INSTITUTO DE ESPAÑA
REAL ACADEMIA NACIONAL DE MEDICINA

QUANTA Y VIDA

DISCURSO
para la recepción pública del Académico Electo

EXCMO. SR. D. ALBERTO GALINDO TIXAIRE

leído el día 7 de junio de 2011

y contestación del Académico de Número

EXCMO. SR. D. CARLOS SEOANE PRADO

MADRID, 2011

INSTITUTO DE ESPAÑA
REAL ACADEMIA NACIONAL DE MEDICINA

QUANTA Y VIDA

DISCURSO
para la recepción pública del Académico Electo

EXCMO. SR. D. ALBERTO GALINDO TIXAIRE

leído el día 7 de junio de 2011

y contestación del Académico de Número

EXCMO. SR. D. CARLOS SEOANE PRADO

Depósito Legal: M. 22.484 - 2011

Fotocomposición e impresión: Imprenta Taravilla, S.L.
Mesón de Paños, 6. 28013 Madrid

ÍNDICE

Págs.

1. **INTRODUCCIÓN** 7
   - 1.1. **Agradecimientos** 7
   - 1.2. **Recuerdo de los físicos que conocí y que me precedieron en este sillón** 11
     - 1.2.1. *Julio Palacios y Martínez (1891-1970)* 11
     - 1.2.2. *Luis Bru Villaseca (1909-1997)* 12
     - 1.2.3. *José Aguilar Peris (1924-2006)* 13

2. **EL MUNDO CUÁNTICO** 15
   - 2.1. **Albores de la nueva era** 19
   - 2.2. **Indefinición objetiva** 21
   - 2.3. **Azar reglado** 22
   - 2.4. **Entrelazamiento** 24
     - 2.4.1. *Velocidades superlumínicas* 25
   - 2.5. **Discretidad** 27
   - 2.6. **Dualidad onda-partícula** 28
   - 2.7. **Complementariedad** 31
   - 2.8. **Principio de indeterminación** 32
   - 2.9. **Una ecuación extraordinaria** 35
   - 2.10. **Efecto túnel** 39
   - 2.11. **La realidad física** 40
     - 2.11.1. *Una desigualdad de Bell* 42
     - 2.11.2. *Un experimento cuántico* 45
   - 2.12. **La física cuántica y el tiempo** 49
   - 2.13. **Algunos límites de origen cuántico** 51
   - 2.14. **Los quanta y la información** 55
     - 2.14.1. *Información cuántica* 59
     - 2.14.2. *Computación clásica* 62
     - 2.14.3. *Computación cuántica* 66
     - 2.14.4. *Asalto cuántico a la complejidad* 70
     - 2.14.5. *Paseos cuánticos* 72

Págs.

2.15. **El problema de la medición** 74
2.16. **El duende de la descoherencia, darwinismo cuántico, y emergencia de la clasicidad** 80

3. **LOS QUANTA Y LAS CIENCIAS DE LA VIDA** 85
3.1. **La física, la cosmología y la vida** 86
3.1.1. *¿Qué es la vida?* 86
3.1.2. *Sobre el origen de la vida* 91
3.1.3. *Fugit irreparabile tempus: naturaleza de la flecha termodinámica* 95
3.1.4. *Magnus ab integro sæclorum nascitur ordo: origen de la flecha termodinámica* 98
3.1.5. *Curvatura de Weyl de principio a fin* 102
3.1.6. *Breve historia de algunas fuentes de energía* 104
3.1.7. *¿Vida sin fin?* 107
3.2. **La consciencia y la mecánica cuántica** 108
3.3. **El libre albedrío y la mecánica cuántica** 111
3.4. **Quiralidad en la naturaleza viva** 115
3.5. **Manifestaciones cuánticas en el fenómeno vida** 119
3.5.1. *La física cuántica en la visión* 121
3.5.2. *La fragancia cuántica* 123
3.5.3. *La brújula cuántica de los petirrojos* 125
3.5.4. *Proceso cuántico en el reino verde* 129

4. **A MODO DE EPÍLOGO** 135

5. **BIBLIOGRAFÍA** 139

DISCURSO DE CONTESTACIÓN DEL EXCMO. SR. D. CARLOS SEOANE PRADO 161

1. INTRODUCCIÓN

Ὁ βίος βραχὺς, ἡ δὲ τέχνη μακρὴ, ὁ δὲ καιρὸς ὀξὺς, ἡ δὲ πεῖρα σφαλερὴ, ἡ δὲ κρίσις χαλεπὴ (Ἱπποκράτης)[1]

Si me hallas en error en un solo punto, no debes por eso condenarme en todos. (M. Servet)

There are more things in Heaven and Earth, Horatio, than are dreamt of in your philosophy. (W. Shakespeare)

Pour le savant, croire la science achevée est toujours une illusion aussi complète que le serait pour l'historien de croire l'histoire terminée. (L. de Broglie)

Excmo. Sr. Presidente de la Real Academia Nacional de Medicina,
Excmos. Sres. Académicos,
Señoras, Señores:

1.1. **Agradecimientos**

Recibir a mi edad el honor de ser acogido en el seno de la Real Academia Nacional de Medicina ha sido para mí una fuente de alegría, solo empañada por mi temor a defraudar a sus ilustres miembros en la confianza depositada en esta humilde persona. Uno por ello a mi hondo agradecimiento, a esa «parte principal de un hombre de bien» según Francisco de Quevedo, mi propósito de contribuir a las tareas de la Academia en cuanto mis conocimientos puedan ser-

[1] La vida es breve, el arte, largo; la ocasión, fugaz; la experiencia, confusa; el juicio, difícil. (Hipócrates.)

le de utilidad. Asimismo deseo corresponder con largueza y perenne reconocimiento al afecto y consideración con que me habéis tratado desde el primer instante todos los Académicos de esta casa. De forma muy especial, quiero dejar testimonio de mi gratitud a quienes no dudaron en avalar con sus firmas mi candidatura: los Excmos. Sres. Académicos D. Diego Gracia Guillén, D. Alberto Portera Sánchez y D. Carlos Seoane Prado. A este último, más cercano a mi campo de trabajo, que aceptó amablemente la invitación de la Presidencia a contestar mi discurso, y que en todo momento que lo he requerido me ha prestado su inestimable consejo, le guardaré siempre un reconocimiento añadido.

Sería injusto no recordar aquí a mi familia; a mis padres, a mi hermana y a mi hijo Ignacio, ya fallecidos, y sobre todo, a María Luisa, mi esposa durante medio siglo, y a mis hijos Alberto y María, sin cuyo apoyo, estímulo y sacrificio este acto de ingreso nunca me hubiera tenido como protagonista.

He asistido a suficientes sesiones científicas de esta corporación como para apreciar su alto nivel científico e interdisciplinar, por lo que estoy seguro de que no me será difícil interesarles en aquello sobre lo que ha girado mayormente mi actividad. Estamos todos dedicados a investigar alguna realidad de la realidad verdadera, somos buscadores que, como afirmaba Xavier Zubiri, no poseemos verdades, sino que estamos poseídos por ellas [Zubiri 2005]. Como tal, yo soy, sencillamente, un aficionado al conocimiento, que solo descansa cuando aprende o descubre. Me gusta saber, a la luz de la ciencia actual, cómo pudo empezar todo, y cómo puede terminar todo. De paso, intento saber de qué están hechas las cosas, y los entresijos de su exquisita maquinaria. De este modo incrusto el universo en mi mollera, y como decía el gran astrónomo Claudio Ptolomeo, quiero creer, junto a todos los que buscamos, que alguna vez conseguimos encontrar algo y que así nos es dado el degustar, aunque sea en mínimas cantidades, la ambrosía de los dioses.

La gente de mi generación ha tenido el raro privilegio de ser testigos de unos cambios radicales en la sociedad y en el conocimiento. Sé lo que es vivir en un pueblo sin luz eléctrica ni agua corriente; sé lo que supone la transmisión oral de un maestro y el estudiar casi sin libros, sé lo que es viajar a lomos de un burro, y sé lo que es dormir al aire libre, en el estío, con las estrellas como bóveda. Y todo eso lo recuerdo con enorme cariño y nostalgia, como mi arcadia feliz. A diferencia de lo que vaticina el androide Roy en la película «Blade Runner», esos «momentos» no se me perdieron «en el tiempo como lágrimas en la lluvia»; por el contrario, los considero cruciales en mi devenir.

La sociedad ha sufrido grandes cambios en el pasado siglo; no es ajeno a ellos el progreso científico, exponencial en su ritmo, asombroso en su alcance. El universo, la obra maestra más exquisita jamás construida que diría Gilbert K. Chesterton, no ha dejado de sorprendernos desde que empezamos a escrutarlo con mirada indagadora. ¿Cuántas veces no hemos creído saberlo ya todo sobre él? En 1871 el gran teórico del electromagnetismo, James Clerk Maxwell, resumía en su lección inaugural de Cambridge el sentir generalizado de sus colegas (del que él disentía), con estas palabras [Maxwell 1871]: «En pocos años, todas las constantes fundamentales de la naturaleza habrán sido evaluadas de forma aproximada, y... la única ocupación que les quedará a los científicos será medirlas con otra cifra decimal más».[2] Al venerable Lord Kelvin (William Thomson) se le atribuye esta otra afirmación: «En la actualidad no hay nada por descubrir en la física. Todo lo que queda por hacer es medir con mayor y mayor precisión».[3] Albert Abraham Michelson (Nobel en Física 1907), el primer laureado Nobel estadounidense, proclamaba en 1894 que «las leyes fundamentales y los hechos físicos más importantes han sido todos descubiertos...»[4] [Michelson 1894]. Pocos años después los quanta (1900) y la relatividad (1905, 1915) iban a conmocionar los cimientos de la física.

Aun así, no aprendimos la lección, y en 1928, Max Born (Nobel en Física 1954), responsable de la interpretación probabilista de los procesos cuánticos, entusiasmado ante el éxito de la ecuación de Dirac para el electrón, decía a un grupo de visitantes de la Universidad de Gotinga que «la física, tal como la conocemos, estará terminada en seis meses»[5] [Born 1928], el tiempo necesario para aplicar dicha ecuación a la otra particular elemental entonces conocida: el protón. Cua-

[2] «...in a few years, all the great physical constants will have been approximately estimated, and [...] the only occupation which will then be left to the men of science will be to carry these measurements to another place of decimals.»

[3] «There is nothing new to be discovered in physics now. All that remains is more and more precise measurement.»

[4] «The more important fundamental laws and facts of physical science have all been discovered, and these are so firmly established that the possibility of their ever being supplanted in consequence of new discoveries is exceedingly remote...our future discoveries must be looked for in the sixth place of decimals.»

[5] «Physics, as we know it, will be over in six months».

tro años después se descubriría el neutrón, y pronto toda una plétora de partículas elementales. Y suma y sigue. Del afamado físico británico Stephen Hawking es un provocativo ensayo de 1979 en el que vaticinó el pronto final de la física teórica [Hawking 1979]. Nada más lejos. Al año siguiente se produce la revolución de las supercuerdas, cuya teoría domina desde hace tres décadas la cumbre más atractiva y ambiciosa de la física según sus seguidores, aunque abundan notables escépticos, como Sheldon Lee Glashow (Nobel en Física 1979), quien arremete en 2003 contra ella («Yo os pregunto: ¿es esto física o es filosofía?»[6]) ante su ostensible falta de predicciones testables, ante su enorme distancia al mundo de la observación [Glashow 2003]; o como el icónico Richard Phillips Feynman (Nobel en Física 1965): «los teóricos de las cuerdas no presentan predicciones, sino excusas»[7] [Feynman 1987]. La última palabra está, como siempre, en la madre Naturaleza; de momento, la teoría de supercuerdas ha proporcionado por primera vez un contaje del número de estados cuánticos de agujeros negros extremales que coincide con el esperado de la fórmula de Bekenstein-Hawking para la entropía de los mismos. Y como dice su más brillante investigador, Edward Witten (Medalla Fields 1990): «I wouldn't have thought that a wrong theory should lead us to understand better the ordinary quantum field theories or to have new insights about the quantum states of black holes» [Witten 2003]. Finalmente, no dejan de ser muy estimulantes ciertas misteriosas coincidencias entre algunas configuraciones de membranas en teoría de las supercuerdas y algunas clases de entrelazamiento de tres qubits en la teoría cuántica de la información [Duff 2010]; o cómo la correspondencia AdS/CFT de la teoría de cuerdas ha probado ser un brillante recurso computacional para resolver un problema de complejidad exponencial, a saber, la emergencia a líquidos fermiónicos de densidad no nula, tras una transición de fase cuántica a temperatura cero [Čubrović, Zaanen, Schalm 2009].

[6] «I ask you, is that a theory of physics or a philosophy?»
[7] «String theorists don't make predictions, they make excuses.»

1.2. Recuerdo de los físicos que conocí y que me precedieron en este sillón

Merecen elogio los hombres que en sí mismos hallaron el ímpetu y subieron en hombros de sí mismos. (L.A. Séneca)

He tenido la dicha de conocer a los últimos tres científicos que ostentaron la medalla n.º 20: los Excmos. Sres. D. Julio Palacios y Martínez, D. Luis Bru Villaseca, y D. José Aguilar Peris. De los tres fui compañero de claustro, y de los tres guardo un grato recuerdo. Los dos primeros, Palacios y Bru, dejaron honda huella en esta casa a lo largo de su dilatada presencia aquí; baste recordar los numerosos escritos y conferencias con que enriquecieron las actividades de esta Academia. El legado de Aguilar a lo largo de sus tres años de Académico fue, naturalmente, menos cuantioso, pero también de remarcable calidad y alcance.

1.2.1. *Julio Palacios y Martínez (1891-1970)*

Julio Palacios es una interesante y polémica figura de la física española. Es recordado por su excelente magisterio, plasmado en conocidos libros de texto, y los físicos lamentamos su obcecación antirrelativista en los últimos años de su vida, que contrasta con su admiración más temprana por la obra de Einstein [Palacios 1934].

Físico de variadas inquietudes, teórico a la par que experimental, colaboró Palacios con el famoso Heike Kamerlingh Onnes (Nobel en Física 1913). Hizo también contribuciones teóricas señaladas, una de las cuales, de 1925, tras ampliación y cambios, pero conservando el mismo título, merecería ser traducida al alemán por el propio Wilhelm Wien (Nobel en Física 1911) y publicada en 1926 en los prestigiosos *Annalen der Physik* [Palacios 1925]. Blas Cabrera, padre de la física experimental española, recogerá en 1932 estos extremos en su contestación al discurso de ingreso de Palacios en la Academia de Ciencias [Cabrera 1932].

Dicho discurso de ingreso de Palacios es una brillante pieza centrada en el principio de indeterminación de Heisenberg, mostrando en ello un conocimiento nada superficial del marco de los cuantos [Palacios 1932].

Fue J. Palacios otro de los que, como Blas Cabrera y Miguel Antonio Catalán, dieron un paso más allá, prefiriendo «hacer» Física a

«hablar» de ella. A quienes creen, equivocadamente a mi entender, que solo ha existido el Julio Palacios que se opuso a la Relatividad, les invito a leer las hermosas palabras con que otro preclaro aragonés y Académico de esta Corporación, el Excmo. Sr. D. Pedro Laín Entralgo, le despedía en 1970 con un *ultimum vale* al trazar su emocionada semblanza [Laín 1970].

Ingresó el Excmo. Sr. D. Julio Palacios y Martínez en esta Real Academia Nacional de Medicina en 1944 con un memorable discurso que llevaba por título «De la miopía y de la presbicia nocturnas», y fue contestado por el Excmo. Sr. D. Obdulio Fernández y Rodríguez, insigne químico que, muchos años después, me honraría al presentarme, junto con los Académicos Excmos. Sres. D. Armando Durán Miranda y D. Carlos Sánchez del Río, para Académico de la Real de Ciencias. El discurso de Palacios es una breve y brillante pieza en la que, con su rigor y profundidad de costumbre, analiza, y aclara, el fenómeno de la visión que acababa de ser casualmente descubierto por los españoles José María Otero Navascués y el antes citado A. Durán, en la Sección de Óptica del Instituto de Alonso de Santa Cruz, del que, a la sazón, era Subdirector el propio Palacios.

No puedo por menos de dejar aquí constancia de mi grata sorpresa cuando, al leer este discurso de D. Julio (nacido en Paniza, provincia de Zaragoza), descubrí, años ha, que había realizado sus estudios de bachillerato en Huesca, justo en el Instituto en el que yo lo haría cuatro décadas después; y qué casualidad, el mismo Instituto de Enseñanza Secundaria en el que poco antes que Palacios lo había hecho el Excmo. Sr. D. Luis Bermejo y Vida, predecesor de éste en el sillón 20. Por cierto, es un motivo de legítimo orgullo para ese Instituto, surgido en 1845 de las cenizas de la vieja Universidad Sertoriana de Huesca, el llevar desde 1934 el nombre de «I.E.S. Ramón y Cajal», en recuerdo de su alumno de fama universal.

1.2.2. *Luis Bru Villaseca (1909-1997)*

Luis Bru fue, sin duda, un destacado físico, introductor en España de la Física del Estado Sólido. Discípulo de Julio Palacios, dirigió durante casi medio siglo un nutrido grupo de investigación, que se inició con los rayos X para pasar luego a la difracción de electrones y a la microscopía electrónica. Sus grandes méritos le abrieron la puerta de los mejores laboratorios mundiales, en los que tuvo el privilegio de conocer a algunas de los personajes más señeros de la ciencia internacional, como el físico experimental Paul Scherrer y el físico teórico Wolfgang Ernst Pauli (Nobel en Física 1945), pudiendo aprender directamente de ellos.

Era un físico de una curiosidad inagotable, un ameno conferenciante cuya inquietud le arrastraba a asomarse a nuevos y fascinantes campos muy alejados de su ámbito profesional.

Ingresó en la Academia de Medicina en el año 1971, sucediendo en ella a su maestro J. Palacios. Bajo el título «Física y Biología», Bru recorre en su discurso de ingreso algunos puntos de encuentro entre estas dos extraordinarias ciencias en torno a algo que él conoce perfectamente: la óptica electrónica. Le contestó con clarividencia el Excmo. Sr. D. Agustín Bullón Ramírez, un histólogo y anatomopatólogo que conocía muy bien la utilidad de estos instrumentos para la investigación biológica.

El paso de Luis Bru por la Real Academia Nacional de Medicina fue ciertamente glorioso, lo que debe enorgullecernos a todos los físicos. La sesión necrológica en memoria del Excmo. Sr. D. Luis Bru Villaseca, celebrada en la Real Academia de Medicina en 1997, bajo la Presidencia del Excmo. Sr. D. Hipólito Durán Sacristán, recoge, además del discurso de precepto, entrañable, a cargo del Excmo. Sr. D. José Botella Llusiá, numerosos testimonios de muchos otros académicos, que resaltan los valores humanos y científicos del Prof. Bru, así como su extraordinaria labor como físico, siempre «sonriente», desde su puesto de Académico.

1.2.3. *José Aguilar Peris (1924-2006)*

José Aguilar fue, sobre todo, un magnífico maestro, de esos pocos que tienen el don de saber transmitir con claridad los conceptos más arduos. Y como sabemos, la termodinámica, el campo central de su tarea docente, abunda bien en ellos. La curiosidad científica de Aguilar, reflejada en sus conferencias y escritos, abarcó muchos otros frentes, desde cuestiones cosmológicas hasta la estructura íntima de la materia.

Otra gran virtud que quiero destacar del Prof. Aguilar es el respeto, el cariño y la admiración que siempre mostró hacia sus antecesores y maestros. Basta leer, por ejemplo, sus escritos sobre Palacios de 1981 y 1991, para la conmemoración del 90 aniversario y

del centenario del ilustre aragonés. No solo son un testimonio personal de gran valor histórico, sino que además rezuman sensibilidad, afecto y consideración.

En sus últimos años centró su atención en el problema de la energía y en el calentamiento global. Su discurso de ingreso (2003) en esta Real Academia, titulado «El efecto invernadero, el cambio climático, la crisis medioambiental y el futuro de la Tierra», es una visión pertinente, global y precisa de uno de los grandes problemas de nuestro tiempo, en cuya exposición el Excmo. Sr. D. José Aguilar Peris hace gala de su dilatada experiencia en el campo de la termodinámica y de su condición de científico comprometido con el futuro de la sociedad. La contestación, a cargo del Excmo. Sr. D. Francisco González de Posada, es una calurosa bienvenida del alumno al maestro, indispensable e insustituible para penetrar en la vida y obra del Prof. Aguilar.

El breve periodo de Aguilar como Académico Numerario de esta Academia no le permitió, sin embargo, desarrollar en su seno todo cuanto él hubiera deseado. Recuerdo perfectamente la enorme ilusión con que ingresó; mas sus proyectos se vieron cruelmente truncados antes de hora. Voy a ocupar el sillón vacante que dejó el amigo. Lo hago con la comprensible tristeza que me produce el recuerdo de su ausencia, pero también con la convicción compartida de que lo importante es que la física esté siempre presente en el mundo de la medicina.

2. EL MUNDO CUÁNTICO

Ἀρχὰς εἶναι τῶν ὅλων ἀτόμους καὶ κενόν, τὰ δ' ἄλλα πάντα νενομίσθαι [δοξάζεσθαι]· (Διογένης Λαέρτιος)[8]

There is no quantum world. There is only an abstract physical description. It is wrong to think that the task of physics is to find out how nature is. Physics concerns what we can say about nature. (N. Bohr)

Quantum mechanics is very much more than just a 'theory'; it is a completely new way of looking at the world, involving a change in paradigm perhaps more radical than any other in the history of human thought. (A.J. Leggett)

There was a time when the newspapers said that only twelve men understood the theory of relativity. I do not believe that there ever was such a time.... On the other hand, I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics.... Do not keep saying to yourself, if you can possibly avoid it, «But how can it be like that?» because you will get «down the drain» into a blind alley from which nobody has yet escaped. Nobody knows how it can be like that. (R.P. Feynman)

A finales del XIX la física giraba en torno a la mecánica de Newton y Lagrange, el electromagnetismo de Faraday y Maxwell, la óptica ondulatoria de Young y Fresnel, y la termodinámica de Clausius y Boltzmann.

Varios nubarrones perturbaban sus indiscutibles éxitos: 1) la falta de una fórmula que diese cuenta del espectro completo (tanto para bajas como altas frecuencias) de la radiación de un cuerpo negro; 2) la energía para calentar un cuerpo muy frío era inferior a la espera-

[8] «Los principios de todas las cosas son los átomos y el vacío; todo lo demás es dudoso y opinable.» (Diógenes Laercio, sobre Demócrito.)

da; 3/ el resultado nulo del experimento de Michelson-Morley indicando que la velocidad de la luz en vacío se mantenía isótropa respecto de nosotros mientras la Tierra giraba en torno al Sol, y 4/ la precesión anómala del perihelio de Mercurio. Las dos primeras ponían en entredicho la termodinámica conocida.[9] La tercera entraba en contradicción con la clásica ley galileana de adición de velocidades, y la cuarta, minúscula, desafiaba a la espléndida y precisa teoría newtoniana de la gravitación.[10]

En su solución genial del problema de la radiación de cuerpo negro, Max Planck (Nobel en Física 1918) se vio forzado a adoptar una hipótesis de trabajo que rompía con la idea de continuidad, con el dogma aristotélico-escolástico de «Natura non facit saltus» [Planck 1900a, 1900b, 1901]. Lo hizo en un sublime acto de desesperación[11] que no solo le llevó a una fórmula de interpolación felizmente acertada,[12] sino que alumbró los quanta, la nueva visión de la naturaleza que marcaría definitivamente la física del siglo XX y que todavía sigue sorprendiéndonos. La hipótesis cuántica de Planck permitió a Peter Debye (Nobel en Química 1936) dar cuenta de la anomalía del calor específico de los sólidos a bajas temperaturas suponiendo que sus vibraciones estaban asimismo cuantificadas [Debye 1912]; esos quanta acústicos son los llamados fonones, en denominación de Igor Tamm (Nobel en Física 1958).

La resolución del aparente conflicto entre el principio de relatividad y la electrodinámica de Maxwell y Lorentz que parecía privilegiar algunos sistemas de referencia, condujo a Albert Awrohom Einstein (Nobel en Física 1921) al abandono de la simultaneidad y del éter lumínico. De ese modo, Einstein demolía con claridad meridiana y la fuerza de una lógica implacable los cimientos de la física conocida, para erigir un nuevo esquema basado en un espacio/tiempo en el que

[9] Años después, Paul Ehrenfest calificaría de «catástrofe ultravioleta» el fracaso de la termodinámica y electromagnetismo clásicos en la obtención del espectro del cuerpo negro [Ehrenfest, 1911]. Los principios cuánticos lograrían conjurar esa catástrofe; afortunadamente, no nos "frien" los rayos X y gamma procedentes de un horno de cocción.

[10] Fue Urbain Le Verrier, que había predicho la existencia del planeta Neptuno por su perturbación del movimiento de Urano, quien en septiembre de 1859 fue el primero en llamar la atención de la comunidad astronómica sobre esta discrepancia de Mercurio: «una grave dificultad, digna de la atención de los astrónomos». Intentando cosechar otro éxito similar al de Neptuno, Le Verrier propuso buscar un planeta (pre-bautizado como Vulcano), entre Mercurio y el Sol, responsable de las irregularidades de Mercurio.

[11] «Akt der Verzweiflung». (M. Planck, carta a Robert Williams Wood, 1931.)

[12] «Eine glücklich erratene Interpolationsformel». (M. Planck, conferencia en su recepción del Premio Nobel, 1920.)

pierden su absolutidad tanto el espacio como el tiempo [Einstein 1905c]. Hay tantos tiempos y espacios como observadores inerciales, y solo en su unión, el espacio/tiempo, recuperan compartida aquella absolutidad individualmente perdida.

Muy pronto, empero, para dar cobijo a la gravedad, Einstein dinamizó al espacio/tiempo, y derrocó a la teoría newtoniana de la gravitación [Einstein 1907, 1915], osadía ésta por la cual, muchos años después, Einstein pediría humildemente perdón a Newton.[13] Gracias al pensamiento más feliz de su vida,[14] el genial judío alemán logrará, tras ocho duros años de andar y desandar caminos, reflejar en una hermosa ecuación sus ideas físicas sobre la gravitación. La gravitación, como geometría del espacio/tiempo, es el «mármol» de la ecuación, y la fuente de la acción gravitacional que distorsiona esa geometría, fuente que no es otra que todo tipo de materia/energía no gravitatoria, es su «leño».[15] Entre las consecuencias de la teoría einsteiniana de la gravitación, la más espectacular sin duda fue la explicación del valor anómalo (unos 42 segundos de arco por siglo) del avance del perihelio mercuriano, sin necesidad de recurrir a ningún agente externo. Este logro mantuvo sumido a Einstein durante varios días en un estado eufórico indescriptible.[16] La teoría einsteiniana del campo gravitatorio, la relatividad general, es considerada como la obra científica más bella y original de toda la física. Sus ecuaciones plasman el apotegma kepleriano «ubi materia, ibi geometria» [Kepler 1601]; y sobre los que guiados se acercan a ellas, sus símbolos ejercen la atracción fascinante de una obra maestra.

Si cierto es que la relatividad de Einstein demolió creencias tan arraigadas como la existencia del espacio y del tiempo con carácter absoluto, o la simultaneidad, desde el punto de vista epistémico ha sido seguramente más perturbadora la teoría de los quanta de Planck que ha dado origen a la actual física cuántica.

[13] «Newton verzeih' mir; du fanst den einzigen Weg der zu deiner Zeit für einem Menschen von höchster Denk- und Gestaltungskraft eben noch möglich war.» [Einstein 1949].

[14] «Der glücklichste Gedanke meines Lebens». (A. Einstein, en una conferencia en Kyoto, 1922)

[15] «Sie gleicht aber einem Gebäude, dessen einer Flügel aus vorzüglichem Marmor (linke Seite der Gleichung), dessen anderer Flügel aus minderwertigem Holz gebaut ist (rechte Seite der Gleichung). Die phänomenologische Darstellung der Materie (auf der rechten Seite) ist nämlich nur ein roher Ersatz für eine Darstellung, welche allen bekannten Eigenschaften der Materie gerecht würde». [Einstein 1936].

[16] «For a few days, I was beside myself with joyous excitement.» (A. Einstein, en carta a Eherenfest, enero 1916.)

Con ella se ha derrumbado el determinismo laplaciano, las leyes del azar se han enseñoreado de la predicción científica, lo continuo y lo discreto han dejado de ser antagónicos para convivir en armoniosa dualidad, y media realidad se oculta para dejar ver a la otra mitad.

Características generales de la física cuántica son:

- la indefinición objetiva,
- el azar y probabilidad objetivos, y
- el entrelazamiento.

Hay que añadir a la lista estas otras características más concretas:

- dualidad onda-corpúsculo,
- complementariedad,
- discretidad,
- efecto túnel cuántico, y
- principio de indeterminación.

La física cuántica no solo ha revolucionado nuestra concepción de la realidad y nuestra descripción del mundo físico; también ha revolucionado en consecuencia la tecnología, siendo soporte de un número asombroso de aplicaciones científicas y prácticas: semiconductores, láseres, resonancia magnética, etc. El diagnóstico médico por imagen, la cirugía, el tratamiento oncológico, etc. no serían concebibles sin el desarrollo de la mecánica cuántica, y con él, de la física atómica, nuclear y molecular, de la física de la materia condensada, y de la física de la computación. Se ha estimado que el 30% del PIB de EEUU procede de inventos posibles gracias a la física cuántica [Tegmark, Wheeler 2001].

La otra gran conmoción epistémica de comienzos del siglo XX, la relatividad especial, también ha sido básica, junto a la mecánica cuántica, para explicar con precisión el mundo atómico, nuclear y subnuclear; y a pesar de la creencia extendida de que solo es importante a velocidades que son una fracción importante de la velocidad *c* de la luz en vacío, tampoco está ausente de la vida ordinaria. Recordemos, por ejemplo, que el GPS o sistema de posicionamiento global funciona gracias a tener en cuenta la relatividad einsteniana tanto especial como general; asimismo, algunos colores naturales, como el

color amarillo del oro, son consecuencia conjunta de la estructura cuántica del átomo de oro y de la relatividad especial, que encoge la diferencia de energías entre sus niveles 6s y 5d, pasándola del ultravioleta al azul. Y algo en verdad sorprendente: unos cálculos *ab initio* han revelado hace muy poco tiempo que unos 5/6 de la energía acumulada en las baterías de plomo de los automóviles se deben a la relatividad especial [Ahuja et al. 2011].[17]

2.1. **Albores de la nueva era**

> *The morning steals upon the night, / melting the darkness.*
> (W. Shakespeare)
>
> *La del alba sería cuando Don Quijote salió de la venta, tan contento, tan gallardo, tan alborozado por verse ya armado caballero, que el gozo le reventaba por las cinchas del caballo.*
> (M. de Cervantes)

Planck fue ante todo un científico de la termodinámica. El principio de conservación de la energía (cuya concepción moderna tanto debe, recordémoslo aquí, al cirujano alemán Julius Robert von Mayer) le deslumbró en sus años mozos; más tarde Planck contribuyó decisivamente a esclarecer los principios segundo (crecimiento de la entropía) y tercero (en sentido fuerte, entropía nula en el cero absoluto) de la física del calor. Su obra VORLESUNGEN ÜBER THERMODYNAMIK sigue siendo un clásico de referencia [Planck 1897].

Dos trabajos de Planck en 1900 marcan el nacimiento de la teoría cuántica. Uno presentado el 19 octubre ante la Sociedad Alemana de Física, donde consigue la afortunada fórmula que interpola entre las bajas frecuencias (aspecto ondulatorio de la radiación) y altas frecuencias (que hoy vincularíamos al aspecto corpuscular de la luz), y que en la noche de ese mismo día tuvo su primera confirmación experimental [Planck 1900a, Jammer 1966]. Esta fórmula de Planck incorpora ya, por tanto, de forma críptica, la dualidad onda-corpúsculo que emergería con más claridad de la mano de Einstein un lustro después. Pero Planck no estaba satisfecho con su hallazgo; quería para su fórmula una justificación física. Y la halló tras dos

[17] También muestran esos cálculos que mientras las contribuciones no relativistas a la energía son similares al cambiar el plomo por el estaño (un elemento más ligero pero de igual grupo), la contribución relativista para este último es mucho más pequeña, lo que explica la ausencia práctica de pilas de estaño.

meses de arduo esfuerzo, postulando que la energía total de un sistema de osciladores lineales radiantes, hertzianos, como los que se suponía que estaban en las paredes de una cavidad de cuerpo negro y que eran responsables de la absorción y emisión de las ondas electromagnéticas (ondas EM) en la cavidad, está discretizada en múltiplos enteros de un elemento de energía (*Energieelement*) proporcional a su frecuencia. Y ahí es donde en ese momento aparece en la física la famosa constante universal (*Naturconstante*) *h* de Planck, el emblema del mundo cuántico.[18] Presenta estas ideas ante la *Deutsche Physikalische Gesellschaft* el 14 de diciembre de 1900 [Planck 1900b]. Ese día nació la física cuántica.

En el primer Congreso Solvay de 1911 Planck presentó una obtención elemental de su ley de radiación proponiendo la discretización, no ya de la energía total del sistema de radiadores, sino de las propias energías de cada oscilador individual, como consecuencia de suponer áreas elementales de tamaño *h* en el espacio de fases [Planck 1911a]. Esta idea de cuantificación de acciones tuvo luego importantes aplicaciones en el desarrollo primitivo de la mecánica cuántica, con Niels (Henrik David) Bohr (Nobel en Física 1922) y Arnold (Johannes Wilhelm) Sommerfeld, entre otros [Bohr 1913; Sommerfeld 1916].

Albert Einstein, quien en su «annus mirabilis» 1905 explicó el efecto fotoeléctrico [Einstein 1905a] postulando que la energía de la luz monocromática de frecuencia ν está concentrada en forma de gránulos o cuantos indivisibles de valor $h\nu$ (bautizados como fotones muchos años después), criticó en 1906 como lógicamente inconsistente la deducción planckiana de la ley de radiación del cuerpo negro [Einstein 1906]: usaba la electrodinámica clásica continua y al mismo tiempo proponía el intercambio energético discontinuo entre radiación y materia. Mas dado el éxito de la fórmula de Planck, Einstein se inclinaba por revisar los fundamentos mismos del electromagnetismo de Maxwell. Planck creyó innecesario tal paso (... *ein Schritt... noch nicht als notwendig geboten ist*), y a finales de 1911 publicó una segunda forma de llegar a la misma que quería obviar los reparos de Einstein [Planck 1911b]; aunque pronto [Planck 1914] la reemplazó por una tercera deducción que resultó insostenible, en esa segunda vía aparecieron por primera vez el concepto de energía de punto cero

[18] De hecho, ya en 1899 aparece, disfrazada, esa constante en un trabajo de Planck sobre la ley de Wien [Planck 1899].

y argumentos que se anticiparon al principio de correspondencia (validez de la física clásica en el límite de grandes números cuánticos), e incluso al uso del lenguaje de las probabilidades en el dominio de la microfísica.

Fue esta una época extraordinaria, en la que colosos de la talla de Planck, Einstein, y Bohr abrieron las puertas a un nuevo y desconcertante mundo cuyas bases sentarían en la década de los 1920 otros genios más jóvenes: Werner Karl Heisenberg (Nobel en Física 1932), Erwin Schrödinger (Nobel en Física 1933), Max Born (Nobel en Física 1954), Louis (Victor Pierre Raymond, 7º Duque) de Broglie (Nobel en Física 1929), Paul (Adrien Maurice) Dirac (Nobel en Física 1933), y el ya antes citado, también nobel, Wofgang (Ernst) Pauli.

A pesar de sus contribuciones fundamentales y decisivas al nacimiento de la mecánica cuántica, tanto Planck como Einstein (este último de modo mucho más explícito, enérgico y combativo) se aferraron a su creencia en una realidad determinista e independiente del observador. Para estos espíritus clásicos, la nueva y revolucionaria visión bohriana de un mundo regido por el azar, por «reglamentado» que fuera este, de un mundo en que la realidad no preexiste necesariamente ahí afuera sino que se hace a golpe de actos elementales de registro o de observaciones, de un mundo dualista en el que un principio de incertidumbre (*Unsicherheitsrelation*) solo nos deja ver a medias, nunca fue más que una visión provisional e incompleta.[19]

2.2. **Indefinición objetiva**

> *Τὸ γὰρ αὐτὸ ἅμα ὑπάρχειν τε καὶ μὴ ὑπάρχειν ἀδύνατον τῷ αὐτῷ κα ἰκατὰ τὸ αὐτό.* (Ἀριστοτέλης)[20]

Significa que en un estado cuántico, aunque esté maximalmente conocido, hay siempre eventualidades *E* (proposiciones dicotómicas sí/no) indefinidas, que no son ni ciertas ni falsas. Cuando se somete a consulta al sistema en ese estado para ver si una cierta eventua-

[19] ¿No escucharían ambos ahora con irónico agrado las reflexiones originales y profundas de Gerard t'Hooft (Nobel en Física 1999) sobre un hipotético regreso del determinismo clásico precisamente a la escala física en que la mayoría piensa que la gravitación se hace ostensiblemente cuántica, es decir, a la escala llamada de Planck? [t'Hooft 1999].

[20] «El mismo atributo no puede, al mismo tiempo, pertenecer y no pertenecer al mismo sujeto y en el mismo sentido». (Aristóteles.)

lidad E (por ejemplo, estar en una cierta región) es cierta o no, el resultado es objetivamente azaroso, con unas probabilidades que dependen solo del estado y de la eventualidad, y no del ánimo o conocimientos del experimentador. Decimos que la eventualidad E es potencial en tal estado (no tiene un valor definido) y que la acción de una de estas consultas (medida de E) actualiza su potencialidad.

Un estado cuántico es, por así decirlo, una red de potencialidades [Shimony 1989]; consta no solo de aquellas eventualidades que tiene bien definidas (hablamos entonces de propiedades del estado), sino también de las probabilidades de hallar cierto o falso al actualizar las otras eventualidades, las indefinidas.

2.3. **Azar reglado**

> *Une intelligence qui pour un instant donné connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome: rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir comme le passé serait présent à ses yeux.* (P.S. Laplace)
>
> *...der Alte nicht würfelt.* (A. Einstein)
>
> *Я согласен, что дважды два четыре - превосходная вещь; но если уже все хвалить, то и дважды два пять - премилая иногда вещица.* (Ф.М. Достоевский)[21]
>
> *Yes, oh universe, without you I would not have been able to come into being. Yet you, great system, are made of phenomena; and every phenomenon rests on an act of observation. You could never exist without elementary acts of registration such as mine.* (J.A. Wheeler)
>
> *The difficulty is not that quantum mechanics is probabilistic —that is something we apparently just have to live with. The real difficulty is that it is also deterministic, or more precisely, that it combines a probabilistic interpretation with deterministic dynamics.* (S. Weinberg)

En el mundo cuántico manda la ventura, y para describir sus fenómenos recurrimos a las probabilidades. Pero no es un mundo azaroso alocado, sino sometido a unas reglas muy precisas.[22] La probabilidad de que en un estado del sistema hallemos como ciertas unas eventualidades que, de estar bien definidas, harían que el sistema estuviese en otro estado, viene dada por el módulo al cuadrado de una amplitud compleja de probabilidad.

El lenguaje de la nueva física es el lenguaje de las amplitudes de probabilidad, con las que, como acabamos de decir, se predice la probabilidad de que algo ocurra en el mundo físico; las certezas se han evaporado, y por mucho que afinemos en el conocimiento del estado inicial de un sistema físico subsisten elementos de ignorancia irreductibles. Diríamos, parafraseando a Borges, que somos «ricos de perplejidades y no de certezas».

Estas probabilidades cuánticas obedecen a unas reglas de juego muy peculiares e inequívocas: cuando algo puede ocurrir de varias maneras indistinguibles, la probabilidad de que ocurra no es la suma de las probabilidades individuales (como ocurre al tirar un dado), sino el cuadrado de la suma de sus «raíces cuadradas», de sus amplitudes de probabilidad. Y como las raíces cuadradas pueden ser positivas y negativas (mejor dicho, tienen fase), puede muy bien ocurrir que se cancelen y que la probabilidad total sea nula (interferencia destructiva). ¿Alguien esperaría que al arrojar a la vez dos dados no trucados nunca pudieran sumar 3, cuando lo común sería que esa suma se diera una vez cada 18, en promedio? Pues eso podría ocurrir con dados cuánticos.

Cuando las potencialidades no se actualizan, esto es, cuando las alternativas son indistinguibles, las amplitudes se suman antes de calcular la probabilidad. Pero si las alternativas se observan, la probabilidad pasa a valer la suma de las probabilidades de cada una de ellas. Decimos entonces que al medir se rompe la coherencia de las diferentes alternativas.

Estas reglas explican una de las peculiaridades de los quanta, su disposición a interferir. No es lo mismo el cuadrado de la suma que la suma de cuadrados. En la primera se producen interferencias cuánticas, pues las alternativas no se materializan. La segunda corresponde al caso de que se actualicen estas eventualidades.

La idea de que el lenguaje de la nueva física debía ser el de las probabilidades fue propuesta por Born en 1926 [Born 1926]. Fue in-

[21] «Admito que dos veces dos igual a cuatro es algo estupendo, pero si hemos de dar a cada cosa lo suyo, dos veces dos igual a cinco resulta también en ocasiones muy atractivo.» (F.M. Dostoyevsky.)

[22] Para una exposición rigurosa del marco postulacional de la mecánica cuántica, véase, por ejemplo, [Galindo, Pascual 1978, 1989a, 1990, 1991].

dudablemente un definitivo golpe de gracia al ya maltrecho determinismo laplaciano, que incluso en sistemas clásicos tan simples como el de los tres o más cuerpos en interacción gravitacional mutua puede verse afectado en la práctica por la aparición del caos determinista, como había observado Poincaré cuatro décadas antes.

2.4. **Entrelazamiento**

> *Very interesting theory —it makes no sense at all.* (Groucho Marx)
>
> *A child of five would understand this. Send someone to fetch a child of five.* (Groucho Marx)
>
> *When two systems, of which we know the states by their respective representatives, enter into temporary physical interaction due to known forces between them, and when after a time of mutual influence the systems separate again, then they can no longer be described in the same way as before, viz. by endowing each of them with a representative of its own. I would not call that* one *but rather* the *characteristic trait of quantum mechanics, the one that enforces its entire departure from classical lines of thought. By the interaction the two representatives [the quantum states] have become entangled.* (E. Schrödinger)
>
> *Let me say at the outset, I am opposing not a few special statements of quantum mechanics held today (1950s), I am opposing the whole of it...* (E. Schrödinger)

El entrelazamiento (o enredo) es quizá la más sorprendente distinción de los quanta [Audretsch 2007]. Introducido como *Verschränkung* por Schrödinger en 1935 para denotar cualquier superposición lineal no factorizable de estados factorizables de varias partículas, se refería a él diciendo que era «el rasgo característico de la mecánica cuántica, aquel que impone su total separación de las líneas clásicas del pensamiento»[23] [Schrödinger 1935]. Einstein no soportaba sus consecuencias de aparente acción instantánea a distancia. De *spukhafte Fernwirkung* o «acción fantasmal a distancia» hablaba Einstein en una carta a Born. De «vudú cuántico» lo ha calificado Bennett.

El entrelazamiento conlleva que se pueda tener un sistema bipartito 1+2 en un estado maximalmente definido (puro, en lenguaje de la mecánica cuántica), sin que ninguna de las partes 1 y 2 lo esté. Clásicamente el entrelazamiento no existe; pero en la mecánica cuántica, en que los estados son una red de potencialidades como hemos dicho, es posible tener un estado en que las eventualidades E_1, E_2 de las partes 1 y 2 estén individualmente indefinidas, pero correlacionadas entre sí, de modo que al actualizarse en sendas medidas, siempre sean las dos falsas, o las dos correctas.

[23] «...the characteristic trait of quantum mechanics, the one that enforces its entire departure from classical lines of thought.»

Un estado entrelazado por antonomasia es el estado singlete (esto es, de espín 0) de dos partículas, *A* y *B*, de espín ½. Las dos partículas tienen sus polarizaciones correlacionadas: si el espín de una apunta en una dirección, el de la otra lo hace en la opuesta. Pero ninguna de ellas tiene un estado de polarización concreto; la información del estado total reside en correlaciones no locales esparcidas por todo, sin que ninguna medida local sobre una de las partes por sí sola pueda revelarla. Si la partícula *A* vuela desde Madrid hacia Zaragoza y la *B* hacia Sevilla, lugares en que nuestros colegas físicos las mantienen hasta que deciden medir sus estados de polarización según una dirección **n** común y arbitrariamente elegida, los resultados, aunque aleatorios para cada uno, guardan una perfecta anticorrelación mutua. Y esto se cumple, por muy alejados que estén entre sí los físicos que comparten el par y cualesquiera que sean los instantes de tiempo en que cada uno haya efectuado la medición sobre su partícula (suponiendo, claro está, que los espines no hayan sufrido ninguna interacción perturbadora tras su salida de la fuente).

2.4.1. *Velocidades superlumínicas*

¿Cabe utilizar esto para enviar información de Zaragoza a Sevilla a velocidad superlumínica? Sí, si los físicos de Zaragoza supieran cómo conseguir que los bits de polarización que obtienen codificasen un mensaje significativo. Pero no es así, pues las leyes cuánticas garantizan que cada ristra de bits obtenida en Zaragoza es absolutamente aleatoria: al medir en Zaragoza la polarización, a lo largo de la recta definida por **n**, de la partícula que le ha llegado, encontrará que o bien su espín apunta en la dirección de **n**, o en la dirección opuesta, -**n**, resultados estos que puede registrar como los bits 1 y 0, respectivamente. De este modo obtendrá una cadena de bits, por ejemplo, 010010111...; la física cuántica asegura que esta cadena es aleatoria. Si el físico de Sevilla hace lo mismo, su ristra de resultados será necesariamente la inversa: 101101000...

Si el colega de Zaragoza selecciona un subconjunto de su ristra para codificar información, por ejemplo una secuencia de tres 1's si queremos transmitir de forma unaria el número primo 3, en Sevilla medirían en esos lugares tres 0's. Pero habría que decirles (por teléfono, correo electrónico, etc.) a qué lugares (en nuestro ejemplo los lugares 2, 5, 7) deben fijarse si queremos que identifiquen la información del 3. Y que sepamos, nadie sabe hacer superlumínico este último paso de la comunicación.

Si la clonación general de estados cuánticos fuera posible, el entrelazamiento podría ser usado para la transmisión superlumínica de información: pues en Zaragoza podrían medir la polarización de sus partículas de los pares entrelazados siguiendo un mensaje binario (0 $\longleftrightarrow \pm z$, 1 $\longleftrightarrow \pm x$), lo que instantáneamente haría que las correspondientes partículas en Sevilla se polarizasen en las direcciones opuestas; su clonación haría posible a los colegas sevillanos determinar con fidelidad estas polarizaciones, y por tanto, leer el mensaje. Pero la clonación de estados cuánticos arbitrarios es imposible, como comentaremos más adelante.

El entrelazamiento juega un papel central en las investigaciones actuales sobre información y computación cuánticas. Pero no solo se reduce a estos ámbitos. Incluso en materia condensada el entrelazamiento es esencial para explicar algunas propiedades. Por ejemplo, se ha demostrado que la medida de la susceptibilidad magnética es un adecuado testigo del entrelazamiento, que señala y cuantifica la presencia del mismo en ciertos sistemas macroscópicos, como el trihidrato de nìtrato cúprico $Cu(NO_3)_2 \cdot 2.5H_2O$ a temperaturas inferiores a 5 K [Brukner, Vedral, Zeilinger 2006].

Siendo el entrelazamiento una manifestación puramente cuántica, es de esperar que solo pueda darse en sistemas a bajas temperaturas T, de modo que la energía térmica $k_B T$ sea muy pequeña en relación con la energía de excitación típica $h\nu_0$ del sistema considerado y así el ruido no rompa la coherencia cuántica. Pero mientras escribo estas líneas, acaba de publicarse un modelo de dos osciladores armónicos macroscópicos disipativos, acoplados y paramétricamente forzados, inmersos en un baño térmico a alta temperatura ($k_B T > h\nu_0$), que mantiene entrelazamiento en ese entorno «caliente» [Galve, Pachón, Zueco 2010]. Tal resultado realimenta la idea, cada vez más acariciada, de que la Naturaleza haya echado mano de los principios cuánticos para que en los sistemas macroscópicos calientes y fuera del equilibrio termodinámico más relevantes, a saber, los seres vivos,

se produzca, cuando lo precisen, un entrelazamiento que optimice la eficiencia del transporte energético [Vedral 2010]. De este tema volveremos a hablar en el próximo capítulo.

2.5. **Discretidad**

> *Natura non saltum facit.* (G. Leibniz)
>
> *La continuité dégoûte en tout.* (B. Pascal)
>
> *If we have to go on with these damned quantum jumps, then I'm sorry that I ever got involved!* (E. Schrödinger)

Otro aspecto muy notable de la física cuántica es la discretidad en los valores de ciertas magnitudes clásicamente continuas (energía, momento angular,...). Sistemas simples como los átomos, moléculas y núcleos exhiben espectros de energías (colecciones de energías posibles) con partes discretas. Son como sus «notas» o «vibraciones» características, su «huella dactilar», y se llaman niveles energéticos. La pequeñez del quantum de acción h de Planck relativa a los valores típicos de la acción clásica impide discernir el aspecto discreto de la energía y de otras magnitudes en la vida ordinaria.

Cuando un átomo sufre una transición desde un nivel energético a otro más bajo, emite un fotón, que, por tanto, nace en ese momento, para luego viajar libremente antes de ser absorbido por otro sistema. Estos saltos cuánticos entre estados del átomo que tanto odió Schrödinger,[24] han sido observados [Sauter et al. 1986a; Sauter et al. 1986b; Gleyzes et al. 2007; Neumann et al. 2010; Vamivakas et al. 2010].

[24] «You surely must understand, Bohr, that the whole idea of quantum jumps necessarily leads to nonsense... If we are going to have to put up with these damn quantum jumps, I am sorry that I ever had anything to do with quantum theory» (Schrödinger, en un apasionada discusión con Bohr y Heisenberg, Copenhague 1926).

2.6. **Dualidad onda-partícula**

> *Après avoir longuement réfléchi dans la solitude et la méditation, j´ai eu tout à coup, pendant l´année 1923, l´idée qu´il fallait généraliser la découverte faite par Einstein en 1905 en l´étendant à toutes les particules matérielles et notamment aux électrons.* (L. de Broglie)
>
> *No known theory can be distorted so as to provide even an approximate explanation [of wave-particle duality]. There must be some fact of which we are entirely ignorant and whose discovery may revolutionize our views of the relations between waves and ether and matter. For the present we have to work on both theories. On Mondays, Wednesdays, and Fridays we use the wave theory; on Tuesdays, Thursdays, and Saturdays we think in streams of flying energy quanta or corpuscles.* (W. Bragg)
>
> *One can not, damn it, reduce the whole of philosophy to a screen with two holes.* (J. Jørgensen)

Cristian Huygens propugnó la naturaleza ondulatoria de la luz en 1678, publicando su teoría unos años después [Huygens 1690]. Newton, por contra, simpatizante con las ìdeas de Pierre Gassendi sobre la luz y sus *atomi lucificæ*, defendió en su teoría de la emisión de la luz la naturaleza corpuscular de esta [Newton 1675, 1704]. El genial erudito Thomas Young, médico, físico, egiptólogo, músico y filólogo, dio argumentos en 1801 a favor de la teoría ondulatoria [Young 1802], concluyendo que «la luz radiante consiste de ondulaciones del éter luminífero», y demostró brillantemente en 1803 que la luz era ciertamente una onda al producir la interferencia de los dos haces luminosos en que un trozo de fina tarjeta[25] interpuesta de canto dividía a un estrecho haz de luz solar que penetraba por un minúsculo orificio [Young 1804]. En experimentos posteriores mostró Young las interferencias mediante una doble rendija; este histórico dispositivo, aplicado siglo y medio más tarde a electrones, mereció ser reconocido internacionalmente en el año 2002 como el experimento físico más hermoso de todos los tiempos, consiguiendo una excelente quinta posición dicho experimento realizado, como hizo Young, con luz.[26]

Tras la monumental contribución de Maxwell al electromagnetismo, al comenzar el siglo XX nadie dudaba de que la luz fuera una onda

[25] «I brought into the sunbeam a slip of card, about one thirtieth of an inch in breadth...» [Young 1804].

