la ciencia moderna, y su participación en todas las revoluciones científicas y en el desarrollo de las nuevas ramas del conocimiento. La Comisión europea promueve un espacio europeo de investigación con mayores recursos económicos, consideración de la investigación fundamental como motor de la innovación y la calidad de vida, mejor coordinación entre sus centros de excelencia, mayor uniformidad en la formación de sus científicos e ingenieros, reconsideración del principio de *subsidiariedad*, integración de todas las comunidades científicas de Europa, eficiencia en la movilidad de los investigadores y científicos, y una red de difusión social de la ciencia y de la tecnología que haga justicia a lo que ambas han supuesto en la elevación de la calidad de vida de los ciudadanos europeos. Para conseguir una auténtica investigación europea deberán formalizarse estas intenciones.

La espera no está exenta de dificultades debido a las discrepancias nacionales de los países miembros actuales, la necesidad de tener en cuenta los criterios de las naciones aspirantes a formar parte de la Unión, y la diversidad de calidades que ofrecen las instituciones académicas y los organismos públicos y privados europeos. Serán necesarios largos debates en el Parlamento europeo en los que se tengan en cuenta las opiniones de los científicos y las propuestas de programas como *seguridad alimentaria y riesgos para la salud, genómica y biotecnología, y energías no nucleares*. En la confección del Sexto Programa Marco habrá que contemplar estas ideas a través de *colaboraciones bilaterales y multilaterales* entre los estados miembros, *flexibilidad administrativa* paneuropea, y mayor *capacidad de reacción* frente a los avances científicos.

La situación se ha hecho más compleja con la participación de los 11 nuevos candidatos a la Unión. La investigación, y concretamente el Quinto Programa Marco, son el primer sector en el que los candidatos comparten plenamente la política de la Unión bajo condiciones similares a las de los estados miembros. De los 11 países candidatos, Polonia, Hungría y la República Checa han sido los que han presentado mayor número de propuestas al Quinto Programa, aunque los de mayor éxito hayan sido Chipre, Estonia, Lituania y Eslovenia. El 29 por ciento de las 12000 propuestas recibidas han sido admitidas para su posible financiación; los países candidatos han participado en la cuarta parte de propuestas, y a ellos corresponden el 4 por ciento de las aprobadas

La ampliación de la Unión Europea presenta grandes diferencias entre los estándares de *investigación, defensa e indus-*

tria de los estados miembros de la Unión y los de los otros países de Europa Central o del Este. Los antiguos países comunistas han invertido muy poco en su producción comercial y en adquisición de equipos de alta tecnología desde la caída del muro de Berlín. Esta falta de cohesión ocasionará problemas difíciles de solucionar, a no ser que se intente atenuar activa y sistemáticamente, sobre todo en el terreno de las infraestructuras de investigación. Merece la pena señalar la reciente acción de la Comisión Europea para identificar en estos países centros de excelencia que actúen a manera de atractores de la financiación de la UE, frente a las ayudas a la *cohesión*, concedidas hasta ahora de forma un tanto indiscriminada por el simple hecho de ser más pobres.

Por lo que se refiere a las Organizaciones internacionales que total o parcialmente se integran en la política europea de la ciencia, la *Organización Mundial de la Salud* –the World Health Organization (WHO)– ha estado durante el último medio siglo en la avanzada de la promoción de la salud global, el acceso a la salud pública y la promoción de su cultura, la formación de los profesionales, y la lucha contra las enfermedades infecciosas, en particular la prevención de la malaria y la ceguera, el control de la tuberculosis, la lucha frente a la adicción al tabaco, y los programas de prevención del HIV y de la enfermedad de Chagas. El reciente liderazgo de Gro Harlem Brundtland y las nuevas prioridades establecidas han contribuido a ello, junto con la disminución de los costes administrativos en un 15% en el año 1999. Por razones humanitarias, políticas y económicas, los Estados Unidos han venido financiando a la Organización, cuyo presupuesto regular en el presente bienio es de 843 millo-

nes de dólares. Pero aunque importante en valor absoluto, la contribución de los Estados Unidos por persona y por porcentaje de su producto interior bruto está muy por debajo de las de Noruega, Dinamarca, Suecia, Holanda y el Reino Unido, por no citar los 35 millones de dólares de atrasos que adeuda. Europa podría jugar un papel de liderazgo en la Organización dado su interés por la salud global, su vulnerabilidad frente a las epidemias propagadas por las migraciones, y su participación en la biomedicina y la biotecnología

Mucho mejores son las perspectivas europeas en el campo de las investigaciones biomédicas. Durante el último medio siglo el desarrollo ha sido espectacular, acelerándose en la década de los 60 con la creación de la *Organización Europea de Biología Molecular* (EMBO) y la *Conferencia Europea de Biología Molecular*. La Organización nació como senado académico de los biólogos moleculares europeos, tras una serie de reuniones y contactos entre grupos destacados, y diseñó una serie de actividades para el trienio 1966-68 bajo el patrocinio de la Fundación Volkswagen. La Conferencia por su parte se instituyó en 1967 como agrupación de Estados patrocinadores, bajo planteamientos globales de política científica europea similares a los que dieron lugar a la aparición del CERN. El CERN serviría de molde para el diseño de la Conferencia, a la que varias naciones se incorporaron como miembros fundadores —el caso de España—, comenzando a tomar parte activa en el desarrollo de sus políticas propias y de cooperación.

Es interesante la justificación de la propuesta de la Conferencia en 1964 por lo que representa como planteamiento político de la ciencia europea y su competencia con los Esta-

dos Unidos: “En el transcurso de los últimos años hemos asistido a un florecimiento de la biología que, para el desarrollo de esta ciencia, es comparable a lo que fueron para la física los primeros años del siglo con el conocimiento de las estructuras atómicas y nucleares. La aparición de una nueva biología ha estado marcada por el progreso en diversos dominios, en particular en el que se ha dado en llamar Biología Molecular. La elucidación de la estructura de las macromoléculas, proteínas y ácidos nucleicos, y la interpretación de las funciones en términos de estructura, han renovado nuestros conocimientos de la herencia y de los mecanismos celulares. La aplicación de tales modos de pensamiento a los problemas de la diferenciación y de la regulación, a la inmunología, a la organización supracelular o al sistema nervioso central, ofrecen la oportunidad de contribuir con resultados no menos revolucionarios. No hay ninguna rama de la biología que no deba transformarse por los progresos realizados en este campo cargado de promesas, sin olvidar los beneficios que la Biología Molecular aportará a la medicina, la agricultura y al desarrollo de nuevas industrias. Entre los principales descubrimientos que están en el origen de esta revolución, muchos se han realizado en los laboratorios europeos, pero en gran medida la iniciativa ha pasado hoy a los Estados Unidos, donde los considerables recursos disponibles para la investigación científica se distribuyen con inteligencia y liberalidad. No solamente las ideas atraviesan el Atlántico; son también numerosos los biólogos europeos de gran relieve que se establecen en los Estados Unidos, llevados por las mejores condiciones de investigación, por las ayudas asignadas generosamente, y por la atmósfera intelectual tan estimulante de las universidades americanas. En

el momento actual, el capital intelectual de Europa no está explotado debidamente en su propio terreno; si se emplean adecuadamente, los recursos humanos y económicos europeos son suficientes para asegurar a Europa su papel en una aventura intelectual cuyas consecuencias se vislumbran no solamente para la ciencia sino para todas aquellas aplicaciones que, a buen seguro, mejorarán la condición humana”.

Hace más de un cuarto de siglo de tal afirmación, y hoy puede asegurarse que gracias a estos proyectos la situación europea en estas áreas ha experimentado un cambio extraordinario, aunque persistan todavía diferencias frente a los Estados Unidos.