[26] Para reemplazar a la *vis viva* de Leibniz debemos también a Young la introducción en la Física de la palabra «energía» (*ἐνέργεια*) presentada por Aristóteles en su Ética a Nicómaco [Young 1807].

EM [Maxwell 1873]. Pero ciertos fenómenos (como el efecto fotoeléctrico [Einstein 1905a], y el efecto Compton [Compton 1923] requerían la vuelta atrás hacia una imagen de la luz como un chorro de partículas, los fotones. ¿Cómo reconciliar estos aspectos corpusculares con los aspectos ondulatorios, evidenciados por todas las experiencias de interferencia y difracción?

No ha sido fácil aprender a convivir con una realidad extraña que se comporta de dos modos opuestos según el entorno. Nuestro lenguaje ha debido acomodarse; no es «científicamente correcto» decir que la luz es una onda, ni tampoco que es un chorro de partículas. No es ninguna de esas cosas, sino ambas a la vez, en potencia. Dependiendo de las circunstancias externas, se realza una faceta y se deprime la complementaria. Según el experimento que se realice, la luz se manifiesta como onda o como partícula. Si corrientemente el aspecto corpuscular de la luz no es discernible es debido al elevado número de fotones que hay en una onda EM ordinaria. Pensemos que, por ejemplo, una humilde vela de 0.1 mW en visible arroja por segundo la friolera de 3×10^{14} fotones de esa parte del espectro; a 100 m de distancia el número de tales fotones que penetran en cada uno de nuestros ojos es de unos 10^5. De una estrella de primera magnitud recibimos una energía del espectro visible por segundo de unos 10^{-8} W/m^2, que corresponde a 10^6 fotones por pupila y segundo. En la actualidad, se preparan ya fuentes que emiten fotones individuales y a la carta, mediante el uso de estructuras nanométricas como puntos e hilos cuánticos. Pueden llegar a ser de gran importancia en metrología, así como para la seguridad en criptografía cuántica, seguridad que se ve comprometida cuando se usan, a falta de fuentes de fotones individuales, fuentes láser de muy baja potencia.

Si las ondas por antonomasia, las ondas EM, se comportan a veces como partículas (de masa nula), ¿no podrán acaso presentarse en ocasiones las partículas (de masa no necesariamente nula) como si fueran ondas? Esta es la pregunta que se planteó el joven de Broglie a comienzos de la década de los 20, y para la que, por puras consideraciones de analogía y simetría, se atrevió en su tesis doctoral a proponer una respuesta afirmativa, contra toda evidencia secular. Su idea impresionó a Einstein, haciéndole exclamar: «ha levantado una esquina del gran velo».[27] De Broglie postuló que toda

[27] «Er hat eine Ecker der grossen Schleiers gelüftet», en carta de Einstein al director de la tesis de de Broglie, Paul Langevin.

partícula material lleva asociada una onda «de materia» que la acompaña en su movimiento [de Broglie 1923; 1924]; en los años siguientes propuso una interpretación de esta onda de materia como onda «piloto» que guía a la partícula en su movimiento. Fue el primer modelo propuesto de «variables ocultas». Pero abandonó más tarde esta idea ante las dificultades encontradas y las críticas recibidas.

Hoy la mayoría de los físicos admiten la interpretación probabilística que ya anticipamos atrás [Born 1926]: la onda de materia es en realidad una onda de amplitud de probabilidad, cuyo módulo cuadrado en un punto es proporcional a la probabilidad de hallar allí la partícula. La longitud de onda y la frecuencia de esa onda están relacionadas con el momento y la energía de la partícula exactamente igual que en el caso de la luz.

El experimento de Davisson-Germer confirmó plenamente la existencia de las ondas de materia, al mostrar la difracción de electrones por un blanco de níquel cristalino [Davisson, Germer 1927]; asimismo, el conjunto de experimentos independientes de Thomson, exhibiendo la difracción de electrones sobre películas muy delgadas y policristalinas de oro y otros metales [Thomson, Reid 1927; Thomson 1927, 1928, 1929]. Clinton Davisson y George Paget Thomson compartieron por ello el Nobel en Física 1937.

En la vida ordinaria no percibimos esta dualidad: la longitud de onda de los cuerpos macroscópicos es tan pequeña que no hay «ranuras» ni «orificios» que puedan utilizarse para desvelar su aspecto ondulatorio.[28] Sin embargo, ahí está.

El experimento de Young de la doble rendija con partículas materiales (precisamente con electrones) fue llevado a cabo por vez primera en 1961 [Jönsson 1961]. Hasta 1974 no se realizó con electrones «de uno en uno» [Merli, Missiroli, Pozzi 1974], y unos años después, lo harían Tonomura y sus colaboradores con una técnica más refinada y elegante [Tonomura et al. 1989].

En un bonito experimento Anton Zeilinger y colaboradores detectaron en 1999 las ondas de materia asociadas a fullerenos (fulerenos) C_{60} [Arndt et al. 1999]. Son algunos de los proyectiles de mayor masa (en un orden de magnitud, pues su masa es de unas 720 u) y complejidad (60 núcleos y 360 electrones, y por tanto con muchos grados de libertad internos excitados) con que se había conseguido ver interferencias en un experimento de difracción; hasta esa fecha, se habían observado con electrones, neutrones, átomos, dímeros, y agregados pequeños de varios átomos de gases nobles ligados por fuerzas de van der Waals. Los fullerenos fueron emitidos en un horno de unos 900-1000 K, y tras pasar por dos ranuras de colimación de 10 ìm separadas en 1.04 m, incidían sobre una red de difracción de rendijas de 50 nm y período de separación de 100 nm. La imagen de interferencia se observó a 1.25 m de la red, detectando los fullerenos tras su ionización mediante un rayo láser.

Más adelante daremos información adicional sobre este tema, comentando otros experimentos posteriores.

2.7. **Complementariedad**

Truth and clarity are complementary. (N. Bohr)

La dualidad onda-corpúsculo es una manifestación particular del profundo principio de complementariedad debido a Bohr [Bohr 1928, 1934]. Otra muestra es el hecho de que la observación del camino seguido por la partícula en el experimento de la doble rendija elimina el patrón de interferencia; ambas alternativas, conocer perfectamente el camino, o interferir completamente, se excluyen entre sí.

Antes de definir el principio de complementariedad, digamos que dos observables se dicen complementarios cuando si se conoce con precisión el valor de uno de ellos, todos los valores posibles del otro son equiprobables [Scully, Zubairy 1997]. Por ejemplo, la posición y el momento, o las componentes de un espín ½ en direcciones ortogonales.

El principio de complementariedad es la afirmación de que todo sistema cuántico posee propiedades complementarias e incompatibles

[28] Echemos la cuenta. Para una bola de billar de masa m = 0.5 kg, por ejemplo, que se mueva sobre el tapete a 0.4 m/s, la longitud de onda de de Broglie vale 3×10^{-33} m. Incluso para cuerpos tan livianos como una mota de polvo (m ~ 1 μg), y velocidades tan pequeñas como las provocadas por agitación térmica debida al fondo cósmico de microondas (T ~ 3 K, v ~ 10^{-7} m/s), resulta una longitud de onda de de Broglie de ~ 10^{-18} m, esto es, un attómetro (am), comparable al tamaño límite actual de un quark o de un electrón [Galindo 2000]. Recordemos aquí que las letras m, μ, n, p, f, a, z, y, símbolos de los prefijos mili, micro, nano, pico, femto, atto, zeto, yocto, antepuestas a la unidad de una magnitud, indican los submúltiplos 10^{-3}, 10^{-6}, 10^{-9}, 10^{-12}, 10^{-15}, 10^{-18}, 10^{-21}, 10^{-24}, respectivamente, de dicha unidad (o si se prefiere por razones nemotécnicas, los submúltiplos 1000^{-1}, 1000^{-2}, 1000^{-3}, 1000^{-4}, 1000^{-5}, 1000^{-6}, 1000^{-7}, 1000^{-8}. Análogamente, las letras k, M, G, T, P, E, Z, Y, símbolos de los prefijos kilo, Mega, Giga, Tera, Peta, Exa, Zetta, Yotta, antepuestas a una unidad, indican los múltiplos 10^{3}, 10^{6}, 10^{9}, 10^{12}, 10^{15}, 10^{18}, 10^{21}, 10^{24}, respectivamente, de dicha unidad, o, si se prefiere, los múltiplos 1000^{1}, 1000^{2}, 1000^{3}, 1000^{4}, 1000^{5}, 1000^{6}, 1000^{7}, 1000^{8}).

entre sí, que no pueden medirse simultáneamente; su medición requiere aparatos mutuamente excluyentes. Sin embargo, puede introducirse una graduación continua: por ejemplo, el saber, aunque no con toda seguridad, por qué camino de los dos posibles ha ido la partícula en un experimento de doble-rendija, va acompañado de una degradación asociada del patrón de interferencia. Estas graduaciones se hacen cuantitativas mediante un parámetro V de visibilidad de interferencia y otro D de distinguibilidad entre caminos, respectivamente, entre los cuales se da una desigualdad de complementariedad (que es lógicamente independiente de las relaciones de indeterminación), de modo que al aumentar uno el otro tiene que disminuir, variando entre los extremos, uno de máxima visibilidad y nula distinguibilidad, y el otro lo contrario [Englert 1995].

El principio de complementariedad es a veces sutil y oscuro en su aplicación. Solo Bohr parecía nadar a gusto en ese mundo complejo, enigmático, bifronte. «Contraria sunt complementa», reza el escudo de armas de Bohr. Escribía Léon Rosenfeld que, entrevistando al famoso físico japonés Hideki Yukawa (Nobel en Física 1949), le preguntó si, como a los físicos occidentales, también le resultaba oscuro el principio de complementariedad; Yukawa le respondió que no, que para los japoneses es un principio muy natural, al no estar, añadió con una sonrisa, corrompidos por la filosofía aristotélica [Rosenfeld 1963].

El principio cuántico de Bohr sigue provocando debates entre los físicos. Incluso hace muy pocos años se realizó un ingenioso experimento de interferencia que se interpretó como una clara violación de la complementariedad bohriana [Afshar et al. 2007]. No tardaron en aparecer críticas que mostraban los fallos de tal análisis y en realizarse experimentos similares que mostraron la vigencia del mencionado principio [Steuernagel 2007; Georgiev 2007; Jacques et al. 2008].

2.8. **Principio de indeterminación**

> *Genauer der Ort bestimmt ist, desto ungenauer ist der Impuls bekannt, und ungekehrt.* (W. Heisenberg)

En la física clásica, conociendo las posiciones y momentos iniciales de cada una de las partículas de un sistema, podíamos en principio predecir con exactitud cuáles iban a ser esas magnitudes un rato más tarde. Ya no; para empezar, un principio de indeterminación, debido a Heisenberg, impide que podamos medir con precisión arbitraria y a la vez una variable de posición y la correspondiente variable del momento. O una u otra; debemos conformarnos con conocer solo una «mitad» de las variables que clásicamente estaban a nuestro alcance.

Un ciudadano normal alberga pocas dudas sobre la posibilidad de medir a la vez la posición de una moto y su velocidad; por eso encuentra natural que en la notificación de una multa de tráfico por exceso de rapidez le señalen ambos datos. En un mundo hipotético en que la constante de Planck tuviese un valor parejo al de la acción de una avioneta en vuelo durante 1 s, por ejemplo, que fuese $h \sim 10^6$ J s, el agente de policía tendría que renunciar o al lugar o a la celeridad, pues, como consecuencia del principio de indeterminación de Heisenberg que vamos a discutir, medir la velocidad de la moto con precisión de 10 km/hora exigiría desconocer su localización en aproximadamente 2 km. Y eso porque, en tan extraño escenario, la mera iluminación transversal del motorista con un solo fotón de ondas de radio, de longitud de onda de aproximadamente 1 m con el fin de verle al pasar con esa precisión, podría transferirle momento más que suficiente para desviarle peligrosamente de su trayectoria [Galindo et al. 1998].

Vivimos, sin embargo, en un Universo en el que el cuanto de acción es pequeño a escala ordinaria, y los efectos del principio de indeterminación se dejan notar solo sobre «motoristas» mucho más livianos: electrones, protones, núcleos atómicos, moléculas, etc.

Tras un cuidadoso análisis de los procedimientos de medida de magnitudes básicas como posición, momento y energía, Heisenberg presentaba en 1927 sus famosas relaciones de indeterminación o incertidumbre [Heisenberg 1927], que limitan las precisiones con que se pueden medir simultáneamente sobre una partícula (o en general, sobre un sistema) pares de magnitudes conjugadas.

En dicho trabajo, en ningún momento habla Heisenberg de principio de indeterminación para referirse a sus relaciones de incertidumbre. Tal nombre, motivado por las profundas implicaciones filosóficas y científicas que se le han atribuido (indeterminismo e inexistencia de órbitas, entre otras) fue usado por varios científicos notables, siendo quizás primero el astrofísico Arthur Stanley Eddington en sus Gifford Lectures de 1927 en la Universidad de Edimburgo [Eddington

1928]. Sin embargo, Heisenberg no rechazó esta denominación, que con el tiempo llegó a usar.

La razón de algunas de las relaciones de indeterminación reside en la dualidad onda-partícula. Por ejemplo, para ver dónde está una cosa con precisión Δx, lo normal es iluminarla con luz de longitud de onda similar o menor que Δx, pero los fotones intercambian energía y momento con ella (efecto Compton), lo que conlleva una imprecisión Δp similar o mayor que $h/\Delta x$.

Es frecuente asignar al principio de indeterminación la razón de la estabilidad de los átomos: clásicamente los electrones atómicos son como pequeñas antenas radiantes que deberían caer sobre el núcleo en tiempos de unos pocos picosegundos, haciendo inestables los átomos.[29] El principio de indeterminación vendría a su rescate, posibilitando de este modo la existencia de la tabla periódica y toda la riqueza estructural de la física atómica y molecular: al caer los electrones, se confinarían más; esto obligaría cuánticamente a aumentar su energía cinética, contrarrestando así la caída. En realidad, estos argumentos, aunque muy físicos, son insuficientes; hay que acudir a desigualdades más poderosas que las relaciones de indeterminación de Heisenberg para asegurar la estabilidad atómica. Esas desigualdades, llamadas de Sobolev, constituyen una versión reforzada del principio de indeterminación, y se obtienen en representaciones funcionales concretas de los espacios de Hilbert asociados [Lieb 1981; Galindo, Pascual 1989b].

Pero una cosa es la estabilidad atómica (estabilidad de primera especie) y otra muy distinta es la estabilidad de la materia (estabilidad de segunda especie) [Lieb 2003, 2008]. Esta última requiere que la energía de enlace por partícula de un trozo material, esté inferiormente acotada al aumentar indefinidamente el número de partículas. Hasta los años 1967-68 no se consiguió probar [Dyson, Lenard, 1967; Lenard, Dyson 1968]. Para sistemas dominados por la interacción coulombiana, fue esencial recurrir al famoso principio de exclusión de Pauli: dos fermiones (partículas de espín semi-impar, que satisfacen la estadística de Fermi-Dirac) idénticos no pueden estar en el mismo

[29] Como bien han señalado Max Tegmark y John Archibald Wheeler, «el desastre del hidrógeno», esto es, porqué la vida (~ 1 ps) predicha por la física clásica para un átomo de hidrógeno es al menos cuarenta órdenes de magnitud menor que la esperada, es uno de los fallos cuantitativos más prominentes de toda la historia de la física [Tegmark, Wheeler 2001]. Le aventaja espectacularmente, eso sí, el pequeño valor, no nulo, de la constante cosmológica, que dista en 123 órdenes de magnitud de su valor natural [Galindo 2007a].

estado [Pauli 1925]. Esto impide la concentración excesiva de fermiones, generando una interacción repulsiva de intercambio que se opone a la atracción coulombiana. La materia fermiónica es estable. Pero no la materia bosónica (de partículas de espín entero, que satisfacen la estadística de Bose-Einstein); la energía de enlace por partícula en un sistema de N bosones idénticos negativamente cargados, en presencia de otras tantas cargas positivas que los neutralicen, crece como $N^{2/5}$, y por tanto, dos trozos de esa materia tenderían a juntarse desprendiendo una cantidad de energía proporcional a $N^{2/5}$. Si, por ejemplo, los electrones fuesen bosones, al juntar dos trozos de materia, cada trozo con unos 10^{24} electrones de una energía de enlace de 10 eV por electrón cuando $N \sim 1$, se desprendería una energía del orden de un megatón. Afortunadamente, no existen bosones negativos estables en la naturaleza.

2.9. **Una ecuación extraordinaria**

Where did we get that [Schrödinger's equation] from? It's not possible to derive it from anything you know. It came out of the mind of Schrödinger, invented in his struggle to find an understanding of the experimental observation of the real world
(R.P. Feynman)

Las demostraciones de la estabilidad atómica y de la materia han sido posibles gracias al gran avance del análisis funcional en torno a una ecuación muy concreta: la famosa ecuación de Schrödinger [Schrödinger 1926]. En referencia al trabajo histórico de este genial vienés, desarrollado en unos pocos meses, y que supuso el imparable comienzo de la mecánica cuántica ondulatoria, se ha escrito, sin exagerar, que «Schrödinger's brilliant paper was undoubtly one of the most influential contributions ever made in the history of science» [Jammer 1966]. El propio Einstein lo ensalzó con entusiasmo, viendo en él la prueba de que los fenómenos cuánticos no obligaban a renunciar al continuo, puesto que una ecuación diferencial (prototipo de continuidad) sobredeterminada podía revelar aspectos discretos. Y Born dijo de la obra cumbre de Schrödinger: «Was gibt es Großartigeres in der theoretischen Physik als seine ersten sechs Arbeiten zur Wellenmechanik» [Born 1961].

Otro de fundadores de la física cuántica, Paul Dirac, considerado como uno de los físicos teóricos más importantes de todos los tiem-

pos, cuenta en su nota necrológica sobre Schrödinger que, según le había confesado este mismo, antes de alumbrar su ecuación había aplicado al átomo de hidrógeno lo que se conoce como ecuación de Klein-Gordon (ecuación relativista para partículas de espín nulo) [Dirac 1961]. La estructura fina del espectro resultante para un átomo hidrogenoide, aunque muy adecuada a los átomos piónicos y kaónicos (tras incluir correcciones obligadas por masa y tamaño finito del núcleo, y por la interacción fuerte mesón-núcleo), no lo es para el hidrógeno, pues no tiene en cuenta el espín del electrón. Por eso Schrödinger, frustrado, abandonó el proyecto; lo retomó tras unos meses, y fue cuando se percató de que si trataba al electrón no relativísticamente entonces conseguía predecir correctamente el espectro del hidrógeno en su aproximación no relativista. Estos resultados fueron el objeto de sus trabajos ya citados de 1926.

Sería Dirac el responsable de legarnos otra ecuación aún más maravillosa, la ecuación de Dirac, una ecuación de ondas relativista para partículas de espín ½, como electrones, nucleones, etc., básica en la teoría cuántica de campos, y que, aplicada al electrón del átomo de hidrógeno, proporciona el espectro de energías con estructura fina incluida [Dirac 1928a, 1928b]. De la parte negativa del espectro de energías daría cuenta con su teoría de los agujeros en un mar de energías negativas [Dirac 1930], agujeros que erróneamente tomó como protones; ante las críticas, pronto los reinterpretaría como antielectrones de carga positiva, prediciendo así la existencia de la antimateria [Dirac 1931]. Poco tiempo después, Carl David Anderson (Nobel en Física 1936) descubría los electrones positivos, que llamó positrones [Anderson 1932, 1933].

Con razón se dice que la ecuación de Schrödinger ha sido la ecuación más fértil de la física desde su creación en el siglo pasado. Movido por el impresionante éxito para el átomo de hidrógeno de la ecuación de Schrödinger y de su ampliación relativista por Dirac, llevó a este último a afirmar en 1929: «The fundamental laws necessary for the mathematical treatment of a large part of physics and the whole of chemistry are thus completely known, and the difficulty lies only in the fact that application of these laws leads to equations that are too complex to be solved» [Dirac 1929]. Sin duda, como dijo John Pople (Nobel en Química 1998), «this was a cry both of triumph and of dispair» [Pople 1998, 1999]. Átomos, moléculas, núcleos, materia condensada, física de superficies, óptica cuántica, microelectrónica, información cuántica, y un largo etcétera, son campos donde se ha

echado mano de esa ecuación con mayor o menor intensidad. Sus propiedades matemáticas (análisis espectral, perturbaciones, completitud asintótica, estabilidad de primera y segunda especie para materia fermiónica, inestabilidad de segunda especie para la materia bosónica, etc.) han ocupado un importante espacio en la física matemática de las últimas décadas. Y todavía quedan importantes cuestiones por dilucidar.

En cuanto a los problemas que plantea su aplicación directa, y a las alternativas que se han propuesto, citemos como muestra [Galindo 2003a]:

1) El cálculo de espectros en átomos y iones multielectrónicos [Datz 1999]. La precisión alcanza sus más altas cotas cuando el número de electrones es ≤ 3. Así, la energía fundamental del Hamiltoniano no relativista más simple asociado al átomo de He se ha calculado con precisión de 1 parte en 10^{19}.[30] Para sistemas atómicos más complejos, se recurre a técnicas de cálculo menos precisas (Hartree-Fock, Monte Carlo, etc.).

2) Heitler y London fueron los primeros en analizar cuánticamente la molécula más simple, H_2, obteniendo una energía de enlace de 3.14 eV (el valor experimental es 4.75 eV), y una distancia internucleónica de 0.87 Å (frente a su valor experimental de 0.740 Å) [Heitler, London 1927]. El cálculo directo de moléculas, por muy sencillas que sean, puede suponer un desafío formidable. Si la molécula tiene N núcleos y Z electrones, su función de ondas depende de $3(N+Z)$ variables (ignorando espines y variables internas de los núcleos). Aunque solo tomásemos 10 puntos en cada recta, el número de puntos a considerar sería $10^{3(N+Z)}$, superior al de nucleones en el Universo visible en cuanto $N + Z \geq 27$.

¿Dónde almacenar, por tanto, esta información? Y si nos preguntamos por el coste de un cálculo mecanocuántico completo con ordenadores clásicos, el insigne matemático Yuri Ivanovitch Manin nos trae a colación este párrafo de Poplavskii: «The quantum-mechanical computation of one molecule of methane requires 10^{42} grid points. Assuming that at each point we have to perform only 10 elementary operations, and that the computation is performed at the extremely low temperature $T = 3\times10^{-3}$ K, we would still have to use all the energy

[30] Tal precisión no es, por supuesto, significativa para la física experimental, pues el Hamiltoniano utilizado es solo una simple aproximación teórica a la energía del sistema. Pero sirve como banco de prueba para valorar la bondad de nuevos métodos numéricos.

produced on Earth during the last century» [Poplavskii 1975; Manin 1999].[31]

Walter Kohn (Nobel en Química 1998) habla de «muro exponencial» refiriéndose a este crecimiento de la complejidad del problema con el número de partículas [Kohn 1999a]. Para brincar esta pared, se propuso un método alternativo a la ecuación de Schrödinger, conocido como el método del funcional de la densidad [Hohenberg, Kohn, 1964; Kohn, Sham, 1965], que permite abordar el análisis cuantitativo de moléculas complejas y agregados de hasta varios centenares de electrones [Kohn 1999b]. En este método la función de onda multielectrónica deja paso a la densidad de electrones, y la búsqueda del estado y energía fundamentales de un sistema atómico o molecular en un potencial externo se traslada a minimizar el llamado funcional de densidad de Hohenberg-Kohn. La complejidad exponencial de la resolución de la ecuación de Schrödinger se reduce a complejidad polinómica, tendente a lineal, en la formulación a través del funcional de la densidad. Su extensión a macro- y biomoléculas, a la materia condensada, y en especial a la física de superficies, es un tema de gran actualidad, en el que el ingenio del investigador se pone a prueba en la búsqueda del funcional «divino» que mejor se adapte a su problema [Mattsson 2002].

El análisis denominado *ab initio* de moléculas pequeñas (menos de 50 electrones) es posible, mediante técnicas Hartree-Fock e interacción de configuraciones, con precisión para las energías rozando la experimental (1 kcal/mol, es decir, 0.04 eV), gracias a la velocidad y memoria de las computadoras actuales [Pople 1998, 1999].

3) La estructura y estabilidad de los núcleos muy ligeros ($A \leq 4$) y sus reacciones se analizan resolviendo la ecuación de Schrödinger con potenciales internucleónicos muy complejos, consecuencia del intercambio de mesones. No basta con las fuerzas entre pares de nucleones; hay que incluir también fuerzas entre ternas de ellos [Henley, Schiffer 1999]. Al aumentar A se hace preciso recurrir a otros métodos, como el de Monte Carlo (para $A \leq 7$) y el de Hartree-Fock.

4) En el estudio de los condensados atómicos de Bose-Einstein, en trampas armónicas y régimen diluido, la aproximación de campo

[31] Es una estimación muy optimista. Según la tecnología actual, con un coste a la baja de 1.3 W por GFLOPS, la energía requerida para ese cálculo sería de unos 10^{34} J, que es el consumo energético mundial del 2008 durante 0.7 Ma.

medio para el parámetro de orden del gas de bosones resulta ser notablemente eficaz desde el punto de vista cuantitativo. Este parámetro de orden del condensado satisface, en excelente aproximación, una versión efectiva y no-lineal de la ecuación de Schrödinger, conocida como ecuación de Gross-Pitaevskii, cuyas bases rigurosas han sido sentadas por Lieb y colaboradores [Gross 1961, 1963; Pitaevskii 1961; Lieb et al. 2002].

2.10. **Efecto túnel**

Una consecuencia natural de la dualidad onda-partícula es la posibilidad de los sistemas cuánticos de atravesar barreras que los superan en energía.

Este fenómeno no es nuevo en la física: Newton, por allá al año 1700, se percató de que la luz que incidía desde un cierto medio material M_1 a la superficie de separación de este con otro medio M_2 de menor índice de refracción, formando un ángulo de incidencia superior al ángulo límite, no sufría reflexión total si el espesor de M_2 era finito, e iba seguido M_2 de un tercer medio M_3 igual al primero. Esta «frustración» de la esperada reflexión interna total encuentra su explicación en la teoría electromagnética de la luz: en M_2 hay siempre una onda «evanescente», onda que, si este medio fuera de espesor infinito, decrecería exponencialmente con la distancia a la superficie de separación, pero que «renace» al adentrarse en el medio M_3, recuperando su carácter oscilatorio perdido. En lenguaje de partículas, diríamos que la deslocalización de sus ondas les permite «husmear» el otro lado de la barrera, y «colarse» con mayor o menor probabilidad. Esta probabilidad es sub-exponencialmente sensible a la altura de la barrera, a la energía cinética del proyectil, y a su masa; por eso, para los electrones, que son muy ligeros, resulta más fácil tunelear que para los protones, que a su vez, lo hacen mejor que las pequeñas moléculas.

En la física cuántica la posibilidad de «tuneleo» cuántico fue reconocida primero por Friedrich Hermann Hund en 1926, que la aplicó al paso de un electrón ligado desde un pozo potencial a otro adyacente en un doble pozo molecular [Hund 1927]. El tránsito a un continuo de energías fue considerado por Nordheim en su análisis de la emisión termoiónica y de la reflexión de electrones por metales [Nordheim 1928]. En la física nuclear la penetración de barreras entró de la

mano de George Gamow[32] en 1928 (ayudado por el matemático Nikolai Kochin), para explicar la desintegración α de los núcleos [Gamow 1928]; a la vez, Gurney y Condon obtenían, de modo independiente, similares conclusiones [Gurney, Condon 1928, 1929]. El nombre de efecto túnel es debido a Schottky en 1931 [Merzbacher 2002].

Hoy el efecto túnel forma parte del paquete estándar de herramientas conceptuales y prácticas de físicos y químicos. Aparece doquiera: en uniones Josephson de superconductores, en el microscopio de efecto túnel, y hasta en el empalme casero de hilos conductores. Más adelante comentaremos sobre su presencia en procesos biológicos.

2.11. **La realidad física**

> *I'm not crazy about reality, but it's still the only place to get a decent meal.* (Groucho Marx)
>
> *Raffiniert ist der Herrgott, aber boshaft ist er nicht.* (A. Einstein)
>
> *Observations not only disturb what is to be measured, they produce it.* (P. Jordan)
>
> *A quantum possibility is less real than a classical reality, but more real than a classical possibility.* (B. Tsirelson)

La mayoría de los físicos somos realistas ingenuos; creemos en la existencia de una realidad externa, que intentamos describir. No dudamos de que la Luna está ahí fuera, aunque no la miremos, ni dudamos de que la caída de un árbol en un bosque lejano genera ruido, aunque no lo oigamos. Pero hemos aprendido que la realidad microscópica es muy sutil; tanto, que podemos albergar serias dudas sobre si la imagen ingenua es trasladable al ámbito cuántico [Mermin 1985].

Cuenta Abraham Pais que, paseando un día con Einstein allá por el año 1950, éste se detuvo de repente, se volvió hacia él, y le preguntó si de verdad creía que la Luna solo existe cuando él la mira

[32] Este brillante físico ruso, además, fue el primero en concebir la cosmonucleosíntesis (origen primigenio de los elementos ligeros), con su consecuente fondo cósmico de radiación, y la idea de que los 20 aminoácidos que forman parte de la mayoría de las proteínas se obtenían como combinación de ternas de las cuatro bases del ADN. Pero Gamow propuso, erróneamente, un código genético con ternas solapantes y no-degenerado.

[Pais 1982].[33] Einstein creía en una realidad objetiva, independiente de que la observáramos o no. Creía que las mediciones solo descubren lo que ya preexiste en el sistema observado. No dudaba, por tanto, sobre cuál era la respuesta a la pregunta sobre la Luna, ni a otras preguntas similares, como la del ruido del árbol. Son las respuestas que daría cualquier ciudadano. En sus notas autobiográficas Einstein escribe:[34] «La Física intenta aprehender la realidad tal como se concibe con independencia de su observación. En este sentido se habla de "realidad física"».

Apoyados en estas creencias, Einstein, Boris Podolsky y Nathan Rosen publicaron un renombrado artículo en 1935, el más citado de todos los de Einstein: en dicho trabajo analizan un experimento ideal con un simple sistema cuántico bipartito (partes 1 y 2) entrelazado, y basándose, por un lado, en su premisa de que las mediciones sobre la parte 1 no pueden afectar al estado de la 2 si ambas partes están suficientemente alejadas entre sí, y por otro lado, en el hecho de que, al estar ambas partes totalmente correlacionadas, del resultado de la medición de un cierto observable sobre la 1 se infiere el resultado que se obtendría al medir otro determinado observable sobre la 2 sin necesidad de hacerlo, llegan a la conclusión de que la mecánica cuántica es incompleta, pues no caben en ella todos los atributos de realidad que poseen los sistemas físicos [Einstein, Podolsky, Rosen 1935]. (Abreviaremos a EPR cualquier mención a esta terna de autores, a su artículo, o a sus conclusiones.)

Pero su amigo Bohr, otro venerable padre de la mecánica cuántica, pensaba de otro modo, y en réplica a ese artículo, con otro de igual título, escribía: «...la interacción finita entre el objeto y el aparato de medida, debida a la existencia misma del quantum de acción, implica... la necesidad de una renuncia final al ideal clásico de causalidad y de una revisión radical de nuestra actitud ante el problema de la realidad física» [Bohr 1935]. Wheeler, buen conocedor de ambos, se sitúa del lado de Bohr. Este es su famoso *dictum*: «Ningún fenómeno elemental es un fenómeno hasta que es un fenómeno observado (o registrado de forma indeleble en un acto irreversible de amplificación)» [Wheeler 1979; Thorne, Zurek 1986].

[33] «It must have been around 1950, I was accompanying Einstein on a walk from The Institute for Advanced Study to his home, when he suddenly stopped, turned to me, and asked me if I really believed that the moon exists only if I look at it.»

[34] A. Einstein: «Die Physik ist eine Bemühung das Seiende als etwas begriefflich zu erfassen, was unabhängig vom Wahrgenommen-Werden gedacht wird. In diesem Sinne spricht man vom "Physikalisch-Realen"» [Einstein 1949].

Si en lugar de la Luna se tratase de un átomo, o de algo con muy pocos grados de libertad, la contestación a la pregunta de Einstein a Pais podría ser otra. Con su medición, el observador construye la realidad, actualizando una potencialidad de entre todas las posibles. Parafraseando a Antonio Machado, el físico cuántico diría: «caminante, no hay camino / se hace camino al *medir*.» Antes de medir, la realidad está «en suspensión», indecisa entre alternativas; por el acto de la medición, se ve forzada a elegir.

A escala macroscópica, nuestro efecto como observadores es despreciable, y podemos ignorarlo en la fenomenología cotidiana. Pero en cuanto atañe al mundo atómico, nuestro efecto es siempre esencial, pues en el interviene el cuanto de acción de Planck, de tamaño comparable con la acción del sistema observado.

2.11.1. *Una desigualdad de Bell*

> *Is it not good to know what follows from what, even if it is not necessarily FAPP? Suppose for example that quantum mechanics were found to resist precise formulation. Suppose that when formulation beyond FAPP was attempted, we find an unmovable finger obstinately pointing outside the subject, to the mind of the observer, to the Hindu scriptures, to God, or even only Gravitation? Would that not be very, very interesting?* (J.S. Bell)[35]

En un colectivo arbitrario de personas, clasificadas por sexo (H,M), por edad (V,J) y por color (B,N), se encuentra que hay

1/ n(H,V,?) hombres viejos (sin color especificado)
2/ n(H,?,B) hombres (sin edad especificada) blancos, y
3/ n(?,V,N) personas (sin sexo especificado) viejas negras.

Como prueba necesaria de que no se han deslizado errores, se comprueba que se satisface esta desigualdad (0):

$$n(\mathrm{H,V,?}) \leq n(\mathrm{H,?,B}) + n(\mathrm{?,V,N}) \qquad (0)$$

dado que una persona cualquiera de sexo-edad «H,V» es o bien blanca (en cuyo caso está en «H,B»), o bien es negra (en cuyo caso está en «V,N»); o si se prefiere,

$$n(\mathrm{H,V,?}) = n(\mathrm{H,V,B}) + n(\mathrm{H,V,N}) \leq n(\mathrm{H,?,B}) + n(\mathrm{?,V,N})$$

[35] FAPP es la abreviatura de Bell para «for all practical purposes».

Basándose en la trivial desigualdad anterior, se puede demostrar sin demasiado esfuerzo una desigualdad, de la clase de las llamadas desigualdades de Bell (que luego comentaré), consecuencia de asumir el realismo local, esto es, 1/ la existencia de una realidad preexistente a las observaciones; y 2/ la localidad einsteniana, es decir, ninguna influencia puede propagarse a velocidad superior a la de la luz en el vacío [Wigner 1970; d'Espagnat 1979].

Supongamos, en efecto, un colectivo de pares (A, B) de partículas A y B; cada par comparte un origen común, distanciándose luego entre sí. Por ejemplo, podrían ser A y B partículas de espín ½ procedentes de la desintegración de una partícula X de espín 0, supuesta en reposo. Y eso supondremos por concreción. Sean S_1, S_2, S_3 tres atributos físicos dicotómicos, de forma que cada partícula A del par (A, B) los posee con valores s_1, s_2 y s_3 iguales a 0 o a 1, y para su compañera B en el par esos valores $\underline{s}_1$, $\underline{s}_2$ y $\underline{s}_3$ de S_1, S_2, S_3 son siempre complementarios a los de A, esto es, si para A el atributo S_j vale 0, o 1, entonces en su compañera B ese mismo atributo S_j vale 1, o 0, respectivamente. En fórmulas,

$$\underline{s}_1 = 1 - s_1,\ \underline{s}_2 = 1 - s_2,\ \underline{s}_3 = 1 - s_3$$

Tales atributos pueden ser las componentes del espín individual a lo largo de una cualquiera de tres direcciones arbitrarias distintas $\mathbf{n}_1$, $\mathbf{n}_2$ y $\mathbf{n}_3$, en unidades de $h/2\pi$ y desplazadas en ½, esto es, $\mathbf{S}\cdot\mathbf{n}_j$ + ½. Debido a la anticorrelación forzada por la conservación del momento angular en la desintegración de la partícula fuente X, podemos conocer el valor s_j de la partícula A midiendo S_j sobre B, y por tanto, de acuerdo con la hipótesis de localidad einsteiniana, sin perturbar A si ambas partículas están suficientemente separadas. Luego los atributos de A (y, *mutatis mutandis*, los de B) son, si aceptamos los argumentos de EPR, elementos de realidad coexistentes. Hagámoslo de momento, por mor de la discusión, aunque sepamos que contradice la conocida incompatibilidad mutua de los observables S_j.

Denotemos por $\#(S_i = s_i,\ S_j = s_j)$, $i \neq j$, la totalidad de los pares en que la partícula A tiene valores s_i y s_j para los atributos S_i, S_j, con independencia del valor que tengan para el atributo restante. Es fácil establecer esta desigualdad (1):

$$\#(S_1 = s_1,\ S_2 = s_2) \leq \#(S_1 = s_1,\ S_3 = s_3) + \#(S_2 = s_2,\ S_3 = \underline{s}_3) \qquad (1)$$

En efecto, basta identificar este colectivo de pares de partículas con el colectivo anterior de personas, los atributos S_1, S_2, S_3 con los de sexo, edad y color, respectivamente, los valores (0,1) con (H,M), (V,J) y (B,N), según el caso, y aplicar la desigualdad (0) antes obtenida (o alguna de las que trivialmente resultan de esta bajo una o varias de las transposiciones H↔M, V↔J, B↔N).[36]

Debido a la supuesta anticorrelación existente entre los valores de los atributos de la partícula *A* y los de su compañera *B*, la desigualdad previa equivale a esta otra desigualdad (2), que hace referencia a un atributo de *A* y a otro de *B*:

$$\#[S_1 = s_1;\ S_2 = \underline{s}_2] \leq \#[S_1 = s_1;\ S_3 = \underline{s}_3] + \#[S_2 = s_2;\ S_3 = s_3] \qquad (2)$$

donde $\#[S_1 = s_1;\ S_2 = \underline{s}_2]$ denota el número de pares en que el atributo S_1 de *A* vale s_1, y el atributo S_2 de *B* vale $\underline{s}_2$, etc. Así escrita la desigualdad anterior (1), a la desigualdad (2) la denominaremos desigualdad de Bell. Para su deducción, hemos admitido, con EPR, que los tres atributos considerados son elementos de realidad para cada una de las partículas del par (como dije, sus valores para una de las dos partículas son inferibles, sin perturbación de esta, de sus valores medidos sobre la lejana compañera, debido a la anticorrelación citada), aunque no puedan medirse dos de ellos para una misma partícula.

Representa la anterior desigualdad (2) de Bell una afirmación que, a diferencia de la desigualdad (1), es trasladable al mundo cuántico, pues mientras sobre una misma partícula cuántica no se puede hablar de los valores de dos atributos incompatibles, como son los proyectores de espín en direcciones que no sean iguales ni opuestas, sí puede hacerse sobre dos partículas distintas, considerando un atributo para cada una de ellas.

De acuerdo con la desigualdad (2), unos porcentajes del 75% de pares con $s_1 = 0$, $\underline{s}_2 = 0$, del 75% de pares con $s_1 = 0$, $\underline{s}_3 = 0$, y del 75% de pares con $s_2 = 1$, $s_3 = 1$, son aceptables, pero no unos porcentajes de 75%, 25% y 25%. ¿De acuerdo?

[36] A los amantes del álgebra, les bastará con darse cuenta de que siempre que las variables *a*, *b* y *c* valen 0 o 1, se cumple la desigualdad $ab \leq ac + b(1 - c)$. Esto garantiza la desigualdad en cuestión.

2.11.2. *Un experimento cuántico*

Volvamos a nuestra fuente de pares. Imaginemos ahora que produce un gran número $3N$ de pares (*A*, *B*) de partículas de espín ½ en un estado global, para cada par, de momento total nulo y de espín total nulo, de forma que los espines individuales en una misma dirección están perfectamente anticorrelacionados. Supongamos que las partículas *A* se mueven según $+Oz$, y las partículas *B* según $-Oz$. Sean las direcciones $\mathbf{n}_1$, $\mathbf{n}_2$ y $\mathbf{n}_3$ en el plano *Oxy* dadas por:

$$\mathbf{n}_1 = (1, 0, 0),\ \mathbf{n}_2 = (\cos\alpha, \text{sen}\,\alpha, 0),\ \mathbf{n}_3 = (\cos\beta, \text{sen}\,\beta, 0)$$

Supondremos que la escala de lectura de las medidas de los observables de espín está diseñada de modo que da el valor 1, o 0, según que el espín de la partícula esté orientado en la dirección $\mathbf{n}_j$ o en la dirección opuesta $-\mathbf{n}_j$. Esto es, seguimos considerando los observables $S_j = \mathbf{S}\cdot\mathbf{n}_j + ½$.

Dividimos el colectivo inicial en tres subcolectivos de *N* pares cada uno. Sobre el primer subcolectivo de *N* de esos pares medimos S_1 sobre *A* y S_2 sobre *B*. La probabilidad de que al medir S_1 sobre *A* obtengamos 0 (caso $s_1 = 0$), y que a la vez la medida de S_2 sobre *B* arroje también 0 (caso $\underline{s}_2 = 0$), es, de acuerdo con la mecánica cuántica, $½\ \text{sen}^2(\alpha/2)$; obtendremos así una colección C_{12} de $\#[S_1 = 0;\ S_2 = 0]$ pares en los que S_1 vale 0 sobre *A* y S_2 vale 0 sobre *B*, de forma que

$$\#[S_1 = 0;\ S_2 = 0]/N = ½\ \text{sen}^2(\alpha/2)$$

Procediendo de igual modo con los otros dos subcolectivos restantes formaremos una colección C_{13} de $\#[S_1 = s_1;\ S_3 = \underline{s}_3]$ pares en los que S_1 vale 0 sobre *A* y S_3 vale 0 sobre *B*, de suerte que

$$\#[S_1 = 0;\ S_3 = 0]/N = ½\ \text{sen}^2(\beta/2)$$

y otra colección C_{23} de $\#[S_2 = 1;\ S_3 = 1]$ pares en los que S_2 vale 1 sobre *A* y S_3 vale 1 sobre *B*, de modo que

$$\#[S_2 = 1;\ S_3 = 1]/N = ½\ \text{sen}^2[(\beta-\alpha)/2]$$

Luego la desigualdad de Bell, antes obtenida, para el colectivo unión de C_{12}, C_{13} y C_{23} queda en la forma equivalente (3)

$$\text{sen}^2(\alpha/2) \leq \text{sen}^2(\beta/2) + \text{sen}^2[(\beta-\alpha)/2] \qquad (3)$$

Por ejemplo, si

$$\alpha = -120°,\ \beta = +120°,\ \beta-\alpha = 240°$$

la desigualdad (3) se convierte en

$$¾ \leq ¾ + ¾$$

que, evidentemente, se cumple.

Pero si

$$\alpha = 120°,\ \beta = 60°,\ \beta-\alpha = -60°$$

la desigualdad (3) se convierte en

$$¾ \leq ¼ + ¼$$

que, claramente, no se cumple. De aquí la siguiente consecuencia fundamental: hay situaciones cuánticas que violan alguna desigualdad de Bell.

Este experimento imaginario que acabamos de exponer se conoce como experimento de EPR *à la* Bohm, una versión más simple y pedagógica que el experimento original EPR [Bohm 1951].

Nótese que el estado cuántico usado para este ejemplo es el estado singlete de espín, un estado entrelazado por antonomasia. No podía ser de otra forma; el entrelazamiento es una condición necesaria (aunque no suficiente) para la violación de las desigualdades de Bell [Werner, Wolf 2001]. En cualquier estado no entrelazado las únicas correlaciones entre sus partes son clásicas y por tanto satisface cualquier desigualdad de Bell. Al fin y al cabo esta solo utiliza, para su establecimiento, argumentos clásicos.

Desde que John Stuart Bell probara en 1964 su famoso y profundo teorema de inexistencia de variables ocultas locales (VOL) con las que se pudieran reproducir todos los resultados de la física cuántica [Bell 1964, 1966, 1987], mostrando que había desigualdades (luego llamadas desigualdades de Bell) violadas por procesos cuánticos pero satisfechas por todos los modelos de variables ocultas compatibles con el realismo local, se han realizado decenas de experimentos que respaldan a la mecánica cuántica y que para la gran mayoría de los físicos suponen el rechazo definitivo de las VOL, y en particular, del realismo einsteiniano. Me limito a citar los trabajos pio-

neros de Freedman y Clauser, y de Aspect, Grangier y Roger, y a remitir a algunos artículos de revisión de interés [Freedman, Clauser, 1972; Aspect, Grangier, Roger 1982; Aspect 1992; Shimony 2009]. Para los más puristas, sin embargo, el caso sigue abierto, pues persisten ciertas fisuras, «gateras», o posibilidades de escapatoria en los experimentos que tienen que ver con la insuficiente eficiencia de los equipos de detección (escapatoria de la detección o «detection loophole») y/o con la insuficiente rapidez en la medición sobre una de las partes del sistema como para asegurar que no afecta a la otra parte (escapatoria de la comunicación o «communication loophole»). Hay experimentos que han cerrado una de ambas escapatorias, pero ninguno todavía que haya cerrado las dos [Matsukevich et al. 2008; Shimony 2009].

Con la violación de las desigualdades de Bell la naturaleza nos muestra, primero, que el concepto de realidad es muy sutil, y segundo, que el realismo local defendido por Einstein es insostenible, pues no siempre existen ni una realidad independiente de nuestras observaciones ni unos estados físicos en los que los resultados de acciones realizadas en zonas distantes sean independientes.

Hemos visto cómo Einstein, ferviente realista, no dudaba de la existencia de un mundo exterior, independiente de si se observa o no. Para él, las mediciones solo descubren lo que ya preexiste en el sistema observado. Para Bohr y sus seguidores (escuela de Copenhague) nada existe si no se ha medido previamente. Con esta armadura positivista, se opusieron frontalmente a las tesis de EPR sobre la incompletitud de la mecánica cuántica, rechazando cualquier argumento contrafactual. En particular, no aceptaron que una partícula pudiera en principio tener una posición y un momento definidos, aunque solo uno de esos atributos fuera determinable.

La preexistencia o no en un sistema individual de dos o más valores incompatibles parecía una cuestión metafísica, hasta que en el año 1964 Bell inventara la forma de preguntarle a la naturaleza sobre esta cuestión. Y ya hemos presentado la respuesta: no es posible tal coexistencia.

¿Por qué el realismo, que tan bien funciona en la vida ordinaria, deja de hacerlo en los fenómenos microscópicos? La respuesta reside en el principio de superposición. Sabemos, por ejemplo, que si hemos preparado una partícula de espín ½ con su espín a lo largo de Oz, esto es, con $2S_z = +1$, y medimos sobre ella $2S_x$, obtenemos +1 un 50% de las veces, y –1 en el otro 50% de los casos. Pero una

vez medido $2S_x$, el valor original $2S_z = +1$ ya deja de ser cierto siempre, siéndolo solo la mitad de las veces. En un mundo cuántico realista, ambos, $2S_z$ y $2S_x$ tendrían valores definidos, y la medida de uno de ellos no debería afectar al otro. Así que en los sistemas cuánticos, los atributos no preexisten, sino que se producen en las preparaciones y en las mediciones.

Sin embargo, ahí está Luna aunque no la mire. ¿Por qué? Porque la Luna es un sistema tremendamente complejo, y cuánticamente incoherente, para el que el principio de superposición no es aplicable. La Luna está interactuando constantemente con el entorno, lo que impide su deslocalización. Se ha podido superponer linealmente estados de «squids» —dispositivos superconductores de interferencia cuántica—; y aunque estos son sistemas mesoscópicos de unos 10^{10} pares de Cooper, son, sin embargo, poco complejos, contando con pocos grados de libertad efectivos.

En el experimento EPR *à la* Bohm, la medición en una de las dos partes *A*, *B*, no influye instantáneamente en la otra parte. Se ha hablado del colapso instantáneo (¿en qué referencial?) del estado al medir en una parte. Decir esto, además de carecer de sentido,[37] es innecesario. Las «fantasmales acciones a distancia», como las llamaba Einstein, no son precisas. Las correlaciones entre los resultados en las partes *A* y *B* no son relaciones causales de una parte sobre la otra; están impresas o codificadas desde su origen en el estado global.

El teorema de Bell establece la incompatibilidad de la física cuántica con el realismo local. ¿Con el realismo o con la localidad? Muchos se inclinan por no tocar el realismo y por permitir una cierta no localidad. Entre quienes optan por sacrificar la localidad se halla Anthony James Leggett (Nobel en Física 2003), que ha considerado la posibilidad de que los sistemas cuánticos puedan tener valores definidos de las magnitudes físicas, observémoslas o no (realismo), y los subsistemas puedan influenciarse entre sí instantáneamente (no localidad). Aceptando la existencia de tales variables ocultas no locales (VONL), pueden demostrarse desigualdades (distintas de las de Bell) entre correlaciones de magnitudes en dos subsistemas; tales desigualdades se conocen con el nombre de desigualdades de Leggett [Leggett 2003]. Se han realizado experimentos con sistemas cuánticos que

[37] De lo contrario, estaríamos frente a una violación de la invariancia relativista: una presunta influencia de *A* sobre *B* a velocidad superlumínica, se vería en otro sistema inercial de referencia como una influencia superlumínica de *B* sobre *A*.

muestran la violación de tales desigualdades y acuerdo con las predicciones cuánticas, siempre «módulo» las citadas y sempiternas escapatorias de la detección y comunicación [Gröblacheret al. 2007; Romero et al. 2010]. Con tales salvedades, podemos decir que también esos modelos de VONL están desterrados.

Decía Giambattista Vico, el filósofo de la historia que identificó verdad y hecho (*verum esse ipsum factum*):[38] «En la historia, somos los actores; en las ciencias naturales, meros espectadores.» No es así, rebatirá Wheeler. Observando la naturaleza, participamos en la construcción de la realidad, de una realidad extraña, mucho más de lo que nuestras palabras puedan expresar; una realidad en que el todo puede ser más que la suma de sus partes, una realidad gobernada por un azar, eso sí, un azar reglado; una realidad, en fin, en que «ser o no ser» ya no es la pregunta, sino la respuesta.

2.12. **La física cuántica y el tiempo**

Ni siquiera el tiempo, eso que «ni vuelve ni tropieza» (Quevedo), resulta insensible al influjo de los cuantos. No podemos cambiar el pasado, pero sí sabemos enriquecer la historia de su influencia sobre el presente en algunos casos elementales del mundo subatómico. En el experimento de la doble rendija, podemos recomponer franjas de interferencia si conseguimos borrar en el futuro cualquier información existente sobre qué rendija, si la 1 o la 2, ha pasado la partícula, siempre que esa información no se haya registrado de forma irreversible. El borrado cuántico de información en los llamados experimentos de elección retardada no altera los datos registrados anteriormente, pero sí permite dar una nueva lectura o forma al relato histórico [Scully, Drühl 1982; Scully et al. 2000; Greene 2004; Galindo 2009].