X. LA COMPRESIÓN SOCIAL DE LA CIENCIA

1. Introducción. Ciencia, cultura y progreso

JUNTO a las prioridades presupuestarias y al conjunto de acciones promotoras de la investigación señaladas en capítulos precedentes debe considerarse la aceptabilidad social de la ciencia, dependiente de su difusión y conocimiento. Será difícil que la investigación y la ciencia gocen de la adecuada protección en las sociedades democráticas si no existe un ambiente social capaz de aceptar los descubrimientos e innovaciones de la ciencia y la técnica como principales responsables de la calidad de vida de los ciudadanos bajo sus múltiples aspectos: salud, empleo, comunicaciones y cultura misma. Sin olvidar la influencia de la ciencia sobre el prestigio y el poder político y económico de los países. Las sociedades democráticas deben apreciar por otro lado la noción de *riesgo* –y su corolario el *principio de precaución*–, y valorar adecuadamente las restricciones éticas concernientes al ambiente físico, biológico o humano. Para diseñar las medidas conducentes a esta aceptación y comprensión por parte de la sociedad será conveniente conocer la historia de estas relaciones, y examinar los medios para corregir posibles desinformaciones, fuente principal de muchas actitudes sociales negativas.

Todas las circunstancias del hombre tienen un carácter histórico. Así sucede con las ideas de *cultura*, *ciencia* y *tecnología*; con las relaciones de la ciencia con la filosofía primero y con la cultura en sentido global después; con la manera en que la sociedad se percata de los beneficios de la ciencia y de la técnica; y con el fomento del progreso de los ciudadanos. Todos estos conceptos, aislados o en sus relaciones, hay que entenderlos en el contexto de sus orígenes y de los cambios que han experimentado a lo largo de los siglos. Hay que tener en cuenta la posición de cada fenómeno en la escala social de su época, analizando la influencia del observador como se hace en la medición de los fenómenos físicos.

Si acudimos a la literatura social en busca de ejemplos, en su obra *Brave New World* Aldous Huxley imaginó en 1932 “un mundo estable con gentes felices, que tienen lo que desean y no aspiran a lo que no pueden poseer; gentes felices y sanas que han de escoger entre esta fortuna o elevar su nivel [...]. que no desean cambiar porque cada cambio es una amenaza a su estabilidad [...] porque la ciencia es peligrosa e incompatible con su felicidad y hay que mantenerla bien encadenada...”. Como en esta cita de hace tres cuartos de siglo, siempre ha habido personas cuya felicidad parece incompatible o al menos ajena a la ciencia; se trata de *gentes felices* a su manera, que no se dan cuenta de que su calidad de vida depende del conjunto de ingredientes científicos, económicos y sociales que contribuyen en cada momento a la idea misma de *bienestar*: la que supone el acceso a la nutrición, la sanidad, los materiales, la energía, las comunicaciones y la cultura de su época. La idea de calidad de vida subroga así su complejidad a la de cada uno de sus componentes primarios, como ciencia, tecnología y cultura.

El concepto de cultura abarca diversas interpretaciones: la más amplia es la que se refiere a características universales de la especie humana, mientras que la más reducida viene definida por las características individuales de cada persona. Entre ambos extremos puede considerarse el conjunto de creencias, valores, lenguas, comportamientos, rasgos políticos, hábitos alimentarios, etc. que son compartidos por miembros de una raza, nación o grupo, y que son diferentes de los de otros grupos. Se habla así de cultura cristiana, cultura occidental, culturas urbana o rural, cultura popular, cultura del consumo y del ocio, y otras muchas modalidades de cultura. Como afirma Smith en su ensayo *Towards a global culture*: “Una identidad cultural significa la continuidad de sentimientos y valores, memorias compartidas de hechos y personajes que han sido puntos de inflexión de una historia colectiva, y un sentido de destino común a lo largo de las sucesivas generaciones de una unidad de población...”. Cada sistema cultural existe en un hábitat social determinado que a su vez ejerce una influencia sobre el propio sistema cultural. Estos sistemas socioculturales han ido evolucionando y difundiéndose a través del tiempo, diferenciándose estructuralmente desde lo simple a lo complejo a medida que la cultura evoluciona; se produce así una especie de realimentación en la que toman parte la *educación* y el *progreso científico*.

Cada momento ha tenido su particular manifestación cultural. El entorno en el que se desenvuelve la calidad de vida en los países industrializados actuales está gobernado por los descubrimientos científicos y tecnológicos. Las apetencias generalizadas de consumo material e intelectual deciden las estrategias científicas y técnicas de las naciones,

las instituciones y las empresas, estrategias cada día más conectadas entre sí y entreveradas con sistemas mediáticos prácticamente uniformes en las diversas sociedades y opiniones públicas. Un mundo en el que el hombre es consciente de las finalidades y consecuencias del avance científico, mientras participa en un proceso irreversible pero influenciable. Una forma de influencia consiste en seleccionar, orientar y encauzar el progreso científico hacia el mejor rendimiento de su actividad social. Este progreso integral constituye el desarrollo, y entraña riesgos inevitables que hay que valorar y atenuar al máximo; y otros riesgos que pueden eludirse mediante normas sociales y de gobierno.

El súbdito o el ciudadano ha sido más o menos consciente de sus problemas y de las soluciones a su alcance en cada momento. Las situaciones históricas han ido evolucionando con la *extensión cultural*, la *educación científica* y la resultante *comprensión social* de la ciencia y la técnica, dependientes a su vez del desarrollo científico del momento. En particular, la investigación y el método científico han proporcionado al hombre de hoy una visión global del mundo físico superior a los más optimistas sueños de las generaciones anteriores.

En íntima relación con las ideas anteriores, la *ideología de progreso* ofrece varias facetas. Conviene distinguir el *ideal de progreso* como tendencia a incrementar el bienestar social y material del hombre, del *progreso del conocimiento* en su conjunto, y del progreso particular de cada ciencia y sus aplicaciones. El progreso del conocimiento ha tenido retrocesos, como en la Edad Media, pero desde la Edad Moderna ha sido tan incesante que ha llegado a parecer inevitable, contribuyendo poderosamente a la mejora substancial de las condi-

ciones de vida del mundo desarrollado. En la actualidad hay bastantes discusiones sobre si este progreso podrá mantenerse indefinidamente y si su ritmo decrecerá o aumentará, y han aparecido nuevos conceptos políticamente correctos como el de *desarrollo sostenible*.

Las gentes y sus gobiernos, creencias y prejuicios influyen en la aceptación social y cultural de la ciencia y la técnica en cada época, es decir, en su comprensión pública. Esta comprensión está llena de facetas tanto de naturaleza científica como política y social. Su estudio incluye los conceptos de *público* y de *opinión pública*; las relaciones entre ciencia y público, y entre científicos y no científicos; las maneras de incidir en ella mediante *programas educativos* y de *divulgación y popularización de la ciencia*; y la necesidad y características de estos acercamientos. En la actualidad el público no acepta automáticamente cualquier innovación, sino que hace un balance entre su utilidad y sus riesgos.

Los diferentes campos de la ciencia y la tecnología participan en el progreso de la calidad de vida y en la modificación de nuestra estructura social. Ello afecta a nuestro modo de vivir y de trabajar, curarnos, comunicarnos, trasladarnos e incluso hacernos más cultos. Analizar el progreso de la calidad de vida exige hoy examinar algunos aspectos *éticos*, *ambientales* y de *sostenibilidad*, para disipar dudas sobre el respeto a la persona humana, su único beneficiario, y asegurar que las mejoras generales no impongan sacrificios inaceptables a una parte de la sociedad.

2. Ciencia, cultura y sociedad en Europa y España

EN capítulos anteriores se dejó constancia de los grandes avances de la ciencia europea. Aquí vamos a repasar brevemente algunos de los desarrollos culturales que los acompañaron, y que también contribuyeron directamente a la calidad de vida de su época.

En el mismo siglo XIX que presencié los extraordinarios descubrimientos científicos que hemos reseñado en capítulos previos, se publicó en la década de los 50 *Madame Bovary* de Flaubert; en la década de los 60 *Los miserables* de Victor Hugo; en los 70 *Una temporada en el infierno* de Rimbaud; en los 80 *Los hermanos Karamazov* de Dostoievski; y en los 90 *Cirano de Bergerac* de Rostand. De puertas adentro y en estas mismas décadas, la espléndida transición entresiglos de nuestra literatura se hizo bien patente en *La Regenta* de Clarín, *Pepita Jiménez* de Valera, *Misericordia* y *Tristana* de Galdós, y *Los Pazos de Ulloa* de Pardo Bazán.

Por lo que a España respecta, la visión crítica con que hoy contemplamos aquella época era ya bien patente para sus contemporáneos. En este sentido se expresó don Cipriano Segundo Montesinos, Duque de la Victoria, miembro de la Real Academia de Ciencias durante la segunda mitad completa del siglo XIX y Presidente de la Institución en las dos décadas finales del siglo (1882-1901), cuando con motivo de su contestación al discurso de don Práxedes Mateo Sagasta en 1897 decía: "... cuando nuestros Gobiernos se afanaban solícitos y generosos por restaurar y fomentar los estudios en España, sorprendiéndonos este tumultuoso y en todos sentidos agitado siglo XIX, en cuyo primer tercio bastante hicimos con lograr salvarnos de la borrasca política y admi-

nistrativa que en contra nuestra muy en sus albores se desató, y que en diversas ocasiones nos puso muy a punto de perecer, y amagó concluir más de una vez con la personalidad y la vida de la nación española”. Aunque bastante hiciéramos con salvarnos de la borrasca política, no se pudo o supo evitar que la ciencia, la técnica y la universidad descendieran hasta confundirse con el ruido de fondo social de las décadas centrales del siglo.

El espíritu crítico de unas cuantas personalidades aisladas intentó despertar una cierta inquietud por el despegue de nuestra ciencia y técnica. De nuevo es Rodríguez Carracido un ejemplo cuando en sus *Estudios histórico-críticos de la ciencia española* afirma: “La idea de la inexcusable colaboración del medio social es la que conviene inculcar a todas las clases de nuestra patria para que presten su concurso al cultivo de la ciencia, y así cuando florezca y fructifique podrán llamarla suya”.

Para analizar la comprensión actual de la ciencia convenirá repasar algunos de sus recientes avances, en particular sobre nuestra situación en el universo. Sabemos hoy que el Sol es una estrella entre las cien mil millones que forman nuestra galaxia, la Vía Láctea, que a su vez es solo una en un universo con decenas de millardos de galaxias; que el tamaño de la Vía Láctea es tal que la luz tarda unos cien mil años en atravesarla; que se ha deducido la existencia de agujeros negros con dos mil millones de veces la masa del Sol; que se ha detectado la presencia de CO en los quasares, los astros más lejanos divisados; que en el universo predomina una materia oscura que no se ve; que los telescopios de neutrinos, como los antiguos de cloro-argón o los modernos de agua pura como el Super-Kamiokande en Japón o de hielo como

el IceCube de la Antártida, han sido capaces de observar neutrinos emitidos por el Sol y otras fuentes, y de llevar a la conclusión de que los neutrinos tienen masa, aunque diminuta; que a unos 10^{-35} s de la Gran Explosión inicial (*Big Bang*) el universo se *enfrió* a 10^{27} K, experimentó una transición de fase (similar a la del agua al convertirse en hielo) en la que se liberó una gran cantidad de energía, lo que provocó su expansión por un factor de al menos 10^{30} en 10^{-33} s (fase inflacionaria); que en 1965 Penzias y Wilson, premios Nobel 1978, detectaron casualmente, en una antena cuerno de los laboratorios Bell, una débil radiación de fondo de microondas cuyo origen cósmico iba a revolucionar la cosmología; que los fotones de dicho fondo que ahora observamos proceden de cuando el universo se hizo transparente a la luz, al cabo de unos 380.000 años del Big Bang; que el satélite COBE⁸ (Cosmic Background Explorer), lanzado en 1989, encontró en 1992 anisotropías en dicha radiación de fondo, signatura de las semillas primigenias que darían lugar mucho más tarde, por acreción gravitacional, a las grandes estructuras astrofísicas; que la expansión actual del universo, descubierta por Edwin Hubble⁹, es acelerada; que la interacción débil no es invariante bajo Paridad, y permite distinguir entre izquierda y derecha en el Cosmos; que la violación de la simetría PC (Paridad por Conjugación de Carga) es responsable, junto al desequilibrio termodinámico en alguna época primitiva, de que la materia domine a la antimateria en nuestro universo; que los estallidos de radiación gamma, con las luminosidades más altas de todo el universo, pueden ser debidos a colapsos supernova especialmente violentos; etc.

En medicina la *terapia génica* se aplica ahora a enfermedades adquiridas como cáncer, sida y trastornos neurodege-

nerativos tipo Parkinson y Alzheimer; las especies transgénicas animales y vegetales con propiedades modificadas han conseguido un gran éxito en la producción de materiales humanos y como modelos de enfermedades del hombre; hay grandes perspectivas en la manipulación de los vectores virales, las vacunas-DNA, la acción inhibidora de los antisépticos, la terapia celular y los biomateriales; se abren variadas posibilidades farmacológicas en la aplicación de nuevos mecanismos de transducción de señales celulares; es cada vez más eficaz la manipulación de células sexuales y embriones fecundados *in vitro*; hay grandes oportunidades para el desarrollo de aplicaciones de las redes neuronales y la lógica borrosa, la realidad virtual, la biodiversidad y la nanotecnología molecular como alternativa a la electrónica con base de silicio.

Se abren a la industria biofarmacéutica nuevas áreas de conocimiento –por ejemplo, la *genómica*, la *proteómica* y la *bioinformática*–, nacidas como consecuencia de los proyectos y logros en la *secuenciación del genoma humano*, con expectativas fantásticas aunque no inmediatas. La utilización de *células madre* con finalidades terapéuticas o de reproducción ofrece grandes posibilidades, y su obtención a partir de células adultas evitaría las principales objeciones éticas planteadas.

Aparecen áreas nuevas basadas en las *ciencias de la computación* y las *computadoras super-rápidas*, con posibilidades de cálculo de decenas de billones de operaciones por segundo (40 Teraflots); etc. Todos estos hechos han cambiado por completo no sólo la investigación en si y los hábitos de los científicos, sino la faz misma de la sociedad actual en los países desarrollados.

3. Ciencia y sociedad contemporáneas

CON todo su bagaje conceptual y metodológico, la ciencia continúa día a día ganando terreno a lo desconocido, acumulando datos y teorías cuyo valor es indiscutible, sin que por ello dejen de ser *falsables* (susceptibles de ser modificados o rechazados por nuevos datos experimentales), y sin que se conviertan en algo dogmático y más allá de la crítica. Pero cabe preguntarse, ¿es consciente la sociedad de ser la receptora de la acción de la ciencia?, o lo que es igual ¿se contempla a la ciencia como producto social?; ¿en qué medida la cultura de nuestra sociedad actual es capaz de asimilar, o simplemente de tomar nota de los descubrimientos de la ciencia y la tecnología?; ¿relaciona nuestra cultura social la calidad de vida moderna con la ciencia fundamental?; ¿es adecuada la alfabetización científica de la sociedad para alcanzar la comprensión imprescindible para la toma de decisiones políticas?; ¿intenta la educación científica compartir con la tradicional cultura literaria su importancia en las actividades de la vida moderna? Estos interrogantes se contemplan en la investigación moderna en ciencias sociales, y son parte del formidable debate epistemológico de los años 60 y 70, con la participación de la escuela de Francfort y las tesis iconoclastas y provocadoras de Lakatos y Feyerabend.

La imagen inocente de la ciencia se ha visto enturbiada por circunstancias como la que inspiró la sentencia del filósofo Passmore: “los físicos han conocido el pecado”. Pese a ello, el *cientifismo* es una confianza y un ambiente; es la impregnación por la ciencia de multitud de hechos familiares; es su total vinculación a los problemas económicos,

sociales y culturales. En este ambiente repleto de logros y avances, de beneficios y riesgos reales o hipotéticos, comienza a jugar un papel decisivo la estructura de la organización nacional e internacional de la creación científica, de la promoción de la investigación y de sus aprovechamientos.

Es digno de reseñar el enfrentamiento entre la *cultura tradicional*, que suele apropiarse en exclusiva del término cultura, y los conocimientos científicos, como si el edificio intelectual de la interpretación del mundo físico no fuera el más maravilloso trabajo colectivo del pensamiento y la imaginación del hombre. El término *intelectual* se ha circunscrito esencialmente a la gente de letras, excluyéndose de él a físicos como Maxwell, Einstein, Bohr, Heisenberg o Dirac, matemáticos como Gauss, Riemann y Gödel y biólogos como Fleming y Dogmagk, cuyas influencias sobre nuestro mundo contemporáneo son innegables.