Esto puede conseguirse, por ejemplo, mediante un adecuado montaje experimental con fotones de una fuente de intensidad *S* en el que para cada fotón γ que llega a la pantalla hay otro fotón ϕ, testigo chivato del suceso, originado en las proximidades de la rendija de paso, y cuyo registro en oportunos detectores D_1, D_2 nos permitiría saber por cuál rendija, si la 1 o la 2, respectivamente, ha pasado γ. Simplemente por esta posibilidad de que podamos averiguar así el camino seguido por cada γ, no se observan interferencias en la pan-

[38] No se apartó mucho de la doctrina escolástica: *Veritas est adaequatio intellectus ad rem*.

talla sobre la que inciden todos estos. Pero ahora podemos borrar esa información que lleva un fotón ϕ sobre el camino, introduciendo unos divisores de haz que superponen dos estados cuánticos del testigo, el estado de cuando proviene de la rendija 1, y el estado de cuando proviene de la rendija 2. Esa superposición puede ser simétrica o antisimétrica, y según sea una u otra, el fotón dispara un detector D_+, D_-, respectivamente. En resumen, contamos con cuatro detectores D_1, D_2, D_+, D_-, de modo que sabemos con total seguridad que, si ϕ dispara el detector D_1, γ ha pasado por la rendija 1 (camino c_1), si ϕ dispara el detector D_2, γ ha pasado por la rendija 2 (camino c_2), si ϕ dispara el detector D_+, el camino de γ ha sido la combinación simétrica c_1+c_2, y si ϕ dispara el detector D_-, el camino de γ ha sido la combinación antisimétrica c_1-c_2. Es posible, por tanto, clasificar los impactos de los fotones que llegan a la pantalla en cuatro subconjuntos disjuntos X_1, X_2, X_+, X_-, según que sus testigos hayan ido a los detectores D_1, D_2, D_+, D_-, respectivamente.

Todo esto podemos hacerlo, en principio, cuando nos plazca, tras haber recogido todos los γ en la pantalla. Seleccionando los impactos de los fotones del conjunto X_1, conseguimos una imagen igual que la que se obtendría rehaciendo el experimento con la rendija 2 cerrada y una fuente de intensidad $S/2$, pues nos consta que todos esos fotones han ido por la rendija 1; hemos mantenido con ellos la información sobre el camino. Idem con X_2, *mutatis mutandis*. Pero si seleccionamos los impactos de los fotones del conjunto X_+, veremos un patrón de interferencia, pues no nos consta por cuál rendija concreta han pasado esos fotones; la mitad de esos fotones fueron por la 1, pero de su chivato ϕ hemos borrado esa información, combinándolo, simétricamente, con la alternativa de haber pasado por la 2. De modo similar podemos razonar con los fotones del conjunto X_-; su patrón de interferencia es complementario del anterior, con máximos intercalados entre los de aquél. La suma de ambos patrones conduce a una imagen sin franjas de interferencias, igual a la que se obtendría con las dos rendijas abiertas, fotones chivatos y una fuente de intensidad $S/2$.

Existen límites cuánticos al buen funcionamiento de los relojes [Salecker, Wigner 1958; Whitrow 1980; Margolus, Levitin 1998; Lloyd 2002; Giovannetti, Lloyd, Maccone 2004]. Combinando el principio de indeterminación y la física del colapso gravitacional se demuestra que hay una precisión máxima, no superable, dada por el tiempo de Planck $\tau_{Planck} \sim 10^{-43}$ s. También los quanta impiden que haya relojes heraclitanos, relojes que siempre avanzan, sin que jamás se den la vuelta. Se demuestra un teorema de no-existencia de relojes perfectos, según el cual, si los hamiltonianos son semiacotados, entonces no hay relojes heraclíteos que en todo instante de tiempo tengan probabilidad no nula de avanzar, y probabilidad nula de ir para atrás [Unruh, Wald 1989].

No deja de ser sorprendente el papel meramente pasivo que el tiempo desempeña en la mecánica cuántica. Hasta la relación de indeterminación energía-tiempo reclama una interpretación singular. El tiempo es variable conjugada de la energía; dado un hamiltoniano H, cabría esperar que existiera τ_H, observable conjugado de H, y que tal «tiempo dinámico» o «interno» guardara alguna relación con el parámetro t de la ecuación de Schrödinger. Pauli zanjó en falso la cuestión con un argumento matemático que luego se demostró que era insostenible ya que, en ciertas circunstancias, existe tal τ_H [Pauli 1958; Galindo 1985].

Infiérese de cuanto precede que si bien la física de los últimos cien años nos ha permitido saber más sobre el tiempo, aún es mucho lo ignorado, y muy posiblemente el debate proseguirá durante algunas décadas en torno a la trilogía tiempo, quanta y gravitación.

2.13. **Algunos límites de origen cuántico**

> *Die Quantenmechanik ist sehr Achtung gebietend. Aber eine innere Stimme sagt mir, dass das noch nicht der wahre Jakob ist. Die Theorie liefert viel, aber dem Geheimnis des Alten bringt sie uns kaum näher. Jedenfalls bin ich überzeugt, dass...*
> (A. Einstein)

1. La precisión predictiva de la electrodinámica cuántica sobresale en toda la física. Así, la anomalía del factor g de espín del electrón se conoce experimentalmente con 10 cifras significativas, y la teoría las reproduce todas para un valor de la constante de estructura fina α que concuerda con las nueve cifras significativas del valor de α procedente del ajuste de ciertos niveles atómicos [Gabrielse et al. 2006, 2007].

2. La importante linealidad de la mecánica cuántica, responsable, en particular, del principio de superposición lineal, también ha sido sometida a férreo escrutinio. El resultado más destacado hasta el momento es la cota obtenida para la presunta rotura de linealidad en

un modelo propuesto por Steven Weinberg (Nobel en Física 1978): la energía del término no-lineal es, a lo sumo, 2.0×10^{-27} veces la energía de los términos lineales [Weinberg 1989a, 1989b; Majumder et al. 1990].

3. Acaba de realizarse un experimento que revela cómo la física cuántica también se aplica a sistemas lo suficientemente grandes como para dejarse ver [O'Connell et al. 2010]. Una minúscula paleta de nitruro de aluminio en voladizo, de unas 40 micras de longitud y unos billones de átomos, se ha puesto, durante unos nanosegundos, en superposición coherente de dos estados cuánticos: uno fundamental, y otro excitado al primer nivel fonónico. Para conseguir tal proeza tecnológica, ha sido preciso enfriar el sistema hasta una temperatura de 25 mK. Esta «máquina cuántica», de tamaño similar al de estructuras perceptibles a simple vista, es el primer dispositivo cuántico creado por el hombre, y su realización ha sido elegida por la revista Science como el hallazgo científico más importante del año 2010.

4. Como ya dijimos, el experimento de la doble rendija con electrones fue seleccionado hace unos años como el experimento físico más bello de toda la historia (seguido en la lista por el legendario experimento de Galileo sobre caída libre de graves en un campo gravitatorio). Escribía Feynman en sus lecciones de física que este experimento contiene todos los misterios de la mecánica cuántica [Feynman, Leighton, Sands 1965].[39] (No es así exactamente; el entrelazamiento es otro misterio a añadir [Silverman 1995].) Ampliamente realizado con luz (fotones) desde que lo hiciera Young a comienzos del siglo XIX, se hizo con electrones por primera vez en 1961. Después se ha llevado a cabo en sistemas interferométricos de distintos tipos con neutrones, átomos y moléculas, algunas tan grandes como los fullerenos C_{60}, C_{70}, e incluso con el fluorofullereno $C_{60}F_{48}$, de 1632 nucleones y masa por tanto de ≈ 1632 u.[40] Asimismo, se ha observado la interferencia cuántica con biomoléculas de forma aplastada como la tetrafenilporfirina $C_{44}H_{30}N_4$ [Hackermüller et al. 2003]; sus centros de masas, localizados inicialmente en unos pocos picómetros, sufren una deslocalización de unos cuatro órdenes de magnitud antes de llegar a la primera de las tres redes de difracción del experimento. Otras moléculas notables con las que se han conseguido también patrones de interferencia son: $C_{30}H_{12}F_{30}N_2O_4$, diazobenceno funcionalizado con grupos perfluoroalquilo [Gerlich et al. 2007], y la molécula catalizadora fluorada $C_{48}H_{24}F_{51}P$ (1601 u) [Gerlich et al. 2008]. Una meta próxima consiste en lograr observar interferencias en experimentos de esta clase o similares con virus de pequeño tamaño y tal vez con nanobacterias.

¿Hay algún límite superior a la masa de los proyectiles? Tal vez alguna masa relacionada con la de Planck (~ 22 μg); recordemos que partículas con la masa de Planck tendrían una longitud de onda Compton del orden de la longitud de Planck y menor que su radio de Schwarzschild, y no está nada claro que en esas circunstancias extremas se mantuvieran las interferencias. De hecho, se ha especulado que las fluctuaciones estocásticas en la geometría del espacio tiempo, debidas al fondo de ondas gravitatorias primigenias y galácticas, provocarían inevitablemente una descoherencia que impediría observar ninguna interferencia onda-materia en partículas con masa superior a una masa límite en cuya expresión, como es lógico esperar, interviene la masa de Planck [Lamine et al. 2006; Jaeckel et al. 2008]. Fuera de estos extremos, hay límites prácticos marcados por las características del interferómetro, estimándose que muy pronto los avances en nanotecnología y sistemas de detección permitirán llegar a masas entre 10^4-10^6 u [Arndt, Aspelmeyer, Zeilinger 2009; Juffmann et al. 2010]; por lo pronto, el grupo de Markus Arndt en la Universidad de Viena ha logrado observar interferencias con grandes moléculas orgánicas (hechas a medida), en un interferómetro de tipo Kapitza–Dirac–Talbot–Lau [Gerlich et al. 2011]. Entre los compuestos moleculares usados en estos experimentos destacan: por su masa, la nanosfera PFNS10 ($C_{60}[C_{12}F_{25}]_{10}$), con diez cadenas perfluoroalquilo enlazadas a un fullereno C_{60}, y un total de 430 átomos (6910 u); y por su tamaño, el complejo TPPF152 ($C_{168}H_{94}F_{152}O_8N_4S_4$) derivado de la tetrafenilporfirina, también con 430 átomos (5672 u, 60 Å).

Se ha analizado recientemente la posibilidad de observar superposiciones cuánticas coherentes de nanoestructuras dieléctricas, enfriadas y atrapadas en cavidades ópticas de alta finura; en particular podría aplicarse a virus pequeños, como el del resfriado común o el del mosaico del tabaco (TMV), que presentan comportamiento dieléctrico, tienen un tamaño del orden de la longitud de onda de los

[39] «We choose to examine a phenomenon which is impossible, *absolutely* impossible, to explain in any classical way, and which has in it the heart of quantum mechanics. In reality, it contains the only mystery.»

[40] En biología molecular y en biofísica es frecuente el uso del dalton como unidad de masa, con símbolo Da, equivalente a la unidad unificada de masa atómica, de símbolo u: 1 Da = 1 u. Por ejemplo, la masa de una cierta molécula de ADN con 1578 pares de bases, medida directamente por vez primera mediante un NEMS (sistema nanoelectromecánico) en 2005, resultó ser de 999 kDa, o, si se prefiere en gramos, 1.66 ag = 1.66×10^{-18} g [Ilic et al. 2005].

láseres usados (~ 100 nm), y aguantan durante semanas las bajas presiones necesarias (del orden de 10^{-4} Torr, esto es, del orden de 0.01 Pa) [Romero-Isart et al. 2010].

A pesar de estos llamativos logros experimentales, y los que sin duda pronto los sobrepasarán, parece muy claro que, como dicen Cronin *et al.*, «it will be some time before sentient beings can be sent through an interferometer and subsequently asked which path they took» [Cronin, Schmiedmayer, Pritchard 2009].

5. El principio cuántico de indeterminación de Heisenberg supone una barrera infranqueable al producto de las incertidumbres con que ponemos conocer simultáneamente cualquier par de variables canónicamente conjugadas. Mas los aparatos de medida también son sistemas físicos que se ven afectados por el entorno, y existen por ello otros límites en las mediciones que no son absolutos, como el ruido cuántico (originado por las fluctuaciones del vacío) y el límite cuántico estándar (que afecta a la medida de la posición de una masa libre), que son superables, y que, gracias al despliegue de enormes dosis de ingenio por parte de los físicos experimentadores, que recurren a estrategias cuánticas modernas como el uso de la luz cuántica comprimida, los estados de espín comprimidos, el entrelazamiento, u otros métodos, esos límites, no absolutos, están siendo rebasados [Braginsky, Vorontsov 1975; Giovannetti, Lloyd, Maccone 2004; Sun et al. 2008; Louchet-Chauvet et al. 2010; Gross et al. 2010].

Desde un punto de vista fundamental, surge la importante cuestión de qué límites existen a las medidas de la propia estructura del espacio-tiempo. Ya comentábamos antes que la precisión límite en la medida del tiempo viene dada por el tiempo de Planck τ_P (~ 0.54×10^{-43} s); en cuanto a la distancia más pequeña medible, su límite es la longitud de Planck l_P (~ 1.6×10^{-35} m).[41] Para medir la estructura a gran escala de nuestro Universo, necesitamos una red de relojes intercambiando señales entre sí. La física cuántica, a través del teorema de Margolus-Levitin, y el requerimiento de que los relojes no estén demasiado apiñados como para formar agujeros negros cuyos horizontes impidan la comunicación entre ellos, limita el número máximo N de sucesos elementales distintos que pueden acontecer en una región de radio R a lo largo de un tiempo T:

$$N \sim (R/l_P)(T/\tau_P)$$

[41] Una mayor precisión exigiría relojes y partículas de longitud de onda Compton similar a su radio de Schwarzchild, y por tanto objetos físicos para cuyo análisis necesitaríamos recurrir a una teoría cuántica de la gravitación, de la que aún carecemos.

En particular, en la parte del Universo actual dentro de nuestro horizonte visible ($R \sim 3.3ct_{U,0}$, T ~ $t_{U,0}$ = 14 Ga) el número máximo de sucesos es

$$N_{U,0} \sim 10^{122}$$

Este número es del mismo orden de magnitud que el número máximo de operaciones lógicas elementales que el Universo (visible) ha podido procesar a lo largo de su vida actual sobre los 10^{91} bits contenidos en sus partículas y campos (10^{122} bits si se incluyen los grados de libertad gravitatorios) [Lloyd 2002; Giovannetti, Lloyd, Maccone 2004; Lloyd 2005].

2.14. **Los quanta y la información**

> *Es ist unwürdig, die Zeit von hervorragenden Leuten mit knechtischen Rechenarbeiten zu verschwenden, weil bei Einsatz einer Maschine auch der Einfältigste die Ergebnisse sicher hinschreiben kann.* (G.W. Leibniz)

> *... I'm not happy with all the analyses that go with just the classical theory, because nature isn't classical, dammit. And if you want to make a simulation of nature, you'd better make it quantum mechanical, and, by golly, it's a wonderful problem because it doesn't look so easy.* (R. Feynman)

> *Computers are physical objects, and computations are physical processes. What computers can or cannot compute is determined by the laws of physics alone, and not by pure mathematics.* (D. Deutsch)

La irrupción de los quanta en la física ha transformado radicalmente nuestra visión de la realidad. Si demoledora fue la relatividad al negar la absolutidad del espacio y la del tiempo, no resulta exagerado afirmar que mucho más perturbadores han sido los principios cuánticos de complementariedad y de indeterminación. Estos nos han forzado a renunciar a la visión de medio mundo para conocer la otra mitad complementaria. La incorporación de las probabilidades en la formulación cuántica, no como la expresión de un conocimiento incompleto, sino como una imposición esencial de la naturaleza, es otra característica del nuevo discurso científico; supone ello, en particular, el forzoso abandono del determinismo laplaciano, pues las leyes cuánticas, que mantienen el determinismo evolutivo, impiden la deter-

minación perfecta del estado inicial que la física clásica requiere para predecir exactamente el futuro. Finalmente, hay un rasgo aún más asombroso de la física cuántica: el entrelazamiento. Ligado a la superposición de potencialidades, o alternativas indistinguibles, del formalismo cuántico, el entrelazamiento hace que, por ejemplo, en un sistema compuesto podamos conocer perfectamente el todo sin conocer bien las partes [Galindo 2000].

La información, vista como memoria, elaboración y comunicación, tiene, sin duda, una naturaleza física. Por ello se rige por las leyes de la naturaleza, que le prestan sus fortalezas y le contagian sus debilidades. La información clásica basada en los bits, entidades físicas robustas frente a perturbaciones externas, y clonables, tiene un papel dominante en nuestra sociedad actual, inimaginable sin el apoyo de los computadores y sin internet. Pero desde hace una treintena de años la información y los quanta se han conocido, y del encuentro ha surgido una prometedora teoría cuántica de la información. Ahora son los qubits, frágiles y no-clonables, los actores del drama. La criptografía cuántica y la computación cuántica son las áreas más importantes de la investigación en este terreno.

Nunca antes estuvo el hombre tan dominado por la información como lo está ahora. Miríadas de decisiones elementales entre el sí y el no, entre el blanco y el negro, entre lo verdadero y lo falso, tejen una tupida tela de araña que nos condiciona y guía. Por eso vale la pena adentrarse en la fértil tierra de los bits, unos simples objetos físicos, los más simples podríamos decir, cuyo almacenamiento, transporte y procesado conforman una importante faceta de la actividad científica, tecnológica y económica del momento.

¿Qué entendemos aquí por «información»? Entre varias otras acepciones, el Diccionario Oxford de Inglés contiene esta, tomada de la teoría de la información de Shannon: «As a mathematically defined quantity; now *esp.* one which represents the degree of choice exercised in the selection or formation of one particular symbol, sequence, message, etc., out of a number of possible ones, and which is defined logarithmically in terms of the statistical probabilities of occurrence of the symbol or the elements of the message.» Esta es la noción básica sobre la que gira el vasto campo de la teoría de la información, desarrollado en la famosa obra de Claude Shannon [Shannon 1948].

En dicha memoria, Shannon halla el límite a la compresibilidad de un lenguaje, emitido por una fuente aleatoria y sin memoria, en términos de la entropía de su alfabeto, y el límite a la capacidad operativa de un canal de transmisión ruidoso a través de su capacidad informativa. Esta teoría clásica de la información se basa en los *bits* («binary digits») 0 y 1, que no son más que dos estados de un sistema clásico que son robustos bajo la observación y clonables en aproximación suficiente. Son las unidades irreductibles de información clásica. Con ristras de tales bits podemos codificar cualquier alfabeto y por tanto cualquier texto. La moderna teoría de comunicaciones se basa en el intercambio de información codificada en cadenas de bits.

La información, además de transmitirse (gruñido, habla, carta, telégrafo, teléfono, radio,...), se almacena (paredes de una cueva, tabletas cuneiformes, papiros, pergaminos, libros, CDs, memorias flash,...) y se procesa (ábaco, computador, cerebro,...). En las tres facetas aparece algún soporte físico. De aquí el aserto «Information is physical» de Rolf Wilhelm Landauer, que los investigadores en el campo de la información han tomado como lema [Landauer 1991]. Esta naturaleza física de la información no es ninguna rémora a su desarrollo, sino una guía imprescindible para discriminar lo posible, por difícil que sea, de lo imposible. Y de la misma forma que la revolución cuántica abrió las puertas de la mecánica, de la óptica, del electromagnetismo, etc., clásicos, a nuevos y vigorosos campos con el marchamo de cuánticos, así también la teoría de la información clásica se expandió, hace unas tres décadas, a una teoría de la información cuántica que ha experimentado un desarrollo espectacular.

De seguirse la ley empírica de Gordon Earl Moore (cada dos años se duplica el número de transistores de un circuito integrado), antes de una década se alcanzará el límite atómico-molecular en el tamaño de los dispositivos electrónicos elementales de los microchips [Moore 1965].[42] En ese instante la robustez del funcionamiento de los ordenadores hará agua, pues las manifestaciones del azar cuántico aflorarán a ese nivel.

Los físicos llevan tres décadas desarrollando las bases de un nuevo futuro de la información. El mundo de los quanta ofrece la preciosa

[42] En realidad, en este trabajo afirma Moore que la duplicación ocurre cada año; en 1975 reajustó su pronóstico, subiendo a dos años el periodo necesario. Es frecuente atribuir erróneamente a Moore la afirmación de que la duplicación tiene lugar cada 18 meses; parece ser que su autoría corresponde a su colega David House, quien la propuso como periodo para doblarse el rendimiento práctico de los chips, no su número de transistores.

posibilidad de reemplazar el viejo y aguerrido bit por un nuevo y delicado vástago, el qubit o bit cuántico,[43] que a diferencia de aquel puede ocupar una posición intermedia arbitraria entre el cero y el uno, un estado indefinido en el que la respuesta a una cuestión no es ni sí ni no, ni blanco ni negro, sino ambas cosas a la vez, digamos que probable, grisáceo, en una infinidad de matices. Esta exuberancia del qubit frente al bit tiene su cruz (que pasa a virtud en el campo criptográfico cuando se trata de detectar escuchas no autorizadas): la información guardada en qubits es sumamente frágil, y su más mínimo contacto con el mundo exterior tiende a degradarla en tiempos muy pequeños. Para contrarrestar esta nefasta acción (la denominada descoherencia) hay que utilizar la información que contiene cada qubit antes de que se corrompa, y sí no da tiempo, hay que preservarla, codificándola apropiadamente, por ejemplo, en estados entrelazados con qubits auxiliares, de modo que cualquier acción exterior perniciosa sobre alguno de ellos sea detectable y corregible, sin pérdida de la información que se codificó en esos estados.

¿Qué ofrecen los qubits? Primero, la posibilidad, basada en la estructura tensorial del formalismo cuántico de sistemas multipartitos y el subsiguiente entrelazamiento, de procesar en sistemas físicos pequeños, de unos cientos de qubits, tal cantidad de información que con bits no cabría en todo el Universo. Segundo, la posibilidad, como consecuencia del principio de superposición lineal, de procesar toda esa información de una sola tacada (paralelismo masivo). Y tercero, la posibilidad, mediante interferencias, de inducir a ese sistema cuántico de qubits a adoptar un estado tal que una medición adecuada sobre él lleve a la respuesta buscada, de un modo eficiente. De ahí tantas esperanzas puestas en los ordenadores cuánticos, que abren horizontes inmensos para la resolución de problemas en los que los ordenadores actuales se muestran impotentes [Galindo 2001; Jozsa, Linden 2003; Galindo 2003b].

[43] Las palabras «bit» y «qubit» fueron introducidas por John Wilder Tukey (1946) y por Benjamin Schumacher (1965), respectivamente.

2.14.1. *Información cuántica*

> *What would happen if we could arrange the atoms one by one the way we want them...?* (R.P. Feynman)

La física cuántica, a través del paso del bit al qubit, del entrelazamiento de estados, y del principio de indeterminación, hace posibles nuevas y poderosas herramientas de transmisión y tratamiento de la información, así como una eficiencia de cálculo en principio prodigiosa.

El avance propiciado en los últimos años por la mecánica cuántica ha sido notable en el ámbito de la criptografía o arte de esconder la información. No solo hay un alto interés militar y estratégico en esto. Nuestra sociedad gira cada vez más en torno a la información digital; ingentes cantidades de dinero se mueven virtualmente en transacciones bancarias cuya seguridad se apoya en sistemas de encriptado sobre los que el asedio es constante, e informes confidenciales y números personales de tarjetas de compra viajan por la red expuestos a la piratería organizada, con el consiguiente riesgo de que nuestra intimidad sea violada y nuestra economía sangrada por manos ajenas. De ahí el interés en el desarrollo de un sistema absolutamente seguro de protección de datos. Irónicamente, los quanta no solo hacen posible esta protección total, sino que ponen de manifiesto la vulnerabilidad de los criptosistemas basados en la existencia de problemas duros para los ordenadores clásicos, pero que dejan de serlo para los cuánticos [Galindo 2007b].

El desarrollo de la computación cuántica constituye en este momento uno de los campos más activos de investigación. No son pocos los problemas técnicos a resolver, relacionados con la extraordinaria fragilidad de los estados cuánticos. Pero al igual que la sociedad usuaria de los mastodónticos ordenadores de finales de los 40, con miles de tubos de vacío y decenas de toneladas de peso, no se imaginaba que medio siglo después cualquier colegial dispondría de máquinas de calcular mucho más ligeras y potentes, somos por naturaleza optimistas y queremos pensar que el ingenio de los científicos logrará vencer finalmente las dificultades para construir ordenadores cuánticos de potencia adecuada. Con ellos el hombre habrá dado un paso de gigante en el entendimiento de la naturaleza. Si el pasado siglo XX puede llamarse siglo de la información, al siglo actual probablemente se le conocerá como el siglo de la tecnología cuántica.

Comparto con muchos la creencia en el beneficio mutuo de la simbiosis quanta e información:

1) Para la propia física fundamental, por la mejor comprensión del mundo cuántico que facilita la teoría cuántica de la información.

2) Para la física experimental de alta precisión, donde el tratamiento cuántico de la información puede resultar sumamente útil, como en el análisis de las señales de ondas gravitacionales que registre el detector LIGO-Avanzado por allá al 2014.

3) Para la tecnología de vanguardia, como la metrología de precisión y la nanotecnología. Ya en 1959, en una charla, tras la cena, pronunciada en CalTech con motivo de la reunión de la American Physical Society, Feynman invitaba a los físicos a explorar tecnológicamente el nuevo mundo de lo pequeño, hablando desde la posibilidad de escribir la Enciclopedia Británica en la cabeza de un alfiler, o meter toda la información escrita existente en un cubo de materia del tamaño de una mota de polvo de 100 μm, hasta la fabricación de máquinas capaces de circular por el riego sanguíneo para reparar, por ejemplo, válvulas en el corazón [Feynman 1960]. Esta visión feynmaniana marcó el comienzo de la era actual de la nanociencia.

La unidad de información cuántica es el *qubit*, o bit cuántico. Es la información almacenable en un sistema cuántico con dos estados: un espín ½, la polarización de un fotón, átomos con 2 estados relevantes, etc., son qubits. Aparte de los estados 0 y 1, los qubits poseen otros estados intermedios, que ni son 0 ni 1, sino ambos a la vez, flotando en una neblina entre estos dos valores.

Toda información clásica es codificable en binario. Con 1 Byte (8 bits) tenemos de sobras para asignar un número en binario a cada signo del teclado y así digitalizar cualquier texto, por ejemplo el Quijote, representándolo por una cadena de bits o por una cadena de condensadores cargados/descargados. Midiendo estas cargas podemos reconstruir la obra de Cervantes.

Con qubits haríamos lo mismo, pero con un cuidado extremo a la hora de leer. Porque si por ejemplo los estados base de los qubits con que salvamos el Quijote son «espín para arriba», «espín para abajo», pero luego a la hora de leer nos equivocamos y medimos «espín para la derecha», «espín para la izquierda», los resultados obtenidos serán aleatorios, el Quijote será irreconocible, y lo que es peor, no habrá manera de deshacer el entuerto, siendo preciso codificar de nuevo la genial novela.

Los bits son robustos, pero los qubits son sumamente frágiles ante cualquier intento de inspección. La obtención de información sobre un sistema cuántico generalmente lo perturba. Otra distinción importante está en el proceso de copiado. Cualquier estado clásico de un sistema es copiable; estamos hartos de verlo (copias de una fotografía, de un fichero digital, etc.). Supongamos, sin embargo, que queremos copiar un estado cuántico cuya preparación ignoramos. Estamos perdidos, pues con el único ejemplar que nos dan ningún conjunto de medidas (salvo aquellas, desconocidas, que dejan el estado incólume) puede revelarnos toda la información necesaria para determinar el estado y así poderlo reproducir. Esta imposibilidad de clonación cuántica (¡no existen fotocopiadoras cuánticas!) [Wootters, Zurek 1982; Dieks, 1982] tiene virtudes esenciales para proteger la información.

Hay diferencias más profundas y con mayor impacto tecnológico. Mientras la capacidad de memoria de un procesador clásico es linealmente proporcional a su tamaño, el principio de superposición lineal de estados hace que la de un procesador cuántico crezca exponencialmente con su número de qubits. Luego es de esperar que un ordenador que opere sobre qubits realice en principio hazañas impensables para un ordenador clásico.

Otrosí, el entrelazamiento ofrece la posibilidad de esconder la información difuminándola de modo que ninguna medición local pueda revelarla. Un libro clásico se lee palabra tras palabra, línea tras línea, página tras página, y la pérdida de legibilidad de una sola de sus páginas podría dificultar esencialmente su comprensión. Si el libro fuera cuántico, lo más probable es que la información conseguida con ese tipo de lectura secuencial fuera escasa, al residir en correlaciones entre muchos de sus qubits diseminados por todo el libro; a cambio, podríamos prescindir de una página del libro cuántico sin comprometer su comprensión (si la codificación usa qubits auxiliares).

El entrelazamiento es el mayor responsable de las ventajas casi mágicas de la comunicación y computación cuánticas; en él se basan algunos protocolos cuánticos de aplicación en teleportación y en criptografía, y nuevas estrategias en la incipiente teoría de juegos cuánticos [Galindo 2009].

2.14.2. *Computación clásica*

Los computadores son inútiles. Solo pueden darte respuestas. (P. Picasso)

Where a calculator on the ENIAC is equipped with 18,000 vacuum tubes and weighs 30 tons, computers in the future may have only 1,000 vacuum tubes and perhaps weigh 1.5 tons. (Anónimo, en *Popular Mechanics* 1949)

I think there's a world market for about 5 computers. (Th.J. Watson, Presidente, IBM, *ca.* 1948)

640K *ought to be enough for anybody.* (B. Gates, 1981)

If P = NP, then the world would be a profoundly different place than we usually assume it to be. There would be no special value in «creative leaps», no fundamental gap between solving a problem and recognizing the solution once it's found. Everyone who could appreciate a symphony would be Mozart; everyone who could follow a step-by-step argument would be Gauss... (S. Aaronson)

El ENIAC, primer computador electrónico de uso general y a gran escala, se concluyó en 1946. De 24 m de largo, 2.5 de alto, y 18 000 válvulas, podía realizar 5 000 sumas por segundo, velocidad que hoy puede parecernos ridícula pero que era entonces mil veces más rápida que la de todos los demás ordenadores. Había muchas dudas de que el monstruoso ENIAC funcionase, cuando lo normal era esperar que cada varios segundos se le fundiese alguna válvula. La elección de componentes de primera calidad, y el uso de la máquina a potencia media, hizo que las previsiones bajaran a dos o tres fallos por semana.

En la actualidad el supercomputador más rápido del mundo es el Tianhe-1A, con tecnología USA, instalado en el Centro Nacional de Supercomputación en Tianjin (China), con un ritmo de cálculo de 2.57 PFLOPS (2.57 PetaFLOPS, esto es, 2.57×10^{15} operaciones en punto flotante por segundo), un factor de $10^{11\text{-}12}$ sobre el ENIAC.[44] La misión del superordenador Tianhe-1A, con una potencia de cálculo teórica máxima de 4.07 PFLOPS, es la resolución computacional de problemas relacionados con la exploración petrolífera, el diseño aero-

[44] A comparar con los 10-100 GFLOPS típicos de un PC.

dinámico, modelización de huracanes y tsunamis, diseño de fármacos, etc.

Se prevé alcanzar los 20 PetaFLOPS con los ordenadores Sequoia y Titán en 2011-2012. Se especula con llegar al ExaFLOPS en 2019, y acercarse al límite del ZettaFLOPS en 2030; en este límite, la capacidad de cálculo permitiría analizar el clima global y predecirlo de modo preciso durante dos semanas.

No todas las grandes empresas científicas requieren estos potentes superordenadores. Un ejemplo notable lo proporciona el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, esa impresionante catedral de la ciencia que encarna la aventura científica más ambiciosa de toda la historia. El LHC va a producir unos 15 PB (Petabytes) de información al año (equivalente a la información que cabe en casi 2 millones de DVD's de doble capa), de cuyo procesamiento se va a encargar la WLCG (Worldwide LHC Computing Grid), una red mundial de ordenadores con un total de más de 100 000 procesadores. El análisis de los datos suministrados por el LHC puede fraccionarse en muchos cálculos paralelos simultáneos en los nodos de la Grid, sin que haya necesidad de intercambio de resultados intermedios entre los distintos procesadores que intervienen. Por esta razón, la WLCG puede competir con los supercomputadores e incluso mejorar su eficacia, al tiempo que los costos se reducen porque la economía a gran escala confiere ventaja a los pequeños ordenadores.

Una superioridad importante añadida es que, de igual modo que Internet surgió en el CERN con Tim Berners-Lee (1989) y otros para ayudar a la comunidad de físicos de altas energías a intercambiar datos físicos, de la Grid se espera que sustituya en un próximo futuro a la actual WWW con una velocidad de transmisión de datos unas 10 000 veces mayor que la actual de banda ancha. Caminamos deprisa hacia un futuro muy próximo de computación «en la nube», un futuro en el que nuestros datos y nuestro computador no estarán físicamente con nosotros, sino archivados los primeros en servidores lejanos, y compartido a distancia el segundo, pudiendo acceder a ellos cuando queramos, vía internet o la red que la reemplace, desde cualquier punto del planeta.

Los problemas con que se enfrenta un supercomputador pueden ser duros (computacionalmente intratables), o pueden ser fáciles o tratables (computacionalmente viables). Todo depende de los recursos que su solución requiera [Papadimitriou 1994; Galindo, Martín-Delgado 2002].

Generalmente se centra la atención en el recurso «tiempo», y se dice que un problema[45] es tratable o de clase de complejidad **P** («Polynomial-time») cuando el tiempo empleado en su solución crece a lo sumo polinómicamente con el tamaño (número de bits) de los datos de entrada. Por ejemplo, ordenar lexicográficamente una lista de nombres, elevar un número entero al cubo, saber si un entero es primo o no, son problemas tratables.

Si esto mismo se puede conseguir con la ayuda de alguna pista «sucinta» (de longitud polinómica respecto de la del dato inicial), se dice que el problema es de clase de complejidad **NP** («Nondeterministic Polynomial-time»). Son problemas de solución fácil de comprobar (pero difícil de encontrar, salvo si son de clase **P**). Ejemplos: la descomposición de un entero en sus factores primos, y el problema del viajante de comercio con presupuesto limitado (dadas N ciudades y sus distancias mutuas, y un máximo kilometraje total L, hallar un recorrido que pase solo una vez por cada una de ellas y tenga longitud que no sobrepase a L).

Evidentemente, todo problema de clase **P** es un problema de clase **NP**; la cuestión central, no resuelta, de la teoría de la computación es saber si ambas clases coinciden o no. El problema citado del viajante es **NP**-completo (todo problema en **NP** es reductible a él en tiempo polinómico en los datos). Luego, si se demostrara (muy improbable que ocurra) que este problema está en **P**, entonces todo otro problema **NP** estaría también en **P**, y en consecuencia **P** y **NP** coincidirían. Otro problema **NP**-completo es el popular sudoku, en su versión generalizada «sudoku $n\times n$».

El problema de saber si una posición es ganadora en juegos clásicos como el de «tres en raya» generalizado a tableros $n\times n$ cae en la clase llamada **PSPACE** (problemas solubles con una exigencia de memoria que crece polinómicamente con el tamaño de los datos iniciales); incluso es un problema **PSPACE**-completo. El mismo problema planteado en el juego de las damas, del ajedrez o del go generalizados a tableros $n\times n$ pertenece a la clase **EXPTIME** (problemas solubles en tiempo exponencial, más concretamente, en tiempo cuyo logaritmo crece polinómicamente con el tamaño de los datos iniciales); más aún, es **EXPTIME**-completo.

[45] No entraremos en detalles. Los problemas a que se refieren estas clases de complejidad son, estrictamente, problemas de decisión (con respuestas 0 o 1, sí o no). Muchos otros problemas (de función, de optimización,...), aunque no sean de decisión, pueden ser reducidos a estos. Tal es el caso de los arriba mencionados.

Se sabe que todas estas clases de complejidad guardan entre sí la siguiente disposición:

$$\mathbf{P}\subseteq\mathbf{NP}\subseteq\mathbf{PSPACE}\subseteq\mathbf{EXPTIME}$$

Se sospecha que estas inclusiones son todas propias, pero no se ha sabido demostrar.

El problema del viajante es sumamente importante en logística, en la fabricación de microchips, e incluso en la secuenciación del ADN.

El problema de la factorización, por su parte, es muy importante en matemáticas. Escribía el genial Carl Friedrich Gauss:[46] «El problema de distinguir entre los números primos y los compuestos, y de descomponer estos últimos en sus factores primos, es uno de los más importantes y útiles de toda la aritmética...; y además la dignidad de la ciencia exige que se exploren atentamente todas las vías para encontrar solución a problema tan distinguido y celebrado» [Gauss 1801]. Los mejores algoritmos de factorización son de complejidad superpolinómica en el tamaño en bits del número a factorizar. Con esos algoritmos, la factorización de un entero de un millar de dígitos puede llevar eones de tiempo a cualquier ordenador actual. Y en esta dificultad reside la seguridad de los cifrados de clave pública, como el RSA, de uso muy generalizado. Los responsables de tareas de muy alta seguridad siguen muy de cerca los adelantos matemáticos en algoritmos de factorización, por si hay que cambiar las claves basadas en la dureza de este problema, o incluso desecharlas. De ahí el sobresalto que les supuso la espectacular creación de un algoritmo cuántico para factorizar en tiempo polinómico: el algoritmo de Shor.

Desde un punto de vista práctico, la clase de complejidad más interesante es la clase **BPP** («Bounded-error Probabilistic Polynomial-time»), consistente en los problemas (de decisión) «eficazmente» resolubles en tiempo polinómico mediante alguna máquina de Turing probabilística (MTP, ver próxima subsección), con probabilidad de error acotada, para todos los datos de entrada, por un número fijo estrictamente menor que 1/2, por ejemplo 1/3.

Es posible que uno de los primeros en darse cuenta de la trascendencia del que años después sería el problema central de la teo-

[46] C. F. Gauss, Art. 329 de su DISQUISITIONES ARITMETICÆ: «Problema, numeros primos a compositis dignoscendi, hosque in factores suos primos resolvendi, ad gravissima ac utilissima totius arithmeticae pertinere,...; praetereaque scientiae dignitas requirere videtur, ut omnia subsidia ad solutionem problematis tam elegantis ac celebris sedulo excolantur.»

ría de la información (**P** versus **NP**) fuera el célebre matemático Kurt Gödel, quien en una carta a von Neuman (escrita en 1956 y encontrada en 1988) le hablaba de las importantes consecuencias que tendría la existencia de una máquina con tiempos de cálculo lineales o cuadráticos en la longitud *n* de los datos. Concretamente, esto significaría, según Gödel, que, a pesar de la irresolubilidad del problema de la decisión, la atención de los matemáticos a los problemas sí-no podría ser reemplazada por las máquinas; después de todo, bastaría tomar el número *n* suficientemente grande de modo que, cuando la máquina no llegara a un resultado, careciera de sentido seguir pensando en el problema.[47] Para una interesante discusión sobre este problema fundamental, sus implicaciones, y su posible elevación a principio de la física, véase [Aaronson 2005, 2008].

2.14.3. *Computación cuántica*

> *Quantum computation is... a distinctively new way of harnessing nature... It will be the first technology that allows useful tasks to be performed in collaboration between parallel universes.* (D. Deutsch)

Los ordenadores clásicos son el desarrollo tecnológico de la máquina de Alan Mathison Turing, un invento conceptual para procesar «mecánicamente» información de acuerdo con ciertas reglas, y en particular, para resolver algorítmicamente problemas matemáticos [Turing 1936]. Recordemos que un algoritmo es una sucesión finita de instrucciones concretas a seguir sin ambigüedad alguna, y que necesariamente termina tras la ejecución de un número finito de ellas [Galindo 2001].[48] (Pensemos en un programa de ordenador escrito en el lenguaje que más nos guste. Como dice Donald Ervin Knuth, «algorithms are the life-blood of computer science» [Knuth 1996].)[49]

[47] «Wenn es wirklich eine Maschine mit $\phi(n) \sim k \cdot n$ (oder auch nur $\sim k \cdot n^2$) gäbe. hätte das Folgerungen von der grössten Tragweite. Es würde nämlich offenbar bedeuten, dass man trotz der Unlösbarkeit des Entscheidungsproblems die Denkarbeit des Mathematikers bei ja-oder-nein Fragen vollständig durch Maschinen ersetzen könnte. Man müsste ja bloss das *n* so gross wählen, dass, wenn die Maschine kein Resultat liefert, es auch keinen Sinn hat über das Problem nachzudenken.»

[48] El nombre de algoritmo (como el de guarismo) proviene del nombre del matemático persa Abu Ja'far Muhammad ibn Musaal-Khwarizmi (*ca.* 780-850), autor del célebre libro HISAB AL-JABR W'AL-MUQABALA, titulo del que emana la palabra *álgebra*.

[49] Estas máquinas originales de Turing, en las que cada acción secuencial de la misma está perfectamente fijada por la situación de la máquina en el paso inmediatamente

A pesar de su engañosa simplicidad, hay máquinas de Turing capaces de calcular todo lo computable. Son máquinas de Turing llamadas universales (MTU), son máquinas programables, son como los vulgares ordenadores de mesa o portátiles (si se dotara a estos de recursos suficientes de memoria, energía y tiempo), y algunas son tan sumamente elementales como el autómata celular unidimensional CA110 [Wolfram 2002].[50]

Otro ejemplo de máquina de Turing universal es el autómata bidimensional conocido como el «juego de la vida», de John Horton Conway. ¿Quién no se ha quedado absorto viendo el desarrollo en pantalla de este inagotable y fantástico juego? En él, la emergencia de singulares configuraciones complejas y la autoorganización son visibles consecuencias de unas simples leyes. Investigadores de muchos campos distintos, desde la matemática a la filosofía, lo han tomado como laboratorio; algunos, por ejemplo el polémico filósofo y científico cognitivo Daniel Clement Dennett, para la exploración de explicaciones naturales a cuestiones tan sutiles como la consciencia o el libre albedrío.

La generalización del concepto de máquina de Turing para dar entrada a los qubits es debida a David Elieser Deutsch [Deutsch 1985]; pero la idea de la importancia de una computación cuántica para simular de forma eficiente y natural los procesos cuánticos se remonta a 1959, cuando Feynman dio en CalTech, como ya comentamos anteriormente, una conferencia visionaria, de título *There's Plenty of Room at the Bottom*, en la que animaba a los científicos (incluso con la oferta personal de dos premios de 1000 USA$) a explorar las posibilidades tecnológicas de lo pequeño, y que cuatro décadas después eclosionaría en forma de la revolución nanotecnológica [Feynman 1960]. Desde 1993 el *Foresight Institute* patrocina bianualmente el *Feynman Prize in Nanotechnology;* y Feynman, en vida, hizo entrega de dos cheques de 1000 USA$: uno al primero en construir un motor eléctrico giratorio que cupiese en un cubo de lado menor

anterior, se llaman máquinas de Turing deterministas (MTD), para distinguirlas de otras máquinas no deterministas (MTND), que admiten un abanico de acciones simultáneas distintas. Entre las MTNDs destacan las máquinas de Turing probabilísticas (MTP), en las que la acción siguiente se toma al azar entre varias, con unas probabilidades prefijadas.

[50] El CA110 es una máquina de Turing (débilmente) universal con 2 estados y 5 símbolos. Wolfram conjeturó la existencia de otra con 2 estados y 3 símbolos. Sería la más simple posible. Para la polémica suscitada en torno a una demostración propuesta sobre la universalidad de una tal MT (2,3) ver, p.e., http://forum.wolframscience.com/showthread.php?threadid=1472.

que 1/4 de pulgada (de hecho, el motor premiado pesaba 250 microgramos, y su tamaño lineal no llegaba a los 4 mm), y otro, a quien lograra escribir una página con una reducción en escala de 1/25 000 (equivalente a escribir la Enciclopedia Británica en la cabeza de un alfiler, o a utilizar caracteres con anchura de unos pocos centenares de átomos), y que pudiera leerse con un microscopio electrónico (este premio a la caligrafía atómica tardó 26 años en otorgarse). Seguiría luego otra contribución pionera de Feynman, presentada en 1981 durante la «First Conference on Physics and Computation», MIT, un seminal trabajo donde expone la ineficiencia de los ordenadores clásicos para abordar problemas cuánticos (también observada con anterioridad por el matemático ruso Manin [Manin 1980]), y presenta un simulador cuántico, precursor de los actuales computadores cuánticos [Feynman 1982]. Comparte también este honor Paul A. Benioff [Benioff 1982].

En un ordenador cuántico o máquina de Turing cuántica (MTQ) los registros son colecciones finitas de qubits coherentes, sometidas a la acción de puertas lógicas cuánticas u operaciones unitarias que implementan el cálculo. La información transformada reside en el estado cuántico de los registros. Los estados están por lo general entrelazados, y la información se halla deslocalizada, difuminada entre los sumandos que integran el estado. Para extraer el resultado del cálculo realizado se mide sobre los registros algún observable adecuado.

Las esperanzas depositadas en los computadores cuánticos son grandes: 1) Como ya dijimos, mientras que la capacidad de manejar información de un procesador clásico depende linealmente de su tamaño, la de un procesador cuántico crece exponencialmente con el número N de qubits. Mas no nos engañemos; esta información está sutilmente escondida y solo es extraíble una parte muy pequeña de ella. Lo que ocurre es que a veces dicha información es de una calidad excepcional en el sentido de que el esfuerzo de un ordenador clásico para suministrarla sería exponencialmente mayor. 2) Una MTQ presenta paralelismo masivo, pues la evolución cuántica es lineal. 3) Un ordenador clásico resulta exponencialmente lento para calcular procesos cuánticos, como observaron Feynman y otros; un ordenador cuántico, sin embargo, no solo puede calcular, con igual o mejor eficacia, todo lo que uno clásico haga, sino que además es ideal para simular eficientemente otros sistemas cuánticos. 4) Se conocen varios algoritmos específicos para la computación cuántica, que revelan su gran potencialidad; destacan el algoritmo de búsqueda general en tablas de datos de Lov Kumar Grover [Grover 1996, 1997], y el de factorización de enteros de Peter Williston Shor [Shor 1994, 1997]. Este último algoritmo, si algún día se consigue construir ordenadores cuánticos a gran escala (con registros de algunos millares de qubits), hará temblar los cimientos de los métodos actuales de encriptación, tan frecuentes en la banca y comercio electrónicos, basados en la intratabilidad práctica del problema matemático de la factorización.

Pero una bestía negra entorpece el desarrollo a gran escala de los ordenadores cuánticos: la descoherencia. Los qubits son elementos muy frágiles, inclonables, y resulta difícil aislarlos por completo del medio exterior, cuya influencia introduce fases incontrolables y aleatorias que destruyen en breves instantes la información recogida en las fases relativas entre los distintos estados. Para aprovechar las enormes ventajas antes citadas de la computación cuántica, hay que apresurarse en realizar el cálculo pretendido mientras la coherencia se mantiene. De ahí el lento, pero continuado, desarrollo y la elementalidad de los prototipos hasta la fecha construidos. Por ejemplo, el récord actualmente está en cálculos con registros moleculares de 7 qubits, concretamente, en la factorización *à la* Shor del número 15 (demasiadas alforjas para tan corto viaje, dirán algunos) conseguida en el año 2001 mediante técnica de RMN [Vandersypen et al. 2001] (dudosamente un proceso cuántico, pues no se observó entrelazamiento [Braunstein et al. 1999]), y más tarde con registros fotónicos [Lu et al. 2007; Lanyon et al. 2007]. Mientras se espera con impaciencia la construcción de prototipos con un número de qubits que supere ampliamente los 8 qubits actuales,[51] se ha simulado en el 2010, con el supercomputador clásico más rápido de Europa (el JUGENE del *Forschungszentrum Jülich*, de casi 300 000 procesadores y con una potencia de cálculo de 1 PFLOPS), el comportamiento de un sistema de computación cuántica de 42 qubits, y la implementación del algoritmo de Shor para factorizar 15707 = 113×139. Se espera que este tipo de simulaciones proporcione información valiosa para el desarrollo de los futuros prototipos de laboratorio.[52]

[51] El pasado 1 de abril el grupo de Rainer Blatt en Innsbruck publicaba la creación de un estado entrelazado (de la forma $(|00..0\rangle + |11...1\rangle)/\sqrt{2}$) de 14 quits (iones de Ca) en una trampa de iones [Monz et al. 2011].

[52] http://www.fz-juelich.de/jsc/qip/research/QC/idealQC/

Diversas técnicas están sobre el tapete: trampas de iones, procesadores cuánticos basados en la tecnología del silicio, procesadores fotónicos,... ¿Cuál nos llevará a los ansiados computadores cuánticos? ¿O tal vez la descoherencia provocada por el entorno impedirá alcanzar una escala razonable para tales ordenadores? La palabra la tiene el futuro, pero en cualquier caso, están ya las puertas abiertas para la utilización de la información cuántica, con sus grandes promesas y no inferiores retos.

2.14.4. *Asalto cuántico a la complejidad*

Los ordenadores cuánticos pueden, en principio, realizar todos los cálculos de un ordenador clásico; pero lo interesante es que pueden hacerlo en algunos casos de modo mucho más eficiente. Se han diseñado algoritmos específicos para los ordenadores cuánticos; ya hemos citado dos de los más interesantes, a saber, el algoritmo de búsqueda debido a Grover, y el algoritmo de factorización debido a Shor.

Encontrar un elemento dentro de una base de datos arbitraria, una lista no estructurada al efecto, con N elementos, puede exigirnos en media la consideración sucesiva de $N/2$ elementos de la misma. Pensemos, por ejemplo, que se trata de buscar en una lista tradicional de teléfonos de una gran ciudad, con un millón de usuarios, un número de teléfono determinado, para ver a quien corresponde. La búsqueda ingenua nos obligaría a mirar medio millón de entradas, en promedio. La física cuántica ofrece una alternativa que rebaja el número de operaciones al orden de la raíz cuadrada $\sqrt{N}$ de N, esto es, a unas mil operaciones en este ejemplo del teléfono, en lugar del medio millón previsto. El artífice de esta rebaja es el algoritmo de Grover, que en esencia consiste en examinar (cuánticamente) todas las entradas de vez (paralelismo masivo), preparadas como estados de un registro de qubits, para ver cuál es el ítem que nos interesa; esta mirada deja «marcado» al elemento buscado entre todos los demás, pero no lo hace prominente para que lo detectemos sin problema. Hay que realzarlo sobre el resto, lo que se consigue con unas $\sqrt{N}$ actuaciones cuánticas apropiadas sobre el estado del registro. Tras ellas, medimos a ver en qué estado se encuentran todos y cada uno de los qubits, y con gran probabilidad el resultado corresponderá al elemento buscado. Enormemente sencillo y versátil, proporciona este algoritmo una mejora cuadrática, y óptima, sobre la búsqueda clásica.

En 1994 Shor causó un gran revuelo al presentar su ya famoso algoritmo cuántico para factorizar enteros, un procedimiento que supone una mejora exponencial sobre los mejores algoritmos clásicos conocidos. No procede aquí entrar en detalles. Solo diremos que el problema se reduce al del cálculo del periodo de una cierta función en teoría de números; y que, por la misma razón que el período de una red física cristalina emerge de forma natural en los experimentos de difracción (una forma de revelar la dualidad onda-corpúsculo o, si se quiere, la transformada de Fourier), también en el problema abordado por Shor interviene la versión cuántica de la transformada de Fourier, con la peculiaridad esencial de que esta versión es exponencialmente más eficiente que incluso la familiar transformada rápida de Fourier. Este algoritmo, suficientemente repetido, permite obtener el periodo buscado con probabilidad de error tan pequeña como se desee. En resumen, el protocolo de Shor lleva a un tiempo de factorización de enteros que es polinómico en la longitud de estos. Y así, por ejemplo, la factorización de un entero de un millar de dígitos, que ocuparía al superodenador hoy más potente durante eones, sería cuestión de unas pocas horas para un ordenador cuántico con el algoritmo de Shor [Galindo 2001, 2003b]. El problema de factorización, en clase **NP** para un ordenador clásico, ha pasado a ser un problema en clase **BQP** («Bounded-error Quantum Polynomial-time»), esto es, un problema resoluble por un ordenador cuántico en tiempo polinómico, con probabilidad de error acotada (como en el caso **BPP**).

Seguimos ignorando hoy día, sin embargo, si la factorización de enteros está fuera de la clase **P** (aunque prevalece la opinión de que sí); y dudamos de que sea un problema **NP**-completo, Se conocen algunos problemas con oráculo que son solubles en tiempo polinómico por una MTQ pero que, para algunos datos de entrada, requieren tiempo exponencial con una MTP [Bernstein, Vazirani 1997; Simon 1997; Bennett et al. 1997]. Sabemos que $\mathbf{P} \subseteq \mathbf{BPP} \subseteq \mathbf{BQP}$, pero desconocemos si realmente hay algún problema de decisión eficazmente tratable con ordenadores cuánticos y que no lo sea también con ordenadores clásicos, esto es, desconocemos si $\mathbf{BPP} \neq \mathbf{BQP}$; asimismo, ignoramos todavía si **BQP** contiene a la clase **NP**, aunque se sospecha fuertemente que los problemas **NP**-completos van a quedar fuera de **BQP**; en otras palabras, es muy probable que los ordenadores cuánticos carezcan de potencia suficiente como para convertir en tratables todos los problemas **NP** [Vazirani 2002]. Finalmente, no deja de ser sorprendente que si la evolución cuántica dejara de ser

lineal, entonces un ordenador cuántico sería capaz de resolver eficientemente los problemas **NP**-completos en tiempo polinómico, es decir, tendríamos **NP**$\subseteq$**BQP** [Abrams, Lloyd 1998]. A la vista de los comentarios precedentes, esta última conclusión puede tomarse como una buena indicación indirecta de la linealidad de la física cuántica.

2.14.5. *Paseos cuánticos*

Un fotón cualquiera de los que el Sol produce en su horno termonuclear tarda del orden de 10^4-2×10^5 años en salir al exterior.[53] Sus sucesivas absorciones y reemisiones por las cargas del plasma bariónico del núcleo solar le obligan a recorrer un enrevesado camino aleatorio en zig-zag hasta encontrar la salida. De no haber sido así, el tiempo hubiera sido de un segundo, más o menos. Este es un ejemplo de paseo aleatorio clásico, observable en los fenómenos de difusión de partículas, tal como el que errático movimiento que experimentan las partículas en las vacuolas de granos de polen observadas en 1827 por el botánico Brown en una solución acuosa. Este movimiento, que desempeñaría un papel importante en la aceptación de la existencia de átomos y moléculas, fue estudiado por Einstein en el segundo y más citado de sus famosos trabajos de su *annus mirabilis* 1905, y en él dedujo que la distancia cuadrática media recorrida crece con la raíz cuadrada del tiempo [Einstein 1905b]. El paseo clásico aleatorio interviene de forma distinguida no solo en muchos algoritmos de la teoría de la computación clásica, sino también en la modelización de los precios en mercados financieros, y en el análisis matemático de sistemas ecológicos, de dinámica de poblaciones, de biodifusión, de teoría cuántica de campos, etc.

Feynman, otra vez anticipándose a todos, fue el primero que ya en 1965 miró al paseo aleatorio clásico desde la perspectiva cuántica [Feynman, Hibbs 1965].[54] En el paseo clásico unidimensional el caminante da un paso a la derecha si al tirar una moneda (no trucada) al aire cae cara, y a la izquierda si sale cruz. Supóngase ahora que el paseante es cuántico, la recta es una red $Z = \{...,-2,-1,0,1,2,...\}$,

[53] Por eso, en el improbable supuesto de que el Sol dejara repentinamente de producir fotones en su interior, es decir, apagara su horno, seguiríamos recibiendo luz solar durante unas decenas de miles de años más.

[54] De hecho, fue casi dos décadas antes cuando Feynman consideró este problema, al desarrollar su histórico enfoque espacio-temporal de la electrodinámica cuántica.

y que, además de su posición (discretizada), acarrea un grado de libertad discreto con dos valores ↑ y ↓, de modo que si se encuentra en el punto $P_n = \{x = n\}$ de la recta con valor ↑, esto es, en un estado $|\uparrow,n)$, entonces pasa al punto P_{n-1} a su izquierda, manteniéndose con ↑, es decir, al estado $|\uparrow,n\text{-}1)$, pero si estaba en estado $|\downarrow,n)$, pasa de P_n al punto P_{n+1} a su derecha, al estado $|\downarrow,n\text{+}1)$. En el caso general de que se encuentre en un estado superposición

$$a\,|\uparrow,n) + b\,|\downarrow,n)$$

pasa a estar en un estado deslocalizado y entrelazado

$$a\,|\uparrow,n\text{-}1) + b\,|\downarrow,n\text{+}1)$$

Este paseo aleatorio cuántico[55] unidimensional difiere notablemente de su análogo clásico. Limitémonos, por brevedad, al caso más simple, el llamado paseo de Hadamard: estado inicial $|\downarrow,0)$, acción lineal unitaria A definida mediante

$$A|\uparrow,n) := 2^{-1/2}[-|\uparrow,n\text{-}1) + |\downarrow,n\text{+}1)]$$
$$A|\downarrow,n) := 2^{-1/2}[|\uparrow,n\text{-}1) + |\downarrow,n\text{+}1)]$$

Un análisis cuidadoso de esta evolución revela que, cuando el número N de pasos realizados es muy grande, la partícula tiende a estar casi uniformemente distribuida sobre los enteros n de igual paridad que N y que caen en el intervalo $[-2^{-1/2}N,\ +2^{-1/2}N]$ [Ambainis et al. 2001]. Así, mientras en el paseo aleatorio clásico la distancia, tras N pasos, al punto inicial crece como $N^{1/2}$, en el paseo cuántico de Hadamard lo hace como N. Además las distribuciones de probabilidad son muy distintas: gaussiana en el caso clásico, con dos máximos (en los «bordes» $n \sim \pm 2^{-1/2}N$) en el cuántico.

Este mayor alcance del paseo aleatorio cuántico ha sido aprovechado para idear algoritmos cuánticos, generalmente de búsqueda, más eficientes en tiempo que los algoritmos clásicos similares. Se consiguen mejoras polinómicas (como en el caso Grover, que puede considerarse como un caso particular de paseo aleatorio cuántico), y en algunos problemas con oráculo, se logran incluso aceleraciones exponenciales [Kempe 2003; Ambainis 2003].

Los paseos cuánticos de átomos, iones y fotones ya se han implementado en laboratorio [Karski et al. 2009; Zähringer et al. 2010;

[55] Denominación debida a [Aharonov, Davidovich, Zagury 1993].

Schreiber et al. 2010; Broome et al. 2010]. Asimismo se ha observado también experimentalmente el paseo aleatorio de un par de fotones idénticos en una disposición de 21 guías de ondas acopladas en un chip de oxinitruro de silicio (SiO_xN_y); se generan correlaciones cuánticas que llegan a violar en 76 desviaciones estándar una desigualdad clásica para las correlaciones diagonales y no diagonales de un par arbitrario de guías [Peruzzo et al. 2010]. Estos últimos resultados refuerzan la creencia del papel básico y dinamizador que los paseos cuánticos pueden desempeñar en la computación cuántica.

Para nuestros propósitos, los paseos cuánticos son de muy especial interés, ya que, como tendremos ocasión de comentar en la segunda parte de este discurso, pueden jugar un papel central para el logro de la espectacular eficiencia de procesos biofísicos tan fundamentales como la fotosíntesis [Engel et al. 2007; Mohseni et al. 2008].

2.15. **El problema de la medición**

Anyone who is not shocked by quantum theory has not understood it. (N. Bohr)

Turning to quantum mechanics, we know immediately that here we get only the ability, apparently, to predict probabilities. Might I say immediately, so that you know where I really intend to go, that we always have had (secret, secret, close the doors!) we always have had a great deal of difficulty in understanding the world view that quantum mechanics represents. At least I do, because I'm an old enough man that I haven't got to the point that this stuff is obvious to me. Okay, I still get nervous with it. And therefore, some of the younger students... you know how it always is, every new idea, it takes a generation or two until it becomes obvious that there's no real problem. It has not yet become obvious to me that there's no real problem. I cannot define the real problem, therefore I suspect that there's no real problem, but I'm not sure there's no real problem. So that's why I like to investigate things. (R.P. Feynman)

Quantum mechanics, that mysterious, confusing discipline, which none of us really understands, but which we know how to use. (M. Gell-Mann)

En todas las ficciones, cada vez que un hombre se enfrenta con diversas alternativas, opta por una y elimina las otras; en la del casi inextricable Ts'ui Pên, opta «simultáneamente» por todas. Crea, así, diversos porvenires, diversos tiempos, que también proliferan y se bifurcan. (J.L. Borges)

The only «failure» of quantum theory is its inhability to provide a natural framework for our prejudices about the workings of the Universe. (W.H. Zurek)

The human mind treats a new idea the way the body treats a strange protein —it rejects it. (P. Medawar)

The difficulty is not that quantum mechanics is probabilistic —that is something we apparently just have to live with. The real difficulty is that it is also deterministic, or more precisely, that it combines a probabilistic interpretation with deterministic dynamics. (S. Weinberg)

Nadie presume de entender la mecánica cuántica. Todo lo contrario. Los más grandes físicos de este siglo (Bohr y Einstein) y otros también preclaros (Feynman, Gell-Mann y Weinberg) se han mostrado perplejos y nerviosos ante las sutiles fintas dialécticas que propician los quanta.[56] Ninguno niega su enorme éxito para explicar cuantitativamente los fenómenos conocidos tanto en la física de lo pequeño como en la física de la materia condensada. Y la mayoría de los físicos saben cómo aplicarla correctamente en esas situaciones. Pero cuando se intenta describir el comportamiento de un quantum individual, la extrañeza y el desconcierto se nos apoderan. Un centenar de años no han sido suficientes para disipar todas las dudas que plantean los principios cuánticos a gran número de profesionales. Destaca como particularmente acérrimo o rebelde el problema de la medición: mientras la evolución de un sistema cuántico cerrado es unitaria, y por ende lineal, reversible y determinista, al actualizar potencialidades, como en una medición sobre el sistema, el estado de este sufre generalmente el infame «colapso» o «reducción»,[57] no unitario, irreversible y probabilista [von Neumann 1932]. ¿Son reconciliables ambos tipos de cambio? La linealidad de la evolución de un sistema en entornos no reactivos (esto es, insensibles a los cambios del sistema) traslada la indefinición objetiva de los sistemas cuánticos a los aparatos de medida, contra toda evidencia experimental. El gato de Schrödinger es la ilustración pintoresca de este conflicto.

En un trabajo de 1935 que iba a tener una gran repercusión, introduce Schrödinger su famosa descripción del gato encerrado en una

[56] Durante las jornadas «Cajal on consciousness» (Zaragoza, 29/11/99-01/12/99), me decía Gell-Mann que ya por fin comprendía la mecánica cuántica. Ante mi insistencia, matizaría que la entendía «prácticamente» toda.

[57] La reducción matemática del estado aparece como un *modus ponens* intranscendente en la formulación de la mecánica cuántica con historias. Pero la unicidad de la actualización es, evidentemente, otro cantar.

cámara acorazada en la que hay un dispositivo diabólico inaccesible al felino, un contador Geiger con una sustancia radiactiva tal que en el transcurso de una hora podrá con igual probabilidad desintegrarse uno de sus átomos o no hacerlo [Schrödinger 1935]. De hacerlo, la desintegración descargará el tubo del contador, lo que accionará un martillo que romperá una ampolla liberando el letal ácido cianhídrico que contiene. La función de ondas que describirá la situación del gato, al cabo de una hora, será una superposición equilibrada de estados de gato vivo y de gato muerto.[58]

Esta ridícula condición para el pobre animal se sigue de haber extrapolado al mundo macroscópico (~10^{26} átomos del gato) nuestras observaciones del mundo atómico.

La superposición lineal de estados cuánticos exige la coherencia de estos, una propiedad sumamente frágil cuya presencia durante un cierto tiempo requiere ausencia práctica de interacción, durante el mismo, con el exterior. La descoherencia provocada por el entorno de un sistema macroscópico es casi instantánea; puede bastar el intercambio de un fotón para dar al traste con la coherencia inicial. De aquí que el escenario descrito por Schrödinger no admite una descripción cuántica mediante un estado puro ψ, y la experiencia ordinaria, clásica, puede dar cuenta de él. Si se quiere, ese estado ψ se reduce, por la acción inevitable del entorno, a un estado mezcla clásico.

Hemos echado mano del gato de Schrödinger por ser el exponente más famoso de la profunda diferencia entre el mundo cuántico y el clásico. Se hubieran podido usar muchos otros casos [Tegmark, Wheeler 2001; Ball 2008]: ¿por qué la aguja de una brújula nunca está en superposición de Norte y Sur, por ejemplo? ¿O por qué cuando un naipe, en posición inicialmente vertical, cae sobre el tapete, no queda en superposición de cara arriba y cara abajo a la vez? Estas visiones nos producirían impacto similar a la del gato vivo y muerto, y como esta última, no se dan. Sin embargo, como carecemos de vivencias directas con objetos microscópicos, podemos, con mayor o menor esfuerzo, aceptar conceptualmente (y comprobar experimentalmente) que en el mundo microscópico se dan situaciones superpuestas, por ejemplo, estados de bilocalización. Es inevitable la pregunta de si el tránsito cuántico a clásico es gradual, o por el contrario abrupto, y si el comportamiento de una u otra forma es una simple cuestión de tamaño o de qué.

La teoría de la descoherencia ofrece una respuesta cuantitativa a estos interrogantes. El paso de comportamiento cuántico a clásico en un sistema físico es cuestión de la suficiente pequeñez de su tiempo de descoherencia, y no de que su tamaño supere un valor crítico, aunque casi siempre vayan de la mano ambas circunstancias. En sistemas macroscópicos, su interacción con el entorno es por regla general tan fuerte que pierden aquellos de forma prácticamente inmediata la coherencia cuántica que pudieran tener inicialmente. Por ejemplo, para una molécula grande de 10 nm, la coherencia entre dos posibles posiciones de la misma separadas en unos 10 Å puede desaparecer en tiempos del orden de 10^{-17} s por causa de sus colisiones con las moléculas del aire en condiciones normales de presión y temperatura. Experimentalmente se ha visto, en efecto, cómo la coherencia va perdiéndose por efecto del entorno, y cómo, sorprendentemente, puede «reavivarse» en ciertas situaciones experimentales con ambiente controlado [Brune et al. 1996; Raimond, Brune, Haroche 1997; Ball 2008].

Si bien podemos olvidarnos del gato original de Schrödinger, los físicos han conseguido superponer estados puros, y mantener la coherencia de tal superposición, con sistemas cada vez más grandes (aunque siguen siendo «simples», en el sentido de presentar un número pequeño de grados de libertad efectivos). Citemos algunos ejemplos:

1. En 1996 se consiguió producir un gato de Schrödinger atómico, un ión $^{9}Be^{+}$ en una trampa de Paul en un estado bilocalizado, superposición de dos estados localizados, uno con espín ↑ y otro con espín ↓, separados a una distancia de unos 84 nm, muy superior a los tamaños individuales de cada estado sumando de unos 7 nm, y a las dimensiones atómicas del orden de 0.1 nm [Monroe et al. 1996].
2. Investigadores del NIST (*National Institute of Standards and Technology*) prepararon estados «gato» superposición de estados de un colectivo de seis iones de berilio en que, en uno de los estados,

[58] «Man kann auch ganz burleske Fälle konstruieren. Eine Katze wird in eine Stahlkammer gesperrt, zusammen mit folgender Höllenmaschine (die man gegen den direkten Zugriff der Katze sichern muß): in einem Geigerschen Zählrohr befindet sich eine winzige Menge radioaktiver Substanz, so wenig, daß im Laufe einer Stunde vielleicht eines von den Atomen zerfällt, ebenso wahrscheinlich aber auch keines; geschieht es, so spricht das Zählrohr an und betätigt über ein Relais ein Hämmerchen, das ein Kölbchen mit Blausäure zertrümmert. Hat man dieses ganze System eine Stunde lang sich selbst überlassen, so wird man sich sagen, daß die Katze noch lebt, wenn inzwischen kein Atom zerfallen ist. Der erste Atomzerfall würde sie vergiftet haben. Die ψ-Funktion des ganzen Systems würde das so zum Ausdruck bringen, daß in ihr die lebende und die tote Katze (s. v. v.) zu gleichen Teilen gemischt oder verschmiert sind.» [Schrödinger 1935].

estos iones tienen sus espines hacia arriba (giran todos en sentido positivo), y en el otro estado todos giran en sentido negativo (espín-hacia abajo) [Leibfried et al. 2005]. Los estados $|\uparrow\rangle$, $|\downarrow\rangle$ de cada ión son de un doblete hiperfino. Lograron mantenerlos así durante 50 μs.

3. Otros grupos consiguieron en 2007 por primera vez la superposición coherente de dos pulsos de luz, cada uno con 2 fotones [Ourjoumtsev et al. 2007].

4. Incluso en el año 2000 se había logrado superponer coherentemente los dos estados cuánticos representativos de sendas corrientes superconductoras opuestas en un SQUID (dispositivo superconductor de interferencia cuántica) [Friedman et al. 2000; Van der Wal et al. 2000]; en el primero de ellos esas corrientes eran de unos pocos μA y contenían varios miles de millones de electrones, mientras que en el segundo, diseñado a menor escala geométrica, las corrientes eran de aproximadamente 0.5 μA cada una, correspondiendo al movimiento en centro de masas de unos millones de electrones.

5. Y finalmente, el logro científico más sobresaliente del pasado año: la superposición lineal de los estados fundamental y primer excitado de la primera «máquina cuántica» fabricada por el ser humano [O'Connell et al. 2010], que ya citamos al hablar de límites de origen cuántico.

Volvamos al problema central de la medición. El familiar esquema bohriano conocido como interpretación de la escuela de Copenhague [Bohr 1985; Heisenberg 1989] no aporta luz alguna a la cuestión; se mueve en una convivencia, indiscutida, de un mundo microscópico, cuántico, y otro macroscópico, clásico, con fronteras separadoras inamovibles.

A lo largo de las décadas siguientes a la cristalización de la mecánica cuántica, se han ido ofreciendo soluciones al problema de la medición; hasta 17 (o 18, si incluimos la de Aguire y Tegmark) esencialmente distintas, esto es, sin contar pequeñas variaciones en detalles, pueden encontrarse entre la literatura [Schlosshauer 2005; Aguirre, Tegmark 2010], lo que indica que todas presentan alguna que otra deficiencia que impide su aceptación general.

Hay propuestas de evoluciones no lineales, que se percibirían solo en sistemas de muchos grados de libertad, con la virtud de llevar en tiempos muy cortos cualquier combinación lineal de estados base del aparato macroscópico de medida (los correspondientes a posiciones definidas de sus agujas) a uno de ellos [Ghirardi, Rimini, Weber 1986].

No faltan sugerencias de introducir en el juego la consciencia del observador quien, con su acto de percepción, colapsaría el estado (¡!) [Wigner 1961]; de ser así, ¿debemos asumir que el universo ha permanecido en un estado entrelazado desde su creación hasta que apareció algún ser «perceptor»? Más tarde volveremos a esta cuestión.

Una alternativa radical con bastantes adeptos es la «interpretación del estado relativo» de Hugh Everett III, o «interpretación de muchos mundos» [Everett 1957]. En ella el problema que nos ocupa desaparece como por encanto; niega simplemente que se actualicen potencialidades. Hay un sistema cerrado global, el Universo, con un estado que evoluciona lineal y unitariamente. Dado un subsistema 1, y el subsistema resto 2 (del que los observadores formamos parte), al medir en el 1 una magnitud X que puede tener distintos valores $\{x_1, x_2,...\}$, el Universo (y con él nosotros) se bifurca en una colección de «ramas» o alternativas; en cada una de ellas todos los que allí estamos vemos que esa magnitud X tiene uno solo de esos valores, digamos x_k. No hace falta «reducir» el estado; nuestro estado relativo (neuronal o de consciencia) en esa rama está ya dispuesto a ver solo ese valor x_k. Pero existen otros observables, para los que la ramificación será distinta y también real. En estas nuevas ramas, el valor de X no estará bien definido, y los observadores en esas ramas tendríamos la incómoda sensación de ver las agujas del aparato que mide X en posiciones indefinidas, en estados «grotescos» como los del gato ni vivo ni muerto. Volvemos, pues, a lo de siempre. Y lo peor es que esta ramificación en «universos paralelos» es incomprobable experimentalmente. Una vez separados, no vuelven a influirse; si fuera posible detectar «sombras» de esos otros universos, la cosa cambiaría radicalmente. No hemos resuelto nada; sí, nos hemos arropado con una miríada de mundos gratuitos (en violación grosera de la *lex parsimoniæ* o principio de Occam, pues se pueden escoger otras posibilidades mucho más «económicas») donde esconder el problema, aunque éste, imperturbable, regresa siempre.

El formalismo de historias consistentes [Griffiths 1984], y el enfoque bohmiano de la mecánica cuántica [de Broglie 1928; Bohm 1952] son otras interpretaciones interesantes de la física cuántica que cuentan asimismo con bastantes partidarios. Mas no podemos aquí hacer debida justicia a todas.

Siendo pragmático, se puede despachar el asunto de esta guisa. El sistema cuántico S interactúa con el aparato de medir M, que a su vez lo hace con el ambiente A. Los tres, sistema, aparato y entorno,

están entrelazados. Como los grados de libertad de este último, es decir, su microestado, no se controlan ni observan por lo general, hay que promediar tomando trazas sobre ellos. En la práctica, el ambiente *A* induce descoherencia entre los «estados de la aguja» del aparato de medida *M*; esto hace perder irremediablemente sus fases relativas, y precipita con ello su transformación en un estado mezcla de *S* + *M*. La fuga, o deslocalización, de información de *M* a *A*, y su carácter generalmente irrecuperable, nos obliga a renunciar a ella, produciendo el colapso informativo del estado puro y entrelazado de *S* + *M* a un estado mezcla, estadístico, en el que las fases que harían posible la interferencia entre las alternativas potenciales de la medición se han perdido entre las miríadas de grados de libertad del entorno. La invocación a la descoherencia consigue así explicar la transición de la «cuantidad» a la «clasicidad» en el proceso de la medición; la posibilidad de superposición lineal de estados distintos de la aguja de *M* ha sido eliminada, librándonos, como en el caso del gato de Schrödinger, de poder contemplar algo tan insólito en nuestra experiencia cotidiana como un objeto macroscópico que puede estar deslocalizado entre varios sitios distintos.

Para muchos, este logro es suficiente como para declarar prácticamente resuelto el problema de la medición. En puridad, sin embargo, y en esto están de acuerdo incluso los teóricos más entusiastas de la descoherencia, ésta sigue dejando abierta la cuestión central de cómo se pasa del «y» (*S* + *M* se halla en un estado mezcla estadística de $|s_1,m_1)$, y de $|s_2,m_2)$, y de...), al «o» exclusivo ((el sistema está en el estado $|s_1)$, la aguja en el estado $|m_1))$, o ((el sistema está en el estado $|s_2)$, la aguja en el estado $|m_2))$, o...), es decir, por qué el resultado de cada acto de medición es uno y no varios [Schlosshauer 2005].[59]

2.16. El duende de la descoherencia, darwinismo cuántico, y emergencia de la clasicidad

Die «Bahn» entsteht erst dadurch, das wir sie beobachten.
(W. Heisenberg)

La clasificación de los sistemas físicos en sistemas clásicos y sistemas cuánticos es precisable en términos de las distintas escalas de

[59] Una cuestión sutil e importante, y que generalmente pasa inadvertida, es la ambigüedad de la descomposición del estado mezcla en combinación convexa de estados pu-

tiempo: la escala de tiempo dinámica τ_{din} que viene a representar un periodo natural del sistema, la escala de tiempos de descoherencia τ_{desc} (tiempo durante el cual se mantiene la coherencia cuántica), y la escala de tiempo de disipación τ_{dis}, que mide el tiempo que tarda el sistema en perder la mitad de su exceso de energía [Tegmark 2000]. Cuando $\tau_{din} \ll \tau_{desc}$ el sistema es cuántico, ya que mantiene la coherencia durante muchos periodos dinámicos. Cuando la desigualdad se invierte, el sistema se comporta clásicamente. En los sistemas microscópicos (átomos y moléculas) $\tau_{desc} \sim \tau_{dis}$, y por tanto nunca pueden manifestar un comportamiento clásico,[60] en claro contraste con los sistemas macroscópicos, para los que $\tau_{dis} \gg \tau_{desc}$.

Los sistemas clásicos independientes son, pues, aquellos para los que $\tau_{desc} \ll \tau_{din} \leq \tau_{dis}$. Mas no nos basta con esto; queremos también que los estados de los sistemas que llamamos clásicos tengan una existencia objetiva desde un punto de vista operacional, en el sentido de que distintos observadores puedan determinar simultáneamente su estado sin apenas perturbarlo y obtengan los mismos resultados [Ollivier, Poulin, Zurek 2004]. Veremos al final de esta sección cómo la propia mecánica cuántica, por efecto de la descoherencia, alberga la posibilidad de mostrar una clasicidad emergente en los llamados estados puntero de los sistemas cuánticos abiertos, es decir, de los sistemas cuánticos en interacción con el entorno ambiente.

La coherencia cuántica subyace la posibilidad de superposición lineal, haciendo posible las interferencias entre estados. Su existencia, sin embargo, peligra constantemente ante el acoso del omnipresente entorno [Zeh 1970, 1973; Zurek 1981, 1982, 1991, 2004]. Pero el medio ambiente no se limita a perturbar los sistemas en él inmersos; también extrae información de ellos. Las correlaciones por entrelazamiento que establece la interacción entre el sistema y su vecindad provocan la dilución de las fases relativas por el entorno, y con ello el paso de estados puros del sistema a estados mezcla, esto es, un alejamiento del comportamiento cuántico y un acercamiento al clásico. Este proceso es generalmente muy rápido, tanto más cuanto más

ros; en particular, el estado de *S* + *M*, mezcla estadística de los estados $|s_1,m_1)$, $|s_2,m_2)$,..., puede ser indistinguible de una mezcla estadística de otros estados $|\sigma_1,\mu_1)$, $|\sigma_2,\mu_2)$,.... Sin embargo, la aguja del aparato fijo *M* de medida señalará siempre alguno de los estados $|m_1)$, $|m_2)$,... y no de los $|\mu_1)$, $|\mu_2)$,... La elección de estados «preferidos» $\{|s_1,m_1), |s_2,m_2),...\}$ es consecuencia de un proceso de superselección inducida por el entorno, como comentaremos en la próxima sección.

[60] Nótese que si $\tau_{din} \gg \tau_{dis}$ difícilmente podemos considerar el sistema en cuestión como un sistema independiente.

grande es el sistema. Más aún, la fuga de información del sistema al entorno se funde de tal modo en la miríada de grados de libertad, de ordinario incontrolables, de este último que su recuperación es casi siempre inviable, haciendo irreversible prácticamente el proceso de descoherencia.

Para darnos una idea de la rapidez con que se pierde la coherencia, pensemos que para un electrón libre de energía 1 keV, el tiempo de descoherencia en el aire a 300 K y 1 atm es de 0.1 ps entre posiciones Δx que difieran en más de 0.1 Å, pero sube a 1 día en un entorno de fotones a 300 K y distancias $\Delta x > 0.02$ mm [Tegmark 1993]. Por el contrario, para partículas de polvo de tamaño $L = 10$ μm (el de un eritrocito, p.ej.), el tiempo de descoherencia para distancias $\Delta x > L$ en aire bajo condiciones normales es menor de 10^{-31} s, y por tanto extraordinariamente pequeño. Para objetos de la vida cotidiana, como una bola de billar, incluso en un entorno tan enrarecido como puede ser el fondo cósmico de microondas (fotones de la radiación de un cuerpo negro a la temperatura de 3 K) las distancias superiores a 1 μm pierden su coherencia en unos 0.1 as (10^{-19} s).

No es extraño, por tanto, que no observemos interferencias cuánticas entre los objetos de nuestra experiencia diaria. El entorno, el ambiente, ese espectador molesto que procuramos esconder, ignorar o apartar al explicar las leyes físicas fundamentales, se ha convertido en salvador de nuestras realidades cotidianas; incluso, como veremos enseguida, el constante escrutinio al que el entorno somete cuanto en su ámbito sucede garantiza el tránsito gradual del extraño mundo cuántico de las probabilidades al familiar mundo clásico de las certezas objetivas. No hay dos mundos separados, uno, el de los sistemas microscópicos que obedecen las leyes cuánticas, y otro, el de los macrosistemas que se gobiernan por las leyes físicas clásicas. No, todo es cuántico; todo está hecho de átomos que siguen las normas cuánticas. Una barra metálica de una tonelada de masa, como el famoso detector de Joseph Weber de ondas gravitacionales, puede comportarse como un oscilador armónico cuántico a temperaturas suficientemente bajas [Braginsky, Vorontsov, Thorne 1980; Caves et al. 1980]. Pero, bajo la monitorización del ubicuo entorno, el comportamiento cuántico del sistema se aproxima, tanto más cuanto más estrecha es aquella, a un comportamiento clásico. Esta es la lección central que hemos aprendido de la teoría de la descoherencia; una teoría compleja, que tras una primera década de «oscuridad» siguiente a los trabajos pioneros de Heinz-Dieter Zeh, y otras tres de desarrollo exponencial con Wojciech Hubert Zurek y colaboradores, se ha ganado un puesto muy relevante en la física cuántica.

Un ejemplo ilustrativo de estas importantes ideas lo tenemos con las moléculas quirales. Son moléculas no superponibles por traslación y rotación a sus imágenes especulares. En 1927 Hund hacía patente su sorpresa ante el hecho de que las moléculas quirales se presentan en sus formas enantioméricas R (*rectus*) o S (*sinister*), y no en una superposición de ambas, como exige la invariancia de su hamiltoniano bajo paridad [Hund 1927]. Esta paradoja se resolvió tan solo hace dos años [Trost, Hornberger 2009], sobre la base de la acción descoherente de un entorno (gas de átomos de ^{4}He) sobre moléculas quirales pequeñas como las de disulfuro de dideuterio (D_2S_2). La interacción de estas moléculas quirales con los átomos de helio depende muy sensiblemente de su índice isomérico (R o S), y estos estados quirales se alzan como «estados preferidos», estados robustos ante la descoherencia, de suerte que el conjunto de tales moléculas D_2S_2 en ese ambiente se convierte en una mezcla estadística de isómeros R y S. Este trabajo es una brillante pieza de cálculo cuántico que demuestra cómo las colisiones de estas sencillas moléculas quirales con los átomos de He del gas ambiente pueden llegar a suprimir, cuando su tasa por unidad de tiempo rebasa un cierto umbral, los efectos del tuneleo entre las formas enantiómeras, blindando estas. Será interesante someter este detallado modelo al veredicto de la experiencia.

Resumamos, para ir terminando, los pasos más significativos en el proceso de la descoherencia cuántica de un sistema cuántico arbitrario S en un medio ambiente E [Zurek 2003, Schlosshauer 2007]:

1) La interacción de S con E entrelaza ambos sistemas, produciendo correlaciones cuánticas entre ambos. Las fases internas del estado inicial de S se deslocalizan por todo $S + E$. Esto es la descoherencia, un mecanismo destructor de interferencias a nivel clásico.

2) La interacción de S con E produce una selección de estados de S «preferidos», que son estables bajo dicha interacción. Esto es la llamada «superselección inducida por el ambiente» (*einselection*). Esos estados se conocen generalmente como estados puntero, estados aguja, o estados dial. Aunque estos estados, individualmente, son resistentes a la descoherencia, las fases de sus combinaciones lineales se pierden por el ambiente, y los estados de $S + E$, afecta-

dos por la descoherencia, terminan siendo mezclas estadísticas impropias con los estados puntero en la diagonal.

3) Miremos ahora al ambiente *E*. La información que *E*, tras su constante monitorización como testigo, ha obtenido del sistema *S* no se ha perdido, y con gran frecuencia hacemos uso de ella para conocer el estado de *S*. Cuando miramos un sistema (una bola, por ejemplo), la información nos llega a través de una fracción de los fotones que antes han colisionado con el objeto y le han sustraído información. Pues bien, los estados puntero no solo son los más aptos frente a la descoherencia; son también los más conspicuos, los que mejor propagan información de sí mismos por el entorno. Esto se conoce como «darwinismo cuántico» [Zurek 2009], y hace que esos estados que más «procrean», que más registros o copias informativas de sí mismos depositan en el ambiente, sean los más objetivables, los más próximos a la clasicidad, ya que distintos observadores obtendrán toda la información de esos estados sin alterar para nada al sistema Σ, simplemente a través de mediciones sobre un colectivo suficientemente grande de esas innúmeras copias diseminadas por el medio. He aquí el origen de la clasicidad, que, como dice Zurek, «emerge del substrato cuántico como consecuencia de la redundancia».

El darwinismo cuántico se ha comprobado en algunos modelos simples, destacando el análisis de una pequeña esfera dieléctrica iluminada por radiación de cuerpo negro en el que se obtiene un alto grado de proliferación de información sobre la localización del objeto repartida por el ambiente (hasta 10^8 copias/μs para una esfera de 1 μm de diámetro iluminada por luz solar) [Riedel, Zurek 2010]. Falta todavía alguna confirmación experimental de esta brillante, sugerente y atrevida idea.

3. LOS QUANTA Y LAS CIENCIAS DE LA VIDA

A physicist is an atom's way of knowing about atoms. (G. Walsh)

Elegantissima hæcce solis, planetarum & cometarum compages non nisi consilio & dominio entis intelligentis & potentis oriri potuit. (I. Newton)

Wonderful as are the laws and phenomena of electricity when made evident to us in inorganic or dead matter, their interest can bear scarcely any comparison with that which attaches to the same force when connected with the nervous system and with life... (M. Faraday)

Life as we know it would be impossible if any one of several physical quantities had slightly different values. (S. Weinberg)

If you equate the probability of the birth of a bacteria cell to chance assembly of its atoms, eternity will not suffice to produce one... Faced with the enormous sum of lucky draws behind the success of the evolutionary game, one may legitimately wonder to what extent this success is actually written into the fabric of the universe. (Ch. de Duve)

Le monde vivant aujourd'hui, tel que nous le voyons autour de nous, n'est qu'un parmi de nombreux possibles. Il aurait très bien pu être différent. Il aurait même pu ne pas exister du tout. (F. Jacob)

En fait, la démarches cientifique représente un effort pour libérer de toute émotion la recherche et la connaissance. (F. Jacob)

Sin la mecánica cuántica no hubiera sido posible conocer el increíble mundo de lo más pequeño, ni el comportamiento de la materia condensada. Por tanto los principios cuánticos no son ajenos a ningún fenómeno natural, ni, en particular, al fenómeno de la vida, pues rigen el comportamiento interno de átomos y moléculas. Mas esta afirmación no nos sorprende ni pasa de ser una culta obviedad. Otra cosa sería si la intervención cuántica aflorara inesperada y sorpren-

dentemente en situaciones macroscópicas contra el razonamiento común de la física; por ejemplo, en medios calientes y húmedos, como es la materia viva.

Ha tenido que pasar más de un siglo para que las dos mayores revoluciones científicas de todos los tiempos, las dinámicas evolutiva y cuántica, confluyeran en una ciencia emergente, la biología cuántica. Es una ciencia interdisciplinar, donde muchos biólogos, químicos, físicos y matemáticos luchan de la mano por descubrir si la teoría física más portentosa asoma también en los procesos íntimos de la vida.

3.1. La física, la cosmología y la vida

Homo liber nulla de re minus quam de morte cogitat; et ejus sapientia non mortis sed vitæ meditatio est. (B. de Spinoza)

What an organism feeds upon is negative entropy. Or, to put it less paradoxically, the essential thing in metabolism is that the organism succeeds in freeing itself from all the entropy it cannot help producing while alive. (E. Schrödinger)

I vividly remember how Delbrück, in telling me about the [Crick and Watson's] discovery, said that it might lead to a revolution in microbiology comparable with the development of atomic physics, initiated by Rutherford's nuclear model of the atom. (N. Bohr)

We do not have a series of stratified earths, one of which is mathematical, another physical, etc. We should not be able to live very long in any one taken by itself. We live in a world where all sides are bound together; all studies grow out of relations in the one great common world. (J. Dewey)

Con el progreso de la ciencia se han ido proponiendo nuevas respuestas a las viejas preguntas sobre qué es la vida, cuál ha sido su origen, y qué finales posibles le esperan.

3.1.1. *¿Qué es la vida?*

Con relación a la pregunta central de qué es la vida, seguimos sin disponer de una respuesta sencilla y de amplia aceptación. Los más prominentes biofísicos no se ponen de acuerdo. El ilustre genetista John Burdon Sanderson Haldane llega incluso a dudar de que alguna vez pueda darse una definición completa, y Manfred Eigen, Premio Nobel en Química 1967, confiesa que quizás no sea esta ni siquiera la pregunta adecuada [Haldane 1947; Eigen 1995; Kaufmann 2009]. En un brillante ensayo, Daniel Edward Koshland adelanta, aunque sin entusiasmo, que «a living organism is an organized unit, which can carry out metabolic reactions, defend itself against injury, respond to stimuli, and has the capacity to be at least a partner in reproduction», y a continuación presenta lo que en su opinión son los siete principios fundamentales con los que operan los seres vivos, principios que reúne bajo el acróstico PICERAS [Koshland 2002]:

1. **P**rograma (plan organizado sobre los ingredientes del ser y sus interacciones a lo largo de toda su vida, codificado en el ADN en el caso de seres terrestres).
2. **I**mprovisación (cambios en el programa, por mutación y selección, para optimizarlo ante un medio exterior determinado).
3. **C**ompartimentación (para proteger del exterior, para centralizar y especializar ciertas funciones, y para mantener las concentraciones adecuadas de substratos y catalizadores (enzimas), etc.).
4. **E**nergía (para mantener las estructuras del organismo, evitando su degradación, y para reciclar su entorno químico).
5. **R**egeneración (como la resíntesis de las proteínas que se desgastan).
6. **A**daptabilidad (reacción pronta frente a los peligros externos, frente al hambre, la sed, el cansancio, etc., comportamientos estos que ya están codificados en el programa).
7. «**S**eclusión» (aislamiento, soledad, imprescindibles para que la miríada de reacciones bioquímicas a desarrollar no se vean perturbadas por el entorno, con el que se establecen cauces específicos para el transvase de materia, energía e información).

Los científicos de la NASA, enfrentados con la hipotética existencia de vida extraterrestre y la necesidad de su posible reconocimiento, adoptaron en 1994 una definición operacional de vida sugerida por Carl Sagan: «la vida es un sistema químico auto-sostenido y capaz de evolucionar en sentido darwiniano» [Joyce 1994]. Posiblemente el *homo sapiens*, como especie, bordee ya los límites de esta definición, por cuanto su perfeccionamiento reside, no tanto en la herencia por el ADN, como fundamentalmente en la educación; podríamos hablar en este caso de una evolución supra-darwiniana [Benner 2010].

Desde la física, los seres vivos somos un tipo particular de estructuras disipativas (de energía), que generan entropía para mantenerse. Solo pueden, por tanto, existir en aquellos ambientes con disponibilidad de abundante energía libre. Más que agua, más que gradientes redox, lo que necesitan todos los seres vivos es acceso a fuentes de energía termodinámicamente libre o útil, cuya captación les permita conservar su estructura y realizar sus funciones propias.

Recordemos que la energía libre es aquella capaz de transformarse totalmente en trabajo bajo determinadas condiciones. Hay varias energías libres; aquí nos referiremos solo a la de Helmholtz, de símbolo *F* (por *Freie* o libre), o *A* (por *Arbeit* o trabajo), apropiada para sistemas cerrados a temperatura y volumen fijos. La energía Helmhotz *F* es la energía interna *U* del sistema menos el «impuesto» entrópico, a saber, el producto *TS* de su temperatura absoluta *T* por su entropía *S*, que el sistema debe «pagar» para producir trabajo útil. Sin el debido rigor, es corriente afirmar que este producto mide la cuota de la energía *U* no aprovechable para el trabajo, siendo el resto, *F*, la energía de calidad extraíble de *U*; las altas temperaturas y/o las altas entropías van en detrimento de la energía disponible [Lineweaver, Egan 2008]. De forma más precisa, el cambio $F_1 - F_2$ de la energía libre *F* es una cota superior al trabajo útil (no de volumen) que un sistema cerrado, a temperatura y volumen constante, y en contacto con un medio a temperatura y presión fijas, puede ejercer sobre este al pasar dicho sistema de un estado 1 a un estado 2.

El genial Ludwig Boltzman, padre de la física estadística, hizo hincapié en que la lucha de los seres vivos por la existencia era una lucha, no por la materia ni por la energía, sino por la entropía.[61] Se equivocó. En el mejor de los casos, los seres animados serían «ingestores» de entropía negativa (o neguentropía),[62] como afirmó Schrödinger en su famosa serie de conferencias en 1943 sobre la vida [Schrödinger 1944], motivadas por su apasionada lectura de un

[61] L. Boltzmann: «The general struggle for existence of animate beings is therefore not a struggle for raw materials —these, for organisms, are air, water and soil all abundantly available— nor for energy which exists in plenty in any body in the form of heat (albeit unfortunately not transformable), but a struggle for entropy, which becomes available through the transition of energy from the hot sun to the cold earth.» En su conferencia, ante la Academia Imperial Austriaca de Ciencias, titulada *Die zweite Hauptsatz der Mechanischen Wärmetheorie*, Sitzungsber. Kaiserl. Akad. Wiss., Wien (1886), reimpresa en Ludwig Boltzmann, THEORETICAL PHYSICS AND PHILOSOPHICAL PROBLEMS, Ed. B. McGuinness, Reidel 1974.

[62] Años después, Brillouin acortaría «entropía negativa» a «neguentropía», término este por el que se le conoce corrientemente [Brillouin 1953].

interesante artículo de Timoféeff-Ressovsky, Zimmer y Delbrück, un genetista y dos físicos [Timoféeff-Ressovsky, Zimmer, Delbrück 1935]. Mas tampoco es esto correcto; tuvo Schrödinger que aceptar las críticas de sus colegas y rectificar en larga nota al Cap. 6 de una nueva edición de su libro, y en otros escritos, diciendo que mejor que «entropía negativa» debiera haber dicho «energía libre».

Sobre el citado libro de Schrödinger existen decenas de análisis críticos, en particular uno memorable escrito en 1987 por el ilustre biólogo molecular Max Ferdinand Perutz, responsable, con John Cowdery Kendrew, de desentrañar la estructura de proteínas como la mioglobina y la hemoglobina, trabajos por los que compartieron el Nobel en Química 1962. Señala Perutz la influencia positiva de este libro en atraer a muchos jóvenes brillantes al campo de la incipiente biología molecular, como los físicos Seymour Benzer, descubridor de la estructura fina del gen, y gran genetista del comportamiento, y Maurice Hugh Frederick Wilkins, codescubridor de la estructura del ADN; o el químico Gunther Stent, con importantes trabajos sobre los virus bacteriófagos. La influencia sobre los conocedores de la materia, los biólogos, fue, empero, poco significativa [Perutz 1987].

Perutz, que aceptó el encargo de escribir un comentario sobre la influencia del libro de Schrödinger con el ánimo de honrar su memoria, pero que al estudiar con ojos muy críticos el libro acabó transformándose en implacable verdugo, resalta algún que otro error conceptual en los conocimientos bioquímicos de Schrödinger, como, por ejemplo, su siguiente afirmación (opuesta al conocimiento de entonces) refiriéndose a los cromosomas: «They are law-code and executive power —or, to use another simile, they are architect's plan and builder's craft— in one». Contrasta esto con la elevada opinión que tiene del artículo de Timoféeff-Ressovsky, Zimmer y Delbrück que sirvió de base a las conferencias de Schrödinger y a su libro. Sobre todo, le impresiona la parte escrita por Delbrück, el físico teórico convertido a la biología tras escuchar en 1932 una conferencia de unos de los patriarcas de la física cuántica, Niels Bohr, titulada «Light and Life» [Bohr 1933]. Concretamente, las siguientes palabras de esa conferencia espolearon la imaginación de Delbrück: «The existence of life must be considered as an elementary fact that cannot be explained, but must be taken as a starting point in biology, in a similar way as the quantum of action, which appears as an irrational element from the point of view of classical mechanical physics, taken together with the existence of elementary particles, forms the foundation of atomic physics. The asserted impossibility of a physical or chemical explana-

tion of the function peculiar to life would in this sense be analogous to the insufficiency of the mechanical analysis for the understanding of the stability of atoms.» Delbrück, el prometedor físico teórico que figura en los textos de Electrodinámica Cuántica como el primero en calcular la dispersión de los fotones por el campo coulombiano de un núcleo a través de la polarización del vacío que este produce, decidió pasarse a la biología, campo en que, como es bien sabido, realizó contribuciones fundamentales en el campo de los virus (su replicación y estructura genética).

Continuando con los comentarios de Perutz, cita este al físico y fisicoquímico Franz Eugen Simon como el científico que alertó a Schrödinger de que su afirmación relativa a la lucha de los seres vivos por la entropía negativa no era afortunada. De hecho, afirma Perutz que cuando Schrödinger escribía su libro era ya bien conocido que el trifosfato de adenosina (ATP) era la unidad primaria, la divisa de la tranferencia de energía química entre las células, y que la energía libre que el ATP alberga es fundamentalmente entálpica.

Schrödinger sugiere, inspirándose en el modelo de Delbrück del gen como un polímero, que el gen es una estructura lineal, un cristal o sólido aperiódico, y que en cada célula hay un gen, o un par de genes, responsables de la dirección ordenada de los procesos vitales a través de un código lineal. Sugiere además, siguiendo la pauta de Bohr, que las leyes físicas que gobiernan estos procesos son distintas de todas las conocidas, ya que según estas últimas el comportamiento de unas pocas moléculas, las encargadas de dirigir el sistema vivo, es totalmente impredecible; solo la estadística con muchas permite, como aprendió de Boltzmann, la predicción.

Lo cierto es que no hay que buscar nuevas leyes para entender esto. Solo le hacía falta a Schrödinger, según Perutz, conocer un poco la química de las enzimas (la catálisis), y acercarse más al mundo de la biología, pues justo cuando estaba escribiendo su libro apareció el trabajo de Oswald Avery, Colin MacLeod y Maclyn McCarty informando de su experimento que mostraba que los genes están formados por ADN, y no por proteínas [Avery, MacLeod, McCarty 1944].

Ni siquiera las licencias poéticas de Schrödinger en WHAT IS LIFE? escapan a la censura (en este caso por boca de Andrew Fielding Huxley, Nobel en Fisiología o Medicina 1963). «But if you are given a single radioactive atom, its probable lifetime is much less certain than that of a healthy sparrow», escribe el padre de la mecánica cuántica ondulatoria. A lo que le responden que no es así, pues un análisis

estadístico de una población de petirrojos nacidos en una cierta primavera ha revelado, primero, que el número de los que sobreviven sigue una ley exponencial, y segundo, que a lo largo de sus primeros 10 años de vida, cada año tienen una expectativa de vida de 1 año aproximadamente, independientemente de su edad. Extraño, ¿no? Es como si el envejecimiento de los petirrojos no importara. Me gusta más la frase de Schrödinger. Por cierto, volveremos a hablar de los petirrojos más adelante.

Es innegable la existencia de fallos en algunas de las respuestas de Schrödinger a sus propios interrogantes en el libro WHAT IS LIFE?, pero, como bien ha apuntado Freeman John Dyson, sobresalieron más sus aciertos en las cuestiones planteadas, pues fueron seminales estas preguntas al señalar la senda que durante las décadas posteriores siguió la biología con brillante éxito [Dyson 1999].

3.1.2. *Sobre el origen de la vida*

> *The existence of life must be considered as an elementary fact that cannot be explained, but must be taken as a starting point in biology.* (N. Bohr)
>
> *Man with all his noble qualities... still bears in his bodily frame the indelible stamp of his lowly origin.* (C. Darwin)

En su magna obra Charles Darwin solo dedica unas palabras, al final, sobre esta apasionante cuestión: «Probably all the organic beings which have ever lived on this earth have descended from some one primordial form, into which life was first breathed» [Darwin 1845]. Y en carta a un amigo es donde se refiere a «some warm little pond» con sales variadas de amoníaco y fósforo, que, en presencia de luz, calor y electricidad, podrían, tal vez, haber reaccionado químicamente, en el pasado, para dar algún compuesto proteínico.[63]

Según los conocimientos actuales sobre la formación de nuestro sistema solar, la Tierra actual y su satélite, la Luna, proceden de la brutal colisión de dos planetas (una proto-Tierra, del tamaño de Marte y otro protoplaneta más pequeño), acaecida hace $4.54\times(1.00\pm0.01)$ Ga, unos 30 millones después de la formación del sistema solar,[64] acontecimiento este último que ocurrió hace 4.5682 Ga, como indica

[63] C. Darwin, carta a Joseph Dalton Hooker (1871).

[64] Nuevos resultados apuntan a un nacimiento más tardío, hasta en unos 150 millones de años, del sistema Tierra-Luna [Dahl, Stevenson 2010].

su datación muy precisa a través de los isotopos ^{207}Pb-^{206}Pb en una inclusión de un meteorito condrítico [Bouvier, Wadhwa 2010]. La temperatura de la Tierra recién formada se elevó, como resultado del choque, hasta unos 7000 ºC. Esta temperatura tuvo que descender bastante, antes de ser tolerable para el desarrollo de los seres vivos. Una temperatura excesiva provoca inestabilidad química y conformacional en el material biológico, y se estima que los requerimientos energéticos para la reparación y resíntesis molecular con que contrarrestar estos efectos dañinos serían insoportables a partir de temperaturas de 140-150 ºC [Stetter 1998; Rothschild, Mancinelli 2001; Cowan 2004]. Se conocen microbios, como la Cepa 121, que se desarrollan bien a 121 ºC, e incluso sobreviven a los 130 ºC. En cuanto a la resistencia de la materia viva a las bajas temperaturas, hay psicrófilos activos a –18 ºC.

Es muy difícil, si no imposible, saber cuándo comenzó exactamente la vida en la Tierra. Hasta que nuestro planeta no alcanzó la edad de 700 millones de años (eón Hádico, 4.5-3.8 Ga), estuvo sometido a una racha de bombardeos de asteroides y cometas que mantuvieron la temperatura de su corteza a unos pocos miles de grados, imposibilitando cualquier atisbo de vida en esa época. Tras un último e intenso bombardeo (conocido como el LHB, por «Last Heavy Bombardment»), esta lluvia cesó prácticamente. Hace de eso unos 3.8 Ga, momento a partir del cual pudo ya florecer la vida. Comenzaba el eón Arcaico.

La idea de Darwin de una forma de vida primigenia, antepasada común de todas las formas de vida conocidas en nuestro planeta, ha encontrado recientemente un abrumador sostén en la moderna filogenética molecular y en la teoría de probabilidades, con independencia de una mayor o menor transferencia génica horizontal y de sucesos de fusión simbiótica. Los análisis realizados a través de las secuencias de aminoácidos de 23 proteínas altamente conservadas, extraídas de 12 taxa, cuatro de cada uno de los tres grandes dominios de la vida (Archæa, Bacteria y Eucariota), corroboran, con una poderosa evidencia estadística, la monofilia de todos los seres terrestres conocidos. En otras palabras, dan soporte completo a la atractiva idea de un tronco común, único, del árbol, o quizás mejor, de la red, de todos los seres vivos terrestres. El calificativo asociado de LUCA (o UCA, o LCA, con todas o algunas de las iniciales de «Last Universal Common Ancestor») para este «antepasado» común está, por tanto, bien escogido como indicador, no de un organismo determinado, sino de la población de organismos, con genotipos desiguales, cuya evolución en distintos lugares y en momentos diferentes ha

dado origen a todas las formas de vida actuales [Steel, Penny 2010; Theobald 2010].

A lo largo de los años se han sugerido diversos escenarios prebióticos que podrían haber desembocado en los primeros seres vivos, en el LUCA.