Uno de los científicos modernos de mejor formación literaria clásica, el Nobel británico Peter Medawar, se refería al sinsentido de que un científico sin conocimientos de música o arte sea considerado como analfabeto, mientras que las gentes de letras no se hayan sentido nunca obligadas a conocer los rudimentos de la ciencia para considerarse cultas.⁹

Infinidad de ejemplos reflejan esta contradicción. En los últimos años ha emergido una intelectualidad científica que a la vez que investiga difunde con solvencia las cuestiones más importantes de nuestros días, conectando directamente con el público con un más que aceptable estilo literario. Así, Monod –con *El azar y la necesidad*–, Jacob –con *La estatua interior*–, Dawkins –con *El gen egoísta* y *El relojero ciego*–, Gould –con *El dedo pulgar del panda* y *La vida maravillosa*–, Margulis –con *Microcosmos*–, Gell-Mann –con *El quark y el*



*Real Academia de Bellas Artes de San Fernando aprobada definitivamente
por Real Decreto de 12 de abril de 1752.*

jaguar–, Hawking –con *Una breve historia del tiempo*–, Penrose –con *La nueva mente del emperador*– y Davis –con *Los mitos de la materia*–.

Frente a estos datos objetivos, en la reciente publicación *Peut-on encore débattre en France*, los principales *intelectuales franceses* –entre los que obviamente no aparece ninguna de las grandes figuras científicas del momento– se plantean la elección de los grandes temas del debate intelectual en Francia, que serían a su juicio la *mundialización*, el *liberalismo* y el *análisis del pasado totalitario*: ni una sola mención a problemas científicos, ni siquiera aquellos con importantes repercusiones éticas, políticas o económicas.

En los últimos años la relación *ciencia-sociedad* plantea una serie de necesidades:

Crear una nueva cultura de diálogo entre los científicos y el público con el fin de que *la sociedad se implique en la empresa científica*.

Prestar atención a los valores y actitudes del público, así como al papel de las ciencias sociales en el análisis de los fenómenos que afectan a la sociedad.

Adaptar las políticas científicas a las necesidades de la sociedad y fomentar la participación social en las distintas etapas de la empresa investigadora.

Lograr que los científicos colaboren con los medios de comunicación.

Atender la posible falta de confianza del público en el asesoramiento científico a los Gobiernos, logrando que todos los organismos e instituciones implicados ofrezcan la mayor claridad en sus aportaciones.

Ante necesidad social de una comprensión pública de la ciencia, conviene considerar la naturaleza de esta *compren-*

sión, el público destinatario, la ciencia a comunicar, y las variaciones y características de la transmisión.

La noción de comprensión implica el reconocimiento de la ciencia como ingrediente cultural imprescindible. Por su parte, los contenidos científicos y tecnológicos y su transmisión y comunicación deberán adaptarse al fragmento social receptor —el público— y a sus necesidades culturales y profesionales de ciencia en general o de aspectos particulares de la misma. Existe un público que es experto en una rama de la ciencia pero necesita conocimientos en campos limítrofes, por ejemplo un experto en nuevos materiales que deba conocer la biogénesis del hueso, o un experto en legislación de patentes que deba estar al día en los avances de la biotecnología. Otros pertenecen a instituciones de gobierno o de decisión política que necesitan información actualizada en muy variadas cuestiones: energéticas, biológicas —transplantes, transgénesis, empleo de células embrionarias, fecundación *in vitro*, etc.—, ambientales, etc. Otro público tiene un nivel cultural que debiera familiarizarle con conocimientos científicos medios como la resolución de la ecuación de segundo grado, el contenido en vitaminas de los alimentos, los mecanismos de acción de antibióticos, los conceptos de radiactividad y radiaciones, etc.; a éste deberían comunicársele los avances recientes de la ciencia y la tecnología —la exploración del espacio, las partículas subatómicas, las modalidades energéticas y el medio ambiente, la política y la gestión del agua, la biotecnología, los biomateriales, las nuevas imágenes médicas, las políticas de I+D, la evolución humana, etc. Otros pertenecen a sectores profesionales, como por ejemplo el profesorado de la enseñanza media, a los que favorece en gran medida el conocimiento de los avances cien-

tíficos en los campos de las matemáticas, la física, la química y la biología. Otros, como los preuniversitarios, pueden necesitar información relativa a los nuevos campos del conocimiento científico –la bioinformática, los nuevos materiales, las ciencias de la computación, el ambiente, la proteómica, la biotecnología, etc.–. Finalmente otros pertenecen a lo que podríamos considerar como opinión pública en general, ignorante del conocimiento científico pero deseosa de alcanzarlo; a estos había que instruirles en aquellos aspectos científicos que dominan la cultura actual e influyen en sus condiciones de vida, permitiéndoles formar su propio criterio en cuestiones de sanidad, nutrición, avances tecnológicos –energía nuclear y energías renovables, telecomunicaciones, ingeniería génica, riesgos geológicos, etc.–.

La interacción del científico con la sociedad destinataria de su información dependerá pues en cada caso del público al que va dirigida. Ello obligará a construir un cuerpo de doctrina didácticamente adecuado, dependiendo también del medio utilizado –conferencias, prensa, radio, televisión, museos, etc.–.

La ciencia y la tecnología se sitúan en el corazón de la economía y del funcionamiento de la sociedad e influyen cada vez en mayor medida sobre la vida de los hombres. Puede que no existan hoy problemas planteados a los ciudadanos en cuya solución no participe en mayor o menor medida la ciencia y la tecnología. La aceptación de este hecho coexiste con un cierto grado de escepticismo sobre las consecuencias sociales y éticas del progreso del conocimiento: a la vez que los avances científicos y tecnológicos deberán pues considerarse los *cambios sociales* y los *intereses políticos, económicos, financieros y comerciales* asociados a dichos avan-

ces. Los responsables políticos deberán elaborar políticas de investigación que respondan a las necesidades auténticas de la sociedad, administrar con prudencia los posibles riesgos, y conjugar los imperativos de libertad de investigación y de acceso al conocimiento con los aspectos éticos del progreso tecnológico.

Es imprescindible desarrollar estas relaciones por su incidencia sobre la calidad de vida en general y en particular sobre la competitividad, el crecimiento y el empleo. La importancia de una comprensión pública de la ciencia ha llevado a la Unión Europea a la creación del proyecto *espacio europeo de la investigación*, como componente básico de la economía y la sociedad del conocimiento europeas.

Terminaré con un extracto del editorial titulado “Science in the 21st Century” que el Presidente Clinton publicó en la revista *Science* (276, 1951, 1997):

“Imagine a new century, full of promise, moulded by science, shaped by technology, powered by knowledge. We are now embarking on our most daring explorations, unravelling the mysteries of our inner world and charting new routes to the conquest of disease. We must not shrink from exploring the frontiers of science. But as we consider how to use the fruits of discovery, we must also never retreat from our commitment to human values, the good of society, our basic sense of right and wrong.

”Science often moves faster than our ability to understand its implications, leaving a maze of moral and ethical questions in its wake. The Internet can be a new town square or a new Tower of Babel. The same computer that can put the Library of Congress at our fingertips can also be used by purveyors of hate to spread blueprints for bombs. The

same knowledge that is developing new life-saving drugs can be used to create poisons of mass destruction.

”Science has no soul of its own. It is up to us to determine whether it will be used as a force for good or evil. We must decide together how to apply ethical and moral principles to the dazzling new discoveries of science. Here are four guideposts.

”First, science and its benefits must be directed toward making life better for all Americans, never just a privileged few. Its opportunities and benefits should be available to all. Science must not create a new line of separation between the haves and the have-nots, those with and those without the tools and understanding to learn and use technology.

”In the 21st century, a child in a school that does not have a link to Internet or the student who does not have access to a computer will be like the 19th-century child without school books. That is why we are ensuring that every child in every school, no matter how rich or poor, will have access to the same technology by connecting every classroom and library to Internet by the year 2000 [...].

”Second, none of our discoveries should be used to label or discriminate against any group or individual. With stunning speed, scientists are now moving to unlock the secret of our genetic code. Genetic testing has the potential to identify hidden inherited tendencies toward disease and to spur early treatment. But that information could also be used, for example, by insurance companies and others to discriminate against and stigmatize people.