En 1924 Alexander Ivanovich Oparin propuso una teoría sobre el origen terrestre de la vida, mediante la síntesis química, progresiva, en el seno de los mares primitivos, de moléculas orgánicas cada vez más complejas, en presencia de una atmósfera reductora, conteniendo hidrógeno, vapor de agua, amoníaco y metano [Oparin 1924]. A esta idea de una «sopa primigenia» llegó también Haldane de modo independiente [Haldane 1929]: para éste, la acción de la radiación ultravioleta pudo haber convertido el metano, amoníaco y agua de los océanos en los primeros compuestos orgánicos, y no habiendo seres vivos para alimentarse de estos, los océanos se fueron convirtiendo en grandes reservorios de un caldo orgánico diluido y caliente, con reacciones internas que con el tiempo producirían macromoléculas, luego estructuras de tipo viral, y finalmente, células. El celebrado e icónico experimento de Miller en 1953, con producción en laboratorio de moléculas orgánicas a partir de sustancias inorgánicas, vino a animar este escenario de Oparin-Haldane [Miller 1953]. Sin embargo, ni hay evidencia geoquímica de esos océanos de sopa llenos de nucleótidos, ni en ellos hubiera sido posible la polimerización de éstos en ARN por falta de fuentes obvias de energía libre, pues el medio, el caldo, estaba en equilibrio termodinámico. La fermentación, a la que Pasteur se refería como «la vida sin oxígeno», suministra muy poca energía como para impulsar el fenómeno vital [Lane, Allen, Martin 2010].

En las últimas dos décadas se ha instalado con mucha fuerza la propuesta de un origen de la vida en los negros fondos oceánicos. A finales del año 2000 se descubrió casualmente un ecosistema submarino, bautizado como «Ciudad Perdida». Es un campo hidrotermal formado por un nuevo tipo de chimeneas, las llamadas chimeneas alcalinas, unos respiraderos o fumarolas por los que emerge agua no demasiado caliente, a unos 40-90 ºC, rica en H_2 y CH_4, y con un pH entre 9 y 11 [Kelley et al., 2001, 2005]. Estas chimeneas de carbonato cálcico forman un bosque de altas agujas, de hasta 60 m de altura. Tan espectacular enclave está situado en el fondo oceánico a unos 15 km de la dorsal medioatlántica, a una profundidad entre 750 y 900 m. En un proceso geoquímico de serpentinización (transformación, por hidroxilación, del peridoto u olivino en serpentina), las aguas

del mar, en reacción con el peridoto de la corteza oceánica, dilatan y fracturan las rocas ultramáficas del fondo marino. Este proceso, además, desprende una energía que calienta el agua, y produce un fluido fuertemente alcalino y con rastros de moléculas orgánicas ligeras (metano, acetato, etc.), cuya expansión térmica lo devuelve desde la corteza al suelo del océano a través de respiraderos. Las paredes de estos son muy porosas; son un delicado tamiz de poros micrométricos interconectados, de dimensiones similares a las de las células actuales, que albergan densas comunidades bacterianas en las que no faltan extremófilos anaerobios.

Estos biotopos con sede en el peridoto serpentinizado fueron propuestos ya en 1993, antes de que se conociera su existencia, como ecosistema apropiado para la aparición de la vida en nuestro planeta [Russell, Daniel, Hall 1993; Russell et al. 1994]. Las aguas de los mares primitivos, hace más de 3.8 Ga, tenían concentraciones de CO_2 unas mil veces superiores a las de hoy. La interfaz redox entre estas aguas y los fluidos hidrotermales de las fumarolas alcalinas propició el paso de electrones del H_2 (primer donante) al CO_2 (primer receptor), y esta hidrogenación produjo metano y acetato, con desprendimiento de energía [Lane, Allen, Martin 2010; Lane 2009].

Con este escenario como base, se ha erigido una descripción muy plausible de la emergencia de la vida en la Tierra, que Lane esquematiza en 10 pasos, y que resumimos así:

1+2+3) Serpentinización, con producción asociada de rocas carbonatadas llenas de poros microscópicos conteniendo una espuma de burbujas inorgánicas de minerales de azufre y hierro. En el interior de estas burbujas el hidrógeno reaccionó con el dióxido de carbono para dar metano, formiato y acetato bajo la acción catalizadora de los centros hierro-azufre.

4+5+6) Bajo el gradiente químico entre el fluido hidrotermal alcalino y el agua marina ácida se forman espontáneamente fosfato de acetilo y pirofosfato, que, en el papel de moléculas ATP, impulsarán la formación de aminoácidos y nucleótidos. Las altas concentraciones de estos en los poros de las chimeneas favorecerán la producción de ARN y ADN, induciendo un «mundo ARN» auto-replicante que luego evolucionará al mundo conocido del ADN y de las proteínas. Al mismo tiempo, se producen moléculas alifáticas que se depositan sobre las paredes de las vesículas de hierro-azufre, para luego formar espontáneamente burbujas conteniendo conjuntos de moléculas autoreplicantes; serán las primeras protocélulas.

7+8) La evolución de la enzima pirofosfatasa, que cataliza la producción de pirofostato, permite a las protocélulas extraer más energía del gradiente químico entre el fluido alcalino y el mar ácido. La evolución de la sintasa ATP facilita a las protocélulas la producción de moléculas de trifosfato de adenosina, el vehículo de energía más importante, como es bien sabido, para el metabolismo intracelular.

Y 9+10), las protocélulas se independizan de las chimeneas, creando su propio gradiente electroquímico para producir ATP, e inician su éxodo en dos etapas, una como arqueas, otra como bacterias. Sin su aprendizaje de la quimiósmosis, ese genial mecanismo revelado por Peter Dennies Mitchell (Nobel en Química 1978), por el cual las células almacenan energía en forma de gradiente electroquímico a través de su membrana, para convertirla, cuando lo necesitan, en energía química transportada por moléculas ATP, las protocélulas nunca hubieran podido escapar de las rocas en que fueron engendradas [Mitchell 1961].

No faltan, finalmente, quienes avanzan un origen exógeno, extraterrestre, según el cual las primeras formas de vida habrían llegado a la Tierra a bordo de alguno de los meteoritos o cometas integrantes de la ya citada lluvia de pequeños astros a la que nuestro planeta estuvo sometido durante el eón Hadeico. Se basan tales partidarios en la presencia de un centenar de aminoácidos en el meteorito de Murchison con predomìnio de levógiros. Este meteorito es una condrita carbonácea de unos 100 kg de masa, y los aminoácidos enantiómeros en él encontrados presentan un exceso de átomos de ^{15}N con respecto a los terrestres, lo que apoya su origen extraterrestre.

3.1.3. *Fugit irreparabile tempus: naturaleza de la flecha termodinámica*

Un sistema en equilibrio termodinámico total es un sistema muerto; en él no hay gradientes de temperatura, ni gradientes químicos, ni gradientes de fuerzas generalizadas. Nada cambia, salvo improbables fluctuaciones estadísticas. Este hubiera sido el triste final del Universo de acuerdo con los conocimientos físicos y astrofísicos del siglo XIX, y la inexorable flecha entrópica del tiempo.[65]

[65] Para un amplio análisis, desde la física de hoy, del tiempo físico, de su carcaj de flechas, de su plasticidad bajo campos gravitatorios, de qué fue el tiempo, y de qué es, ver [Galindo 1994, 1995, 2005a].

De flecha del tiempo habló por vez primera Eddington en 1927 para referirse al sentido temporal de los fenómenos macroscópicos [Eddington 1928]: siempre que echamos un terrón de azúcar en el té se derrite, pero nunca vemos salir de nuestra taza de té azucarado un terrón.[66] Los físicos resumen esta tendencia universal al desorden (como multiplicidad de microestados) en un principio, el segundo de la termodinámica,[67] formulado independientemente por Rudolf Julius Emmanuel Clausius [Clausius 1850] y William Thomson (Lord Kelvin) [Thomson 1851], apoyándose en la obra de Nicolas Léonard Sadi Carnot [Carnot 1824].[68] Más tarde, Clausius reformuló esta ley en la forma hoy conocida tras introducir el concepto de entropía [Clausius 1865]. La entropía, como dice Walter Thirring [Thirring 1994], es algo irreal, espiritual, pero que domina al mundo. Los dos primeros principios de la termodinámica quedaron plasmados por Clausius en sus célebres frases [Clausius 1879]: «Die Energie der Welt ist konstant.» «Die Entropie der Welt strebt einen Maximum zu.»

El misterio no es que la entropía crezca hacia el futuro en una región (bastaría con definir como futuro el sentido del tiempo en que crece la entropía), sino que todos los «futuros» así determinados sean compatibles entre sí, es decir, coincidan y permitan un futuro global.[69]

Tan universal es el crecimiento de la entropía en sistemas aisla-

[66] A no ser en una película que nos pasen al revés.

[67] El «primer» principio fue enunciado [Mayer 1842; Joule 1845; Helmholtz 1847], en realidad, después del «segundo» [Carnot 1824]. De hecho, como indica Balian [Balian 1994], las notas póstumas de Carnot (muerto en la epidemia de cólera de 1832), publicadas en 1878, muestran que éste ya reconocía la equivalencia calor-trabajo: «Partout où il y a destruction de puissance motrice dans les particules des corps, il y a en même temps production de chaleur en quantité précisément proportionelle à la quantité de puissance détruite ... O peut donc poser en thése générale que la puissance motrice est en quantité invariable dans la nature, qu'elle n'est jamais à proprement parler ni produite ni détruite. A la verité elle change de forme». También conocía el origen común al trabajo y al calor; escribió: «La chaleur n'est autre que la puissance motrice ou plutôt que le mouvement qui a changé de forme, c'est un mouvement».

[68] Los nombres de Sadi Carnot en algunas calles en Francia son en recuerdo de un sobrino-nieto del famoso físico, presidente de la República que fue asesinado. Ni el físico, ni su padre Lazare, héroe de la Revolución, tienen calle dedicada.

[69] Compárese la afirmación «...the second law of thermodynamics is really a tautology. Entropy increases with time, because we define the direction of time to be that in which entropy increases» [Hawking, Laflamme, Lyons 1994], con esta otra más tardía: «It is a non trivial feature of our universe that it should have a well defined thermodynamic arrow which seems to point in the same direction everywhere we can observe» [Hawking, Laflamme, Lyons 1993].

dos que ha llegado a considerarse más fundamental que las propias leyes físicas.[70]

Así pensaba Einstein de la termodinámica [Einstein 1949]: «Es ist the einzige physikalische Theorie allgemeinen Inhaltes, von der ich überzeugt bin, dass sie im Rahmen der Anwendtbarkeit ihre Grundbegrieffe niemals ungestossen werden wird (zur besonderen Beachtung der grundsätzlichen Skeptiker).

Y del siguiente modo opinaba Eddington del segundo principio [Eddington 1928]: «The law that entropy always increases holds, I think, the supreme position among the laws of nature. If someone points out to you that your pet theory of the universe is in disagreement with Maxwell's equations —then so much the worse for Maxwell's equations... but if your theory is found to be against the second law of thermodynamics, I can give you no hope; there is nothing for it but to collapse in deepest humiliation.»

La consiguiente degradación en calidad de la energía llevó a Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz en 1854 a afirmar en una conferencia que cuando toda la energía del Universo se convirtiera en calor, los procesos naturales cesarían y el Universo quedaría «condenado a un estado de reposo eterno» [Helmholtz 1854]. Lord Kelvin lo había ya pronosticado [W. Thomson 1851, 1852], y fue Clausius quien bautizaría este triste final, en el que el Universo alcanzaría su máximo de entropía, como la *Wärmetod* (muerte térmica) del Universo [Clausius 1868].[71]

La expansión cósmica, sin embargo, exige reconsider tamaño augurio. Lo haremos más adelante.

[70] Defendía Snow que todo ciudadano culto debía conocer la ley de crecimiento de la entropía, equiparando su ignorancia a la de otro que desconociese la obra dramática de Shakespeare [Snow 1959].

[71] Como dicen Barrow y Tipler, este descenso en el orden muestra que el Universo, más que teleológico, más que tender hacia un fin más perfecto, sería disteleológico [Barrow, Tipler 1986].

3.1.4. *Magnus ab integro sæclorum nascitur ordo: origen de la flecha termodinámica*

> *Once during a sermon on the Second Law of Thermodynamics and the Entropic Heat Death of the Universe, the Lord Kelvin pronounced that our world would end in about 20 billion years when the sun's fuel expired. An elderly woman in the congregation interrupted Him and anxiously asked: «How long did you say?». The Lord Kelvin replied «20 billion years». The woman sighed, «Thank You Lord, I thought You said 20 million!».* (Anónimo)

Este hermoso quinto verso hexámetro de la égloga IV de Virgilio, el poeta de Mantua, viene, en lectura descontextualizada, como anillo al dedo, pues, efectivamente, el magno orden del Universo nació de lo profundo de los siglos.

Los estados de máximo desorden no son de equilibrio absoluto, y puede el sistema pasar eventualmente a estados más ordenados, incluso al estado inicial (en buena aproximación), esperando lo que haga falta. El problema de la flecha entrópica del tiempo está en saber por qué hay de ordinario estados iniciales de baja entropía, sin necesidad de esperar esos enormes lapsos de tiempo para que aparezcan como fluctuación.

Por manipulación externa sobre un sistema, podemos ordenarlo (a costa de desordenar más el exterior). La Tierra es un sistema abierto, que intercambia energía y entropía con su entorno [Davies, Gribbin 1992; Lineweaver, Egan 2008]. Del Sol recibimos casi toda energía útil; el Sol es un sistema en desequilibrio termodinámico con el exterior, un sistema que arroja ingentes cantidades de energía de calidad al espacio frío. Es como una fuente de energía libre de la que echamos mano para crear orden aquí en la Tierra. Nuestros cuerpos viven porque mantenemos baja su entropía gracias a los alimentos que ingerimos; éstos a su vez tienen su origen en la fotosíntesis, una operación de creación de sustancias con baja entropía mediante el uso de la luz solar, cuyos fotones visibles de 6 000 K son absorbidos y su energía posteriormente devuelta al espacio en forma de radiación infrarroja a 300 K. Esta degradación en temperatura, y por ende, en calidad energética, supone una cesión de entropía al exterior que contrarresta con creces la neguentropía producida en la biosfera.

La pregunta de la flecha del tiempo queda así trasladada al Sol, y en general a las estrellas, y por ende al cosmos: ¿por qué las estrellas están en desequilibrio con el exterior, en estados de baja entropía? La respuesta no está en las leyes físicas, sino en las condiciones iniciales; condiciones que, por otro lado, no podemos ignorar, pues la oscuridad de la noche y la expansión cósmica sugieren un Universo de edad finita [Galindo 2005b, 2006].

De acuerdo con el modelo cosmológico de concordancia, cuando el Universo tenía un segundo su temperatura era tan alta (10^{10} K) que los únicos núcleos existentes eran protones y neutrones. Al expandirse se enfrió, y estos nucleones pudieron combinarse en núcleos más pesados. Pero al cabo de unos minutos ya las temperaturas eran bajas para que el proceso continuara, y solo hubo tiempo a que se formara helio y algunos pocos núcleos ligeros. La mayor parte de la materia quedó intacta, en forma de hidrógeno uniformemente distribuido.

La gravitación «desordenó» esta distribución apiñando la materia alrededor de irregularidades locales, y generando así las grandes estructuras astrofísicas (galaxias, estrellas y cúmulos galácticos), fuentes de energía concentradas que dan lugar a los fenómenos asimétricos que hoy vemos [Price 1989]. Más tarde las omnipresentes fuerzas gravitatorias producirían en las estrellas las presiones, y con ello las temperaturas y densidades, adecuadas para reanudar la nucleosíntesis y convertir a las estrellas en focos calientes de baja entropía.

Las estrellas queman generalmente hidrógeno, produciendo elementos más pesados. En esta combustión (que finaliza en materia nuclear formada por núcleos de hierro muy estables) generan gran cantidad de entropía, que vierten al espacio. La fusión termonuclear detiene el colapso gravitacional, evitando que la estrella se caliente demasiado y estabilizándola durante eones. Por otro lado, las estrellas han podido permanecer calientes en un ambiente frío porque la expansión ha enfriado al Universo a ritmo más rápido que el de tendencia al equilibrio termodinámico. La rápida expansión ha permitido que la gravitación pudiera crear organización más deprisa que la destruía.

Pero, ¿por qué hay tanto hidrógeno (material nuclear ordenado) disperso por el Universo?, y ¿cómo se explica que el Universo estuviera ordenado en un principio, cuando todo apunta a lo contrario? Recordemos que la uniformidad de la radiación de fondo y de la distribución a gran escala de la materia primitiva sugiere un estado inicial de equilibrio, y por ende de máximo desorden [Kolb, Turner 1990]. ¿Qué sutil orden se oculta tras aquel aparente desorden? ¿No hubiera sido todo más aparente si el Universo hubiera optado por un

orden manifiesto, por la forma de un sólido platónico, por ejemplo? [Penrose 1990].[72]

Según Penrose, el estado inicial del Universo fue de entropía total minima; aunque ese estado fue sumamente homogéneo y de entropía no-gravitacional máxima, desde el punto de vista gravitatorio ocurrió todo lo contrario: ese estado fue demasiado ordenado, con una «entropía gravitacional» nula, y tendió a condensarse en grumos. Resume la situación Penrose con su «hipótesis sobre el tensor de Weyl»,[73] según la cual dicho tensor debe anularse sobre las singularidades del pasado, pero no del futuro; este tensor se anula en universos de Friedmann (homogéneos e isótropos), y por tanto su presencia está ligada a las inhomogeneidades y de aquí a la entropía gravitacional [Penrose 1979].[74]

Al ser para sistemas gravitacionales la agregación entrópicamente favorable, el fluido cosmológico ha ido colapsando a estructuras de diversos tamaños: galaxias, estrellas, planetas, cúmulos, supercúmulos, etc. A medida que estas estructuras se van formando, se desgajan del resto, salvo por su intercambio gravitacional y luminoso, que tiene poca influencia en su comportamiento termodinámico local. Si el fluido cósmico (rama principal) tiene baja entropía inicial, los sistemas cuasi-aislados que se desprenden (ramas secundarias) también serán de baja entropía, que muy probablemente irá creciendo con su evolución. Las entropías de todos estos sistemas «rama» [Reichenbach 1956] crecen en la misma dirección, la de la rama progenitora. Debido a esta ramificación vemos doquiera a nuestro alrededor tantos sistemas fuera de equilibrio, cuasi-aislados, de entropía baja y creciente. Así se define la flecha termodinámica, aquella de crecimiento de entropía en la inmensa mayoría de sistemas rama. De un estado

[72] Sus razones tendrá el Creador, y viene aquí de perillas aquel pasaje del Criticón [Gracián 1651]: «Así que con razón confiesan todos los sabios, que aunque se juntaran todos los entendimientos criados y alambicaran sus discursos, no pudieran enmendar la más mínima circunstancia, ni un átomo de la perfecta naturaleza; y si aquel otro Rey, aplaudido de Sabio, porque conoció cuatro estrellas (tanto se estima en los Príncipes el saber), se arrojó a decir que si él hubiera asistido al lado del Divino Hacedor, en la fábrica del Universo, muchas cosas se hubieran dispuesto de otro modo, y otras mejorado, no fue tanto efecto de su saber, cuanto defecto de su nación, que en este achaque del presumir, aun con el mismo Dios no se modera».

[73] Parte conforme del tensor de Riemann a la que no afectan algebraicamente las ecuaciones de Einstein; describe grados de libertad puramente gravitacionales, y es sensible a acumulaciones locales, distantes o no, de materia.

[74] Nadie sabe muy bien todavía cómo ha de definirse la «entropía gravitacional», de modo que su crecimiento mida el apelmazamiento o condensación de la materia en grumos.

inicial de muy baja entropía, pero creciente, han surgido, por ramificaciones sucesivas, sistemas que reiteran esa tendencia. La historia del Universo es una saga de sistemas rama en cascada [Halliwell 1994].

Falta explicar por qué la entropía gravitacional fue inicialmente tan baja respecto de su valor máximo. La contestación acertada deberá esperar a que una teoría cuántica de la gravitación, completa y correcta, nos muestre convincentemente a todos la razón de que el Universo naciera en un estado gravitacional tan improbable. Ese peculiar estado inicial del Universo de muy baja entropía es el gran problema que, de momento, solo la actual cosmología cuántica, sin duda provisional y rudimentaria, aborda tímida, pero valientemente.[75]

Otros autores prefieren ver la respuesta al gradiente entrópico en la propia expansión, que hizo que la gravitación pudiera crear organización más deprisa que se destruía, y que las estrellas hayan podido permanecer calientes en un ambiente frío porque la expansión ha enfriado al universo a ritmo más rápido que el de tendencia al equilibrio termodinámico [Davies 1994]. Al principio, hasta que el universo cumplió un segundo de vida, la entropía (convencional, no gravitacional) fue máxima;[76] luego, aunque siguió creciendo, no lo hizo al ritmo con que creció con la expansión el máximo de entropía, y quedó rezagada, por debajo del máximo posible. Se abrió una brecha de entropía, que, según Paul Charles William Davies, ha sido el verdadero motor de la flecha termodinámica. En particular, el ritmo de nucleosíntesis quedó atrasado respecto del de expansión, y el hidrógeno primordial quedó en desequilibrio durante eones, sin fusión completa en hierro. Si la expansión del Universo se fuera frenando —como creíamos hasta 1998— esa brecha tendería a cerrarse, desapareciendo probablemente en el futuro lejano gracias a los aportes considerables de entropía con la luz emitida por las estrellas. Este enfoque de Davies presenta un flanco débil [Penrose 1990]; el argumento asumido apoyaría, quiéralo o no su autor, la inversión de la flecha termodinámica al colapsar el Universo, de forma que la entropía generada cupiese en las nuevas dimensiones. Pero hay razones por las que no

[75] Boltzmann avanzó una respuesta: tal vez se trató de una fluctuación gigantesca desde un estado de equilibrio. No requiere esto ningún Creador; es cuestión de esperar el tiempo que haga falta, suponiendo cierta ergodicidad para el Universo en bloque. Pero sería tan altísimamente improbable, que muy pocos secundan esa idea.

[76] Cuando la edad del Universo era de 1 s aproximadamente, los neutrinos dejan de estar en equilibrio con el resto de la «sopa primigenia».

parece deseable tal aparejamiento de las flechas cosmológica y entrópica [Galindo 2010].

Hoy disponemos de abundante evidencia observacional sobre la expansión acelerada del Universo. En tales circunstancias, y de mantenerse, como parece probable, esta dinámica en el tiempo, el futuro de la entropía sería radicalmente distinto al antes imaginado. Hablaremos de esto luego.

3.1.5. *Curvatura de Weyl de principio a fin*

Para explicar la flecha del tiempo, parece por tanto necesario recurrir a un estado inicial de muy baja entropía. No basta con que el universo haya comenzado su existencia con una Gran Explosión o Big Bang (BB), y que el estado inicial, térmico y por tanto de entropía máxima para el tamaño de aquel universo primordial, se haya quedado rezagado respecto del máximo permitido en el universo expandido, tal como propugna Davies [Penrose 1990]. Porque, como acabamos de señalar, de ser ésto válido, en el caso de contracción futura o colapso global del universo volveríamos a un universo pequeño en que no cabría toda la entropía generada, a no ser que esta disminuyera al invertirse la flecha cosmológica. Aunque el universo no sea cerrado, tal inversión debería irrumpir también en los colapsos microcósmicos locales producidos en torno a los agujeros negros (ANs), con manifestaciones patentes de violación de la segunda ley de la termodinámica. Y para Penrose la física local observada por un astronauta que se zambulle en un AN es indistinguible de la física ordinaria; tal astronauta verá que la entropía sigue creciendo hasta el inevitable y desagradable final implosivo de su existencia, bajo enormes fuerzas distorsionantes de marea. Estas tensiones límite se traducen en un tensor o curvatura conforme de Weyl[77] generalmente divergente (como $1/r^3$ en colapso esférico). Por contra, en el BB, con

[77] El tensor de Riemann se descompone en dos partes: el tensor conforme de Weyl (parte sin traza del tensor de curvatura), y otra parte proporcional al tensor de Ricci. En la desviación geodésica para la luz, el primero contribuye a la distorsión o cambio en forma, y el segundo al cambio en volumen. El tensor de Ricci satisface algebraicamente las ecuaciones de Einstein. El tensor de Weyl cumple unas ecuaciones diferenciales con fuente expresable a través del tensor de Ricci, y por ende, del tensor de energía-tensiones; por eso es un análogo gravitacional del campo electromagnético. Un tensor no nulo de Weyl señala acumulación local de materia, creciendo al aumentar ésta.

la geometría de Robertson-Walker, domina la parte Ricci (que se hace divergente), mientras que la distorsión en forma tiende a cero al aproximarnos a la singularidad inicial.

Estas consideraciones apoyan la idea de un BB muy especial, caracterizado por un tensor de Weyl nulo y otro de Ricci infinito; si el final es de Gran Implosión o Big Crunch, no es de esperar que se repita la historia, sino que la atracción gravitatoria producirá apiñamientos o condensaciones materiales, de entropía creciente,[78] y con un tensor de Weyl cada vez más intenso en media. Al final se espera una fase de fusión progresiva de AN's en otros de mayores masas, creciendo sin límite la curvatura conforme.

En consecuencia, no hay correlación necesariamente entre el tamaño del universo y su contenido entrópico, y tenemos que buscar una explicación de por qué el BB fue de baja entropía, por qué su singularidad fue suave; sin tal explicación, lo más probable hubiera sido un BB caótico y de alta entropía, rebosante de agujeros blancos (ABs), y por ende un cosmos sin flecha termodinámica.[79]

Para convencernos de que el BB ha sido un estado realmente especialísimo, una simple estimación a la baja será suficiente: en el universo hoy visible los $N_B \sim 10^{80}$ nucleones que contiene contribuyen en una fracción despreciable ($\sim 10^{-9}$) a la entropía ordinaria, que es $\sim 10^{89} k_B$, y cuyo ingrediente fundamental lo constituye el fondo cósmicos de microondas (FCM). Pero si toda esta materia estuviese colapsada en un gigantesco AN, su entropía sería enormemente mayor: la fórmula de Bekenstein-Hawking conduce en este caso a la estimación $\sim 10^{123} k_B$. Luego el número de estados microscópicos del Universo en el BB, comparado con el del Universo colapsado en un AN, satisface

$$\frac{N_{U,BB}}{N_{U,AN}} \sim 10^{-10^{123}}$$

[78] El carácter universalmente atractivo de la gravitación trastoca nuestras intuiciones ordinarias. Como ya hemos dicho, cuando hay fuerzas gravitatorias una distribución uniforme de masa no es de entropía máxima, sino mínima.

[79] Sabemos que los ANs poseen entropía proporcional al área de su horizonte de sucesos; ¿y los ABs? De tenerla, la inversión temporal sugeriria un valor de esa entropía proporcional al área del horizonte de partículas de dicho AB, y por tanto decreciente hacia el futuro. Aparte de este comportamiento antitermodinámico, un AB hace imposible la predicción, pues una superficie de Cauchy corta a la línea de universo de la singularidad. Permite, eso sí, la retrodicción, lo que no tiene demasiado interés, pues siempre es más cómodo recurrir a la memoria. Por todo esto Penrose se inclina por vetar la existencia de los ABs.

Es un número éste inimaginablemente pequeño, que revela la excepcionalidad de la situación de partida.

Constreñir las singularidades en el pasado de modo que en ellas el tensor de Weyl deba anularse y así se fuerce tal peculiar estado del BB se conoce como *hipótesis de la curvatura de Weyl*:

$$\text{WEYL} = 0$$

Y así están las cosas. Para explicar esa sensación universal que todos tenemos de que el tiempo fluye hemos tenido que remontarnos al mismísimo comienzo (en el que WEYL = 0), e imaginarnos un hipotético final (donde WEYL = ∞), es decir, hemos acabado en los extremos en que los conceptos mismos de espacio y tiempo pierden su sentido, donde las leyes físicas conocidas entran en grave crisis, y deben dejar paso a una futura teoría cuántica de la gravitación.

3.1.6. *Breve historia de algunas fuentes de energía*

De acuerdo con los conocimientos astrofísicos actuales, un plausible relato de la historia energética de nuestro Universo podría ser el siguiente.

Durante los primeros momentos tras el Big Bang hace 13 700 millones de años, en el Universo solo había energía, la energía de un falso vacío, una energía distribuida de forma totalmente homogénea por doquier. Esta energía es la que impulsó la titánica expansión que, de acuerdo con el espíritu del modelo inflacionario, experimentó el Universo: unos 30 órdenes de magnitud en apenas una quintillonésima de segundo. Tras esta inflación, el falso vacío decayó en un verdadero vacío liberando toda su energía, que se materializó en un colosal infierno de partículas relativistas (quarks, antiquarks, leptones, antileptones, portadores de fuerzas), en equilibrio termodinámico a altísima temperatura: aunque su ritmo de expansión fue en esa época muy rápido, lo fue más el ritmo de colisión y reacción entre las partículas (exceptuando el caso de los presuntos gravitones o quanta de la gravitación, que siempre estuvieron «descolgados» del resto de las partículas, por la extrema debilidad de la interacción gravitacional).

La aniquilación materia-antimateria acabó casi con la presencia de partículas, quedando un denso baño de fotones; y digo casi, porque gracias a la violación de la simetría CP (conjugación C partícula-antipartícula y paridad P) que presenta el modelo estándar (cromodinámica cuántica para las interacciones fuertes, modelo electrodébil para las interacciones débiles y la interacción electromagnética), las poblaciones originales de partículas-antipartículas (quarks-antiquarks, leptones-antileptones) no estuvieron exactamente compensadas: por cada 10^9 antipartículas, había «$1+10^9$» partículas, por lo que una milmillonésima parte de las partículas sobrevivió al holocausto de la aniquilación materia/antimateria. Esos quarks y electrones residuales son los que hoy integran los núcleos y átomos que pueblan el Universo.

La entropía del Universo en un volumen comóvil se ha mantenido constante, a gran escala, en la expansión. Por el contrario la temperatura ha ido disminuyendo gradualmente; mientras se mantuvo por encima del millón de K (hasta el instante $t \sim 1$ s), todas las partículas y la radiación compartían la misma, pero a partir de ese momento los neutrinos dejaron de estar en equilibrio estadístico con el resto, se descolgaron del conjunto, y desde entonces forman un gas libre que permea el Universo a una temperatura que ha ido disminuyendo linealmente con el factor de escala de la geometría del Cosmos. Llegó el momento de la liberación de la luz cuando la edad, tras el BB, era de unos 380 000 años. Esto ocurrió al bajar la temperatura a los 3 000 K, lo que permitió la neutralización de la materia; los electrones y núcleos existentes dejaron de estar libres, se formaron los átomos, y la interacción luz-materia se hizo despreciable. Los fotones pudieron ya deambular libremente. Aquellos fotones son hoy los fotones del fondo cósmico de microondas (FCM), fotones ahora de unos 3 K, por el aumento del tamaño del Universo en un factor 1000 desde su liberación; es la luz de los rescoldos de la explosión primigenia, los fósiles de la aquel titánico parto del Universo. De estos fotones testigos hay actualmente 411 por cm^3 en cada rincón del Cosmos.

Tras la recombinación atómica, la materia y la radiación se separaron para siempre a escala global; las estrellas, cuando surgieron unos cientos de millones de años después, produjeron inmensas regiones de plasma ionizado, donde la luz dejó de estar libre, pero la gran mayoría de los fotones del Universo seguirían siendo esos fósiles libres.

El número de fotones del FCM que hay en nuestro Universo visible es del orden de 10^{89}, mil millones de veces superior al número de bariones, esto es, protones y neutrones (10^{80}). ¿Dominan, por tanto,

la entropía? Así sería si los bariones formasen un gas.[80] Pero sabemos que la mayoría de las galaxias albergan sendos agujeros negros supermasivos (ANSMs) en sus núcleos, y que estos son enormes sumideros de entropía, que devuelven al exterior en el proceso de evaporación Hawking. Mientras que la entropía de un gas viene a crecer en una unidad (k_B) al añadirle una partícula, la de un AN formado por el colapso gravitacional de N bariones crece en Nk_B al añadirle un barión más. Por eso no es extraño que la contribución mayor a la entropía del Universo visible se deba a sus ANSMs. Se estima que $S_{ANSMs}/k_B \sim 10^{104}$ [Egan, Lineweaver 2010], y que la tasa de producción de entropía por la acreción en estos ANSMs es del orden de $\dot{S}_{ANSMs}/k_B \sim 10^{90}$/año, muy superior a la de cualquier otro tipo de fuente [Maor et al. 2008]. Cuando se hayan evaporado todos los ANs (los de mayor masa, $M \sim 10^{12}M_{Sol}$, tienen una vida media del orden de 10^{101} años) su entropía pasará a engrosar fundamentalmente la entropía de la radiación.

La entropía S_{ANSMs} queda todavía muy lejos del valor máximo que podría alcanzar la entropía en un volumen comóvil normalizado al Universo hoy visible, que es del orden de la entropía dada por el principio holográfico, a saber, $S_{UV,máx}/k_B \sim 10^{123}$ ['t Hooft 1993; Susskind 1995; Bousso 2002]. Recordemos que, de acuerdo con este principio, la entropía máxima de un sistema (débilmente gravitante) que ocupa una región cuya superficie frontera tiene área A, es simplemente $(A/4l_P^2)k_B$, donde l_P es la longitud de Planck ($l_P \sim 10^{-35}$ m).

Las estrellas son otra fuente importante de entropía. Las altas presiones y temperaturas en su interior favorecen la nucleosíntesis, la fusión nuclear. Para las estrellas de la secuencia principal el combustible es el hidrógeno. Por cada 4 nucleones se liberan unos 27 MeV de energía, en forma de un par neutrinos, un par de gammas, y un par de positrones, que pronto se aniquilan con sendos electrones en otros gammas. Todos los gammas producidos se mueven por el plasma estelar, hasta que consiguen salir, tras haber perdido casi toda su energía. Por cada uno de estos gammas originales (de energía ~1 MeV) emergen un millón de fotones de energía ~1 eV. Luego se produce entropía a razón de $10^6 k_B$/nucleón, y en consecuencia la tasa de generación estelar de entropía es del orden de $\dot{S}_{estrellas}/k_B \sim 10^{75}$/año

[80] La materia oscura tampoco sobrepasa en entropía a la radiación. Se estima [Egan, Lineweaver 2010] que su entropía es del orden de $10^{87\text{-}89}$. En cuanto a la energía oscura, su falta de apelmazamiento sugiere que tiene pocos grados de libertad, y por tanto que es desdeñable a efectos entrópicos.

(contando unas 10^{22} estrellas, con 10^{57} nucleones cada una, y una vida activa de unos 10^{10} años, como media).

Sin duda es el Sol la estrella más importante para nosotros. De la superficie solar (fotosfera) nos llegan sus fotones, con un espectro de cuerpo negro a temperatura de unos 5760 K. Por otro lado, la superficie terrestre, a una temperatura efectiva media de 255 K, emite en el infrarrojo, devolviendo 23 fotones térmicos por cada fotón solar absorbido. De este modo, la energía emitida iguala a la recibida, y se mantiene el equilibrio. Como el valor canónico aceptado (desde hace una década) del flujo solar a la distancia de 1 UA es de 1365.4±1.3 W/m^2,[81] el flujo de radiación terrestre es de 341 W/m^2, y teniendo en cuenta el albedo (30%) y el factor $(1\text{-}T_{Tierra}/T_{Sol}) \approx 0.96$ que relaciona el flujo entrópico neto de la Tierra y el flujo de entropía que nuestro planeta arroja al exterior con los fotones infrarrojos, resulta como flujo de energía libre que recibimos del Sol 228 W/m^2, lo que supone un total de 10^{17} W. Anualmente, por tanto, la Tierra recibe del Sol una energía disponible equivalente a 100 billones de toneladas equivalentes de petróleo, o, si se prefiere, a 1 millón de gigatones. Esta energía, que es igual a la que disipan todas las estructuras disipativas sobre la faz de la Tierra, sostiene todos los gradientes térmicos (vientos, huracanes, corrientes oceánicas, vida) que mantienen la actividad de la superficie terrestre. El vertido de entropía que hace la Tierra hacia el medio exterior es del orden de $\dot{S}_{Tierra}/k_B \sim 10^{45}$/año.

3.1.7. *¿Vida sin fin?*

Mientras la entropía S del Universo (visible) se mantenga inferior a su valor máximo $S_{máx}$, podrá seguir creciendo y por tanto la vida seguirá siendo, en principio, posible. La pregunta de si la brecha $S_{máx}$-S llegará a cerrarse (muerte térmica) o no, y si, en caso positivo, lo hace en tiempo finito o asintóticamente en tiempo infinito, es una cuestión candente, que depende de la composición energética del Universo futuro. Si esta no es sino la prolongación de la actual, cabe pensar como escenario esperado uno en el que el Universo se expandirá exponencialmente (energía oscura), convirtiéndose en un lugar superfrío, inhóspito y solitario; casi todas las galaxias se esconderán tras un ho-

[81] Una reciente recalibración de las medidas obtenidas con el TIM (Total Irradiance Monitor) a bordo del satélite SORCE de la NASA corrigen ligeramente esta cifra, disminuyéndola a 1360.8±0.5 W/m^2 [Kopp, Lean 2011].

rizonte de sucesos; y cuando hayan pasado más de 140 décadas cósmicas (10^{140} años) y los ANSMs se hayan evaporado, únicamente quedará un fluido gaseoso de leptones y fotones, tan diluido, que solo ocasionalmente se producirá alguna aniquilación electrón-positrón. Bajo esta perspectiva tan poco halagüeña, la vida inteligente y activa no podría darse de modo indefinido, ni aun bajo el supuesto de una osada hipótesis de «cambio de escala biológica» [Dyson 1979; Krauss y Starkman 2000].

3.2. **La consciencia y la mecánica cuántica**

> *The consciousness question seems to me to be approachable with current technology, and is too important to leave to the speculations of physicists.* (N. Lane)
>
> *You have nothing to do but mention the quantum theory, and people will take your voice for the voice of science, and believe anything. (*B. Shaw)
>
> *Although the idea of «vital forces» in biology alien to physics and chemistry has largely disappeared, consciousness remains the last refuge of obscurantists.* (M. Gell-Mann)

Con cierto miramiento me atreveré a decir unas breves palabras sobre la consciencia, ante este auditorio tan ilustre y exigente. El Académico Excmo. Sr. D. Francisco José Rubia inauguraba el curso académico 2010 con una brillante y documentada exposición sobre «El enigma de la consciencia»: qué es, de dónde procede, y para qué sirve. En particular, citaba el Prof. Rubia, con acertado escepticismo, la teoría del anestesiólogo Stuart Hameroff y del renombrado matemático Roger Penrose sobre una pretendida coherencia cuántica basada en los microtúbulos como origen físico de la consciencia [Rubia 2010]. Muy pocos son los físicos atraídos por estas ideas, que, en cambio, han hallado más aceptación entre la comunidad mística [Seife 2000].

No han sido Hameroff y Penrose los primeros en echar mano de la física cuántica para dar respuesta a una cuestión fundamental en torno a la consciencia: qué procesos físicos la subyacen. El gran físico Eugene Paul Wigner, Premio Nobel en Física 1963, fue tal vez pionero, al vincular el controvertido «colapso» del estado cuántico en el proceso de la medición con un acto consciente de la mente del observador [Wigner 1961]. La historia del «amigo de Wigner» ilustra esta cuestión.

Ese amigo realiza un experimento que tiene dos posibles resultados: la producción, o no, de un flash en el laboratorio, según que el sistema con que se experimenta esté en un estado cuántico $|f\rangle$, o en un estado ortogonal $|nf\rangle$. El sistema está inicialmente en un estado «no decidido» $\alpha|f\rangle + \beta|nf\rangle$, con amplitudes de probabilidad α, β, de emitir, no emitir, el flash. Llega Wigner al laboratorio de su amigo y le pregunta qué resultado ha producido el experimento. El amigo le dice que ha sido «flash» (o «no flash», según haya observado). Al cabo de unos segundos, Wigner insiste, y le pregunta qué vió antes de que él, Wigner, le hiciera la primera pregunta. Su amigo no se lo piensa dos veces: «Ya te lo dije; vi el flash» (o «no vi el flash», según haya sido el caso). El amigo, en consecuencia, no percibe que se halle en «animación suspendida» entre un estado mental $|F\rangle$ de haber visto el flash y un estado mental $|NF\rangle$ de no haberlo visto, como correspondería al entrelazamiento $\alpha|f\rangle|F\rangle + \beta|nf\rangle|NF\rangle$ que, de acuerdo con las reglas de la mecánica cuántica, debe producirse entre el sistema observado y el aparato de observación. La conclusión de Wigner es sugerir que la mente humana no se somete al gobierno de las leyes cuánticas, pues no admite la superposición lineal.

Se cuenta que Wigner abandonaría esta postura a principios de los 70, cuando la teoría de la descoherencia irrumpió con fuerza en el panorama científico.

Tuve la oportunidad de escuchar personalmente a Hameroff y a Penrose en el congreso «Cajal and consciousness» celebrado en Zaragoza en Diciembre del año 1999, para conmemorar el centenario de la publicación de la magna obra de Cajal TEXTURA DEL SISTEMA NERVIOSO DEL HOMBRE Y DE LOS VERTEBRADOS (1899-1904). Desde unos meses antes se conocía un importante trabajo de Tegmark donde este autor concluía, tras un análisis cuidadoso de los distintos factores de rotura de coherencia, que los tiempos de descoherencia cuántica en los procesos neurológicos están en el rango de 10^{-13} a 10^{-20} s, y por tanto son varios órdenes de magnitud más cortos que los tiempos de disparo o descarga de las neuronas (10^{-3} s) y los tiempos ($\sim 10^{-7}$ s) que los excitones tardan en atravesar un microtúbulo corto [Tegmark 2000]. El cerebro es un medio cálido, húmedo, ruidoso a escala atómica, en fuerte interacción con el medio que lo rodea, y por ello nada propicio a la coherencia cuántica. La actividad neuronal cae plenamente, en consecuencia, en el dominio clásico, sin que se den las circunstancias para que su actuación pueda semejarse a la de un ordenador cuántico; no caben argumentos holísticos basados en la

física cuántica para explicar la consciencia. Ni las contribuciones de Hameroff y de Penrose a las Actas del Congreso, ni la respuesta de Hameroff *et al.* a la crítica de Tegmark, aportan argumentos científicos minimamente convincentes [Hameroff 2001; Penrose 2001; Hagan, Hameroff, Tuszíñsky 2002].[82]

También escuché en ese Congreso a Murray Gell-Mann (Premio Nobel de Física en 1969), el gran físico de los quarks, quien, con su fino instinto, ve en la consciencia un problema típico de complejidad emergente, que encaja perfectamente en la neurobiología y en la física clásica; un problema para el que considera muy improbable que la física cuántica tenga nada que decir. No exento de sorna, despacha las especulaciones de Penrose y Hameroff basadas en gravitación cuántica de esta guisa: «Invoking quantized gravitation in a discussion of consciousness leads us back to our discussion of redness, but I am afraid it is only the redness of herrings that is involved.» [Gell-Mann 2001].[83]

Otro físico teórico, Klaus Hepp, y el neurocientífico Christof Koch, también ven mucho más probable que la base material de la consciencia pueda entenderse en un marco puramente neurobiológico, sin necesidad, como dicen ellos, de invocar ningún *deus ex machina* mecanocuántico. Y retan a quienes sostienen que la consciencia es necesaria para producir el colapso de los estados cuánticos a realizar un experimento mental (*gedanken*) o imaginario: un observador está mirando, con uno de sus ojos, un estado superposición (por ejemplo, del tipo de gato de Schrödinger vivo/muerto), y con el otro ojo, una sucesión de caras que cambian muy rápidamente. Bajo ciertas condiciones el observador solo es consciente de estas caras, y no del gato. ¿Colapsará el estado del gato? No debería hacerlo si la consciencia fuera imprescindible para producir el colapso. Según la física cuántica, sin embargo, basta con que algún fotón proveniente del sistema cuántico se tope con algún objeto clásico, como es la retina

[82] En mhttp://space.mit.edu/home/tegmark/technical.html puede leerse una breve réplica («Max Tegmark's quantum mechanics library: brain») a Hagan, Hameroff y Tuszyński.

[83] En el texto de su charla en este Congreso sobre Cajal, Gell-Mann afirma que la mecánica cuántica ni es extraña ni es misteriosa, y que su presunta rareza se basa en un malentendido. He aquí un cambio radical respecto de su opinión 20 años atrás [Gell-Mann 1981], cambio que me matizaría personalmente, como ya reseñé anteriormente. En cuanto al colapso de los estados cuánticos, para Gell-Mann se trata de un vulgar colapso de probabilidades, como el que ocurre cuando al final de una carrera de caballos hay ya un caballo ganador: la distribución inicial de probabilidades colapsa a la distribución {...0,1,0,...,0,...}.

de un ojo del observador, para que el gato deje de estar en situación suspendida entre estado vivo y estado muerto, y se precipite en uno de estos dos estados robustos. He aquí dos alternativas cuya elección podría ser sometida, en principio, al veredicto experimental [Kosch, Hepp 2006].

3.3. **El libre albedrío y la mecánica cuántica**

Denique si semper motu conectitur omnis
et vetere exoritur <motus> novus ordine certo
nec declinando faciunt primordia motus
principium quoddam, quod fati foedera rumpat,
ex infinito ne causam causa sequatur,
libera per terras unde haec animantibus exstat,
unde est haec, inquam, fatis avolsa voluntas,
per quam progredimur quo ducit quemque voluptas,
declinamus item motus nec tempore certo
nec regione loci certa, sed ubi ipsa tulit mens?
(Titus Lucretius Carus)

We must believe in free will. We have no choice. (I.B. Singer)

Do we really have free will, or, as a few determined folk maintain, is it all an illusion? We don't know, but will prove...that if indeed there exist any experimenters with a modicum of free will, then elementary particles must have their own share of this valuable commodity. (Conway, Kochen)

Lucrecio, el gran *poeta damnatus* de la épica científica, recoge de Epicuro la idea del *παρέκκλιση*, *clinamen* o declinación, para salvar a los seres vivos de la necesidad del hado. Se trata de una tercera forma de moverse los «átomos» (principios universales, semillas, cuerpos, figuras,...),[84] distinta de su movimiento vertical natural y de las colisiones mutuas. La declinación o desviación se produce espontáneamente en espacio y tiempo indeterminados, y propicia las colisiones entre los átomos. «Pues si no declinaran los principios, / en el vacío, paralelamente / cayeran como gotas de la lluvia; / si no tuvieran su reencuentro y choque / nada criara la naturaleza.»[85] Además de crearse así las cosas, el *clinamen* hace que los cuerpos puedan escapar al determinismo físico, a la férrea cadena de las causas y sus efectos.

[84] La palabra «átomo» no figura en ningún lugar del poema lucreciano De Rerum Natura.

[85] Traducción de Abate Marchena, en Lucrecio, De la naturaleza de las cosas, (edición de Agustín García Calvo), Ediciones Orbis, S.A. 1984.

El libre albedrío (*liberum arbitrium*) es una cuestión filosófica de gran trascendencia ética y social, que también ha recibido la atención de algunos físicos insignes, como Eddington, Bohr, Arthur Holly Compton (Nobel en Física 1927), y Schrödinger. El determinismo laplaciano ahoga a la libre voluntad, pues, bajo su égida, el pasado decide por completo el futuro. Por eso la física cuántica supuso en su momento una esperanza de liberación que podía romper con las cadenas de ese hado que parecía ineludible. El presente ya no tenía las llaves del futuro, pues el azar cuántico intervenía por derecho físico.

Ahora bien, el indeterminismo cuántico también entra en conflicto con el libre arbitrio, pues ese indeterminismo no es completo, ya que fija unas probabilidades, que no podríamos nunca eludir en el ejercicio de nuestra libertad soberana. Schrödinger se percató bien de esto en su breve análisis de 1936: «pues si el que yo me fume un pitillo o no antes del desayuno (¡una muy mala cosa!) dependiera del principio de indeterminación de Heisenberg, este estipularía una estadística concreta, digamos 30:70, que, con constancia, podría yo invalidar» [Schrödinger 1936]. Y el responsable de la paradoja del gato no tiene inconveniente en exclamar: «No hay una función ψ en la vida». Concluye Schrödinger sus reflexiones así: «Las unidades materiales que determinan los procesos vitales parecen ser lo suficientemente grandes para salvaguardar posiblemente, o incluso probablemente, el curso esencial de estos procesos contra toda manifestación perceptible, directa e inmediata, de la incertidumbre de Heisenberg.»

Si el libre albedrío es imposible tanto bajo el determinismo clásico como bajo el indeterminismo cuántico, ¿debemos concluir que nuestra libertad individual es una ilusión?

En este ilustre foro el Académico Prof. Rubia pronunció una conferencia en el curso 2009 titulada «El fantasma de la libertad». No tuve ocasión de escucharla, pero sí he leído con fruición su libro de igual título [Rubia 2009]. Ahí se encuentra, rigurosamente documentada, la respuesta afirmativa a la anterior pregunta: sí, la voluntad libre es una ficción cerebral. Los experimentos pioneros de Benjamin Libet y colaboradores pusieron de manifiesto que la actividad neuronal inconsciente relacionada con una determinada acción de un individuo (registrada en medidas electrofisiológicas a través de un potencial eléctrico preparatorio) se iniciaba unas pocas décimas de segundo antes del momento en que este decide realizarla. Más aún, si la ejecución de esa acción era voluntaria y el hacerla, o no, se dejaba a la elección individual, también el potencial preparatorio aparecía unas

décimas de segundo antes de que el sujeto fuera consciente de que iba a realizar la acción [Libet et al. 1983]. Nuevos experimentos más recientes y sofisticados, con tomas de imágenes cerebrales por resonancia magnética funcional, han puesto de manifiesto que la actividad inconsciente en la corteza prefrontal y parietal puede adelantarse incluso en 10 s al comienzo del proceso consciente de toma de decisión por parte del sujeto [Soon et al. 2008, Cashmore 2010].

A pesar de todos estas poderosas razones neurofisiológicas, el debate no está, ni mucho menos, cerrado para todos. ¡Tan profundo es el sentimiento de libertad individual! Decíamos antes que ni el determinismo a ultranza, ni el indeterminismo cuántico (con su azar reglado), pueden convivir con el libre arbitrio. Restaría aún la posibilidad de que este fuera compatible con algún otro tipo de indeterminismo estocástico. Tal resquicio parece estar eliminado nada menos que por un teorema; sí, un teorema matemático, y no una argumentación filosófica.

Los matemáticos John Conway (el inventor del «Juego de la Vida» del que ya escribimos) y Simon B. Kochen publicaron un teorema en 2006 según el cual, bajo tres axiomas que llaman **SPIN**, **TWIN**, y **FIN**, demuestran que si un observador tiene libre albedrío para elegir entre varias orientaciones de los aparatos usados para realizar ciertos experimentos —qué menos— en que intervienen partículas, entonces ¡también estas partículas tienen libre albedrío!, en el sentido de que su comportamiento en el experimento no depende para nada de su pasado, y por tanto, son «libres» para elegir su respuesta o resultado en dichos experimentos [Conway, Kochen 2006].

Las hipótesis son:

SPIN. Existen partículas de espín total 1 (en unidades $h/2\pi = 1$), de modo que al medir el cuadrado $(\boldsymbol{S}.\boldsymbol{n})^2$ de la componente de su espín $\boldsymbol{S}$ a lo largo de una dirección $\boldsymbol{n}$ resulta siempre el valor 0, o 1. Cuando se mide secuencialmente a lo largo de tres direcciones ortogonales x, y, z (lo llamaremos a esto experimento triple), se obtienen siempre los valores 1, 0, 1, salvo orden. (Recuérdese la relación $S_x^2 + S_y^2 + S_z^2 = 2$ para partículas de espín 1, y que los cuadrados de estas componentes conmutan para dicho espín.)

TWIN. Es posible aparear dos de esas partículas a, b, de modo que si se mide sobre una de ellas, digamos la a, la componente del espín a lo largo de x, y, z, con los resultados i, j, k (una permutación de 1, 0, 1), y sobre la otra, b, en una dirección w de entre x, y, z,

entonces el valor obtenido para esta segunda es *i*, *j*, o *k*, según que *w* = *x*, *y*, o *z*.

FIN. Existe una cota superior finita a la velocidad de propagación efectiva de la información.

En un trabajo posterior [Conway, Kochen 2008], saliendo al paso de ciertas críticas, Conway y Kochen refuerzan el teorema, debilitando el axioma **FIN**, que sustituyen por este otro:

MIN. Supongamos que las partículas sobre las que se miden los espines citados están muy alejadas entre sí, y que los observadores *A* y *B* que los miden guardan una separación de género espacio en el sentido usual relativista.[86] Entonces, si el observador *B* elige una dirección *w* arbitraria, la respuesta de la partícula *a* es independiente de esta elección. Asimismo, si el observador *A* elige una terna ortogonal *x*, *y*, *z*, arbitraria, la respuesta de la partícula *b* no depende de dicha elección.

La conclusión del teorema fuerte del libre albedrío es que los axiomas **SPIN**, **TWIN** y **MIN** garantizan que la respuesta de una partícula de espín 1 a un experimento triple es libre, esto es, no depende de las propiedades del universo anteriores a esa respuesta en un sistema inercial arbitrario. En palabras llanas: el libre albedrío del experimentador para escoger una configuración u otra de su experimento entraña el libre albedrío (o independencia de su historia previa) de las partículas para responder al experimento con un valor u otro. Este «contagio» universal del libre albedrío no exige la validez de toda la mecánica cuántica; basta con la terna de axiomas anteriores.

Este teorema muestra también que, aceptados **SPIN** y **TWIN** (postulados que cumple automáticamente el formalismo cuántico), ninguna teoría determinista puede dar cuenta de los resultados del experimento en cuestión sin entrar en conflicto con **MIN**, es decir, con la relatividad. En particular, ninguna teoría de «variables ocultas» puede explicar los resultados de la física cuántica sin violar la localidad einsteiniana. Así interpretado, el resultado era ya bien conocido de antaño: la incompatibilidad de la mecánica cuántica con las teorías de variables ocultas locales [Bell 1964]. Mas los autores van mucho más lejos; arguyen también que es imposible la existencia de ningún modelo estocástico que respete la terna **SPIN**, **TWIN** y **MIN**. Y es en esta conclusión donde se produce la colisión frontal con otros resultados

[86] Recordemos que dos sucesos (x_1, t_1), (x_2, t_2) del espacio-tiempo guardan entre sí una separación de género espacio cuando ninguna partícula puede ir de uno al otro moviéndose a velocidad que no supere nunca la de la luz en vacío.

que sostienen lo contrario [Bassi, Guirardi 2007; Tumulka 2007; Conway, Kochen 2007; Goldstein et al. 2010]. La polémica no está cerrada; está claro que idénticas palabras adquieren distintos significados para unos y otros. Una interesante discusión sobre ambos puntos de vista y algunas sutilezas de la mecánica cuántica relativista sugieren que, sorprendentemente, las dos posturas enfrentadas pueden ser correctas [Gisin 2010].

Hasta que se aclare esta situación en torno a las implicaciones del teorema fuerte del libre albedrío, será prudente esperar.

3.4. **Quiralidad en la naturaleza viva**

Symmetry, as wide or as narrow as you may define its meaning, is one idea by which man through the ages has tried to comprehend and create order, beauty and perfection. (H. Weyl)

Aussi bien ce sont mes premières joies de chercheur. Celles qu'inspire la science n'ont pas moins de poésie que les autres. (L. Pasteur)

Lorsque certaines causes produisent certains effets, les éléments de symétrie des causes doivent se retrouver dans les effets produits. Lorsque certains effets révèlent une certaine dissymétrie, cette dissymétrie doit se retrouver dans les causes qui lui ont donné naissance. (P. Curie)

Perhaps looking-glass milk isn't good to drink. (L. Carroll)

Decía Heisenberg que «la belleza es la conformidad propia de las partes entre sí y respecto del todo». Para Platón de Atenas, los ingredientes de la belleza como virtud estaban en la medida y en la proporción. Generalmente no necesitamos de una definición (que resume un sentimiento) para apreciar dónde hay belleza: la vemos sin más en una puesta de sol, en la concha de un molusco, en las ruinas del Partenón, y en mil sitios más. Ayudados por microscopios y telescopios, podemos también maravillarnos ante la estructura de un copo de nieve o de una molécula de ADN, ante la majestuosidad de los anillos de Saturno, o el delicado colorido de la nebulosa Trífida.

Pero necesitaremos de una mínima educación y sensibilidad temáticas para llegar a vislumbrar no ya la estética del producto final sino la belleza de las leyes mismas que rigen finalmente los procesos generadores de éste, a saber, las leyes fundamentales de la física. Sería inconcebible la fealdad en los principios rectores de un mundo en

el que hay rosas y hay diamantes. Una sola palabra tiene la clave para llegar a ese entendimiento: simetría. Con ella, como decía el gran matemático Hermann Klaus Hugo Weyl, el hombre ha intentado percibir y crear orden, belleza y perfección. Y si no, que se lo pregunten a los griegos, que en su obsesión por la simetría llegaron a imponérsela al Universo. Hemos tardado siglos en darnos cuenta de su error. Johannes Kepler sustituyó los círculos pitagóricos perfectos, maximalmente simétricos, por las elipses de Apolonio de Perga, órbitas planetarias que son soluciones *asimétricas* de unas ecuaciones para el movimiento celeste *simétricas* bajo rotaciones en torno al Sol. El gran físico Pierre Curie, Nobel en Física 1903, con su «principio de simetría», erró, pues una simetría en las causas no necesariamente desemboca en efectos con esa simetría [Curie 1894]. Se desconocía en aquella época la posibilidad de simetrías espontáneamente rotas, simetrías de las leyes que no aparecen de modo manifiesto en las soluciones. El ferromagnetismo es uno de los ejemplos más conocidos. Irónicamente, la transición para- a ferro-magnetismo fue descubierta por el propio Curie.

No, no nos fijemos en el fruto final, sensible a unas condiciones de contorno circunstanciales, y que bien pueden ocultar, como hacen los planetas, las simetrías subyacentes. Enfoquemos más bien la atención en los principios que gobiernan el cosmos, para ver si en ese mundo ideal mora también la belleza.

Amparándose en su principio, Curie intentó, sin éxito, sintetizar moléculas ópticamente activas en presencia de un medio asimétrico bajo reflexión especular, a saber, dos campos, uno eléctrico, y otro magnético, paralelos. Un siglo después demostraría Pierre-Gilles de Gennes, Nobel en Física 1991, que la invariancia bajo inversión temporal era la responsable de que en el experimento de Curie, con un estado final en equilibrio, se obtuviese una mezcla racémica, esto es, una mezcla con igual abundancia de moléculas dextrógiras que de moléculas levógiras [Gennes 1970].

En 1811 el físico François Jean Dominique Arago descubrió la actividad óptica de los cristales de cuarzo [Arago 1811]. En 1815 el físico Jean-Baptiste Biot observó el efecto rotatorio en disoluciones de sales, y años más tarde, lo hizo con la disolución del ácido tartárico dextrógiro (única forma entonces conocida) [Biot 1815].

El ácido racémico se encontró accidentalmente en 1828; aunque tiene la misma composición química que el tartárico, carece de actividad óptica. El célebre microbiólogo y químico Louis Pasteur consiguió en 1848 cristalizar una sal de este ácido, y separar sus cristales en dos clases enantiomorfas (o imágenes recíprocas bajo reflexión especular), con actividades ópticas opuestas [Pasteur 1848]. La dextrógira coincidía en su efecto con el ácido tartárico dextrógiro. Pasteur logró así resolver el ácido racémico en sus dos componentes quirales, los ácidos dextrotartárico L-(+) y levotartárico D-(–), sentando con ello las primeras bases de la disimetría o quiralidad molecular.[87]

Es un hecho conocido que en casi todos los organismos vivos, con unas pocas excepciones, los 19 aminoácidos proteinogénicos (salvo el vigésimo, la glicina, que es aquiral) y los azúcares de origen biológico son de tipo L y de tipo D, respectivamente, mientras que su producción sintética, en ausencia de catalizadores quirales o de fuentes de quiralidad, siempre aboca en mezclas racémicas.[88] El análisis de huesos fósiles de 100 millones de años de antigüedad muestra que los aminoácidos proteinogénicos ya eran L-enantiómeros, y entra en lo plausible que la homoquiralidad molecular apareciera en el transcurso de la evolución química de la Tierra hará unos 4 Ga. La quirobiogénesis, la emergencia de la selectividad quiral presente en un entorno cósmico de la Tierra, es un problema abierto importante que atrae la atención de físicos, químicos y astrobiólogos.

¿Es la (bio)homoquiralidad una condición necesaria para la aparición de la vida, o es una consecuencia de esta? Hoy prevalece la opinión de la necesidad de un entorno prebiótico quiral, basada en los experimentos que indican que estructuras secundarias de las proteínas como las α-hélices y las β-láminas solo se forman a partir de agregados enantioméricamente puros [Cline 1995; Fitz et al. 2007; Gleiser, Walker 2010].

No hay acuerdo entre los expertos acerca de cómo se ha alcanzado la homoquiralidad. Algunos apuestan por un proceso de tres fases:

1) Una primera fase germinal, en la que las fuerzas electrodébiles, a través de la acción de las corrientes débiles neutras mediadas por su portador el bosón Z^0 y la consiguiente violación de la paridad, produce un minúsculo desequilibrio entre las componentes enantiomé-

[87] La notación ± indica el efecto sobre el plano de polarización de la luz: + en el caso dextrorrotatorio, – en el caso levorrotatorio. Los símbolos (en versalitas) L, D indican configuraciones similares a las del gliceraldehido L, D, o levo, dextro, o R, S, como molécula de referencia.

[88] A pesar de ser de tipo L, nueve de esos diecinueve aminoácidos son dextrorrotatorios para una longitud de onda de 589 nm. Y la D-fructosa es levogiratoria.

ricas L y D. La diferencia de energía ΔE entre los niveles fundamentales de los dos enantiómeros es extraordinariamente pequeña; por ejemplo, para una molécula quiral sencilla como el bromoclorofluorometano (CHFClBr), ΔE es del orden de 10^{-16} eV, esto es, unos 30 mHz, lo que implica, mediante la distribución de Boltzmann, un insignificante exceso enantiomérico (o asimetría quiral neta) a temperatura ambiente del orden de 4×10^{-15}, lo que equivale a un exceso de unas 10^9 moléculas, por mol, del enantiómero más estable en una mezcla nominalmente racémica. La medida experimental de la violación de la paridad en moléculas quirales aún no se ha podido realizar hasta la fecha con la precisión necesaria; pero existe por fin un ambicioso proyecto conjunto, con intervención de físicos y químicos, tanto teóricos como experimentales, cuya finalidad es medir ΔE, mediante espectroscopía láser ro-vibracional de ultra-alta resolución, en algunos sistemas moleculares quirales apropiados. Para ello están desarrollando un minucioso y exhaustivo análisis computacional previo, que exige complejos cálculos cuánticos relativistas, *ab initio*, con numerosas moléculas quirales candidatas, entre las que figuran como prometedoras algunos complejos de oxo-renio. [Darquié et al. 2010; Bast et al. 2011].

Además de la rotura intrínseca de la simetría de paridad por la interacción electrodébil, que convierte los enantiómeros en diastereómeros, tampoco se descarta la posibilidad de que a la minúscula ventaja inicial de un enantiómero sobre el otro contribuya el mero azar (fluctuación estadística).

2) Una segunda fase se encargaría de amplificar el pequeño exceso enantiomérico resultante de la fase anterior. Aquí se abre un amplio abanico de interesantes posibilidades [Blackmond 2010], empezando con el modelo ideal y pionero de Frank: un enantiómero como autocatalizador e inhibidor del enantiómero antagonista [Frank 1953]. Cuatro décadas hubieron de pasar hasta el hallazgo de una primera prueba de concepto del método de Frank, en la alquilación autocatalítica de aldehidos pirimidínicos con dialquilzincs [Soai et al. 1995]. Pronto aparecería la primera racionalización de estos procesos, un importante modelo cinético y predictivo, confirmado por espectroscopía RMN [Blackmond et al. 2001]. Otros procesos enantioenriquecedores relevantes han sido y/o están siendo intensamente explorados: modelos de «amnesia» quiral [Blackmond 2007; Viedma 2007], y modelos de manipulación de excesos enantioméricos eutécticos [Klussmann et al. 2006], que podrían haber sido ambos importantes a nivel prebiótico. Otros autores abogan por la segunda ley de

la termodinámica, extendida adecuadamente a sistemas abiertos, como motor de amplificación del desequilibrio inicial [Jaakkola, Sharma, Annila 2008]. Tampoco falta quien acuda a la misteriosa y esquiva gravedad cuántica como causante del consenso quiral.

Es claro que, ante tantas ofertas distintas, habrá que esperar a que nuevos hallazgos arrojen más luz sobre este importante problema.

3) Finalmente, habría una tercera fase, una etapa de propagación a otras moléculas, o período de contagio de la hegemonía de la componente (L o D) dominante.

3.5. **Manifestaciones cuánticas en el fenómeno vida**

> *A new scientific truth does not triumph by convincing its opponents and making them see the light, but rather because its opponents eventually die, and a new generation grows up that is familiar with it.* (M. Planck)
>
> *The hypothesis I am proposing is that the transition from non-life to life was a quantum-mediated process, and that the earliest form of life involved non-trivial quantum mechanical aspects.* (P. Davies)

Nadie cuestiona la presencia activa de los principios cuánticos en los niveles más básicos (moléculas, átomos, núcleos,...) de la naturaleza, y en consecuencia, su acción indirecta en todos los fenómenos, incluidos los biológicos. La duda surge cuando nos preguntamos por los posibles atisbos «no triviales» de los cuantos a niveles más complejos, es decir, por la posibilidad de que su intervención en ellos aflore de modo inesperado y por ello sorprendente.

En las últimas dos décadas se ha constatado un resurgimiento extraordinario en la física cuántica, una especie de renacimiento cuántico, gracias sobre todo al tirón de la información y computación cuánticas, y al desarrollo concomitante de una verdadera ingeniería cuántica que manipula átomos y fotones a la carta. Y los procesos biológicos no podían escapar de la meticulosa atención de quienes están en la vanguardia de esta revivificación de los quanta. Como dice Davies, «los pujantes campos de la nanotecnología, la biotecnología, la tecnología cuántica y el procesamiento de la información cuántica convergen con fuerza en la actualidad» [Davies 2008a].

La descoherencia cuántica ha sido el fantasma permanente que ha acosado todo intento de buscar manifestaciones cuánticas en sis-

temas naturales complejos; el ritmo de descoherencia aumenta con la temperatura, y fenómenos macroscópicos coherentes como la superconductividad y la superfluidez solo emergen a bajas temperaturas. Una excepción significativa son las cerámicas superconductoras a alta temperatura crítica descubiertos en 1986; su existencia alienta la esperanza de que argumentos cualitativos basados en la consideración de energías ambientales del orden de $k_B T$ pueda contrarrestarlos la naturaleza mediante un astuto apantallamiento de la acción descoherente del medio.

Otro recurso del que la naturaleza podría haber echado mano es el de los subespacios resistentes a la descoherencia. Pueden existir estados cuánticos inmunes a la pérdida de coherencia; tales estados subtienden un subespacio libre de descoherencia, que además es genérico (independiente del ruido y de las condiciones iniciales), y estable en primer orden bajo pequeñas alteraciones de la dinámica del sistema [Lidar, Chuang, Whaley 1998].

Los sistemas biológicos parecen, en principio, no ser los más idóneos para las manifestaciones cuánticas (como la coherencia, el entrelazamiento, o la provocación de fenómenos macroscópicos por fotones o espines individuales); la razón es que la materia biológica ni está suficientemente aislada, ni está debidamente fría. Por el contrario, es húmeda, templada y ruidosa. De ahí el escepticismo generalizado entre los biólogos y una notable mayoría de físicos sobre la relevancia de los quanta en los procesos biológicos. Sin embargo, no olvidemos que los sistemas vivos son sistemas forzados abiertos y que operan fuera del equilibrio termodinámico. Como tales, podrían generar enfriamiento a nivel intra-molecular, aumentado así el rendimiento catalítico de algunas proteínas. Además, los seres vivos, a diferencia de los seres inertes o inanimados, son sistemas físicos capaces de corregir sus errores, eliminándolos con el recurso a alguna fuente de energía libre. En particular, cabe en principio pensar en su posibilidad de deshacerse de los errores generados por la descoherencia en el entrelazamiento de algún estado cuántico de sus macromoléculas, al menos durante el tiempo suficiente para su aprovechamiento en mejorar la eficiencia de algún proceso bioquímico [Briegel, Popescu 2009]. Son, sin duda, mejoras todas éstas que la naturaleza habría aprovechado por selección evolutiva.

Y efectivamente, en los últimos años se han encontrado indicios muy alentadores, tanto experimentales como teóricos, sobre la posible no trivialidad de la presencia cuántica en ciertos fenómenos de

la naturaleza viva, que tienen que ver con la visión, el olfato, la orientación de las aves migratorias, y la eficiencia fotosintética. Aparte de estas manifestaciones especiales, cabe citar la probada participación del efecto túnel de electrones en la fotosíntesis, en la respiración celular, y en el transporte electrónico a lo largo del ADN; también hay evidencias (por efecto isotópico cinético) de tuneleo protónico en la acción enzimática de la alcohol deshidrogenasa y de otras enzimas [Arndt, Juffmann, Vedral 2009; Hayashi, Stuchebrukhov 2010; Cai, Popescu, Briegel 2010]. Muestra del interés actual en torno a estas candentes cuestiones, baste señalar que en la reunión del pasado marzo de la American Physical Society celebrada Dallas, con unos 12 000 asistentes, se dedicaron cuatro sesiones «foco» a la «Coherencia Cuántica en Biología», centradas básicamente en algunos de los temas que acabo de mencionar.

Revisemos ahora las manifestaciones especiales.

3.5.1. *La física cuántica en la visión*

> *Light, seeking light, doth light of light beguile.* (W. Shakespeare)
>
> *All these fifty years of conscious brooding have brought me no nearer to the answer to the question, 'What are light quanta?' Nowadays every Tom, Dick and Harry thinks he knows it, but he is mistaken.* (A. Einstein)
>
> *Photons have mass? I didn't even know they were Catholic.* (Woody Allen)

El ejemplo por antonomasia de un quantum es el fotón, una excitación electromagnética elemental e indivisible. La energía que transporta un fotón del espectro visible es muy pequeña, del orden de un par de electronvoltios, o medio attojulio. A pesar de esta nimiedad, es bien sabido que basta con unos pocos de ellos (entre 2 y 7) para excitar la retina y producir visión en un observador adaptado a la oscuridad. De hecho, un solo fotón de la región verde-azul del espectro que llegue a uno de los 92 millones de bastones de la retina humana es capaz de excitarlo en visión escotópica o de muy baja intensidad [Hecht, Shlaer, Pirenne 1942; van der Velden 1946]. En visión nocturna estas células fotorreceptoras alcanzan su máxima sensibilidad a la longitud de onda (en vacío) de 498 nm. La eficiencia de-

tectora del ojo, como ha escrito Albert Rose, ha llegado a su límite en el proceso evolutivo.

Se conoce bastante bien el proceso bioquímico por el cual la energía del fotón captado por una molécula de rodopsina en un bastón se amplifica y transduce en una variación detectable de la diferencia de potencial eléctrico a través de la membrana del bastón, cambio que se transmite al sistema visual [Rieke, Baylor 1998].

Con la loable idea de aproximar el mundo cuántico a la vida cotidiana, se propuso hace un par de años un elegante experimento para poder «ver» con nuestros propios ojos como detectores el entrelazamiento cuántico de fotones [Sekatski et al. 2009], apoyándose en resultados anteriores sobre posible entrelazamiento en un sistema micro-macroscópico consistente en unos $3.5x10^4$ fotones por un lado (parte «macro»), y un solo fotón por otro (parte «micro») [De Martini, Sciarrino, Vitelli 2008a, 2008b]. La idea es partir de dos fotones 1, 2 entrelazados (entrelazamiento «micro-micro»), y de uno de ellos, digamos el 2, hacer miles de copias por emisión estimulada en un cristal no-lineal, copias que si bien no pueden ser todas buenas (teorema de no-clonación cuántica), sí lo son cuando los estados iniciales yacen en un círculo máximo de la esfera de Bloch. Tras hacer pasar el fotón solitario 1 y el haz 2H resultante de la amplificación del fotón 2 del par inicial por adecuados filtros polarizadores, un observador podrá ver literalmente la señal del haz y comprobar «personalmente» que sus correlaciones con la señal del fotón solitario registrada por un detector ordinario violan una desigualdad de Bell del tipo CHSH (por Clauser, Horne, Shimony, Holt), testigo fehaciente de un entrelazamiento. El experimento en cuestión, con observadores humanos, acaba de ser realizado [Pomarico et al. 2011]. En él, efectivamente, se ha detectado esa violación; sin embargo, no puede concluirse del mismo que se haya visto un entrelazamiento «micro-macro» 1-2H, pues se ha usado un dispositivo clásico (no cuántico) para la amplificación, y por tanto, el estado del sistema 1-2H es separable, sin entrelazamiento alguno entre el 1 y el haz 2H. Se trata, en consecuencia, de un falso positivo, fruto del entrelazamiento 1-2 original y de la escapatoria de detección por las pérdidas del sistema y la eficiencia no perfecta de los detectores. La detección inequívoca de entrelazamiento micro-macro sigue siendo un reto experimental por batir. Del experimento analizado puede solo inferirse que se ha «visto» efectos cuánticos consecuencia del entrelazamiento micro-micro del sistema bifotónico de partida.

3.5.2. *La fragancia cuántica*

Omnia postremo bona sensibus et mala tactu
dissimili inter se pugnant perfecta figura;
ne tu forte putes serrae stridentis acerbum
horrorem constare elementis levibus aeque
ac musaea mele, per chordas organici quae
mobilibus digitis expergefacta figurant;
neu simili penetrare putes primordia forma
in nares hominum, cum taetra cadavera torrent,
et cum scena croco Cilici perfusa recens est
araque Panchaeos exhalat propter odores;
neve bonos rerum simili constare colores
semine constituas, oculos qui pascere possunt,
et qui conpungunt aciem lacrimareque cogunt
aut foeda specie foedi turpesque videntur.
(Titus Lucretius Caro)

El olfato es posiblemente la forma más primitiva de contacto de los seres con el mundo exterior. Surgido en el amanecer de la vida hace varios miles de millones de años, igual nos advierte de un peligro, como la presencia cercana de un predador o el estado de putrefacción de un alimento, que despierta en nosotros sensaciones profundas y evocadoras. Lo que no esperábamos es que en este sentido, de funcionamiento tan esquivo, interviniese de modo no trivial la mecánica cuántica.

En 1938 apareció un interesante trabajo sobre la base científica del olor, en el que su autor se proponía analizar tanto el fundamento fisiológico de la percepción de los olores, como la física del estímulo ósmico u olfativo [Dyson 1938]. Cuenta, entre otras cosas, que ya Newton tuvo en su estudio durante varios años uno o dos granos de almizcle sin que estos perdieran apreciablemente peso ni desapareciera de la habitación su perfume. De hecho, la fuente del olor sí pierde peso, aunque muy lentamente, lo que indica que nuestro olfato es capaz de percibir una cantidad pequeñísima de materia olorosa. Dyson cifra, por ejemplo, en 10 pg la masa umbral de triclorofenol que hay que inspirar para sentir su olor (equivalente a unas 3×10^{10} moléculas). Como mecanismo físico de producción de la sensación olorosa adelanta Dyson una hipótesis muy original: los movimientos vibratorios y rotatorios de las moléculas de la sustancia aromática, dentro de una banda ósmica, y cuando la presión de vapor es suficiente, serían los responsables de excitar las células olfativas produciendo señales características del olor en cuestión. Por eso muchas sustancias

distintas, pero con espectros de vibración y rotación similares en la banda adecuada, olerían de forma parecida. Sabemos hoy, sin embargo, que no es necesariamente así, pues hay moléculas enantiómeras, y por tanto con idénticos espectros, que huelen de forma muy distinta; se conocen como pares enantiómeros de tipo 2. Por ejemplo, los enantiómeros del limoneno (uno, de tipo R-(+), produce el olor a naranja, el otro, tipo S-(–), el olor a limón). Con otros pares, llamados de tipo 1, no se halla diferencia en su aroma. Existe una correlación entre estos tipos y la flexibilidad de las moléculas correspondientes. Los de tipo 1 tienen estructura molecular rígida; los del tipo 2 la tienen flexible [Brookes, Horsfield, Stoneham 2009].

La propuesta original de Dyson fue secundada y mejorada posteriormente [Wright 1977]. Pero hasta 1996 no se formuló ningún mecanismo concreto de transducción de esas vibraciones moleculares al sistema nervioso; lo hizo el biofísico Luca Turin invocando el efecto túnel (cuántico) inelástico de electrones entre distintos niveles de energía de las moléculas receptoras cuando su diferencia de energía igualaba a una de excitación fonónica (esto es, vibracional) de la molécula odorante captada [Turin 1996]. Así tuvo origen la polémica «teoría de la vibración» para el sentido del olfato. Para entonces ya habían hecho públicos los neurocientíficos Richard Axel y Linda B. Buck sus brillantes resultados sobre receptores olfatorios [Buck, Axel 1991], por los que recibirían años más tarde el Nobel de Fisiología o Medicina 2004.

Dominaba, a la sazón, otra teoría alternativa, conocida como «teoría de la forma», basada en una acción de reconocimiento de las moléculas olorosas por los órganos receptores, una acción del tipo encaje «llave/cerradura» entre las moléculas del olor y las receptoras [Moncrieff 1949; Amoore 1963]. Necesitó ser más tarde corregida, dando paso a «la teoría de los odotopos» o «teoría de la forma débil», en la que solo algunas partes («topos») de la molécula olorosa, y no toda esta, serían activas o relevantes para el olor [Mori, Shepherd 1994]. Pero también este refinamiento del modelo resulta insuficiente [Brookes 2010].

Al principio, la idea de Turin no despertó prácticamente interés alguno; fue necesaria la aparición de un librito biográfico y de divulgación sobre Turin y sus ideas acerca del olor, escrito por Chandler Burr, comentarista científico, para provocar la atención de la comunidad investigadora [Burr 2003]. Pronto aparecieron los resultados de un experimento psicofísico realizado en el hospital de la Universidad

Rockefeller en los que no se encuentra evidencia alguna que apoye la teoría vibratoria de Turin; esta se muestra insuficiente, por sí sola, para explicar el olor que se percibe de las moléculas olorosas [Keller, Vosshall 2004]. Según uno de los autores del estudio estos hallazgos, sin embargo, no desaprueban la teoría de la vibración, y que, aunque son consistentes con la teoría de la forma, tampoco pueden considerarse como una prueba de validez de esta [Rinaldi 2007].

Nuevos resultados en estos últimos años han fortalecido la propuesta de Turin [Brookes et al. 2007]. Un modelo mecanocuántico, bastante sencillo, pero general, con parámetros similares a los que se dan en los sistemas biomoleculares, muestra que el tuneleo inelástico de electrones entre una parte donante y otra receptora del sistema olfativo, asistido por la emisión de un fonón cedido a la molécula olorosa, es capaz de predecir las características observadas en el olor. Los autores de este estudio proponen rebautizar el modelo como «modelo de la tarjeta llavero» (en inglés, *swipe*, o *key*, *card model*): la molécula odorante no solo debe entrar en la «ranura» del receptor (teoría de la forma), sino que además debe tener el código de energías vibracionales correcto para encajar con el espectro electrónico y así propiciar el efecto túnel disparador de la señal olfatoria (teoría de la vibración).

3.5.3. *La brújula cuántica de los petirrojos*

> *Art thou the bird whom Man loves best, / The pious bird with the scarlet breast, / Our little English Robin; / The bird that comes about our doors / When autumn winds are sobbing?* (W. Wordsworth)
>
> *Era un ángulo de aves / dirigidas / aquella latitud de hierro y nieve / que avanzaba / sin tregua / en su camino rectilíneo: / era la devorante rectitud / de una flecha evidente, / los números del cielo que viajaban / a procrear formados / por imperioso amor y geometría.* (P. Neruda)

Hay al menos medio centenar de especies distintas de animales, desde insectos, moluscos y crustáceos hasta reptiles, anfibios, peces, aves y mamíferos, que están provistos de «brújulas» internas que les permiten detectar el campo geomagnético y utilizarlo para orientarse en sus grandes migraciones o en sus pequeños desplazamientos, y también para determinar su actual localización geográfica relativa al lugar de destino. No es baladí tal hazaña, por cuanto este campo es

tan débil (25-65 μT) que su energía de interacción con los momentos magnéticos atómicos es del orden de tan solo una diezmillonésima parte de la energía térmica $k_B T$ (~1/40 eV) a temperatura ambiente.

A diferencia de la mayoría de los sentidos, no existe un órgano magnetorreceptor como tal. Los campos magnéticos penetran y atraviesan muy fácilmente el tejido biológico, pudiendo en principio estimular elementos magnetorreceptores en cualquier rincón del cuerpo. Esto dificulta enormemente la identificación de estos últimos, que exige técnicas de imagen muy avanzadas. Se conocen tres posibles mecanismos físicos de magnetodetección [Johnsen, Lohmann 2005, 2008]: 1/ MD1: inducción electromagnética, 2/ MD2: ferrimagnetismo, y 3/ MD3: reacciones químicas con intervención de pares de radicales libres.

De la inducción EM podrían haberse aprovechado los elasmobranquios (como tiburones y rayas); estos condrictios están dotados de colecciones de células ultrasensibles a los cambios de potencial eléctrico. Pero está aún por demostrarse, pues aunque la sensibilidad de sus electorreceptores a esos cambios es muy alta (umbral del orden de 2 μV/m), no son capaces de detectar diferencias de potencial de muy baja frecuencia.

Materiales ferrimagnéticos como la magnetita (Fe_3O_4) y la greigita (Fe_3S_4) interaccionan intensamente con el campo magnético; sus pequeños dominios (0.1-1 μm) son poderosos dipolos magnéticos, con una energía de interacción con el campo magnético de la Tierra que sobrepasa mucho a la energía térmica. Piénsese que un nanocristal de magnetita de unos 60 nm interactúa con el campo geomagnético con una energía comparable a la térmica. Pues bien, en la naturaleza se han encontrado magnetorreceptores en forma de nanocristales biogénicos de magnetita o greigita, tanto en bacterias como en el fitoplancton, que los utilizan para detectar la dirección «hacia abajo». En las truchas y en las palomas mensajeras también se han localizado nanocristales de magnetita sensibles a los cambios de campos magnéticos, y que podrían ser responsables de la orientación de estos animales. Por ejemplo, en las palomas se sitúan en ciertas áreas a ambos lados del pico [Johnsen, Lohmann 2005, 2008].[89]

[89] Incluso cada gramo de nuestro cerebro alberga unos cinco millones de cristales de biomagnetita de tamaños entre 10 y 100 nm, cuya utilidad no se conoce aún a ciencia cierta, y que tal vez podría tener alguna función biológica, o quizás intervenir en la transducción y almacenamiento de datos que llegan al neocórtex [Kirschvink et al. 1992; Martínez Banaclocha (M.A.), Bókkon, Martínez Banaclocha (H.) 2010].

El tercer mecanismo de magnetorrecepción, basado en reacciones fotoquímicas con intervención de iones radicales apareados y suficientemente rápidas para que el ruido térmico no tenga tiempo de enmascarar los efectos del campo geomagnético, es para nosotros el que presenta mayor interés por depender básica y explícitamente de los principios cuánticos. Hallar reacciones bioquímicas cuyo producto sea suficientemente sensible al pequeño campo geomagnético, y por tanto permitan responder ante su estímulo, no es nada fácil. La llamada «química de espines» ha ofrecido una posible solución, cuya idea puede esquematizarse así [Rodgers, Hore 2008]: 1/ un fotón excita a un par de electrones de una molécula donante del magnetorreceptor llevándolos a un estado, entrelazado, singlete de espín; 2/ esta molécula donante transfiere un electrón de ese par a una molécula aceptadora vecina, sin romperse su correlación con el otro electrón del par; 3/ se forma así un par de iones radicales con sendos electrones, espacialmente separados, que, aunque desapareados en cada radical, siguen sin embargo correlacionados a distancia entre sí en estado singlete; 4/ las interacciones hiperfinas de cada uno de esos dos electrones con los núcleos de sus moléculas provocan la conmutación oscilante singlete/triplete, sin pérdida apreciable de entrelazamiento durante un cierto tiempo; 5/ la presencia del campo magnético terrestre afecta a las poblaciones relativas singlete/triplete, en cuantía dependiente de la inclinación entre la molécula y este campo; 6/ este efecto se traduce en las cantidades registrables de productos finales de la reacción, sensible al espín total del par electrónico, tras la devolución del electrón del aceptador al donante.

La viabilidad de este mecanismo de birradicales para señalar campos magnéticos débiles ha sido demostrada experimentalmente, en laboratorio, con grupos ligados de caratenoide, porfirina y fullereno C_{60} [Maeda et al. 2008].

Se cree que el mecanismo MR3 transduce información sobre el campo magnético al sistema nervioso, actuando como «brújula o compás de inclinación», en el petirrojo europeo (*Erithacus rubecula*), un ave paseriforme, un pajarico parecido al gorrión, rechoncho, y con frente y pechera de color rojo-naranja. A finales de agosto los petirrojos de Europa septentrional migran, de noche, hacia zonas más cálidas como nuestra Península. En 1972 se advirtió que los petirrojos no detectan la dirección norte a través de la polaridad del campo geomagnético, sino interpretando como norte aquella dirección en que el ángulo entre la línea del campo magnético y el vector fuerza

de la gravedad es menor [Wiltschko (R.), Wiltschko (W.) 1972]. En 1978 se sugirió que los petirrojos se orientaban en sus migraciones mediante un sistema del tipo MR3 [Schulten, Swenberg, Weller 1978; Schulten, Windemuth 1986; Ritz, Adem, Schulten 2000]. Desde entonces se han realizado numerosos experimentos con iluminación y campos magnéticos controlados que vienen a apoyar esta propuesta [Wiltschko (R.), Wiltschko (W.) 2002; Zapka et al. 2009]. Se puede así decir que el petirrojo «ve», literalmente, el campo magnético a través de su ojo derecho; fotones de corta longitud de onda (entre el ultravioleta, 370 nm, y el verde, 565 nm), excitan algún fotopigmento especializado en la retina (posiblemente criptocromo), produciendo pares de radicales y las reacciones antes comentadas [Wiltschko et al. 2010; Hill, Ritz 2010; Ritz et al. 2010]. Una disposición ordenada de las moléculas fotorreceptoras daría lugar a productos químicos finales en igual disposición relativa, simulando así, a modo de señal de brújula, una respuesta al campo magnético terrestre.

Se necesita mucha más información experimental para perfilar inequívocamente y detallar el sistema aviar de navegación magnética por el mecanismo MR3. Pero es grande la evidencia acumulada en su favor; parece bastante claro de que se trata de un proceso químico basado en estados entrelazados de pares de espín, y por ende de naturaleza eminentemente cuántica. Un reciente análisis teórico de este modelo en condiciones realistas ha demostrado que el entrelazamiento y coherencia de los espines se mantienen durante más de 0.1 ms, un notable lapso de tiempo si se compara con los 0.08 ms conseguidos en sistemas moleculares en laboratorio, en condiciones especialmente preparadas para conseguir largos tiempos de coherencia [Gauger et al. 2011]. Una muestra más de que la naturaleza consigue en ocasiones vencer el ruido biológico, haciendo posible que los aspectos cuánticos afloren en medios «templados, húmedos y turbulentos».

3.5.4. *Proceso cuántico en el reino verde*

> *Nature has put itself the problem of how to catch in flight light streaming to the Earth and to store the most elusive of all powers in rigid form. The plants take in one form of power, light; and produce another power, chemical difference.* (J.R. Mayer)
>
> *The sun's rays are the ultimate source of almost every motion which takes place on the surface of the earth.* (J. Herschel)
>
> *By blending water and minerals from below with sunlight and CO_2 from above, green plants link the earth to the sky. We tend to believe that plants grow out of the soil, but in fact most of their substance comes from the air.* (F. Capra)
>
> *La luz bajo los árboles, / la luz del alto cielo. / La luz / verde / enramada / que fulgura / en la hoja / y cae como fresca / arena blanca.* (P. Neruda)

Terminada la intensa lluvia de meteoritos «impactores» hará unos 4 Ga, nuestra Tierra pudo por fin sosegarse y ofrecer albergue a la vida. Durante el eón Hádico (4.5-3.8 Ga), su atmósfera, rosácea, fue básicamente anóxica, integrada por gases volcánicos como metano, dióxido de carbono, hidrógeno, vapor de agua y sulfuros; su contenido de oxígeno, liberado por fotolisis UV del vapor de agua, era prácticamente nulo (~ 10^{-14} PAL, PAL = nivel de O_2 en la atmósfera actual, equivalente a un 20.9% en volumen). Luego, a caballo entre finales del eón Arcaico (3.8-2.5 Ga) y comienzos del eón Proterozoico (2.5-0.542 Ga), en el lapso 2.45-2.32 Ga, tuvo lugar la «Gran Oxidación» (*Great Oxidation Event*); rápidamente la atmósfera fue tornándose óxica, pasando de $\leq 10^{-5}$ PAL hasta alcanzar un nivel moderado de oxígeno ($\geq$0.01-0.1 PAL) [Bekker et al. 2004; Buick 2008; Rothschild 2008]. Contribuyó a ello de forma decisiva la fotosíntesis oxigénica, un proceso iniciado primero (2.7-2.6 Ga) con las cianobacterias u oxifotobacterias [Xiong 2006],[90] que dominaron la pro-

[90] Algunos indicios llevan a especular sobre la posibilidad de fotosíntesis oxigénica casi desde los comienzos mismos de la vida (3.8-3.5 Ga) [Buick 2008; Konhauser 2009]. A comienzos del presente año, se han publicado los interesantes resultados del estudio filogenómico, mediante el algoritmo AnGST (*Analyzer of Gene and Species Trees*) especialmente desarrollado al efecto, de 3983 familias principales de genes [David, Alm 2011]; sus historias revelan que en el período que va entre 3.33 Ga y 2.85 Ga hubo un estallido (que los autores bautizan como Expansión Arcaica) en la tasa de aparición de genes *de novo*, nada menos que un 26.8% de los existentes. Además, el análisis de sus metabolitos sugiere que a partir de la Expansión Arcaica la biosfera de este eón presentaba una oxigenación creciente, así como algunos de los componentes genéticos básicos para la actividad fotosintética oxigénica y la respiración basada en el oxígeno.

ducción primaria de la biosfera durante todo el Proterozoico, a las que más tarde se sumarían las algas, y después (0.5-0.4 Ma), en el periodo Ordovicense del eón Fanerozoico (0.542-0. Ga), las plantas.

Gracias a la fotosíntesis oxigénica, una reacción redox que fija el carbono del CO_2 y libera oxígeno, parte de la energía que nos llega del Sol queda almacenada en biomoléculas (azúcares) que nutren a los seres vivos. Alguien ha bautizado a este proceso, con gran tino y sugerente gancho mediático, como «comerse el Sol»; para él los que en alguna manera participamos del festín, es decir, todos, somos irremediablemente «heliófagos» [Morton 2007]. De los 100 PW de energía solar que cada segundo recibe en media la superficie de la Tierra, aproximadamente una milésima parte, esto es, unos 100 TW, mantienen la función fotosintética y convierten anualmente unos 100 Pg de carbono en biomasa [Field et al. 1998].

El proceso fotosintético, desde que la luz es captada hasta que su energía queda almacenada en forma química de forma estable, es sumamente complejo; ha sido ampliamente estudiado, existiendo una ingente literatura científica al respecto. En esencia: 1) Un fotón es absorbido por una molécula de pigmento clorofílico (cromoforo) de las antenas receptoras del sistema fotosintético; esta energía captada excita a un electrón externo de la molécula, produciendo un excitón (par electrón en nivel excitado más agujero vacante que deja ese electrón al abandonar su nivel fundamental); 2) el excitón salta a una molécula vecina, y de esta a otra, etc. hasta llegar al complejo proteínico receptor; 3) los excitones que se van acumulando en estos centros de recepción fuerzan una separación ultrarrápida de carga a través de una membrana, iniciándose con ello una larga cadena de reacciones químicas que abocan en los productos orgánicos finales [van Grondelle, Novoderezhkin 2010].

Durante el último lustro la fotosíntesis ha despertado especial interés en físicos, químicos y biólogos. Gracias a los láseres de femtosegundo se ha podido observar en algunos organismos fotosintetizadores como bacterias o algas, que la transmisión de energía desde las antenas fotorreceptoras hasta los centros de reacción, en que esta energía se transforma en energía química, es un proceso coherente, lo que explica su extraordinaria eficiencia cuántica (>99%): prácticamente toda la energía de cada fotón captado llega íntegra sobre un excitón al centro de transformación química [Blankenship 2002]. Tan breve es el tiempo que tarda el excitón en llegar a su destino que no se disipa energía alguna por el camino. Se trata de la manifestación cuántica no trivial y más rotunda hasta hoy en el mundo biológico, con la que cerraremos este capítulo.

La primera evidencia directa de un comportamiento coherente en estos procesos de recolección de luz la obtuvo el grupo de Graham R. Fleming en 2007,[91] estudiando a una temperatura baja, de 77 K (nitrógeno líquido), el sistema bacterioclorofílico conocido como complejo de Fenna-Matthews-Olson (FMO); es un sistema de proteínas y pigmentos que aparece en las bacterias verdes del azufre (*Chlorobium tepidum*), organismos éstos que realizan fotosíntesis anoxigénica. El complejo FMO es un homotrímero, con monómeros idénticos que contienen cada uno ocho moléculas BChl-*a* (Bacterioclorofila-*a*) en un andamiaje proteínico de unos pocos nanómetros; hace el papel de «cable» para conducir la energía desde la antena receptora de luz hasta el centro de reacción [Engel et al. 2007; Sension 2007; Mohseni et al. 2008].[92] También se detectó coherencia cuántica en el centro de reacción de bacterias púrpuras (*Rhodobacter sphaeroides*) [Lee, Cheng, Fleming 2007].

Mediante espectroscopía nolineal, óptica ultrarrápida y transformada de Fourier 2D, Engel y colaboradores observaron «latidos» de coherencia entre los diversos pigmentos durante casi 600 fs (fracción notable del tiempo de unos pocos picosegundos que dura el proceso de transferencia) en la transferencia de energía, hasta el centro de reacción, de la excitación provocada en los cromoforos del complejo FMO por pulsos muy cortos (~41 fs) de luz láser, centrada en 808 nm, con semianchura, a la mitad del máximo, de 31 nm. En este experimento los excitones no avanzan zigzagueantes saltando incoherentemente de pigmento a pigmento, en acoplo dipolar mutuo, de forma aleatoria clásica. No. Lo hacen de forma más decidida, más eficiente, explorando simultáneamente *à la cuántica* varias vías alternativas para elegir la mejor, la más rápida. En un principio se pensó que en esta búsqueda la naturaleza podía echar mano del algoritmo cuántico de Grover [Engel et al. 2007]. Pronto se vio que con este algoritmo la eficiencia no podía llegar a ser la observada, y que esta podía conseguirse, sin embargo, invocando el paseo cuántico aleatorio [Mohseni

[91] Con anterioridad se habian encontrado señales indirectas de oscilaciones cuánticas electrónicas en algunos complejos fotosintéticos [Savikhin, Buck, Struve 1997].

[92] En los trabajos a que acabamos de citar se creía que las subunidades monoméricas del FMO contenían solo siete moléculas BChl-*a*. Posteriormente, se ha probado experimentalmente la existencia de una octava molécula BChl-*a* que hace de enlace del complejo con el cromoplasto/placa-base [Tronrud et al. 2009; Schmidt amBusch et al. 2011].

et al. 2008]; sorprendentemente, la interacción del fotosistema FMO con el entorno ruidoso e incoherente potencia de modo muy significativo, en este análisis teórico, la transferencia coherente de energía, impidiendo, por ejemplo, que se produzca su localización Anderson por desajustes entre las energías de los distintos cromoforos. En este modelo de transferencia de energía en entornos multicromofóricos basado en el paseo cuántico aleatorio asistido por el medio ambiente, este último es responsable de aproximadamente un 80% de la eficiencia, siéndolo en torno al 10% la dinámica coherente [Rebentrost, Mohseni, Aspuru-Guzik 2009a]. Trabajos teóricos y experimentales posteriores han mostrado que incluso a temperatura ambiente (300 K, 277 K) se mantiene durante unos (350 fs, 300 fs) la coherencia observada en el complejo FMO [Ishizaki, Fleming 2009; Panitchayangkoon et al. 2010].

Para explicar en el marco cuántico las extraordinarias eficiencias observadas en los sistemas fotosintéticos, existen otros enfoques teóricos basados en la asistencia de ruido desfasador, auxilio éste que si bien en principio perjudica la coherencia, puede sin embargo potenciar el transporte de energía [Rebentrost et al. 2009b; Plenio, Huelga 2008]. Nuevos desarrollos han puesto explícitamente de manifiesto que con un ajuste conveniente del nivel de ruido desfasador se logran espectaculares mejoras, pero estas no van acompañadas de un entrelazamiento maximal ni duradero [Chin et al. 2010; Caruso et al. 2009, 2010].

Finalmente, el grupo de Gregory D. Scholes publicó el año pasado importantes resultados experimentales, obtenidos mediante 2DPE (espectroscopía 2D de eco de fotones), que registran la coherencia cuántica durante más de 400 fs en la transferencia de energía en la fotosíntesis por dos tipos distintos de algas criptofitas marinas a una temperatura ambiente de 294 K [Collini et al. 2010; van Grondelle, Novoderezhkin 2010; Scholes 2010a]. Parece, por tanto, claro que la Naturaleza se nos adelantó en casi dos mil millones de años al menos en aplicar la física cuántica, usándola *in vivo* en uno de los procesos biológicos más importantes.

Este campo de investigación sigue en plena ebullición. Era lógico preguntarse si ese rasgo tan singular y característico de la mecánica cuántica, como es el entrelazamiento, se da también en estos escenarios fotosintéticos naturales. Con un adecuado modelo dinámico para el complejo FMO, realista, y no markoviano ni perturbativo, se ha conseguido probar numéricamente la presencia de entrelazamiento

multipartito entre los distintos cromoforos (con separaciones medias de 1.5 nm) de cada monómero durante tiempos de 5 ps a 77 K (2 ps a 300 K) [Sarovar et al. 2010]. Se están desarrollando técnicas que permitan medir los elementos de matriz del operador densidad en este complejo y así poder extraer experimentalmente información sobre tal entrelazamiento. Como el entrelazamiento subyace gran parte de los algoritmos cuánticos de computación, su presencia en la fotosíntesis ha llevado a referirse a los organismos que producen esta como «computadores cuánticos verdes» [Scholes 2010b]. Posiblemente sea exagerado, pues una cuestión importante y que sigue totalmente abierta en este campo de la fotosíntesis es saber si la Naturaleza hace uso de la física cuántica para menesteres otros que una eficiente transferencia de energía, digamos, por ejemplo, para teleportar información, como su autor certeramente advierte.

4. A MODO DE EPÍLOGO

Le moyen d'ennuyer est de vouloir tout dire. (Voltaire)

Lo cierto es que una abstracta incertidumbre
sale de cada caos que regresa
cada vez a ser orden,
y qué curioso, todo
comienza con palabras,
nuevas palabras que se sientan solas
a la mesa, sin previa invitación,
...
hasta que son, hasta que comienza
otra vez el comienzo por el verbo. (P. Neruda)

Ninguna ciencia, en cuanto a ciencia, engaña; el engaño está en quien no sabe. (M. de Cervantes)

Hora va siendo de concluir. Me siento afortunado por haber disfrutado de un doble privilegio: primero, la libertad de elección de mi discurso, y luego, la atención de una audiencia singular. Desearía no haber errado mucho al ejercer aquella, ni quisiera de la última haber abusado en demasía. Tal vez encuentren este discurso excesivamente largo; mas, y permítanme parafrasear a Blaise Pascal, no he tenido tiempo de hacerlo más corto.

Cien años de progreso científico al mayor ritmo que registra la historia nos han acercado al génesis, nos han mostrado nuevas entrañas de la materia, y nos han hecho vislumbrar el final de las cosas. Al menos eso es lo que ingenuamente nos creemos; como antes lo hicieran otros basados en sus propios conocimientos. De la historia de la ciencia hemos aprendido que muchas de nuestras verdades científicas de hoy devendrán mitos en el futuro, como lo son para nosotros los viejos sistemas del mundo que nos legaron babilonios, griegos y pensadores hasta comienzos del pasado siglo.

Sí, es cierto que hemos visto los átomos, que hemos sabido liberar la energía de los núcleos, que hemos pisado la Luna, que nuestras sondas han explorado el Sistema Solar, que nuestros telescopios han avistado las primeras galaxias allá donde parece que el espacio acaba y el tiempo comienza, que hemos hecho de la Tierra una aldea global,... pero, a pesar de todo ello, no es menos cierto que lo desconocemos casi todo. Las fronteras de la ignorancia colectiva han crecido, paradójicamente, con el saber; de cada respuesta hallada han emanado muchos interrogantes nuevos, y el mar de lo ignoto se extiende ante nosotros aún más imponente.

Hemos dedicado una buena parte del discurso propiamente académico a repasar los éxitos y algunos claroscuros de la física de los cuantos, esa parte de la filosofía natural que ha protagonizado la mayor conmoción conceptual habida en toda la historia de la actividad científica, y sin la que la tecnología actual sería inconcebible. Mi intención ha sido el hacerlo de modo asequible, huyendo de tecnicismos y de enrevesadas fórmulas matemáticas. No porque me disgusten éstas, entre las que siempre he nadado, y a las que tengo, por su inigualada capacidad de compresión, esto es, por su alto valor sintético, como el vehículo más poderoso y preciso de la comunicación científica; pero la ciencia es creación de unos seres sentientes que se afanan, sueñan, sufren con melancolía sus muchas épocas de sequía y disfrutan en las menos de creación, unos seres que recurren indefectiblemente a las palabras cuando necesitan transmitir su particular fascinación por la ciencia.

Tras ese paseo por el extraño mundo de los quanta, me he atrevido a abordar aquí las posibles conexiones de esta espléndida física de la materia con el complejo fenómeno de la vida. No lo hubiera hecho de no ser porque, como he expuesto anteriormente, hay indicios razonables para barruntar que en algunos de sus mecanismos o procesos la Naturaleza viva ha recurrido al uso de los principios cuánticos. Estos hallazgos han supuesto una sacudida para la comunidad física, confiada en su creencia intuitiva de que los medios biológicos, por razones de su temperatura y falta de aislamiento, conducían a tiempos estimados de descoherencia de fracciones de picosegundo, y por tanto no eran lugares propicios para la cuantidad; hemos aprendido la lección, y sabemos ya que en los sistemas abiertos, fuera del equilibrio, el ruido puede auxiliar a la coherencia cuántica. Quebrada aquella cómoda confianza, estoy seguro de que en los próximos años se encontrarán nuevos casos, e incluso me atreveré a

pronosticar que los biocientíficos, en un plazo no lejano, no diré yo que corran a nuestras facultades a cursar másteres de física cuántica (cosa que ya nos gustaría), pero sí que solicitarán el apoyo puntual de físicos y químicos en cuestiones cuánticas.

De un tiempo a esta parte, algunos autores [Davies 2004, 2005, 2008b, 2009; Lloyd 2009], llevados por su optimismo ante las señales cuánticas en algunos procesos biológicos que ya hemos discutido, han revitalizado las especulaciones de Bohr y Schrödinger sobre una posible conexión entre la mecánica cuántica y el fenómeno de la vida, sugiriendo la presencia de vínculos muy estrechos entre las dos teorías científicas de mayor trascendencia en los últimos cien años: la teoría cuántica, y la teoría de la evolución mediante selección natural de la variación genética.