”Third, technology should not be used to break down the wall of privacy and autonomy free citizens are guaranteed in

a free society. The right to privacy is one of our most cherished freedoms [...].

”Fourth, we must always remember that science is not God. Our deepest truths remain outside the realm of science. We must temper our euphoria over the recent breakthrough in animal cloning with sobering attention to our most cherished concepts of humanity and faith [...].

”If we hold fast to these principles, we can make this time of change a moment of dazzling opportunity for all Americans. Science can serve the values and interests of all Americans, but only if all Americans are given a chance to participate in science.”

NOTAS

1. Sin que haya desaparecido por completo la sensación de extrañeza ante fenómenos como el experimento de la doble rendija o el *entrelazamiento* o *enredo* (*entanglement*, en inglés), sin análogos en nuestra experiencia cotidiana, muchas de las aparentes paradojas de la mecánica cuántica se contemplan hoy con mayor serenidad. En bastantes casos la extrañeza provenía de un planteamiento inadecuado de los problemas, que enfatizaba los aspectos sorprendentes en vez de procurar entenderlos, y con un enfoque adecuado desaparecen o se atenúan. En todo caso, la extrañeza que subsiste debe referirse no a la mecánica cuántica, que es solo una teoría que intenta reproducir el comportamiento observado de la naturaleza, sino a esta misma, que no es como nuestros prejuicios nos han hecho creer a veces. Son los experimentos los que tienen la última palabra, y si

los resultados rechazan algunas ideas del “sentido común” (y confirman de paso las predicciones de la mecánica cuántica), solo nos queda modificar nuestro sentido común, ya que no podemos cambiar la naturaleza. El presente trabajo abunda en ejemplos de cómo ideas universalmente aceptadas en algún momento, como el geocentrismo, los cuatro elementos (fuego, aire, agua y tierra), el flogisto, etc., han tenido que ser totalmente abandonadas ante la presión de los hechos experimentales.

2. La sonda comenzó sus observaciones del clima y la geología de Marte en febrero de 2002, dedicando especial atención a la búsqueda de agua y de ambientes susceptibles de permitir la existencia de vida. Se espera que su misión se extienda al menos un año marciano (dos años y medio terrestres) y que facilite la comunicación con otras misiones norteameri-

canas, europeas y japonesas cuya llegada a Marte está prevista en un futuro próximo.

3. La construcción se ha retrasado. El edificio y la estructura de acero del telescopio de 27 m de altura están ya contruidos pero los 42 espejos hexagonales de 1,9 m de diámetro y 470 kg de peso están empezando a llegar a finales de 2003. Se confía en que el telescopio pueda entrar en funcionamiento en 2004.

4. En los últimos tiempos han sucedido muchas cosas: los participantes son ahora la Unión Europea, Japón y Canadá, que presentan candidatos para la localización del reactor, más los Estados Unidos, Rusia, China y Corea del Sur, que no lo hacen. La distribución del presupuesto es la siguiente: 10 por ciento el país en el que se construya el reactor; 20 por ciento la comunidad europea, más otro 10 por ciento adicional si finalmente se construye en Europa; el resto a repartir entre los restantes socios del proyecto. Europa ofrece como candidato Caradache en Francia, habiendo rechazando la propuesta de Vandellós en Tarragona a pesar de la oferta española de llegar al 20 por ciento de los gastos en caso de ser elegida. Caradache tendrá que

competir ahora con las propuestas de Canadá y Japón.

5. El proyecto se ha completado el 14 de Abril de 2003.

6. La importancia de la Resonancia Magnética Nuclear ya fue “premiada” con el Premio Nobel de Física 1992 (Felix Bloch y Edwards Mills Purcell); y ha vuelto a ser reconocida con la concesión del Premio Nobel de Medicina 2003 al químico Paul C. Lauterbur de la Universidad de Illinois y al físico Peter Mansfield de la Universidad de Nottingham; al primero por la aplicación de la técnica a la detección no invasiva de estructuras internas del organismo, y al segundo por los desarrollos matemáticos que han permitido procesar los datos.

7. En realidad el Quinto Programa Marco ha terminado ya, pero he preferido dejar el texto tal como lo escribió el Prof. Martín Municio, dado que el Sexto Programa será citado muy brevemente.

8. El 11 de febrero de 2003 hizo público la NASA el análisis de los espectaculares datos enviados por la sonda WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*), que han permi-

NOTAS

tido estimar con precisión insospechada un puñado de datos cosmológicos de indudable importancia, entre ellos la edad del universo desde la Gran Explosión (13,7 millardos de años), su ritmo de expansión, su composición en materia bariónica, materia oscura y energía oscura, etc., necesarios para la precisión de la Nueva Cosmología y para someter a comprobación modelos como la inflación.

9. Otro crítico comentaba que los mismos intelectuales ingleses que se avergonzarían de no saber quiénes fueron Virginia Woolf y el grupo de Bloomsbury, no tienen reparo en ignorar la personalidad y la obra de su compatriota y contemporáneo el

físico P. A. M. Dirac. Sin embargo la influencia de Dirac en el mundo actual a través de la Mecánica Cuántica, base de toda la física moderna, sólo puede compararse dentro del grupo con la del economista John Maynard Keynes, y ha sido mucho mayor que la de cualquiera de sus literatos y artistas. Y si pasamos a España, basta con recordar que muchos políticos e intelectuales se excusan de su total ignorancia científica diciendo jocosamente “es que soy de letras”. ¿Se concedería la consideración de intelectual a alguien que se jactase de desconocer lo que es un soneto, una pintura al fresco o una sonata diciendo “es que soy de ciencias”?

BIBLIOGRAFÍA

- AILES C P (1991) Assessment of Audiences for International S&T Information. SRI International, Arlington Va.
- ALBERTS B M, SHINE K I & WULF W A (1998) Actions are needed to promote research sharing. Statement, September 8. En: www2.nas.edu/new/21be.html.
- ALIC J A (1992) Beyond Spinoff: Military and Commercial Technologies in a Changing World. President and Fellows of Harvard College, Cambridge Mass.
- ALL EUROPEAN ACADEMIES (2001) Science, Society and Culture. Response to the proposal for the Framework Programme 2002-2006 of the European Community. ALLEA's Office, Amsterdam.
- ASHER I, KEYNAN A & ZADOK M (1995) Strategies for the National Support of Basic Research: An International Comparison. Proceeding of an International Conference Sponsored by The Israel Academy of Sciences and Humanities The Charles H Revson Foundation. IASH, Israel.
- ASSOCIATION OF UNIVERSITY TECHNOLOGY MANAGERS INC (2000) AUTM Licensing Survey, Fiscal Year 1991-1999.
- BLUMENTHAL D, CAMPBELL E, CAUSINO N & LOUIS K (1996) Participation of Life-Science Faculty in Research Relationships with Industry. The New England Journal of Medicine 23: 1734-1739.
- BLUMENTHAL D, CAMPBELL E G, ANDERSON M S, CAUSINO N & LOUIS K S (1997) Withholding Research Results in Academic Life Science. Journal of American Medical Association 277 (15): 1224-1228.
- BRAINARD J & SOUTHWICK R (2000) Congress Gives Colleges a Billion-Dollar Bonanza in Earmarked Projects. The Chronicle of Higher Education 46 (July 28): A29.
- BRAINARD J & SOUTHWICK R (2001) A Record Year at the Federal Trough: Colleges Feast on \$1.67 in Earmarks. The Chronicle of Higher Education 47 (August 10): A20.
- BRANSCOMB L, FLORIDA R, HART D, KELLAR J & BOVILLE D (1997) Investing in Innovation: Toward a Consensus Strategy for Federal Technology Policy. Harvard University Press, Cambridge Mass.
- BRANSCOMB L, ed (1995) Empowering Technology. MIT Press, Cambridge Mass.