Para Lloyd, por ejemplo, la mecánica cuántica, a través de su discretidad, hace digital a la Naturaleza, una circunstancia que esta aprovecha para construir la base genética de la vida. Por sus principios y por su carácter digital asegura la estabilidad de la materia y la numerabilidad de sus estructuras; garantiza la enormidad del número de estados o configuraciones genéticas posibles del genoma humano (número que, teniendo en cuenta que el genoma contiene unos 6 Gb informativos, podemos estimar en $2^{6\times10^9}$), y con ello potencia la selección natural; permite la codificación en el ADN, a nivel atómico, de todas las instrucciones detalladas para la síntesis de proteínas; y finalmente, con su aleatoriedad, ofrece a la vida la fuente de variación que necesita para su evolución. En justa correspondencia, y puestos a rizar el rizo, cabría especular en la posibilidad de que las leyes de la física sean ellas mismas fruto de un proceso de selección natural dentro del multiverso que contemplan algunos modelos inflacionarios, o dentro del «paisaje» de 10^{500} universos posibles que ofrece la teoría de cuerdas.

Davies va más lejos en sus reflexiones. La tesis central de Davies es que la vida, para llegar a ser, no precisa de toda una complicadísima red de reacciones químicas intermedias, sino que surge directamente del mundo atómico gracias a las leyes cuánticas. La vida es, fundamentalmente, este par: replicación con variación, más selección natural. Pero el primer ingrediente no requiere necesariamente concurso material; tal vez baste con que se replique la información.[93] Con esta idea Davies propone un origen de la vida en forma de Q-vida,

[93] El teorema de no-clonación es soslayable en la copia de estados ortogonales.

un replicador cuántico, un procesador capaz de copiar información cuánticamente de forma mucho más rápida (tiempos de femtosegundos) que el copiado material a nivel molecular (tiempos de milisegundos). Además, las fluctuaciones cuánticas favorecerían los errores en el copiado, y el principio de superposición haría que se explorasen simultáneamente, y no secuencialmente, todas las posibles mutaciones para luego seleccionar las más idóneas, a saber, aquellas conducentes también a otra forma de Q-vida, a otro replicador cuántico. No se sabe dónde este «ordenador cuántico», que es lo que sería en particular dicho espécimen de Q-vida, se habría originado; tal vez en ambientes extremadamente fríos, como una mota de polvo interestelar o el interior de un cometa. El paso a la vida con soporte químico habría sido propiciado por la Q-vida al toparse con ambientes como el de la Tierra, nada amistosa para la Q-vida, pero provista de materiales orgánicos. La Q-vida habría transferido su información digital a un sistema molecular, una memoria informativa más robusta aunque mucho más lenta, a un «disco duro» capaz de independizarse en algún momento como ser vivo ordinario.

Estas ideas especulativas y otras similares han suscitado, como era de esperar, notables polémicas, de las que son una significativa muestra los dos debates cuya transcripción está incluida al final del interesante libro QUANTUM ASPECTS OF LIFE [Abbott, Davies, Pati 2008]. Por ahora, reina la confusión natural en torno a temas tan atractivos y difíciles como los concernientes al presunto papel de los quanta en el origen y evolución de la vida, y solo una mayor experimentación y un adecuado desarrollo teórico de la física cuántica en entornos complejos, como los medios biológicos, podrán guiarnos en esta ilusionante aventura, tan rebosante de preguntas como escasa aún de respuestas.

He dicho.

5. BIBLIOGRAFÍA

— S. AARONSON, 2005: *NP-complete problems and physical reality,* ACM SIGACT News **36**(1), March, 30-52, quant-ph/0502072.

— S. AARONSON, 2008: *The Limits of Quantum Computers,* Scientific American **298**, March, 62-69.

— D. ABBOTT, P.C.W. DAVIES, A.K. PATI (Eds.), 2008: QUANTUM ASPECTS OF LIFE, prólogo de R. Penrose, Imperial College Press, London.

— D.S. ABRAMS, S. LLOYD, 1998: *Nonlinear quantum mechanics implies polynomial-time solution for NP-complete and #P problems,* Phys. Rev. Lett. **81**, 3992-3995, quant-ph/9801041.

— S.S. AFSHAR, E. FLORES, K.F. MCDONALD, E. KNOESEL, 2007: *Paradox in wave-particle duality,* Found. Phys. **37**, 295-305.

— A. AGUIRRE, M. TEGMARK, 2010: *Born in an Infinite Universe: a Cosmological Interpretation of Quantum Mechanics,* arXiv:1008.1066v1 [quant-ph].

— Y. AHARONOV, L. DAVIDOVICH, N. ZAGURY, 1993: *Quantum random walks,* Phys. Rev. A **48**(2), 1687-1690.

— R. AHUJA, A. BLOMQVIST, P. LARSSON, P. PYYKKÖ, P. ZALESKI-EJGIERD, 2011: *Relativity and the Lead-Acid Battery,* Phys. Rev. Lett. **106**, 018301.

— A. AMBAINIS, 2003: *Quantum walks and their algorithmic applications,* International Journal of Quantum Information **1**, 507–518.

— A. AMBAINIS, E. BACH, A. NAYAK, A. VISHWANATH, J. WATROUS 2001: *One-Dimensional Quantum Walks,* en Proc. 33rd ACM Ann. Symp. Theory Computing (ACM Press), 37-49.

— J.E. AMOORÉ, 1963: *Stereochemical theory of olfaction,* Nature **198**, 271-272.

— C.D. ANDERSON, 1932: *Apparent Existence of Easily Deflectable Positives,* Science **76**, 238-239.

— C.D. ANDERSON, 1933: *The Positive Electron,* Phys. Rev. **43**, 491-494.

— F. ARAGO, 1811: *Sur une modification remarquable qu'éprouvent les rayons lumineux dans leur passage à travers certains corps diaphanes et sur quelques autres nouveaux phénomènes d'optique,* Mémoires de la classe des sciences math. et phys. de l'Institut Impérial de France **1**, 93-134.

— M. ARNDT, M. ASPELMEYER, A. ZEILINGER, 2009: *How to extend quantum experiments*, Fortschr. Phys. **57**, 1153-1162.

— M. ARNDT, T. JUFFMANN, V. VEDRAL, 2009: *Quantum physics meets biology,* HFSP Journal **3**, 386-400.

— M. ARNDT, O. NAIRZ, J. VOS-ANDREAE, C. KELLER, G. VAN DER ZOUW, A. ZEILINGER, 1999: *Wave–particle duality of C_{60} molecules*, Nature **401**, 680-682.

— A. Aspect, 1992: *Bell's Theorem: the naïve view of an experimentalist*, en Quantum [Un]speakables, eds. R.A. Bertlmann, A. Zeilinger, Springer, Berlin-Heidelberg-New York, 119-153.
— A. Aspect, P. Grangier, G. Roger, 1982: *Experimental realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm* Gedankenexperiment*: a new violation of Bell's Inequalities*, Phys. Rev. Lett. **49**, 91-94.
— J. Audretsch, 2007: Entangled Systems, Wiley-VCH, Berlin.
— O.T. Avery, C.M. MacLeod, M. McCarty, 1944: *Studies on the Chemical Nature of the Substance Inducing Transformation of Pneumococcal Types: Induction of Transformation by a Desoxyribonucleic Acid Fraction Isolated from Pneumococcus Type III*, Journal of Experimental Medicine **79**(2), 137-158.
— R. Balian, 1994: *Le temps macroscopique*, Preprint CEA-Saclay T94/009.
— Ph. Ball, 2008: *Physics: Quantum all the way*, Nature **453**, 22-25.
— J.D. Barrow, F.J. Tipler, 1986: The anthropic cosmological principle, Clarendon, Oxford.
— A. Bassi, G.C. Ghirardi, 2007: *The Conway-Kochen Argument and Relativistic GRW Models*, Found. Phys. **37**, 169-185.
— R. Bast, A. Koers, A.S. Pereira Gomes, M. Iliaš, L. Visscher, P. Schwerdtfeger, T. Saue, 2011: *Analysis of parity violation in chiral molecules*, Phys. Chem. Chem. Phys., **13**, 864-876.
— A. Bekker, H.D. Holland, P.-L. Wang, D. Rumble, III, H.J. Stein, J.L. Hannah, L.L. Coetzee, N.J. Beukes, 2004: *Dating the rise of atmospheric oxygen*, Nature **427**, 117-120.
— J.S. Bell, 1964: *On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox*, Physics **1**, 195-200.
— J.S. Bell, 1966: *On the problem of hidden variables in quantum mechanics*, Rev. Mod. Phys. **38**, 447–452.
— J.S. Bell, 1987: Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics, Cambridge University Press, Cambridge UK, revised edition.
— P.A. Benioff, 1982: *Quantum mechanical hamiltonian models of Turing machines*, Journal of Statistical Physics **29**, 515-546.
— S.A. Benner, 2010: *Defining Life*, Astrobiology **10**(10), 1021-1030.
— C.H. Bennett, E. Bernstein, G. Brassard, U. Vazirani, 1997: *Strengths and Weaknesses of Quantum Computing*, SIAM Journal on Computing, **26**, 1510-1523.
— E. Bernstein, U. Vazirani, 1997: *Quantum complexity theory*, SIAM Journal on Computing, **26**, 1411-1473.
— J.-B. Biot, 1815: *Phénomènes de polarisation successive, observés dans les fluides homogènes*, Bulletin de la Société Philomatique de Paris **1**, 190-192.
— D.G. Blackmond, 2007: *«Chiral amnesia» as a driving force for solid-phase homochirality*, Chemistry **13**(12), 3290-5.
— D.G. Blackmond, 2010: *The Origin of Biological Homochirality*, Cold Spring Harb. Perspect. Biol. **2**, a002147.
— D.G. Blackmond, C.R. McMillan, S. Ramdeehul, A. Schorm, J.M. Brown, 2001: *Origins of asymmetric amplification in autocatalytic alkylzinc additions*, J. Am. Chem. Soc. **123**, 10103-10104.
— R. E. Blankenship, 2002: Molecular Mechanism of Photosynthesis, Blackwell Science, Oxford.
— D. Bohm, 1951: Quantum Theory, Prentice Hall, New York.
— D. Bohm, 1952: *A suggested interpretation of the quantum theory in terms of «hidden» variables, I, II*, Phys. Rev. **85**, 166-179, 180-193.

— N. Bohr, 1913: *On the constitution of atoms and molecules*, Philosophical Magazine **26**, 1-25, 476-502, 857-875.
— N. Bohr, 1928: *The quantum postulate and the recent development of atomic theory*, Naturwissenschaften **16**, 245-247.
— N. Bohr, 1933: *Light and Life*, Nature **131**, 421-423, 457-459.
— N. Bohr, 1934: Atomic theory and the description of nature, Cambridge Univ. Press, Cambridge UK.
— N. Bohr, 1935: *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?* Phys. Rev. **48**, 696-702.
— N. Bohr, 1985: Collected Works, ed. J. Kalchar, North-Holland, Amsterdam.
— M. Born, 1926: *Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge*, Zeitschrift für Physik **37**, 863-867; **38**, 803–827.
— M. Born, 1928: Palabras a un grupo de visitantes de la Universidad de Gotinga.
— M. Born, 1961: *Erwin Schrödinger*, Physikalischer Blätter **17**, 85-86.
— R. Bousso, 2002: *The holographic principle*, Rev. Mod. Phys. **74**, 825-874.
— A. Bouvier, M. Wadhwa, 2010: *The age of the Solar System redefined by the oldest Pb–Pb age of a meteoritic inclusion*, Nature Geoscience **3**, 637-641.
— V. B. Braginsky, Y. I. Vorontsov, 1975: *Quantum-mechanical limitations in macroscopic experiments and modern experimental technique*, Sov. Phys. Usp. **17**, 644-650.
— V. B. Braginsky, Y. I. Vorontsov, K.S. Thorne, 1980: *Quantum Nondemolition Measurements*, Science **209**, 54-557.
— S.L. Braunstein, C.M. Caves, R. Jozsa, N. Linden, S. Popescu, R. Schack, 1999: *Separability of Very Noisy Mixed States and Implications for NMR Quantum Computing*, Phys. Rev. Lett. **83**, 1054-1057.
— H.J. Briegel, S. Popescu, 2009: *Entanglement and intra-molecular cooling in biological systems? – A quantum thermodynamic perspective*, arXiv:0806.4552v2 [quantum-ph].
— L. Brillouin, 1953: *Negentropy Principle of Information*, J. of Applied Physics **24**, 1152-1163.
— J.C. Brookes, 2010: *Science is perception: what can our sense of smell tell us about ourselves and the world around us?*, Phil. Trans. R. Soc. A **368**, 3491-3502.
— J.C. Brookes, F. Hartoutsiou, A.P.Horsfield, A.M. Stoneham, 2007: *Could Humans Recognize Odor by Phonon Assisted Tunneling?*, Phys. Rev. Lett. **98**, 038101.
— J.C. Brookes, A.P. Horsfield, A.M. Stoneham, 2009: *Odour character differences for enantiomers correlate with molecular flexibility*, J. R. Soc. Interface **6**, 75-86.
— M.A. Broome, A. Fedrizzi, B.P. Lanyon, I. Kassal, A. Aspuru-Guzik, A. G. White, 2010: *Discrete Single-Photon Quantum Walks with Tunable Decoherence*, Phys. Rev. Lett. **104**, 153602.
— Č. Brukner, V. Vedral, A. Zeilinger, 2006: *Crucial role of quantum entanglement in bulk properties of solids*, Phys. Rev. A **73,** 012110.
— M. Brune, E. Hagley, J. Dreyer, X. Maître, A. Maali, C. Wunderlich, J.M. Raimond, S. Haroche, 1996: *Observing the Progressive Decoherence of the «Meter» in a Quantum Measurement*, Phys. Rev. Lett. **77**, 4887-4890.
— L. Buck, R. Axel, 1991: *A novel multigene family may encode odorant receptors: a molecular basis for odor recognition*, Cell **65**,175-187.

— R. Buick, 2008: *When did oxygenic photosynthesis evolve?*, Phil. Trans. R. Soc. B **363**, 2731-2743.
— C Burr, 2003: The Emperor of Scent: A Story of Perfume, Obsession, and the Last Mystery of the Senses, Random House, New York.
— B. Cabrera: *Contestación al discurso leído en el acto de su recepción por D. Julio Palacios Martínez*, Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 8 de abril de 1932, pp. 65-78.
— J. Cai, S. Popescu, H.J. Briegel, 2010: *Dynamic entanglement in oscillating molecules and potential biological implications*, Phys. Rev. E **82**, 021921.
— S. Carnot, 1824: Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à developper cette puissance, Bachelier, Paris.
— F. Caruso, A.W. Chin, A. Datta, S.F. Huelga, M.B. Plenio, 2009: *Highly efficient energy excitation transfer in light-harvesting complexes: The fundamental role of noise-assisted transport*, J. Chem. Phys. **131**, 105106.
— F. Caruso, A.W. Chin, A. Datta, S.F. Huelga, M.B. Plenio, 2010: *Entanglement and entangling power of the dynamics in light-harvesting complexes*, Phys. Rev. A **81**, 062346.
— A.R. Cashmore, 2010: *The Lucretian swerve: The biological basis of human behavior and the criminal justice system*, Proc. Natl. Acad. Sci. USA **107**(10), 4499-4504.
— C.M. Caves, K.S. Thorne, R.W.P. Drewer, V.D. Sandberg, M. Zimmerman, 1980: *On the Measurement of a Weak Classical Force Coupled to a Quantum-Mechanical Oscillator. 1. Issues of Principle*, Rev. Mod. Phys. **52**, 341-392.
— A.W. Chin, A. Datta, F. Caruso, S.F. Huelga, M.B. Plenio, 2010: *Noise-assisted energy transfer in quantum networks and light-harvesting complexes*, New J. Phys. **12**, 065002. ArXiv:0910.4153v2 [quant-ph].
— R.J.E. Clausius, 1850: *Über die bewegende Kraft der Wärme, und die gesetze, welche sich daraus für die Wärmelehre Selbst ableiten lassen*, Annalen der Physik **89**, 368, 500.
— R.J.E. Clausius, 1865: *Über verschiedene für die Anwendung bequeme formen der Hauptgleichungen der mechanischen Wärmetheorie*, Annalen der Physik **125**, 390.
— R.J.E. Clausius, 1868: *On the Second Fundamental Theorem on the Mechanical Theory of Heat*, Philosophical Magazine, **35**, 405-419.
— R.J.E. Clausius, 1879: Die mechanische Wärmetheorie, I, II, Vieweg, Braunschweig.
— D.B. Cline (Ed.), 1995: *Physical Origin of Homochirality in Life* (AIP Conference Proceedings 379), AIP Press, New York.
— E. Collini, C.Y. Wong, K.E. Wilk, P.M.G. Curmi, P. Brumer, G.D. Scholes, 2010: *Coherently wired light-harvesting in photosynthetic marine algae at ambient temperature*, Nature **463**, 644-648.
— A.H. Compton, 1923: *A Quantum Theory of the Scattering of X-Rays by Light Elements*, Phys. Rev. **21**, 483-502.
— J.H. Conway, S. Kochen, 2006: *The Free Will Theorem*, Found. Phys. **36**, 1441-1473.
— J.H. Conway, S. Kochen, 2007: *Reply to Comments of Bassi, Ghirardi, and Tumulka on the free will theorem*, Found. Phys. **37**, 1643-1647.
— J.H. Conway, S. Kochen, 2009: *The Strong Free Will Theorem*, Notices of the A.M.S. **56**, 226-232.

— D.A. Cowan, 2004: *The upper temperature for life – where do we draw the line?*, Trends in Microbiology **12** (2), 58-60.
— A.D. Cronin, J. Schmiedmayer, D.E. Pritchard, 2009: *Optics and interferometry with atoms and molecules*, Rev. Mod. Phys. **81**, 1051-1129.
— M. Čubrović, J. Zaanen, K. Schalm, 2009: *String Theory, Quantum Phase Transitions, and the Emergent Fermi Liquid*, Science **325**, 439-444.
— P. Curie, 1894: *Sur la symétrie dans les phénomenes physiques, symétrie d'un champ électrique et d'un champ magnétique*, Journal de Physique, 3e série, tome III, 393-415.
— T.W. Dahl, D.J. Stevenson, 2010: *Turbulent mixing of metal and silicate during planet accretion — And interpretation of the Hf-W chronometer*, Earth and Planetary Science Letters **295** (1-2), 177.
— B. Darquié, C. Stoeffler, A. Shelkovnikov, C. Daussy, A. Amy-Klein, C. Chardonnet, S. Zrig, L. Guy, J. Crassous, P. Soulard, P. Asselin, T.R. Huet, P. Schwerdtfeger, R. Bast, T. Saue, 2010: *Progress toward the first observation of parity violation in chiral molecules by high-resolution laser spectroscopy*, Chirality **22** (10), 870-884.
— Ch. Darwin, 1845: On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life, John Murray, London.
— S. Datz, G.W.F. Drake, T.F. Gallagher, H. Kleinpoppen, G. zu Putlitz, 1999: *Atomic Physics*, Rev. Mod. Phys. **71**, S223-S241.
— L.A. David, E.J. Alm, 2011: *Rapid evolutionary innovation during an Archean Genetic Expansion*, Nature **469**, 93-96.
— P.C.W. Davies, 1994: *Stirring up trouble*, en Halliwell *et al.* pp. 119-130.
— P.C.W. Davies, 2004: *Does quantum mechanics play a non-trivial role in life?*, BioSystems **78**, 69-79 .
— P.C.W. Davies, 2005: *A quantum recipe for life*, Nature **437**, 819.
— P.C.W. Davies, 2008a: *Preface*, en Abbott *et al.* pp. xiii-xv.
— P.C.W. Davies, 2008b: *A Quantum Origin of Life?*, en Abbott *et al.* pp. 3-18.
— P.C.W. Davies, 2009: *The quantum life*, Physics World, July, 24-28.
— P.C.W. Davies, J. Gribbin, 1992: The matter myth, Touchstone, Simon & Schuster, New York.
— C. Davisson, L.H. Germer, 1927: *Diffraction of electrons by a crystal of nickel*, Phys. Rev. **30**, 705-740.
— L. de Broglie, 1923: *Waves and quanta*, Nature **112**, 540.
— L. de Broglie, 1924: *Recherches sur la théorie des quanta*, Tesis doctoral. Reimpresa en: Annales de la Fondation Louis de Broglie **17**, 22-128 (1992).
— L. de Broglie, 1928: *Rapport au V-ème Conseil de Physique Solvay sur la «nouvelle dynamique des quanta»*, pp. 105-132.
— P. Debye, 1912: *Zur Theorie der spezifischen Wärme*, Annalen der Physik **39**, 789-839.
— B. D'Espagnat, 1979: *The Quantum Theory and Reality*, Scientific American **241**, November, 158-181.
— F. De Martini, F. Sciarrino, C. Vitelli, 2008a: *Entanglement Test on a Microscopic-Macroscopic System*, Phys. Rev. Lett. **100**, 253601.
— F. De Martini, F. Sciarrino, C. Vitelli, 2008b: *Entanglement and nonlocality in a Micro-Macroscopic system*, arXiv: 0804.0341 [quant-ph].

— D. Deutsch, 1985: *Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer*, Proceedings of the Royal Society of London; Series A, Mathematical and Physical Sciences **400**, 97-117.
— D. Dieks, 1982: *Communication by EPR devices*, Physics Letters A, **92**(6), 271-272.
— P.A.M. Dirac, 1928a: *The Quantum Theory of the Electron*, Proceedings of the Royal Society A **117**, 610-624.
— P.A.M. Dirac, 1928b: *The Quantum Theory of the Electron. Part II*, Proceedings of the Royal Society A **118**, 351-361.
— P.A.M. Dirac, 1929: *Quantum Mechanics of Many-Electron Systems*, Proceedings of the Royal Society A **123**, 714-733.
— P.A.M. Dirac, 1930: *A Theory of Electrons and Protons*, Proceedings of the Royal Society A **126**, 360-365.
— P.A.M. Dirac, 1931: *Quantised Singularities in the Electromagnetic Field*, Proceedings of the Royal Society A **133**, 60-72.
— P.A.M. Dirac, 1961: *Professor Erwin Schrödinger — Obituary*, Nature **189**, 355-356.
— F.J. Dyson, 1979: *Time without end: Physics and biology in an open universe*, Rev. Mod. Phys. **51**, 447-460.
— F.J. Dyson, 1999: *Origins of Life*, Cambridge Univ. Press, Cambridge UK.
— F.J. Dyson, A. Lenard, 1967: *Stability of matter I*, J. Math. Phys. **8**, 423-434.
— G.M. Dyson, 1938: *The scientific basis of odour*, Chem. Ind. **57**, 647–651.
— M. Duff, 2010: *Black Holes and Qubits*, CERN Courier **50**, 13-15.
— C.A. Eagan, C.H. Lineweaver, 2010: *A larger estimate of the entropy of the Universe*, Astrophysics Journal **710**, 1825-1834.
— A. Eddington, 1928: The nature of the physical world, Cambridge Univ. Press, Cambridge UK (1927 Gifford Lectures, University of Edinburgh.)
— P. Ehrenfest, 1911: *Welche Züge der Lichtquantenhypothese spielen in der Theorie der Wärmestrahlung eine wesentliche Rolle?*, Annalen der Physik **36**, 91-118.
— M. Eigen, 1995: *What will endure of 20th century biology?*, en What is life? The next fifty years, eds. M.P. Murphy, L.A.J. O'Neill, pp. 5-23, Cambridge Univ. Press, Cambridge UK.
— A. Einstein, 1905a: *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*, Annalen der Physik **17**, 132-148.
— A. Einstein, 1905b: *Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen*, Annalen der Physik **17**, 549-560.
— A. Einstein, 1905c: *Zur Elektrodynamik Bewegter Körper*, Annalen der Physik **17**, 891-921.
— A. Einstein, 1906: *Zur Theorie der Lichterzeugung und Lichtabsorption*, Annalen der Physik **20**, 199-206.
— A. Einstein, 1907: *Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerung*, Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik **4**, 411-462.
— A. Einstein, 1915: *Die Feldgleichungen der Gravitation*, Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 844–847.
— A. Einstein, 1936: *Physik und Realität*, Journal of the Franklin Institute **221**(3), 313-347.

— A. Einstein, 1949: *Autobiographisches*, en Albert Einstein: philospher-scientist, ed. P.A. Schilpp, Harper Torchbook, New York.
— A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, 1935: *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?*, Phys. Rev. **47**, 777-780.
— G.S. Engel, T.R. Calhoun, E.L. Read, T.-K. Ahn, T. Mancal, Y.-C. Cheng, R.E. Blankenship, G.R. Fleming, 2007: *Evidence for Wavelike Energy Transfer through Quantum Coherence in Photosynthetic Systems*, Nature **446**, 782-786.
— B.-G. Englert, 1995: *Fringe Visibility and Which-Way Information: An Inequality*, Phys. Rev. Lett. **77**, 2154-2157.
— H. Everett, III, 1957: *'Relative state' formulation of quantum mechanics*, Rev. Mod. Phys. **20**, 454-462.
— R.P. Feynman, 1960: *There's plenty of room at the bottom*, Eng. Sci. **23**(5), 22-36.
— R.P. Feynman, 1982: *Simulating Physics with Computers*, International Journal of Theoretical Physics **21**, 467-488.
— R.P. Feynman, 1987: TV Interview (as quoted from memory by G. Statile in *The Majesty and Misery of String Theory*, 2007).
— R.P. Feynman, A.R. Hibbs, 1965: Quantum Mechanics and Path Integrals, McGraw-Hill, New York.
— R.P. Feynman, R.B. Leighton, M. Sands, 1965: The Feynman Lectures on Physics, Vol. 3, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.
— C.B. Field, M.J. Behrenfeld, J.T. Randerson, P. Falkowski, 1998: *Primary Production of the Biosphere: Integrating Terrestrial and Oceanic Components*, Science **281**, 237-240.
— D. Fitz, H. Reiner, K. Plankensteiner, B. Rode, 2007: *Possible Origins of Biohomochirality*, Curr. Chem. Biol. **1**, 41-52.
— F.C. Frank, 1953: *On spontaneous asymmetric synthesis*, Biochim. Biophys. Acta **11**, 459-463.
— S. J. Freedman, J. F. Clauser, 1972: *Experimental test of local hidden-variable theories*, Phys. Rev. Lett. **28**, 938-941.
— J.R. Friedman, V. Patel, W. Chen, S.K. Tolpygo, J.E. Lukens, 2000: *Quantum superposition of distinct macroscopic states*, Nature **406**, 43-46.
— G. Gabrielse, D. Hanneke, T. Kinoshita, M. Nio, B. Odom, 2006: *New Determination of the Fine Structure Constant from the Electron g Value and QED*, Phys. Rev. Lett. **97**, 030802 (2006), *Erratum*, Phys. Rev. Lett. **99**, 039902 (2007).
— A. Galindo, 1985: *¿Un observable «tiempo»?*. En el libro Algunas cuestiones de física, eds. J. Aporta, D. González, M. Quintanilla, pp. 655-659, Universidad de Zaragoza, Zaragoza.
— A. Galindo, 1994: *Tras el tiempo*. Discurso inaugural del año académico 1994-1995, Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Madrid.
— A. Galindo, 1995: *El tiempo en física*. En el libro El tiempo: tiempo, relatividad y saberes, UPCO, Madrid, pp. 133-198. Actas de la XXI Reunión Interdisciplinar ASINJA. Ed. A. Dou.
— A. Galindo, 2000: *El extraño y prodigioso mundo de los quanta*. En el libro Horizontes culturales – Las Fronteras de la Ciencia 1999, pp. 127-147. Espasa-Calpe, Madrid.

— A. Galindo, 2001: Del bit al qubit. Lección Inaugural de Curso Académico 2001-2002. Memoria de 101 páginas, publicada por la Universidad Complutense.
— A. Galindo, 2003a: *Mirando hacia atrás*, Revista Española de Física, Número especial, **17**, 15-19.
— A. Galindo, 2003b: *Entre el 0 y el 1: El arte de calcular*, Revista de la Real Academia de Ciencias **97**, 359-395.
— A. Galindo, 2005a: *Einstein y el tiempo*. Revista Española de Física, Número especial: «Año Mundial de la Física, 1», **19**, 64-73. Conferencia en San Sebastián, dentro del Congreso «Albert Einstein Annus Mirabilis 2005», organizado por la Fundación DIPC.
— A. Galindo, 2005b: *La nueva Cosmología: Principio y fin del Universo*. Revista de la Real Academia de Ciencias **99**, Número 1, 113-159.
— A. Galindo, 2006: *Einstein y la cosmología*, Revista de la Real Academia de Ciencias **99**, Número 2, 263-274.
— A. Galindo, 2007a: *La cosmología y Einstein*, ARBOR Ciencia, Pensamiento y Cultura, **CLXXXIII**(728), 869-876.
— A. Galindo, 2007b: *El arte de disfrazar la información: de la C a la Q*, Revista de la Real Academia de Ciencias **101**, Número 2, 307-320.
— A. Galindo, 2009: *De gatos, juegos y estadísticas, a la teleportación cuántica*, Revista de la Real Academia de Ciencias **103**, Número 2, 305-322.
— A. Galindo, 2010: Un tiempo para pensar, monografía en preparación.
— A. Galindo, M.A. Martín-Delgado, 2002: *Information and Computation: Classical and Quantum Aspects*, Rev. Mod. Phys. **74**, 347-423.
— A. Galindo, A. Moreno, A. Benedí, P. Varela, 1998: Física 2, McGraw-Hill, Madrid.
— A. Galindo, P. Pascual, 1978: Mecánica Cuántica, Alhambra, Madrid.
— A. Galindo, P. Pascual, 1989a: Mecánica Cuántica I, II, Eudema Universidad, Madrid.
— A. Galindo, P. Pascual, 1989b: Problemas de Mecánica Cuántica, Eudema Universidad, Madrid, pp. 238-239.
— A. Galindo, P. Pascual, 1990: Quantum Mechanics I, Springer Verlag, Berlin.
— A. Galindo, P. Pascual, 1991: Quantum Mechanics II, Springer Verlag, Berlin.
— F. Galve, L.A. Pachón, D. Zueco, 2010: *Bringing Entanglement to the High Temperature Limit*, Phys. Rev. Lett. **105**, 180501.
— G. Gamow, 1928: *Zur Quantentheorie des Atomkernes*, Zeitschrift für Physik **51**, 204-212; *Zur Quantentheorie der Atomzertrümmerung*, Zeitschrift für Physik **52**, 510-515.
— E.M. Gauger, E. Rieper, J.J. L. Morton, S.C. Benjamin, V. Vedral, 2011: *Sustained Quantum Coherence and Entanglement in the Avian Compass*, Phys. Rev. Lett. **106**, 040503.
— C. F. Gauss, 1801: Disquisitiones Aritmeticæ, Lipsiae, in commissis apud Gerh. Fleischer Jun.
— M. Gell-Mann, 1981: *Questions for the Future*, 8th Wolfson Lecture 1980, en J.H. Mulvey (ed.), The Nature of Matter, Clarendon Press, Oxford, 1981, pp. 169-198.
— M. Gell-Mann, 2001: *Consciousness, Reduction, and Emergence. Some Remarks*, Ann. N.Y. Acad. Sci. **929**, 41-49.
— P.-G. des Gennes, 1970: *Sur l'impossibilité des certaines synthèses asymmetriques*, C. R. Acad. Sc. Paris **270**, 891 (1970).

— D.D. Georgiev, 2007: *Single photon experiments and quantum complementarity*, Prog. Phys. **2**, 97-103.
— S. Gerlich, S. Eibenberger, M. Tomandl, S. Nimmrichter, K. Hornberger, P.J. Fagan, J. Tüxen, M. Mayor, M. Arndt, 2011: *Quantum interference of large organic molecules*, Nature Communications **2**, 263 | DOI: 10.1038/ncomms 1263.
— S. Gerlich, M. Gring, H. Ulbricht, K. Hornberger, J. Tüxen, M. Mayor, M. Arndt, 2008: *Matter Wave Metrology as a Complementary Tool for Mass Spectrometry*, Angew. Chem. Int. Ed. **47**, 6195-6198.
— S. Gerlich, L. Hackermüller, K. Hornberger, A. Stibor, H. Ulbricht, M. Gring, F. Goldfarb, T. Savas, M. Müri, M. Mayor, M. Arndt, 2007: *A Kapitza–Dirac–Talbot–Lau interferometer for highly polarizable molecules*, Nature Physics **3**, 711-715.
— G.C. Ghirardi, A. Rimini, T. Weber, 1986: *Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems*, Phys. Rev. D **34**, 470-491.
— V. Giovannetti, S. Lloyd, L. Maccone, 2004: *Quantum-Enhanced Measurements: Beating the Standard Quantum Limit*, Science **306**, 1330-1336.
— N. Gisin, 2010: *The Free Will Theorem, Stochastic Quantum Dynamics and True Becoming in Relativistic Quantum Physics*, arXiv:1002.1392v1 [quant-ph].
— S. Glashow, 2003: NOVA *Viewpoints on String Theory*.
— M. Gleiser, S.I. Walker, 2010: *The Chirality Of Life: From PhaseTransitions To Astrobiology*, en Astronomy and Relativistic Astrophysics. New Phenomena and New States of Matter in the Universe, Proceedings of the Third Workshop (IWARA07), eds. C.A. Vasconcellos, B.E.J. Bodmann, H. Stoecker, M.J. Reboucas, V.B. Bezerra, W. Greiner, World Scientific Publishing Co, pp. 17-30.
— S. Gleyzes, S. Kuhr, C. Guerlin, J. Bernu, S, Deléglise, U. Busk Hoff, M. Brune, J.-M. Raimond, S. Haroche, 2007: *Quantum jumps of light recording the birth and death of a photon in a cavity*, Nature **446**, 297-300.
— S. Goldstein, D.V. Tausk, R. Tumulka, N. Zanghì, 2010: *What Does the Free Will Theorem Actually Prove?*, Notices of the A.M.S. **57**, 1451-1453.
— B. Gracián, 1651: El criticón, Zaragoza.
— B. Greene, 2004: The Fabric of the Cosmos: Space, Time, and the Texture of Reality, Random House.
— R.B. Griffiths, 1984: *Consistent Histories and the Interpretation of Quantum Mechanics*, J. Stat. Phys. **36**, 219-272.
— S. Gröblacher, T. Paterek, R. Kaltenbaek, Č. Brukner, M. Żukowski, M. Aspelmeyer, A. Zeilinger, 2007: *An experimental test of non-local realism*, Nature **446**, 871-875.
— E.P. Gross, 1961: *Structure of a quantized vortex in boson systems*, Il Nuovo Cimento **20**, 454–457.
— E.P. Gross, 1963: *Hydrodynamics of a superfluid condensate*, J. Math. Phys. **4**, 195–207.
— C. Gross, T. Zibold, E. Nicklas, J. Esteve, M.K. Oberthaler, 2010: *Nonlinear atom interferometer surpasses classical precision limit*, Nature **464**, 1165-1169.
— L.K. Grover, 1996: *A fast quantum mechanical algorithm for database search*, in Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on the Theory of Computing (Philadelphia, Pennsylvania), pp. 212-219.

— L.K. Grover, 1997: *Quantum mechanics helps in searching for a needle in a haystack*, Phys. Rev. Lett. **79**, 325-328.
— R.W. Gurney, E.U. Condon, 1928: *Quantum Mechanics and Radioactive Disintegration,* Nature **122**, 439.
— R.W. Gurney, E.U. Condon, 1929: *Quantum Mechanics and Radioactive Disintegration,* Phys. Rev. **33**, 127-140.
— L. Hackermüller, S. Uttenthaler, K. Hornberger, E. Reiger, B. Brezger, A. Zeilinger, M. Arndt, 2003: *Wave Nature of Biomolecules and Fluorofullerenes*, Phys. Rev. Lett. **91**, 090408.
— S. Hagan, S. Hameroff, J.A. Tuszyński, 2002: *Quantum Computation in Brain Microtubules? Decoherence* and *Biological Feasibility*, Phys. Rev. E **65**, 061901.
— J.B.S. Haldane, 1929: *The origin of life*, Rationalist Annual **3**, 3-10.
— J.B.S. Haldane, 1947: *What is life?*, Boni and Gaer, New York.
— J.J. Halliwell, 1994: *Quantum cosmology and time asymmetry*, en Halliwell *et al.* pp. 369-389.
— J.J. Halliwell, J. Pérez-Mercader, W.H. Zurek (eds), 1994: Physical origins of time asymmetry, Proceedings of the NATO Workshop held at Mazagón, Spain, Sept 30-Oct 4, 1991, Cambridge Univ. Press, Cambridge UK.
— S. Hameroff, 2001: *Consciousness, the Brain, and Spacetime Geometry*, Ann. N.Y. Acad. Sci. **929**, 73-104.
— S.W. Hawking, 1979: *Is the end of theoretical physics in sight?* Lucasian lecture.
— S.W. Hawking, R. Laflamme, G.W. Lyons, 1993: *Origin of time asymmetry*, Phys. Rev. D **47**, 5342-5356.
— S.W. Hawking, R. Laflamme, G.W. Lyons, 1994: *The no boundary condition and the arrow of time*, en Halliwell *et al.* pp. 346-357.
— T. Hayashi, A. Stuchebrukhov, 2010*: Electron Tunneling in Respiratory Complex I*, Proc. Natl. Acad. Sci. USA **107**, 19157-19162.
— S. Hecht, S, Shlaer, M. Pirenne, 1942: *Energy, quanta and vision*, J. Gen. Physiol. **25**, 819-840.
— W. Heisenberg, 1927: *Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik*, Zeitschrift für Physik **43**, 172-198.
— W. Heisenberg, 1989: Collected Works, ed. W. Rechenberg, Springer, Berlin.
— W. Heitler, F. London, 1927: *Wechselwirkung neutraler Atome und homoöpolare Bindung nach der Quantenmechanik*, Zeitschrift für Physik **44**, 455-472.
— H. Helmholtz, 1847: Über die Erhaltung der Kraft, Reimer, Berlin.
— H. Helmholtz, 1854: *Über die Wechselwirkung der Naturkräfteund die darauf bezüglichen neuesten Ermittelungen der Physik* (Conferencia pronunciada el 7 de febrero de 1854, en Königsberg). Puede verse bajo el título *On the Interaction of the Natural Forces*, en Science and Culture: Popular and Philosophical Essays, ed. David Cahan, The University of Chicago Press, Chicago 1995, pp. 18-45.
— E.M. Henley, J.P. Schiffer, 1999: *Nuclear physics at the end of the century*, Rev. Mod. Phys. **71**, S205-S219.
— E. Hill, T. Ritz, 2010: *Can disordered radical pair systems provide a basis for a magnetic compass in animals?* J. R. Soc. Interface **7**, S265-S271.

— P. Hohenberg, W. Kohn, 1964: *Inhomogeneous Electron Gas*, Phys. Rev. **136**, B864–B871.
— F. Hund, 1927: *Zur Deutung der Molekelspektren. I; II; III*, Zeitschrift für Physik **40**, 742-764; **42**, 93-120; **43**, 805-826.
— C. Huygens, 1690: Traité de la Lumière, Leyden, chez Pierre Vander.
— B. Ilic, Y. Yang, K. Aubin, R. Reichenbach, S. Krylov, H.G. Craighead, 2005: *Enumeration of DNA Molecules Bound to a Nanomechanical Oscillator*, Nano Letters **5**, 925-929.
— A. Ishizaki, G. R. Fleming, 2009: *Theoretical Examination of Quantum Coherence in a Photosynthetic System at Physiological Temperature*, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. **106**, 17255-17260.
— S. Jaakkola, V. Sharma, A. Annila, 2008: *Cause of chirality consensus*, Curr. Chem. Biol. **2**, 53-58
— V. Jacques, N.D. Lai, A. Dréau, D. Zheng, D. Chauvat, F. Treussart, P. Grangier, J.-F. Roch, 2008: *Illustration of quantum complementarity using single photons interfering on a grating*, New J. Phys. **10**, 123009.
— M.T. Jaeckel, B. Lamine, A. Lambrecht, S. Reynaud, P. Maía Neto, 2008: *Quantum decoherence and gravitational waves*, en Beyond the Quantum, Proceedings Leiden 2006, eds. Th.M. Nieuwenhuizen *et al.*, World Scientific, Singapore (2007) 125-134; arXiv: 0806.2541v1 [gr-qc].
— M. Jammer, 1966: The Conceptual Development of Quantum Mechanics, McGraw-Hill, New York.
— S. Johnsen, K.J. Lohmann, 2005: *The physics and neurobiology of magnetoreception*, Nature Reviews Neuroscience **6**, 703-712.
— S. Johnsen, K.J. Lohmann, 2008: *Magnetoreception in animals*, Physics Today **61**, March, 29-35.
— C. Jönsson, 1961: *Elektroneninterferenzen an mehreren künstlich hergestellten Feinspalten*, Zeitschrift für Physik **161**, 454-474.
— J.P. Joule, 1845: *On the existence of an equivalent relation between heat and the ordinary forms of mechanical power*, Phil. Mag. **27**, 205-207.
— G.F. Joyce, 1994: Prólogo, en Origins of Life: The Central Concepts, eds. D.W. Deamer, G. Fleischaker, Johnes and Bartlett, Boston.
— R. Jozsa, N. Linden 2003: *On the role of entanglement in quantum computational speed-up*, Proc. R. Soc. Lond. A **459**, 2011-2032.
— T. Juffmann, S. Nimmrichter, M. Arndt, H. Gleiter, K. Hornberger, 2010: *New prospects for de Broglie interferometry. Grating diffraction in the far-field and Poisson's spot in the near-field*, Found. Phys. DOI 10.1007/s10701-010-9520-5.
— M. Karski, L. Förster, J-M. Choi, A. Steffen, W. Alt, D. Meschede, A. Widera, 2009: *Quantum Walk in Position Space with Single Optically Trapped Atoms*, Science **325**, 174-177.
— M. Kaufmann, 2009: *On the Free Energy That Drove Primordial Anabolism*, Int. J. Mol. Sci. **10**, 1853-1871.
— A. Keller, L.B. Vosshall, 2004: *A psychophysical test of the vibration theory of olfaction*, Nat. Neurosci. **7**, 337-338.
— D.S. Kelley *et al.*, 2001: *An off-axis hydrothermal vent field near the Mid–Atlantic Ridge at 30° N*, Nature **412**, 145-149.
— D.S. Kelley *et al.*, 2005: *A serpentinite-hosted ecosystem: the Lost City hydrothermal field*, Science **307**, 1428-1434.

— J. Kempe, 2003: *Quantum random walks – an introductory overview*, Contemporary Physics **44**, 307-327.
— J. Kepler, 1601: De fundamentis astrologiae certioribus. In Joannis Keplери astronomi Opera Omnia, Vol. I. Editit Christian Frisch. Frankofurti a.M.–Erlangae, Heyder & Zimmer 1858-1871.
— J.L. Kirschvink, A. Kobayashi-Kirschvink, J.C. Diaz-Ricci, S.J. Kirschvink, 1992: *Magnetite in human tissues: a mechanism for the biological effects of weak ELF magnetic fields*, Bioelectromagnetics **1**, 101-113.
— M. Klussmann,H. Iwamura, S.P. Mathew, D.H. Wells, Jr, U. Pandya, A. Armstrong, D.G. Blackmond, 2006: *Thermodynamic control of asymmetric amplification in amino acid catalysis*, Nature **441**, 621-623.
— D.E. Knuth, 1996: Selected papers on computer science, CSLI Lecture Notes **49**, CSLI Publications and Cambridge Univ. Press, Cambridge UK.
— C. Koch, K. Hepp, 2006: *Quantum mechanics in the brain*, Nature **440**, 611-612.
— W. Kohn, 1999a: *Nobel Lecture: Electronic structure of matter-wave functions and density functionals*, Rev. Mod. Phys. **71**, 1253-1266.
— W. Kohn, 1999b: *An essay on condensed matter physics in the twentieth century*, Rev. Mod. Phys. **71**, S59-S77.
— W. Kohn, L.J. Sham, 1965: *Self-Consistent Equations including Exchange and Correlation Effects*, Phys. Rev. **140**, A1133-1138.
— E.W. Kolb, M.S. Turner, 1990: The early universe, Addison-Wesley, New York.
— K. Konhauser, 2009: *Deepening the early oxygen debate*, Nature Geophysics **2**, 241-242.
— G. Kopp, J.L. Lean, 2011: *A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance*, Geophysical Research Letters **38**, L01706.
— D.E. Koshland, 2002: *The Seven Pillars of Life*, Science **295**, 2215-2216.
— L.M. Krauss, G.D. Starkman, 2000: *Life, the Universe, and Nothing: Life and Death in an Ever-expanding Universe*, The Astrophysical Journal **531**, 22-30.
— P. Laín, 1970: *Intervención de D. Pedro Laín Entralgo* en «Solemne Sesión Necrológica en memoria del Excmo. Sr. D. Julio Palacios Martínez, Presidente de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, celebrada por las Reales Academias Española, de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales y Nacional de Medicina, el día 13 de mayo de 1970», pp. 681-689. Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Tomo LXIV, 649-690.
— B. Lamine, R. Hervé, A. Lambrecht, S. Reynaud, 2006: *Ultimate Decoherence Border for Matter-Wave Interferometry*, Phys. Rev. Lett. **96**, 05405.
— R.W. Landauer, 1991: *Information is physical*, Physics Today **44**, May, 23-29.
— N. Lane, 2009: *The cradle of life*, NewScientist, 17 October 2009, 38-42.
— N. Lane, J.F. Allen, W. Martin, 2010: *How did LUCA make a living? Chemiosmosis in the origin of life*, BioEssays **32**, 271-280.
— B.P. Lanyon, T.J. Weinhold, N.K. Langford, M. Barbieri, D.F.V. James, A. Gilchrist, A.G. White, 2007: *Experimental Demonstration of a Compiled Version of Shor's Algorithm with Quantum Entanglement*, Phys. Rev. Lett. **99**, 250505.
— H. Lee, Y.C. Cheng, G.R. Fleming, 2007: *Coherence dynamics in photosynthesis: protein protection of excitonic coherence*, Science **316**, 1462-1465.

— A.J. Leggett, 2003: *Nonlocal hidden-variable theories and quantum mechanics: an incompatibility theorem*, Found. Phys. **33**, 1469-1493.
— D. Leibfried, E. Knill, S. Seidelin, J. Britton, R.B. Blakestad, J. Chiaverini, D. Hume, W.M. Itano, J.D. Jost, C. Langer, R. Ozeri, R. Reichle, D.J. Wineland, 2005: *Creation of a six atom «Schrödinger cat» state*, Nature **438**, 639-642.
— A. Lenard, F.J. Dyson, 1968: *Stability of matter II*, J. Math. Phys. **9**, 698-711.
— A. Libet, C.A. Gleason, W.W. Wright, D.K. Pearl, 1983: *Time of conscious intention to act in relation to onset of cerebral activity (readiness-potential). The unconscious initiation of a freely voluntary act*, Brain **106**, 623-642.
— D.A. Lidar, I.L. Chuang, K.B. Whaley, 1998: *Decoherence-Free Subspaces for Quantum Computation*, Phys. Rev. Lett. **81**, 2594-2597.
— E.H. Lieb, 1981: *The Uncertainty Principle*, en Encyclopedia of Physics (eds. R. Lerner, G. Trigg), Addison Wesley, 1078-1079.
— E.H. Lieb, R. Seiringer, J.P. Solovej, J. Yngvason, 2002: *The Ground State of the Bose Gas*, en Currrent Developments in Mathematics 2001 (eds. de Jong *et al.*), International Press, 131-178.
— E.H. Lieb, 2003: *The Stability of Matter and Quantum Electrodynamics*, Milan Jour. Math. **71**, 199-217.
— E.H. Lieb, 2008: *Quantum Mechanics, the Stability of Matter and Quantum Electrodynamics*, Contemporary Math. **476**, 133-148 (2008).
— C.H. Lineweaver, C.A.Eagan, 2008: *Life, gravity and the second law of thermodynamics*, Physics of Life Reviews **5**, 225-242.
— S. Lloyd, 2000: *Ultimate physical limits to computation*, Nature **406**, 1047-1054.
— S. Lloyd, 2002: *Computational Capacity of the Universe*, Phys. Rev. Lett. **88**, 237901.
— S. Lloyd, 2005: *Quantum limits to the measurement of spacetime geometry*, arXiv:quant-ph/0505064v1.
— S. Lloyd, 2009: *A quantum of natural selection*, Nature Physics **5**, 164-166.
— A. Louchet-Chauvet, J. Appel, J.J. Renema, D. Oblak, N. Kjærgaard, E.S. Polzik, 2010: *Entanglement-Assisted Atomic Clock beyond the Projection Noise Limit*, New J. Phys. **12**, 065032.
— C-Y. Lu, D.E. Browne, T. Yang, J-W. Pan, 2007: *Demonstration of a Compiled Version of Shor's Quantum Factoring Algorithm Using Photonic Qubits*, Phys. Rev. Lett. **99**, 250504.
— K. Maeda, K.B. Henbest, F. Cintolesi, I. Kuprov, C.T. Rodgers, P.A. Liddell, D.Gust, C.R. Timmel, P.J. Hore, 2008: *Chemical compass model of avian magnetoreception*, Nature **453**, 387-390.
— P.K. Majumder, B.J. Venema, S.K. Lamoreaux, B.R. Heckel, E.N. Fortson, 1990: *Test of the linearity of quantum mechanics in optically pumped ^{201}Hg*, Phys. Rev. Lett. **64**, 2931-2934
— Y.I. Manin, 1980: *Computable and uncomputable* (in Russian). Moscow, Sovetskoye Radio, 1980.
— Y.I. Manin, 1999: *Classical computing, quantum computing, and Shor's factoring algorithm*, Séminaire N. Bourbaki 1998-1999, exp. nº 862, 375-404.
— I. Maor, T.W. Kephart, L.M. Krauss, Y.J. Ng, G.D. Starkman. 2008: *Replacing Anthropy with entropy: Does it work?*, arxiv:hep-th/0812.1015.
— N. Margolus, L.B. Levitin, 1998: *The maximum speed of dynamical evolution*, Physica D **120**, 188-195.

— M.A. Martínez Banaclocha, I. Bókkon, H. Martínez Banaclocha, 2010: *Long-term memory in brain magnetite*, Medical Hypotheses **74**, 254-257.
— D.N. Matsukevich, P. Maunz, D.L. Moehring, S. Olmschenk, C. Monroe, 2008: *Bell inequality violation with two remote atomic qubits*, Phys. Rev. Lett. **100**, 150404.
— A.E. Mattsson, 2002: *In Pursuit of the «Divine» Functional*, Science **298**, 759-760.
— J.C. Maxwell, 1871: Introductory lecture given at Cambridge University.
— J.C. Maxwell, 1873: Treatise on Electricity and Magnetism, Clarendon Press, Oxford.
— J.R. Mayer, 1842: *Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur*, Ann. Chemie und Pharmacie **42**, 233-240.
— P.G. Merli, G.F. Missiroli, G Pozzi, 1974: *Electron interferometry with the Elmiskop 101 electron microscope*, J. Phys. E: Sci. Instrum. **7**, 729-732.
— N.D. Mermin, 1985: *Is the moon there when nobody looks? Reality and the quantum theory*, Physics Today **38**, April, 38-47.
— E. Merzbacher, 2002: *The Early History of Quantum Tunneling*, Physics Today **50**, August, 44-50.
— A.A. Michelson, 1894: Dedication of Ryerson Physics Lab, University of Chicago, Chicago, IL.
— S.L. Miller, 1953: *Production of Amino Acids Under Possible Primitive Earth Conditions*, Science **117**, 528-529.
— P.D. Mitchell, 1961: *Coupling of phosphorylation to electron and hydrogen transfer by a chemi-osmotic type of mechanism*, Nature **191**, 144-148.
— M. Mohseni, P. Rebentrost, S. Lloyd, A. Aspuru-Guzik, 2008: *Environment-Assisted Quantum Walks in Photosynthetic Energy Transfer*, J. Chem. Phys. **129**, 174106.
— R.W. Moncrieff, 1949: *What is odour? A new theory*, American Perfumery and Essential Oil Review **54**, 453-454.
— C. Monroe, D. M. Meekhof, B. E. King, D. J. Wineland, 1996: *A «Schrödinger Cat» Superposition State of an Atom*,Science **272**, 1131-1136.
— T. Monz, P. Schindler, J.T. Barreiro, M. Chwalla, D, Nigg, W.A. Coish, M. Harlander, W. Hänsel, M. Hennrich, R. Blatt, 2011: *14-Qubit Entanglement: Creation and Coherence*, Phys. Rev. Lett. **106**, 130506.
— G.E. Moore, 1965: *Cramming more components onto integrated circuits*, Electronics **38**(8), April 19.
— K. Mori, G.M. Shepherd, 1994: *Emerging principles of molecular signal processing by mitral/tufted cells in the olfactory bulb*, Semin. Cell. Biol. **5**, 65-74.
— O. Morton, 2007: *Eating the Sun: How Plants Power the Planet*, Fourth Estate Ltd.
— P. Neumann, J. Beck, M. Steiner, F. Rempp, H. Fedder, P.R. Hemmer, J. Wrachtrup, F. Jelezko, 2010: *Single-Shot Readout of a Single Nuclear Spin*, Science **329**, 542-544.
— I. Newton, 1675: *Hypothesis of Light*, Royal Society.
— I. Newton, 1704: Opticks: Or a Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light. Also Two Treatises of the Species and Magnitude of Curvilinear Figures, London, for Sam Smith, and Benj. Walford.
— L. Nordheim, 1928: *Zur Theorie der thermischen Emission und der Reflexion von Elektronen an Metallen*, Zeits. f. Physik **46**, 833-855.