BIBLIOGRAFÍA

- BUSH V (1960) Science - The Endless Frontier: A Report to the President on a Program for Postwar Scientific Research. National Science Foundation, Washington DC.
- CALLAN B, COSTIGAN S S & KELLER K H (1999) Exporting U.S. High Tech: Fact and Fiction About the Globalization of Industrial R&D. Council on Foreign Relations, New York. En: www.foreignrelations.org/public/pubs/global_141.html.
- CARNEGIE COMMISSION (1992) Enabling the Future: Linking Science and Technology to Societal Goals. Carnegie Commission on Science, Technology, and Government, New York.
- CARNEGIE COMMISSION (1993) Science, Technology, and Government for a Changing World: The Concluding Report of the Carnegie Commission on Science, Technology, and Government, New York.
- CARNEGIE COMMISSION (1994) Enabling the Future. Linking Science and Technology to Societal Goals. A Report of the Carnegie Commission on Science, Technology, and Government, New York.
- CHALK R M, ed (1998) Science, Technology, and Society. AAAS, Washington.
- CLARK R M (1995) Scientific and Technical Intelligence Analysis. En: H Bradford Westerfield, ed. Inside CIA's Private World. Yale University Press, New Haven Conn. Pp 293-297.
- COBURN C, ed (1995) Partnerships: A Compendium of State and Federal Cooperative Technology Partnerships. Battelle Press, Columbus Ohio.
- COMISIÓ ASSESORA DE CIÈNCIES I TECNOLOGIA DE LA GENERALITAT DE CATALUNYA (2001) Informe relativo a los incentivos fiscales para el fomento y consolidación de las actividades de Investigación y Desarrollo. Generalitat de Catalunya: Departament d'Universitats i Societat de la Informació, Barcelona.
- CONCEIÇÃO P, GIBSON DV, HEITOR MV & SHARIF S, eds (2000) Science, Technology, and Innovation Policy. Opportunities and Challenges for the Knowledge Economy. International Series on Technology Policy and Innovation. The IC² Institute. The University of Texas at Austin; and The Center for Innovation, Technology and Policy Research, Instituto Superior Técnico, Lisbon, Portugal. Quorum Books, Westport.
- CONFERENCE BOARD (1997) Perspectives on a Global Economy. Technology, Productivity, and Growth. USA and German Issues. The Conference Board, New York.
- COMMITTEE ON SCIENCE, ENGINEERING, AND PUBLIC POLICY (1999) Capitalizing on Investments in Science and Technology. National Academy Press, Washington DC.
- COUNCIL OF ECONOMIC ADVISORS (1995) Supporting Research and Development to Promote Economic Growth: The Federal Government's Role. Council of Economic Advisors, Washington DC. En: ww.whitehouse.gov/WH/EOP/CEA/econ/html/econ-top.html.
- COUNCIL ON COMPETITIVENESS (1996) Endless Frontier, Limited Resources: U.S. R&D Policy for Competitiveness. Council on Competitiveness, Washington DC.

BIBLIOGRAFÍA

- DEFENSE ADVANCE RESEARCH PROJECTS AGENCY STRATEGIC PLAN 2003 DARPA, Washington DC.
- EUROPEAN COMMISSION (1997) Second European Report on S&T Indicators. Brussels.
- EUROPEAN COMMISSION (1997) The Globalising Learning Economy: Implications for Innovation Policy. Targeted Socio-Economic Research. Sci Res Develop. Directorate-General; Science, Research and Development, EUR 18307 EN.
- EUROPEAN SCIENCE FOUNDATION (2003) New Structures for the support of high-quality research in Europe. A report from a High Level Working Group constituted by the European Science Foundation to review the opinion of creating a European Research Council. European Science Foundation.
- FLORIDA R (1999) The Role of the University: Leveraging Talent, Not Technology. Issues in Science and Technology (Summer). En: www.nap.edu/issues/15.4/florida.htm.
- FLORIDA R (1998) Other Countries' Money," Technology Review, March/April, p 31.
- FORMAN P & SÁNCHEZ-RON JM, eds (1996) National Military Establishments and the Advancement of Science and Technology. Studies in 20th Century History. Boston Studies in the Philosophy of Science, vol 180. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- GAMBARDELLA A (1995) Science and Innovation. The US Pharmaceutical Industry during the 1980s. Cambridge University Press, Cambridge.
- GASSMAN O & VON ZEDTWITZ M (1998) Organization of Industrial R&D on a Global Scale. R&D Management 28 (3): 131.
- GEISLER E (2001) The Mires of Research Evaluation. The Scientist 15 (10): 39.
- GOLDMAN C A & WILLIAMS T (2000) *Paying for University Research Facilities and Administration*. Science and Technology Policy Institute – RAND, Santa Monica CA.
- GOTBAUM J (2001) Clarification of OMB A-21 Treatment of Voluntary Uncommitted Cost Sharing and Tuition Remission Costs. Memorandum M-01-06. Office of Management and Budget, Executive Office of the President, Washington DC.
- GOVERNMENT-UNIVERSITY-INDUSTRY RESEARCH ROUNDTABLE (1998) National Science and Technology Strategies in a Global Context: Report of a Symposium. National Academy Press, Washington DC.
- GOVERNMENT-UNIVERSITY-INDUSTRY RESEARCH ROUNDTABLE (1998) Openness and Secrecy in Research: Preserving Openness in a Competitive World, Brochure. National Academy Press, Washington DC.
- HUTTNER S (1999) Knowledge and the Biotech Economy: A Case of Mistaken Identity. Paper presented at the High Level CERI/OECD/NSF Forum on Measuring Knowledge in Learning Economies and Societies, Arlington VA.
- INTERNATIONAL BANK FOR RECONSTRUCTION AND DEVELOPMENT - WORLD BANK (2000) World Development Indicators, Washington DC.
- JANES M C (1996) A Review of the Development of Technology Assessment. Intern J Tech Managem (Special Issue on Technology Assessment) 11 (5/6): 507–522.

BIBLIOGRAFÍA

- JANKOWSKI J E (1998) R&D: Foundation for Innovation. *Research and Technology Management*. 41 (2): 14.
- JONES R V (1978) *The Wizard War: British Scientific Intelligence 1939-1945*. Coward, McCann & Geoghegan Inc, New York.
- KAMIEN M I & SCHWARTZ N L (1982) *Market Structure and Innovation*. Cambridge University Press, Cambridge UK.
- KEATLEY A G, ed (1985) *Technological Frontiers and Foreign Relations*, National Academy of Sciences, National Academy of Engineering, Council on Foreign Relations. National Academy Press, Washington DC.
- KORNBERG A (1995) *The Golden Helix. Inside Biotech Ventures*. University Science Books, Sausalito CA.
- KOSTOFF R N (1999) *Handbook of Research Impact Assessment*, 7th ed. DTIC Report Number ADA296021.
- Kostoff R N (1997) Peer Review: The Appropriate GPRA Metric for Research. *Science* 277 (5326): 651–652.
- LEVIN S Y & STEPHAN P (1991) Research Productivity Over the Life Cycle: Evidence for Academic Scientists. *American Economic Review* 81: 114–32.
- MARIEN B A (1998) Protecting Scientific Excellence” *Research and Technology Management* 41 (2): 39.
- MATHEWS J A (1997) A Silicon Valley of the East: Creating Taiwan’s semiconductor industry. *California Management Review* 39 (4): 26-54.
- MCCLELLAN JE & DORN H (1999) *Science and Technology in World History. An Introduction*. The Johns Hopkins University Press, Baltimore.
- McLOUGHLIN G (1994) *International Science and Technology Issues for U.S. Policy makers*. Congressional Research Service 94-733 SPR, Washington DC.
- MCNEIL I, ed (1990) *An Encyclopaedia of the History of Technology*. Routledge, London.
- MISHEL L, BERNSTEIN J & SCHMITT J (1997) *Did Technology Have Any Effect on the Growth of Wage Inequality in the 1980s and 1990s? Revised Preliminary Draft*. Economic Policy Institute, Washington DC.
- MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY AND COUNCIL ON COMPETITIVENESS (1998) *Competing Through Innovation: A Report of the National Innovation Summit*. Council on Competitiveness, Washington DC.
- NARIN F, HAMILTON K S & OLIVASTRO D (1997) The increasing linkage between U.S. technology and public science. *Research Policy* 26:317-330.
- NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES, NATIONAL ACADEMY OF ENGINEERING, INSTITUTE OF MEDICINE, AND NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1995) *Allocating Federal Funds for Science and Technology*. National Academy Press, Washington DC.

BIBLIOGRAFÍA

- NATIONAL ACADEMIES BOARD ON SCIENCE, TECHNOLOGY AND ECONOMIC POLICY (2001) Intellectual Property in the Knowledge-Based Economy. En: www4.nationalacademies.org/pd/step.nsf.
- NATIONAL ACADEMIES BOARD ON SCIENCE, TECHNOLOGY AND ECONOMIC POLICY (2001) Trends in Federal Support of Research and Graduate Education. National Academy Press, Washington DC.
- NATIONAL ACADEMY OF ENGINEERING, TECHNOLOGY & ECONOMICS (1991) A volume commemorating Ralph Landau's service to the NAE. National Academy Press, Washington DC, 1991.
- NATIONAL CENTER FOR EDUCATION STATISTICS (1999) Highlights from TIMSS. National Center for Education Statistics, Washington DC.
- NATIONAL ECONOMIC COUNCIL, NATIONAL SECURITY COUNCIL, AND OFFICE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY POLICY (1995) Second to None: Preserving America's Military Advantage Through Dual-Use Technology. Defense Technical Information Center, ADA 286779, Ft. Belvoir Va.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1991) Ending Mandatory Retirement for Tenured Faculty. National Academy Press, Washington DC.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1999) Harnessing Science and Technology for America's Economic Future: National and Regional Priorities. Office of Special Projects Policy Division. National Research Council. National Academy Press, Washington DC.
- NATIONAL SCIENCE BOARD, COMMITTEE ON INDUSTRIAL SUPPORT FOR R&D, NATIONAL SCIENCE FOUNDATION (1992) The Competitive Strength of U.S. Industrial Science and Technology: Strategic Issues. Government Printing Office, NSB-92-138, Washington DC.
- NELSON R R (1998) The agenda for growth theory: A different point of view. Cambridge Journal of Economics 22:497-520.
- NELSON R R, ROSENBLUM R S y SPENCER W J (1996) Conclusion: Shaping a new era. En: Rosenbloom R y Spencer W, eds. Engines of Innovation: U.S. Industrial Research at the End of an Era. Harvard Business School Press, Boston.
- NEW YORK TIMES (2001) Technology Intensifies the Law of Change. Interview with Gordon E. Moore (May 27).
- NONAKA I (1991) The knowledge-creating company. Harvard Business Review (November-December):96-104.
- NORWALK C T, BLACKBURN R y LAWRENCE J (1986) Aging and the Quality of Faculty Job Performance. Review of Educational Research (Fall): 265-290.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1996) National Science Education Standards. National Academy Press, Washington DC.
- NATIONAL SCIENCE FOUNDATION (1998) Research and Development in Industry. NSF, Arlington Va.

BIBLIOGRAFÍA

- OHMAE K (1990) *The Borderless World: Power and Strategy in the Interlinked Economy*. Harper Business, New York.
- OLBY RC, CANTOR GN, CHRISTIE JRR & HODGE MJS, eds (1990) *Companion to the History of Modern Science*. Routledge, London.
- ORGANIZATION OF AMERICAN STATES (1997) *Science & Technology Indicators. Iberoamerican/Interamerican*, Washington DC.
- POPPER SW & WAGNER CS (2001) *New Foundations for Growth: The US Innovation System Today and Tomorrow*. An executive summary. Science & Technology Policy Institute at RAND for the National Science and Technology Council. MR-1338.0/1.
- POPPER S, WAGNER C & LARSON E (1998) *New Forces at Work: Industry Views Critical Technologies*. RAND, MR-1008-OSTP, Santa Monica CA.
- PRESIDENT'S COMMITTEE OF ADVISORS ON SCIENCE AND TECHNOLOGY (1997) *Report to the President on the Use of Technology to Strengthen K-12 Education in the United States*. PCAST, Washington DC.
- PRESTOWITZ C V (1988) *Trading Places: How We Allowed Japan to Take the Lead*. Basic Books, New York.
- RAGHURAM N & MADHAVI Y (1996) India's Declining Ranking. *Nature* 383: 572.
- RAMO S (1985) *The Foreign Dimension of National Technological Policy*. En: Simon Ramo, ed. *Technological Frontiers and Foreign Relations*. National Academy Press, Washington DC. Pg 14.
- REICH R & MAGAZINER I (1982) *Minding America's Business*. Vintage Books, New York.
- ROACH S S (1998) *The Boom for Whom: Revisiting America's Technology Paradox*. Special Economic Study. Morgan Stanley Dean Witter, New York.
- ROCO MC y BAINBRIDGE WS (2001) *Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology*. National Science Foundation. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- ROMER P M (1990) Endogenous technological change. *Journal of Political Economy* 98:71-102.
- ROOSEVELT, PRESIDENT FRANKLIN, LETTER TO VANNEVAR BUSH, November 17, 1944, reprinted in Bush (1960).
- ROSENBERG N (1982) *Inside the Black Box*. Cambridge University Press, Cambridge UK.
- ROSENBLOOM R S & SPENCER W J (1996) The transformation of industrial research. *Issues in Science and Technology* 8(3):68-74.
- ROSENBLOOM R & SPENCER W J (1996) *Engines of Innovation: U.S. Industrial Research at the End of an Era*. Harvard Business School Press, Boston.
- SÁNCHEZ RON JM (1992) *El Poder de la Ciencia*. Historia socio-económica de la física (siglo XX). Alianza Editorial-Expo'92, Madrid.
- SCHUMPETER J (1943) *Capitalism, Socialism, and Democracy*. Harper & Row, New York.
- SCHWARTZ P & LEYDEN P (1997) *The long boom. A history of the future: 1980-2020*. En: www.wired.com/wired/archive/5.07/.

BIBLIOGRAFÍA

- SMITH A (1994) *The Wealth of Nations: An Inquiry into the Nature and Causes*. Random House, New York.
- SMITH B L R & BARFIELD C E, eds (1996) *Technology, R&D, and the Economy* The Brookings Institution and the American Enterprise Institute for Public Policy Research, Washington DC.
- SPENCER W J (1990) Research to product: A major U.S. challenge. *California Management Review* 32/2: 45-53.
- STEINBERG L (1996) *Beyond the Classroom: Why School Reform Has failed and What Parents Need to Do*. Simon and Schuster, New York.
- BOARD ON SCIENCE, TECHNOLOGY, AND ECONOMIC POLICY, NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1999) *Securing America's Industrial Strength*. National Academy Press, Washington D C.
- TASK FORCE ON ALTERNATIVE FUTURES FOR THE DEPARTMENT OF ENERGY NATIONAL LABORATORIES (1995) *Alternative Futures for the Department of Energy National Laboratories*. US Government Printing Office, Washington DC.
- THE BOSTON CONSULTING GROUP (2001) *A Revolution in R&D. How Genomics and Genetics are transforming the biopharmaceutical industry*. BCG Inc, Boston.
- THE CARNEGIE COMMISSION ON SCIENCE, TECHNOLOGY, AND GOVERNMENT, *Science and Technology in U.S. International Affairs*, New York: The Carnegie Commission on Science, Technology, and Government, January 1992, p. 40.
- COUNCIL ON COMPETITIVENESS, *GOING GLOBAL*, WASHINGTON, D.C., 1998.
- THE WHITE HOUSE (1993) *Technology for America's Economic Growth*. Washington DC, February 22.
- THE WHITE HOUSE (1994) *Science in the National Interest*. Washington DC, August 3.
- U S CONGRESS, OFFICE OF TECHNOLOGY ASSESSMENT (1990) *Helping America Compete: The Role of Federal Scientific & Technical Information*. Government Printing Office, OTA-CIT-454, Washington DC.
- U S DEPARTMENT OF COMMERCE, OFFICE OF TECHNOLOGY POLICY, FOREIGN SCIENCE & TECHNOLOGY (1996) *Information Sources: In the Federal Government and Select Private Sector Organizations*. Washington DC.
- U S GENERAL ACCOUNTING OFFICE, FOREIGN TECHNOLOGY (1990) *U S Monitoring and Dissemination of the Results of Foreign Research*, GAO Report to the Chairman, Subcommittee on Technology and National Security, Joint Economic Committee, U.S. Congress, Washington, D.C., GAO/NSAID-90-117.
- U S HOUSE OF REPRESENTATIVES, COMMITTEE ON SCIENCE (1998) *Unlocking Our Future: Toward a New National Science Policy*. U.S. Congress, Washington DC.
- US OFFICE OF MANAGEMENT AND BUDGET (2000) *Cost Principles for Educational Institutions*. Circular A-21. US Government Printing Office, Washington DC.
- US OFFICE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY POLICY (2000) *Analysis of Facilities and Administrative Costs at Universities*. US Government Printing Office, Washington DC.

BIBLIOGRAFÍA

- US PATENT AND TRADEMARK OFFICE (2000) Technology Assessment and Forecast Report, U.S. Universities and Colleges, 1969–99. US Government Printing Office, Washington DC.
- WAGNER C S (1995) Techniques and Methods for Assessing the International Standing of U.S. Science. RAND, MR-706.0-OSTP, Santa Monica CA.
- WORLD TECHNOLOGY EVALUATION CENTER (1997) Electronics in the Pacific Ri. International Technology Research Institute, Loyola College, Baltimore Md.
- WORLD'S SCIENTIFIC ACADEMIES (2000) Transition to Sustainability in the 21st Century. The Contribution of Science and Technology. A Statement of the World's Scientific Academies.
- WULF W A (1998) The education challenge. Speech before the National Forum on Harnessing Science and Technology for America's Economic Future, Washington DC.

BIOGRAFÍAS

PEDRO GARCÍA BARRENO: *Doctor en Medicina con especialidad en Cirugía, formado en el Hospital Provincial de Madrid y en los Hospitales de las Universidades de Cardiff y norteamericanas de Michigan y de Texas. Actualmente regenta la cátedra de fisiopatología quirúrgica de la Universidad Complutense. Es, también, subdirector de investigación del Hospital General Universitario Gregorio Marañón de Madrid, Académico numerario de la Real Academia de Ciencias exactas, físicas y naturales y Vocal-Bibliotecario de su Junta de Gobierno, y Secretario General del Instituto de España. Fellow de la Royal Society of Medicine del Reino Unido, profesor asociado en el Departamento de Análisis Matemático de la Facultad de Matemáticas de la Universidad Complutense, Diplomado en Informática Médica por el Instituto de Informática del Ministerio de Educación y Ciencia y Máster en «Internacional Business Administration» por el Instituto de Empresa.*

ALBERTO GALINDO TIXAIRE: *Licenciado en Ciencias Exactas por la Universidad de Zaragoza, Doctor en Ciencias Físicas por la Universidad Central de Madrid, Catedrático de Física Teórica, fundador y primer Director del Grupo Interuniversitario de Física Teórica, miembro del primer Scientific Council del Erwin Schrödinger Institute of Mathematical Physics de Viena. Entre otros reconocimientos pueden citarse la Medalla de Física de la Real Sociedad Española de Física y Química, 1970, el Premio Nacional de Investigación en Física, 1977, el Premio Nacional de Investigación "Ramón y Cajal", 1985 y el Premio Aragón 1991 a la Investigación Científico-Técnica. Es Académico Electo de la Academia de Ciencias Exactas, Físico-Químicas y Naturales de Zaragoza, Miembro de la Academia Europaea y Académico de Número de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.*

JUAN PÉREZ MERCADER: *Doctor en Ciencias Físicas por la Universidad Complutense, y Máster en Matemáticas y Física Teórica por el Trinity College de Dublín y Máster en Filosofía por el City University de Nueva York. Ha focalizado su actividad investigadora en la aplicación de la Física Teórica al conocimiento de universo, habiendo trabajado en los estudios sobre la desintegración de protón, la supercuerdas, el problema de la constante cos-*

BIOGRAFÍAS

mológica, la materia oscura, la irreversibilidad del tiempo, entre otros fenómenos cosmológicos. A esta actividad científica hay que añadir su labor docente en destacadas universidades de Europa y Estados Unidos, enseñando física o dirigiendo tesis doctorales. En la actualidad es Director del Centro de Astrobiología, Secretario del Comité que representa a España en la Internacional Union for Pure Astro-Exo-Biology Network, Presidente de la Junta Rectora del Parque Natural de Doñana, Profesor de Investigación del CSIC, entre otros cargos Académicos.

DANIEL MARTÍN MAYORGA: Ingeniero de Telecomunicación por la Universidad Politécnica de Madrid. Miembro de la Academia Europea de Ciencias y Artes, de la Academia Argentina de las Artes y Ciencias de la Comunicación, del Capítulo Español del Club de Roma y del patronato de la Fundación Hospital Gregorio Marañón. Escritor, crítico de libros y conferenciante sobre telecomunicaciones, tecnología y la relación de ésta con la sociedad y la lengua española.

GUILLERMO GARCÍA ALCAINE: Doctor en Ciencias Físicas por la Universidad Complutense de Madrid. En la actualidad es Profesor Titular de Física Teórica en la Facultad de Físicas de la U.C.M. Su campo de interés son los fundamentos de Mecánica Cuántica.

JOSÉ LUIS SOTELO SÁNCHO: Catedrático de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Complutense. Ha sido Catedrático y Decano de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Extremadura y Vicerrector de Investigación de la Universidad Complutense. Académico Correspondiente de la Real Academia de Ciencias. Su actividad investigadora se centra en el estudio de procesos catalíticos, de adsorción y de oxidación avanzada de interés industrial.

MERCEDES MARTÍN-MUNICIO DE MONTAUD: Titulada en Relaciones Humanas por la Universidad de Comillas. Traductora.

OTRAS PUBLICACIONES DE LA ACADEMIA
EUROPEA DE CIENCIAS Y ARTES
- ESPAÑA -

- EL PAPEL Y LA IMPORTANCIA DE LAS ACADEMIAS EN EL SIGLO XXI.
Encuentro Internacional en Madrid, abril 1997.
- DESAFÍOS DE EUROPA EN EL SIGLO XXI.
Encuentro Internacional en el Museo Guggenheim. Bilbao, abril 2000.
- BENEFICIOS FISCALES EN LAS RELACIONES INVESTIGACIÓN-EMPRESA.
(Ignacio de Luis Villota y Alvaro de Juan Ledesma). Documento de Trabajo.
- INNOVACIÓN EN LA EUROPA DEL CONOCIMIENTO. (Juan Mulet). Documento de Trabajo.
- LAS FINANZAS PÚBLICAS EN LA EUROPA DE LAS NACIONES.
(José Manuel González-Páramo e Ignacio Zubiri Oria). Documento para Debate.
- LAS FINANZAS PÚBLICAS EN LA EUROPA DE LAS REGIONES.
(José Manuel González-Páramo y Carlos Monasterio). Documento para Debate.
- LA COOPERACIÓN FISCAL EN LA UNIÓN EUROPEA: LOS AVANCES NECESARIOS.
(José Manuel González-Páramo e Ignacio Zubiri Oria). Documento para Debate.
- LAS POLÍTICAS DE FOMENTO DE LA INNOVACIÓN DE LA UNIÓN EUROPEA.
(Rosa Alonso y Gonzalo León). Documento para Debate.
- LAS CONSECUENCIAS DE LA AMPLIACIÓN PARA LA POLÍTICA REGIONAL EUROPEA:
LA PERSPECTIVA ESPAÑOLA. (Carmela Martín e Ismael Sanz). Documento de Trabajo.
- EL IMPACTO DE LA AMPLIACIÓN DE LA UE EN EL COMERCIO Y EN LOS FLUJOS MIGRATORIOS
Y DE INVERSIÓN DIRECTA DE ESPAÑA.
(Carmela Martín y Jaime Turrión). Documento de Trabajo.
- LA AMPLIACIÓN AL ESTE DE LA UNIÓN EUROPEA: IMPLICACIONES AGRARIAS.
(José M.ª Sumpsi e Ignacio Atance). Documento de Trabajo.
- LOS RETOS PRESUPUESTARIOS DE LA AMPLIACIÓN DE LA UNIÓN EUROPEA.
(Ignacio Zubiri Oria). Documento de Trabajo.

ESTE LIBRO SE TERMINÓ DE IMPRIMIR
EL DÍA 15 DE NOVIEMBRE DE 2003