— A.D. O'Connell, M. Hofheinz, M. Ansmann, R.C. Bialczak, M. Lenander, E. Lucero, M. Neeley, D. Sank, H. Wang, M. Weides, J. Wenner, J.M. Martinis, A.N. Cleland, 2010: *Quantum ground state and single-phonon control of a mechanical resonator*, Nature **464**, 697-703.
— H. Ollivier, D. Poulin, W.H. Zurek, 2004: *Objective Properties from Subjective Quantum States: Environment as a Witness*, Phys. Rev. Lett. **93**, 220401.
— A.I. Oparin, 1924: The Origin of Life, Moscow Worker Publisher (in Russian).
— A. Ourjoumtsev, H. Jeong, R. Tualle-Brouri, Ph. Grangier, 2007: *Generation of optical «Schrödinger cats» from photon number states*, Nature **448**, 784-786.
— A. Pais, 1982: Subtle is the Lord — The Science and the Life of Albert Einstein, Clarendon Press, Oxford, and Oxford University Press, New York.
— J. Palacios, 1925: *Teoría de la emisión en el modelo atómico de Rutherford-Bohr*, An. de la Soc. Esp. de Fís. y Quím. **23**, 259-276; *Theorie der Licht-emission nach dem Modell von Rutherford-Bohr*, Annalen der Physik **79**, 55-80 (1926).
— J. Palacios, 1932: *Mecánica Cuantista*. Discurso de ingreso en la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, leído el 8 de abril de 1932. Est. Tip. de A. Medina, Toledo, pp. 4-64.
— J. Palacios, 1934: *Deducción de la Mecánica a partir del principio de conservación de la energía y de la regla de composición de velocidades*, An. de Fís. y Quím. **32**, 5-19 (1934). Notas y adiciones de J. Palacios sobre una conferencia con este título impartida por Paul Langevin en la Facultad de Ciencias de la Universidad Central (hoy UCM) en noviembre de 1933.
— G. Panitchayangkoon, D. Hyes, K.A. Fransted, J.R. Caram, E. Harel, J. Wen, R.E. Blankenship, G.S. Engel, 2010: *Long-Lived Quantum Coherence in Photosynthetic Complexes at Physiological Temperature*, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. **107**, 12766-12770.
— C.H. Papadimitriou, 1994: Computational Complexity, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.
— L. Pasteur, 1848: *Recherches sur les relations qui peuvent exister entre la forme cristalline, la composition chimique et le sens de la polarisation rotatoire*, Annales de chimie et de physique **24**, 442-459.
— W. Pauli, 1925: *Über den Zuzammenhang des Abschlusses der Elektrongruppe in Atom mit der Komplexstruktur der Spektren*, Zeitschrift für Physik **31**, 765-783.
— W. Pauli, 1958: Encyclopædia of physics, Vol. 5/1, ed. S. Flügge, Springer, Berlin.
— R. Penrose, 1979: *Singularities and time asymmetry*, en General relativity: an Einstein centenary survey, eds. S. W. Hawking, W. Israel, pp. 581-638, Cambridge Univ. Press, Cambridge UK.
— R. Penrose, 1990: The emperor's new mind, Oxford Univ. Press, Oxford.
— R. Penrose, 2001: *Consciousness, the Brain, and Spacetime Geometry: An Addendum. (Some New Developments on the Orch OR Model for Consciousness)*, Ann. N.Y. Acad. Sci. **929**, 105-10.
— M.F. Perutz, 1987: *Physics and the riddle of life*, Nature **326**, 555-558.
— A. Peruzzo, M. Lobino, J.C.F. Matthews, N. Matsuda, A. Politi, K. Poulios, X.-Q. Zhou, Y. Lahini, N. Ismail, K. Wörhoff, Y. Bromberg, Y. Silberberg, M.G.

THOMPSON, J.L. OBRIEN, 2010: *Quantum Walks of Correlated Photons*, Science **329**,1500-1503.
— L.P. PITAEVSKII, 1961: *Vortex Lines in an Imperfect Bose Gas*, Soviet Physics JETP-USSR **13**, 451-454.
— M. PLANCK, 1897: VORLESUNGEN ÜBER THERMODYNAMIK, Veit & Comp., Leipzig.
— M. PLANCK, 1899: *Über irreversible Strahlungsvorgänge*, Fünfte Mitteilung (Schluss), Berl. Ber. 440-480.
— M. PLANCK, 1900a: *Über eine Verbesserung der Wien'schen Spectralgleichung*, Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft **2**, 202-204.
— M. PLANCK, 1900b: *Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum*, Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft **2**, 237-245.
— M. PLANCK, 1901: *Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum*, Annalen der Physik **4**, 553-563.
— M. PLANCK, 1911a: *La loi du rayonnement noir et l'hypothèse des quantités élémentaires d'action*, en LA THÉORIE DU RAYONEMENT ET LES QUANTA: RAPPORTS ET DISCUSSIONS DE LA RÉUNION TENUE À BRUXELLES, pp. 93-114.
— M. PLANCK, 1911b: *Eine neue Strahlungshypothese*, Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft **13**, 138-148.
— M. PLANCK, 1914: *Eine veränderte Formulierung der Quantenhypothese*, Berl. Ber. 918-923.
— M.B. PLENIO, S.F. HUELGA, 2008: *Dephasing assisted transport: Quantum networks and biomolecules*, New J. Phys. **10**, 113019.
— E. POMARICO, B. SANGUINETTI, P. SEKATSKI, H. ZBINDEN, N. GISIN,2011: *Experimental amplification of an entangled photon: what if the detection loophole is ignored?*, arXiv:1104.2212v1 [quant-ph].
— R.P. POPLAVSKII, 1975: *Thermodynamical models of information processing*, (in Russian), Uspekhi Fizicheskikh Nauk **115**, 465-501.
— J.A. POPLE, 1998: *Quantum Chemical Models*, Nobel Lecture, December 8. NOBEL LECTURES, CHEMISTRY 1996-2000, ed. I. Grenthe, World Scientific Pub., Singapore, 2003.
— J.A. POPLE, 1999: *Nobel Lecture: Quantum Chemical Models*, Rev. Mod. Phys. **71**, 1267-1274.
— H. PRICE, 1989: *A point on the arrow of time*, Nature **340**, 181-182.
— J.M. RAIMOND, M. BRUNE, S. HAROCHE, 1997: *Reversible Decoherence of a Mesoscopic Superposition of Field States*, Phys. Rev. Lett. **79**, 1964-1967.
— P. REBENTROST, M. MOHSENI, A. ASPURU-GUZIK, 2009a: *Role of Quantum Coherence and Environmental Fluctuations in Chromophoric Energy Transport*, J. Chem. Phys. B **113** (29), 9945-9947, arXiv:0806.4725.
— P. REBENTROST, M. MOHSENI, I. KASSAL, S. LLOYD, A. ASPURU-GUZIK, 2009b: *Environment-assisted quantum transport*, New J. Phys. **11**, 033003, arXiv: 0807.0929.
— H. REICHENBACH, 1956: THE DIRECTION OF TIME, Univ. of California Press, Berkeley.
— C.J. RIEDEL, W.H. ZUREK, 2010: *Quantum Darwinism in an Everyday Environment: Huge Redundancy in Scattered Photons*, arXiv:1001.3419v3 [quantum-ph].
— F. RIEKE, D.A. BAYLOR, 1998: *Single-photon detection by rod cells of the retina*, Rev. Mod. Phys. **70**, 1027-1036.

— A. RINALDI, 2007: *The scent of life*, EMBO Reports **8**(7), 629-633.
— T. RITZ, S. ADEM, K. SCHULTEN, 2000: *A model for photoreceptor-based magnetoreception in birds*, Biophys. J. **78**, 707-718.
— T. RITZ, T. YOSHII, C. HELFRICH-FOERSTER, M. AHMAD, 2010: *Cryptochrome. A photoreceptor with the properties of a magnetoreceptor?*, Commun. Integr. Biol. **3**(1), 24-27.
— C.T. RODGERS, P.J. HORE, 2008: *Chemical magnetoreception in birds: The radical pair mechanism*, Proc. Natl. Acad. Sci. USA **106**(2), 353-360.
— J. ROMERO, J. LEACH, B. JACK, S.M. BARNETT, M.J. PADGETT, S. FRANKE-ARNOLD, 2010: *Violation of Leggett inequalities in orbital angular momentum subspaces*, New J. Phys. **12**, 123007.
— O. ROMERO-ISART, M.L. JUAN, R. QUIDANT, J.I. CIRAC, 2010: *Toward Quantum Superposition of Living Organisms*, New Journal of Physics **12**, 033015.
— L. ROSENFELD, 1963: *Niels Bohr's contribution to epistemology*, Physics Today **16**, October, 47-52, 54.
— L.J. ROTHSCHILD, 2008: *The evolution of photosynthesis...again?*, Phil. Trans. R. Soc. B **363**, 2787-2801.
— L.J. ROTHSCHILD, R.L. MANCINELLI, 2001: *Life in Extreme Environments*, Nature **409**, 1092-1101.
— F.J. RUBIA, 2009: EL FANTASMA DE LA LIBERTAD, Editorial Critica, Barcelona.
— F.J. RUBIA, 2010: *El enigma de la consciencia*, Discurso inaugural del curso académico 2010, Real Academia Nacional de Medicina.
— M.J. RUSSELL, R.M. DANIEL, A.J. HALL, 1993: *On the emergence of life via catalytic iron-sulphide membranes*, Terra Nova **5**, 343-347.
— M.J. RUSSELL, R.M. DANIEL, A.J. HALL, J.A. SHERRINGHAM, 1994: *A hydrothermally precipitated catalytic iron sulphide membrane as a first step toward life*, J. Mol. Evol. **39**, 231-243.
— H. SALECKER, E.P. WIGNER, 1958: *Quantum limitations of the measurement of space-time distances*, Phys. Rev. **109**, 571-577.
— M. SAROVAR, A. ISHIZAKI, G.R. FLEMING, K.B. WHALEY, 2010: *Quantum entanglement in photosynthetic light-harvesting complexes*, Nature Physics **6**, 462-467.
— Th. SAUTER, R. BLATT, W. NEUHAUSER, P.E. TOSCHEK, 1986a: *'Quantum jumps' observed in the fluorescence of a single ion*, Optics Communications **60**, 287-292.
— Th. SAUTER, W. NEUHAUSER, R. BLATT, P. E. TOSCHEK, 1986b: *Observation of Quantum Jumps*, Phys. Rev. Lett. **57**, 1696-1698.
— S. SAVIKHIN, D.R. BUCK, W.S. STRUVE, 1997: *Oscillating anisotropies in a bacteriochlorophyll protein: Evidence for quantum beating between exciton levels*, Chemical Physics **223**, 303-312.
— M. SCHLOSSHAUER, 2005: *Decoherence, the measurement problem, and interpretations of quantum mechanics*, Rev. Mod. Phys. **76**, 1267-1305.
— M. SCHLOSSHAUER, 2007: DECOHERENCE AND THE QUANTUM-TO-CLASSICAL TRANSITION, Springer, Berlin.
— M. SCHMIDT AM BUSCH, F. MÜH, M.E-A. MADJET, T. RENGER, 2011: *The Eighth Bacteriochlorophyll Completes the Excitation Energy Funnel in the FMO Protein*, J. Phys. Chem. Lett. **2**, 93-98.
— G.D. SCHOLES, 2010a: *Quantum-Coherent Electronic Energy Transfer: Did Nature Think of It First?*, J. Phys. Chem. Lett. **1**, 2-8.
— G.D. SCHOLES, 2010b: *Green quantum computers*, Nature Physics. **6**, 402-403.

— A. Schreiber, K. N. Cassemiro, V. Potoèek, A. Gábris, P.J. Mosley, E. Andersson, I. Jex, Ch. Silberhorn, 2010: *Photons Walking the Line: A Quantum Walk with Adjustable Coin Operations*, Phys. Rev. Lett. **104**, 050502.
— E. Schrödinger, 1926: *Quantisierung als Eigenwertproblem*, Annalen der Physik **79**, 361-376, 489-527; **80**, 437-490, **81**, 109-139.
— E. Schrödinger, 1935: *Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik*, Naturwissenschaften **23**, 807-812, 823-828, 844-849.
— E. Schrödinger, 1936: *Indeterminism and Free Will*, Nature **138**, 14-15.
— E. Schrödinger, 1944: What is Life? – the Physical Aspect of the Living Cell, Cambridge Univ. Press, Cambridge UK.
— K. Schulten, C. Swenberg, A. Weller, 1978: *A biomagnetic sensory mechanism based on magnetic field modulated coherent electron spin motion*, Z. Phys. Chem. NF **111**, 1-5.
— K. Schulten, A. Windemuth, 1986: *Model for a physiological magnetic compass*, en Biophysical Effects of Steady Magnetic Fields, eds. G. Maret, N. Boccara, J. Kiepenheuer), pp. 99-106, Springer-Verlag, Berlin.
— M.O. Scully, K. Drühl, 1982: *Quantum eraser: A proposed photon correlation experiment concerning observation and «delayed choice» in quantum mechanics*, Phys. Rev. A **25**, 2208-2213.
— M.O. Scully, Y-H. Kim, R. Yu, S.P. Kulik, Y.H.Shih, 2000: *A Delayed Choice Quantum Eraser*, Phys. Rev. Lett. **84**, 1-5.
— M.O. Scully, M.S. Zubairy, 1997: Quantum Optics, Cambridge Univ. Press, Cambridge UK.
— C. Seife, 2000: *Cold Numbers Unmake the Quantum Mind*, Science **287**, 791.
— P. Sekatski, N. Brunner, C. Branciard, N. Gisin, C. Simon, 2009: *Quantum experiments with human eyes as detectors based on cloning via stimulated emission*, Phys. Rev. Lett. 103, 113601..
— R.J. Sension, 2007: *Quantum path to photosynthesis*, Nature **4**, 740-741.
— C.E. Shannon, 1948: A mathematical theory of communication, Bell System Technical Journal **27**, 379-423, 623-656.
— A. Shimony, 1989: *Conceptual foundations of quantum mechanics*. En The New Physics (ed. P. Davies), pp. 373-395, Cambridge University Press, Cambridge UK.
— A. Shimony, 2009: *Bell's Theorem*. In Stanford Encyclopedia of Philosophy. (First published Wed Jul 21, 2004; substantive revision Thu Jun 11, 2009.)
— P.W. Shor, 1994: *Algorithms for quantum computation: Discrete logarithms and factoring*, in Proc. 35nd Annual Symposium on Foundations of Computer Science (ed. Shafi Goldwasser), IEEE Computer Society Press, pp. 124-134.
— P.W. Shor, 1997: *Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer*, SIAM J. Computing **26,** 1484-1509 (1997).
— M.P. Silverman, 1995: More than One Mistery: Explorations in Quantum Interference, Springer, Berlin.
— D.R. Simon, 1997: *On the Power of Quantum Computation*, SIAM J. Computing **26,** 1474-1483.
— C.P. Snow, 1959: The two cultures and the scientific revolution, Cambridge Univ. Press, Cambridge UK.

— K. Soai, T. Shibata, H. Morioka, K. Choji, 1995: *Asymmetric autocatalysis and amplification of enatiomeric excess of a chiral molecule*, Nature **378**, 767-768.
— A. Sommerfeld, 1916: *Zur Quantentheorie der Spektrallinien*, Annalen der Physik **51**, 1-94, 125-167.
— C.S. Soon, M. Brass, H.J. Heinze, J.D. Jaynes, 2008: *Unconscious determinants of free decisions in the human brain*, Nat. Neurosci. **11**, 543-545.
— M. Steel, D. Penny, 2010: *Origins of life: Common ancestry put to the test*, Nature **465**, 168-169.
— K.O. Stetter, 1998: *Hyperthermophiles: Isolation classification and properties*. En Extremophiles: Microbial life in Extreme Environments (eds. K. Horikoshi, W.D. Grant), pp. 1-24, Wiley-Liss, New York.
— O. Steuernagel, 2007: *Afshar's experiment does not show a violation of complementarity*, Found. Phys. **3**, 1370-1385.
— F.W. Sun, B.H. Liu, Y.X. Gong, Y.F. Huang, Z.Y. Ou, G.C. Guo, 2008: *Experimental demonstration of phase measurement precision beating standard quantum limit by projection measurement*, Europhysics Letters **82**, 24001.
— L. Susskind, 1995: *The world as a hologram*, J. Math. Phys. **36**, 6377-6396.
— M. Tegmark, 1993: *Apparent wave function collapse caused by scattering*, Found. Phys. Lett. **6**, 571-590.
— M. Tegmark, 2000: *Importance of quantum decoherence in brain processes*, Phys. Rev E **61**, 4194-4206; arXiv:quant-ph/9907009v2.
— M. Tegmark, J.A. Wheeler, 2001: *100 Years of Quantum Mysteries*, Scientific American **284**, February, 68-75.
— D.L. Theobald, 2010: *A formal test of the theory of universal common ancestry*, Nature **465**, 219-222.
— W. Thirring, 1994: *Boltzmann's legacy in the thinking of modern physics*, conferencia pronunciada en 1994 en Viena con motivo del 150 aniversario del nacimiento de Boltzmann. Preprint ESI 83.
— G.P. Thompson, 1927: *The Diffraction of Cathode Rays by Thin Films of Platinum*, Nature **120**, 802.
— G.P. Thompson, 1928: *Experiments on the Diffraction of Cathode Rays*, Proceedings of the Royal Society **117**, 600-609; *Experiments on the Diffraction of Cathode Rays. II,* Proceedings of the Royal Society **119**, 651-654.
— G.P. Thompson, 1929: *Experiments on the Diffraction of Cathode Rays. III,* Proceedings of the Royal Society **125**, 352-370.
— G.P. Thompson, A. Reid, 1927: *Diffraction of Cathode Rays by a Thin Film*, Nature **119**, 890.
— W. Thompson (Lord Kelvin), 1851: *On the dynamical theory of heat, with numerical results deduced from Mr. Joule's equivalent of a thermal unit, and M. Regnault's observations on steam*, Trans. R. Soc. Edin. March 1851. Recogido en Mathematical and physical papers of William Thomson, Vol I, pp. 174-200, Cambridge Univ. Press, Cambridge UK, 1882.
— W. Thompson (Lord Kelvin), 1852: *On a Universal Tendency in Nature to the Dissipation of Mechanical Energy*, Proceedings of the Royal Society of Edinburgh. April 1852.
— G. 't Hooft, 1993: *Dimensional Reduction in Quantum Gravity*, en Salamfestschrift: a collection of talks, World Scientific Series in 20th Century Physics, vol. 4 (eds. A. Ali, J. Ellis, S. Randjbar-Daemi), World Scientific; arXiv: gr-qc/9310026.

— G. 'T HOOFT, 1999: *Quantum Gravity as a Dissipative Deterministic System*, Class. Quant. Grav. **16**, 3263-3279; SPIN-1999/07, gr-qc/9903084.
— K.S. THORNE, W.H. ZUREK, 1986: *John Archibald Wheeler: A Few Highlights of His Contributions to Physics*, Found. Phys. **16**, 79-89.
— N.W. TIMOFÉEFF-RESSOVSKY, K.G. ZIMMER, M. DELBRÜCK, 1935: *Über die Natur der Genmutation und der Genstruktur*, Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen: Mathematische-Physikalische Klasse, Fachgruppe VI, Biologie Bd. **1**, Nr. 13, 189-245.
— A. TONOMURA, J. ENDO, T. MATSUDA, T. KAWASAKI, H. EZAWA, 1989: *Demonstration of Single-Electron Buildup of an Interference Pattern*, American Journal of Physics **57**, 117-120.
— D.E. TRONRUD, J.Z. WEN, L. GAY, R.E. BLANKENSHIP, 2009: *The Structural Basis for the Difference in Absorbance Spectra for the FMO Antenna Protein from Various Green Sulfur Bacteria*, Photosynth. Res. **100**, 79-87.
— J. TROST, K. HORNBERGER, 2009: *Hund's Paradox and the Collisional Stabilization of Chiral Molecules*, Phys. Rev. Lett. **103**, 023202.
— R. TUMULKA, 2007: *Comment on «The Free Will Theorem»*, Found. Phys. **37**, 186-197.
— L. TURIN, 1996: *A spectroscopic mechanism for primary olfactory reception*, Chem. Senses **21**, 773-791.
— A. TURING, 1936: *On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem*, Proc. Lond. Math. Soc. **42**, 230-265; correction ibid. **43**, 544-546 (1937).
— W.G. UNRUH, R.M. WALD, 1989: *Time and the interpretation of canonical quantum gravity*, Phys. Rev. D **40**, 2598-2614.
— A.N. VAMIVAKAS, C.-Y. LU, C. MATTHIESEN, Y. ZHAO, S. FÄLT, A. BADOLATO, M. ATATÜRE, 2010: *Observation of spin-dependent quantum jumps via quantum dot resonance fluorescence*, Nature **467**, 297-300.
— L.M.K. VANDERSYPEN, M. STEFFEN, G. BREYTA, C.S. YANNONI, M.H. SHERWOOD, I.L. CHUANG, 2001: *Experimental realization of Shor's quantum factoring algorithm using nuclear magnetic resonance*, Nature **414**, 883-887.
— H.A. VAN DER VELDEN, 1946: *The number of quanta necessary for the perception of light in the human eye*, Ophthalmologica **111**, 321-331.
— C.H. VAN DER WAL, A.C.J. TER HAAR, F.K. WILHELM, R.N. SCHOUTEN, C.J.P.M. HARMANS, T.P. ORLANDO, S. LLOYD, J.E. MOOIJ, 2000: *Quantum Superposition of Macroscopic Persistent-Current States*, Science **290**, 773-777.
— R. VAN GRONDELLE, V. NOVODEREZHKIN, 2010: *Quantum design for a light trap*, Nature **463**, 614-615.
— U. VAZIRANI, 2002: *Fourier Transforms and Quantum Computation*, en THEORETICAL ASPECTS OF COMPUTER SCIENCE 2000, Lecture Notes in Computer Science Springer, Vol. 2292, eds. G.B. Khosrovshahi *et al.*, pp. 208-220.
— V. VEDRAL, 2010: *Hot Entanglement*, Nature **468**, 769-770.
— C. VIEDMA, 2007: *Chiral symmetry breaking and complete chiral purity by thermodynamic-kinetic feedback near equilibrium: Implications for the origin of biochirality*, Astrobiol. **7**, 312-319.
— J. VON NEUMANN, 1932: MATHEMATISCHE GRUNDLAGEN DER QUANTENMECHANIK, Springer, Berlin.
— S. WEINBERG, 1989a: *Precision tests of quantum mechanics*, Phys. Rev. Lett. **62**, 485-488.

— S. WEINBERG, 1989b: *Testing Quantum Mechanics*, Annals of Physics **194**, 336-386.
— R. WERNER, M. WOLF, 2001: *Bell Inequalities and Entanglement*, Quantum Information and Computation **1**, 1-25.
— J.A. WHEELER, 1979: FRONTIERS OF TIME, (North-Holland PuNishing Co., Amsterdam); also in REDICONTI DELLA SCUOLA INTERNAZIONALE DI FISICA «ENRICO FERMI» (eds. N. Toraldo di Francia, Bas van Fraassen), North-Holland Publishing Co., Amsterdam), pp. 395-497.
— G.J. WHITROW, 1980: THE NATURAL PHILOSOPHY OF TIME, Clarendon, Oxford.
— E.P. WIGNER, 1961: *Remarks on the mind-body question*, en THE SCIENTIST SPECULATES – AN ANTHOLOGY OF PARTLY-BAKED IDEAS, ed. I.J. Good, Heinemann, London, pp. 284-302.
— E.P. WIGNER, 1970: *On Hidden Variables and Quantum Mechanical Probabilities*, Amer. J. Phys. **38**, 1005-1009.
— R. WILTSCHKO, K. STAPPUT, P. THALAU, W. WILTSCHKO, 2010: *Directional orientation of birds by the magnetic field under different light conditions*, J. R. Soc. Interface **7**, S163-S177.
— R. WILTSCHKO, W. WILTSCHKO, 1972: *Magnetic compass of European robins*, Science **176**, 62-64.
— R. WILTSCHKO, W. WILTSCHKO, 2002: *Magnetic compass orientation in birds and its physiological basis*, Naturwissenschaften **89**, 445-452.
— E. WITTEN, 2003: NOVA *Viewpoints on String Theory*.
— S. WOLFRAM, 2002: A NEW KIND OF SCIENCE, Wolfram Media, Inc., Champaign, Illinois.
— W.K. WOOTTERS, W.H. ZUREK, 1982: *A Single Quantum Cannot be Cloned*, Nature **299**, 802-803.
— R.H. WRIGHT, 1977: *Odor and molecular vibrations: neural coding of olfactory information*, J. Theor. Biol. **64**, 473-502.
— J. XIONG, 2006: *Photosynthesis: what color was its origin?*, Genome Biology **7**(12), 245 (1-5).
— T. YOUNG, 1802: *On the theory of light and colours* (The 1801 Bakerian Lecture), Philosophical Transactions of the Royal Society of London **92**, 12-48.
— T. YOUNG, 1804: *Experiments and calculations relative to physical optics* (The 1803 Bakerian Lecture), Philosophical Transactions of the Royal Society of London **94**, 1-16.
— T. YOUNG, 1807: *A Course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts*, J. Johnson, London.
— F. ZÄHRINGER, G. KIRCHMAIR, R. GERRITSMA, E. SOLANO, R. BLATT, C.F. ROOS, 2010: *Realization of a Quantum Walk with One and Two Trapped Ions*, Phys. Rev. Lett. **104**(10), 100503.
— M. ZAPKA, D. HEYERS, C.M. HEIN, S. ENGELS, N-L. SCHNEIDER, J. HANS, S. WEILER, D. DREYER, D. KISHKINEV, J.M. WILD, H. MOURITSEN, 2009: *Visual but not trigeminal mediation of magnetic compass information in a migratory bird*, Nature **461**, 1274-1277.
— H.D. ZEH, 1970: *On the Interpretation of Measurement in Quantum Theory*, Found. Phys. **1**, 69-76.
— H.D. ZEH, 1973: *Toward a Quantum Theory of Observation*, Found. Phys. **3**, 109-116.

— W.H. Zurek, 1981: *Pointer Basis of Quantum Apparatus: Into what Mixture does the Wave Packet Collapse?*, Phys. Rev. D **24**, 1516-1525.
— W.H. Zurek, 1982: *Environment-Induced Superselection Rules*, Phys. Rev. D **26**, 1862-1880.
— W.H. Zurek, 1991: *Decoherence and the Transition from Quantum to Classical*, Physics Today **44**, October, 36-44.
— W.H. Zurek, 2003: *Decoherence, einselection, and the quantum origins of the classical*, Rev. Mod. Phys. **75**, 715-765.
— W.H. Zurek, 2004: *Quantum Darwinism and Envariance*, in Science and Ultimate Reality: From Quantum to Cosmos, eds. J.D. Barrow, P.C.W. Davies, C.H. Harper, Cambridge University Press, Cambridge UK.
— W.H. Zurek, 2009: *Quantum Darwinism*, Nature Physics **5**, 181-188.
— X. Zubiri, 2005: *¿Qué es investigar?*, The Xavier Zubiri Review **7**, 5-7.

DISCURSO DE CONTESTACIÓN DEL EXCMO. SR. D. CARLOS SEOANE PRADO

Excmo. Sr. Presidente de la Real Academia,
Excmos. Sres. Académicos,
Señoras, Señores:

UNA CIENCIA PARA UNA ACADEMIA

> *«The more we know, the more we feel our ignorance; the more we feel our ignorance, the more we know how much remains unknown; and, in philosophy, the sentiment of the Macedonian hero can never apply. There are always new fields to conquer»*
>
> HUMPRY DAVY

Se atribuye al gran Hermann Weyl esta reflexión: *«En mi trabajo, siempre he tratado de conjugar lo verdadero con lo bello. Pero cuando tuve que elegir, elegí lo bello»*. Pues bien, cuando se contempla la tarea vital de nuestro nuevo académico, se ve con claridad que él nunca tuvo que elegir.

Quiere el protocolo que sea un químico quien dé recepción en esta casa a un insigne representante de la física, la más profunda de las ciencias naturales. No es, pues, mi bienvenida el discurso de un especialista; más bien el de un compañero y amigo, que cultiva la más modesta ciencia de Bunsen y que, como él, piensa que el químico que no es físico no es nada. La química, en efecto, adopta el papel empírico del experimentador que necesita conocer el comportamiento de ciertos átomos y moléculas que escapan todavía a las predicciones de la física. Aun a riesgo de simplificar, y de caer en lo que Posada llama reduccionismo tibio, siempre he pensado que la física, con su apoyo matemático, debiera llegar poco a poco a explicar todo el comportamiento de la Naturaleza y el funcionamiento de la vida. Pero ese momento, al que se aproxima asintóticamente, no ha llegado.

Allí donde los átomos se organizan en grandes y complejas moléculas entra la química, aportando su empirismo, como ciencia capaz de comprender, y aprovechar, el comportamiento de moléculas como nuestras hormonas, las proteínas, los medicamentos o el ADN de nuestras células. Cierto es también que la química fundamental debería deducir *ab initio* toda la bioquímica pero como todavía no puede, la biología celular y la histología son ciencias por derecho pro-

pio. Llevando al extremo esta «escala de las ciencias», la fisiología podría eventualmente llegar a ser deducible de estas ciencias básicas y, a su vez, predecir toda la medicina clínica y la patología, con su gran, aunque brillante, carga de empirismo. Se asentaría así definitivamente la medicina sobre las bases fisico-químicas y moleculares que llevan siglos esperándola.

Larga tarea tiene aún la física hasta que de las partículas elementales, la teoría cuántica y la relatividad, irreconciliables o no, llegue a interpretar la vida en su normalidad y en la enfermedad. Ninguno de nosotros lo veremos, pero esa tarea sería objetivo último de la ciencia que cultiva nuestro nuevo académico, como sintética y elegantemente reza el título de su bellísimo discurso «Quanta y vida». No pudo haber elegido tema mejor para explicarnos esa base física en que todo se apoya.

UN DISCURSO PARA UNA CIENCIA

> *«... in an advanced state of knowledge, we are able to reduce more of the particular into general observations; whereas in the youth of a science every observation is an independent fact. In delivering the principles of it, they must all be independently mentioned, so that though a selection may be made, a proper abridgement is impossible»*
>
> JOSEPH PRIESTLEY

Mi relación con el profesor Galindo es, para mi fortuna, ya larga. Además de servir ambos como catedráticos de ciencias en la Universidad Complutense, durante mi mandato como vicerrector pude comprobar su disponibilidad para cuanto se le necesitaba, que era mucho, y compartimos tareas que me han permitido disfrutar del permanente rigor y la seriedad de cuanto acomete. Escuchándole, acabamos de tener ocasión sin par de comprobarlo.

Ha sido el suyo un discurso de densa perfección, con el añadido esfuerzo de hacernos comprender a los no especialistas. Sabemos bien la dificultad de transmitir fuera del gremio, o aun dentro de él, la complejidad de la física matemática. La ciencia, en palabras de Niels Bohr, ha tenido que pagar un precio muy alto para el estudio de lo microscópico: la pérdida de significado del lenguaje y los conceptos mentales, que deben ser usados fuera de su contexto habitual, de lo que se considera racional o «de sentido común». Dos grandes bloques componen la magistral lección que hemos escuchado: el mundo cuántico, primero, con sus teorías fundamentales, y, segundo,

los quanta en las ciencias de la vida como regalo especialmente apropiado a la institución que hoy le acoge alborozada.

Es la primera parte un acertadísimo estudio crítico de la evolución de la física actual y del nacimiento de las principales ideas que llevaron a la visión que hoy tenemos del Universo y cuanto lo constituye; una lección didáctica que, a nuestra nostalgia de recordar, añade el placer de aprender lo que la física moderna ha aportado: un conocimiento mucho más profundo del Universo y una comprensión del átomo más allá de esos pocos electrones de valencia que sustentan la química. Los químicos solo arañamos la piel de los átomos. Son los físicos cuánticos quienes nos han llevado, a través de ese enorme vacío atómico, hasta al núcleo y nos han hecho ver, junto a la complejidad, como el ínfimo porcentaje «lleno» de la materia puede organizar inconmensurable belleza. Se requiere para ello cruzar lo que Feynman llamó los «misterios de la mecánica cuántica»: el papel sorprendentemente pasivo del tiempo en ella, el entrelazamiento, los sistemas con propiedades complementarias pero incompatibles entre si, el principio de indeterminación, las contraintuitivas dualidades de los estados cuánticos. El «ser o no ser», dice Galindo, ya no es la pregunta, si no la respuesta.

Nos guía así por profundos logros, pero también incertidumbres, de la mente humana. Llega a cuestiones filosóficas de fondo al estudiar la violación de las desigualdades de Bell como indicación de lo sutil que es el concepto de realidad, con la incompatibilidad del realismo local einsteniano y la física cuántica. Existe, para Einstein, una realidad exterior independientemente de si se observa o no; para Bohr, nada existe si no se ha medido previamente. Ten cuidado en como miras el mundo, reza el saber popular, pues el mundo puede ser como lo mires.

La deslumbrante brillantez de lo que él llama fundadamente la ecuación más fértil de la Física, la ecuación de Schrödinger, es un titánico triunfo en la compresión de la materia, especialmente con la ampliación relativista de Dirac y esa pragmática alternativa: el método del funcional de la densidad, que permite abordar agregados de varios centenares de electrones. Pero los problemas llegan al intentar calcular biomoléculas con masas moleculares de cientos de kDa que son, para nuestra desgracia, las que más interesan a la bioquímica y la medicina.

Creo percibir en sus palabras un sano punto de humildad cuando se refiere a la prematura idea de Paul Dirac al afirmar, en 1929, que las leyes fundamentales de buena parte de la física y, desde luego, todas las de la química, son completamente conocidas; la única dificultad es que esas leyes llevan a ecuaciones demasiado comple-

jas para poder ser resueltas. Muy complejas son, si, pues casi un siglo después, la química, la biología y la medicina tienen aún mucho que aprender, y que enseñar, desde su todavía imprescindible empirismo. Como escribió Maddox en *Nature*, uno de los grandes escándalos de la ciencia es que siga siendo imposible predecir la estructura aun del más simple de los cristales a partir de su composición. La noticia sobre mi muerte, escribió Mark Twain a quien por error publicó su prematura necrológica, es considerablemente exagerada. Así lo entiende Galindo cuando nos señala la infinidad de posibles aplicaciones de la ecuación de Schrödinger a átomos y moléculas, a las que la física matemática ha dedicado décadas, tras las cuales aún quedan muy importantes cuestiones por dilucidar. Para el físico, en palabras de un químico experimental, todas las moléculas son una sola cosa: simples manifestaciones de la ecuación de Schrödinger; es el químico quien ha de sufrir las diferencias.

Termina su hermosa lección de física fundamental dedicando una parte importante a una de sus más queridas preocupaciones científicas: la información y computación cuánticas como posible solución al desaforado aumento de las necesidades de computación de nuestra sociedad. Relevante para ello es que la información tiene un verdadero significado entrópico, algo propuesto por primera vez por Leo Szilard, también en 1929, al explicar la no violación del segundo principio de la termodinámica en la reducción de entropía del Diablo de Maxwell. Si la ley de Moore continúa cumpliéndose, nos dice Galindo, en la progresiva reducción de tamaño de los circuitos electrónicos llegaremos pronto al límite atómico-molecular. Entonces emergerán las manifestaciones del azar cuántico y perderemos la cómoda certeza que el bit digital, con su nítido 0-1, nos ha ofrecido hasta ahora. Habremos de saltar al bit cuántico, el qubit, una «especie» si se me permite el término biológico, más frágil, menos estable, pero extraordinariamente más rica, capaz de almacenar cantidades ingentes de información gracias, precisamente, a la ambigüedad que sus estados intermedios, entre el 0 y el 1, ni uno ni otro o ambos a la vez, aportarían. Pero a esta ventaja en capacidad, se contrapone la menos conveniente inestabilidad de estos sistemas cuánticos para el mantenimiento y recuperación de la información, que obligaría a operar en fracciones de tiempo tan ínfimas que resultan aún inmanejables. De otro lado, lo que Galindo llama la «bestia negra», la descoherencia, resultante de la influencia exterior, puede introducir fases incontrolables y aleatorias que destruyan la información en tiempos con el mismo orden de inquietante brevedad. Aún no sabemos cual, si alguna, de las muchas técnicas prácticas ensayadas podrá hacer realizable la genial concepción teórica del ordenador cuántico. Es un

futuro apasionante aún por desarrollar, no exento de riesgos y dudas, que pende de un trabajo hoy solo asequible a los muy pocos físicos que intentan hacer del siglo XXI el de la tecnología cuántica. Seamos, como lo es Galindo, optimistas, respecto a la carrera ya previsible entre la computación cuántica y los «clusters» constituidos por millares de ordenadores clásicos, no cuánticos, como la WLHCCG (Worldwide LHC Computer Grid) generada para el LHC (Gran Colisionador de Hadrones), que se espera reemplace a la actual Internet de la WWW con velocidades 10.000 veces superiores.

La última parte de su desbordante discurso nos lleva a lo que denominaríamos biología cuántica. *«El mundo son átomos»*, dijo Epicteto, *«lo demás son opiniones y aun opiniones sobre las opiniones»*. Desde luego la materia viva, como cualquier otra del Universo, está formada por los mismos átomos sujetos a las leyes cuánticas. Pero Galindo ha querido regalarnos con la búsqueda de más sutiles conexiones entre la física cuántica y las funciones de la vida. Rompe así la creencia en que un ser vivo, ese medio biológico «húmedo, templado y ruidoso», por usar sus propias palabras, no es un sistema suficientemente aislado ni debidamente frío para que los fenómenos cuánticos sean relevantes. Falso, nos dice, y comienza por una reflexión sobre la concepción misma de la vida, incluidos los errores históricos en que incurrieron en este asunto grandes físicos cuánticos, con el propio Schrödinger a la cabeza. Centra su atención en el origen cosmológico de la vida con el problema, nada claro aún, de la disponibilidad de energía libre y la ineludible directriz termodinámica en la entropía, que acabaría llevando a un Universo en estéril equilibrio termodinámico donde la vida ya no podrá existir.

Un valiente esfuerzo supone su consideración de las bases físicas que pueden subyacer a la conciencia y a un título no muy esperable: «La mecánica cuántica y el libre albedrío», esa obsesión de los humanos casi desde que tenemos inteligencia. En el ámbito más estrictamente material están sus siguientes reflexiones sobre fenómenos cuánticos en biología, en especial la quiralidad en la naturaleza, y las posibles razones cuánticas para su aparición, tal vez como condición para, tal vez como consecuencia de, la vida. Fenómenos cuánticos subyacen también en la fisicoquímica de la visión, o del olfato, o de la orientación, y del proceso clave del que los seres superiores dependemos, la complejísima fotosíntesis, que poéticamente llama «proceso cuántico en el reino verde». Estos descubrimientos serán para la biología y la medicina un paso de gigante hacia la ciencia positiva, comparable al que en su momento liberó a la química orgánica y la bioquímica de la superchería de la *Fuerza Vital*. Añadiríamos a esto el uso en medicina de la resonancia magnética que, aunque aplica-

da por químicos, supone un maravilloso fenómeno de física cuántica por excitación de espines nucleares. Todo ello ha de llevar a una colaboración, tan fructífera como inevitable, de químicos y físicos cuánticos con la biomedicina.

Su último y sugerente punto, lo que llama la Q-vida, o vida cuántica, plantea la fascinante posibilidad de una evolución cuántica anterior no solo a la evolución biológica, sino también a eso que los químicos llamamos evolución prebiótica. La imaginada intervención de un replicador cuántico primigenio, operando en rangos de femtosegundos, habría permitido la selección rápida y paralela de mera información cuántica, aún sin base molecular, que solo más tarde se convertiría en genética; la vida con soporte químico, tal como la conocemos, solo aparecería después, con la humedad, temperatura y falta de aislamiento que un planeta cálido pudo ofrecer junto a sus moléculas orgánicas. No se si así reivindicaremos al gran astrónomo Fred Hoyle, cuando pensaba que la vida se creó en el mismo momento en que la materia fue creada.

Muchas y tentadoras preguntas nos pone sobre la mesa, que serán, estoy seguro, objeto de apasionantes discusiones académicas.

UN TIEMPO PARA INVESTIGAR

> *«La ciencia no es una abstracción; como producto del esfuerzo humano está inseparablemente unida a la personalidad de quien se consagra a ella»*
>
> EMIL FISHER

En el nuevo académico han confluido la brillantez de ideas y la constancia en la tarea. La musa existe, decía Picasso, pero cuando llega le gusta encontrarte trabajando.

La labor académica e investigadora que ha realizado a lo largo de casi 50 años en física teórica y matemática ha estado siempre en la punta de lanza de la ciencia y ha recorrido el análisis funcional, la teoría de grupos, las ecuaciones de evolución no lineales y los aspectos esenciales de la mecánica cuántica: teoría de campos, física de partículas elementales, grupos cuánticos e información y computación cuántica. Tiene su investigación un carácter muy personal, el de un creador que publica con gran frecuencia como autor único.

Ni es este el momento, ni soy yo la persona, para un análisis pormenorizado de la trayectoria investigadora de Galindo, pero demos siquiera unos gruesos brochazos que nos permitan vislumbrar su importancia.

El profesor Galindo ha sido, ya desde sus inicios como investigador, un verdadero pionero en el proceso, afortunadamente hoy muy avanzado, de la internacionalización de la ciencia española. Desde su estancia en el Courant Institute en Nueva York con la Agencia Internacional de Energía Atómica, ha pasado antes, durante y después de su largo período como catedrático en activo, por el International Center for Theorethical Physics de Trieste, la Universidad de Nápoles y el CERN de Ginebra; en Francia, el Institut des Hautes Études Scientiques, la Universidad de Dijon, y el prestigioso Collège de France. La universidad de Viena, la de Princeton y California en EEUU y Garching en Alemania han sido también beneficiarias de su saber. Fue propuesto como Director de Investigación de L'École de Physique de la Universidad de Ginebra, que no pudo aceptar porque su incorporación al CERN le obligó a elegir uno entre dos de los grandes puestos internacionales que pueden ofrecerse a un físico. La vida, decía John Lennon, es eso que te ocurre mientras tu haces planes.

El contenido de sus publicaciones profesionales es, naturalmente, de muy alta especialización y se han movido esencialmente en lo que habría que generalizar en la interpretación cuántica del Universo: el momento magnético intrínseco como fenómeno no relativista, perturbaciones en la teoría cuántica de campos, interacciones nucleón-muón, indistinguibilidad y reglas de superselección. Son temas especialmente relevantes, más en el ámbito de la física matemática, el núcleo de $\delta/\delta u$ en análisis variacional, leyes de conservación, y alguno de engañosa resonancia ginecológica, la matriz T universal.

Pero ha sido en los últimos años cuando se ha interesado especialmente por la información y computación cuántica, a la que nos hemos referido como el futuro de lo que ya no me atrevería a llamar informática. «*Del bit al qubit*», la extraordinaria conferencia de Galindo de hace algunos años nos abrió, quizá aún solo entreabrió, un mundo que incluso entraría ya casi, si se me permite la contradicción semántica, en la «realidad» de la ciencia-ficción, con la teleportación cuántica de la información. Y, más cerca, esos niveles de encriptación que convertirán en un crucigrama infantil las más sofisticadas claves criptográficas de hoy. Vean si no su delicioso trabajo *«El arte de disfrazar la información»*.

No me resisto a mencionar aquí un reciente estudio de la UE aparecido en *Public Library of Science* con datos de la National Science Foundation. Analiza el permanente conflicto a que está sometido el científico, entre la obligación de ser riguroso y exhaustivo en su investigación y la necesidad de promover su carrera profesional, y la de sus discípulos, mediante continua, urgente y abundante publicación. Se publican anualmente del orden de 1,5 millones de artículos científicos.

Como la competencia académica es cada vez mayor, se tiende a la medición cuantitativa de la productividad y esta situación, publicar cuanto antes, y cuanto más, conduce a una primacía de la cantidad sobre la calidad, con deterioro del nivel científico de la investigación. En la vida científica del profesor Galindo, sin embargo, ha primado siempre la calidad frente a la cantidad, la profundidad frente a la prisa, lo importante antes que lo urgente. Es la suya una carrera científica ejemplar que le ha mantenido siempre, concentrándose en sus verdaderas devociones científicas, en las mismas fronteras de la física.

Y uso el plural fronteras porque nuestro nuevo académico ha abordado cuantos problemas le han interesado sin atarse a una única línea de trabajo. Nos preguntamos a veces en la vida si tensamos las cadenas que nos atan para romperlas o para asegurarnos de que resistirán. Galindo pertenece sin duda al primer tipo humano. Ha tensado siempre los límites de la ciencia, sin aceptar barreras a su pensamiento, lo que gráficamente se define en inglés como *thinking out of the box*, para alumbrar una de las producciones científicas más brillantes de la ciencia española.

DE LA TORRE DE MARFIL AL HOMBRE DE LA CALLE

> *«He was not obliged, as most professors, to pick out a single furrow and plow it for life. His whole carrier was devoted to the opposite principle: that an educated, intelligent person can take any subject that seems interesting and important and, taking care with the exposition, make it interesting and important to other intelligent people»*
>
> LOUIS MENAND

Pero su complejísima especialidad no ha impedido al nuevo académico descender a explicaciones asequibles para el no especialista en sus ensayos e infinidad de conferencias en España y otros países. Ha sentido así una de las obligaciones del científico: su papel frente a la sociedad trasmitiendo la alta, a veces muy alta, divulgación de cultura científica (*«Gravitación para el hombre de la calle», «De Newton a los agujeros negros», «Origen y fin del Universo», «Entre el 0 y el 1: el arte de calcular», «La gran explosión», «Cosmos: dichos y hechos», «Cosmología en la era espacial», «Números, formas y otras cosas»*), sobre los más interesantes y actuales aspectos de la física, siempre bajo el espíritu de uno de sus lemas: *«Ciencia para todos»*. Su esfuerzo ha permitido a una audiencia general acercarse al mundo de las partículas elementales, a la cosmología, a la relatividad, a los agujeros negros, a los conceptos fundamentales de la Física: espacio, tiempo, energía, materia y antimateria y, desde luego, a lo que Galindo ha llamado *«El extraño y prodigioso mundo de los quanta»*.

Siempre se ha preocupado, y mucho, de los aspectos humanísticos de la Ciencia, de esa falsa colisión entre Ciencia y Humanidades, y abordado con exquisitez el eterno asunto de las dos culturas en *«Ciencia y humanismo» o «En tierra de nadie: conversaciones sobre letras y ciencias»*.

Como gran físico que ha alcanzado los límites de su campo, se ha encontrado en su avance con las fronteras de la filosofía, en las que ha sabido moverse con polémica brillantez en trabajos como «*La percepción de lo real», «Universo y materia: límites y retos», «Incertidumbre en un mundo en mutación», «Creatividad», «Límites y asedio a la racionalidad»*, o el de la gran pregunta: *«¿Por qué? o ¿como?»*. Desde la filosofía, inevitablemente, se le ha visto rozando a veces con la siguiente frontera: *«Ciencia y Dios», «El Universo ante el hombre», «Universo bifronte y trino», «De la inmutabilidad de los cielos al Universo inflacionario», «Dios aritmetiza»*.

En algunas de sus obras, como ven, es palpable una vena poética, que brilla en sus trabajos «*En la espesura de la noche», «Número y Diosa», «La fragilidad del ser», «De manzanas, electrones y estrellas»*, o en títulos tan sugerentes como *«Universo en estampida», «En pos del tiempo», «Dos cielos para dos sabios»* y el quevediano *«El tiempo que ni vuelve ni tropieza»*. La ciencia, dice Lawrence Durrel, es la poesía del intelecto y de la poesía surgen algunos de sus títulos con tintes de serio humor aragonés: *«El gran dragón de humo», «Claroscuros de la luz», «Profecías en blanco y negro», «Universo a gran escala y otros temas de gravedad», «De gatos, juegos y estadísticas a la teleportación cuántica»*.

Si se me permiten dos deseos, sería el primero que pronto un volumen recoja todos estos magníficos ensayos y estudios críticos del profesor Galindo; es el segundo, que conserve para nosotros, sus nuevos compañeros, esta capacidad de hacer comprensibles los más abstractos y profundos conceptos de la física. Intentemos obviar en esto al viejo Feynman cuando dijo: *«creo que se puede afirmar con seguridad que nadie entiende realmente la mecánica cuántica»*.

PASIÓN POR ENSEÑAR

«Science can be mastered from books only at the most elementary level. For the journey to the frontiers of knowledge, an experienced and willing master is needed as a guide»

ERNEST BOREK

Una pequeña anécdota define al docente Alberto Galindo. Hace algún tiempo, siendo él ya profesor emérito tras toda una vida enseñando, recibí una llamada suya: «Carlos, he ido a verte, pero me dijo la secretaria que estabas dando clase. ¡Que suerte tienes!

En un momento en que en la Universidad española se oye con frecuencia el término *actividad* investigadora contrapuesto al de *carga* docente, me parece importante destacar la intensidad, y el deseo, con que ha llevado esta «carga» que han hecho de él una admirada guía para sus alumnos. Como docente en su complejo campo, ha sabido hacer buena la afirmación de Niels Bohr, «verdad y claridad son complementarias», y ejercer eso que los romanos llamaban *autoritas*: algo menos que una orden, algo más que un consejo.

No se le podría aplicar aquella reflexión de Sastre hacia D. Ramón de Valle Inclán: «Reivindico para Valle la condición de maestro, con independencia de la ausencia de discípulos». Muy al contrario, ha sido maestro de discípulos que le han seguido de una universidad a otra para recibir su magisterio y convertirse a su lado en grandes investigadores, en ese continuo que lleva de la buena docencia a la buena investigación. Si docente es quien, mal que bien, enseña una asignatura, maestro es solo aquel que despierta en quien le escucha la vocación por lo que enseña. La escuela que surgió de Galindo es una escueta joya perlada de científicos de gran valía, como árbol que, más que soltar al viento muchas semillas, prefiere dar solo las que bien germinan.

Sin dejar nunca su investigación, ha dedicado mucho esfuerzo a sus notas de clase y sus libros de texto. Una de sus obras de referencia, *«Mecánica Cuántica»,* con Pedro Pascual, mereció su difusión como texto internacional por Springer Verlag, una de las más prestigiosas editoriales científicas del Mundo. Es, en opinión de muchos, el mejor texto de mecánica cuántica que se haya escrito. Él conoce bien, como nos recordaba, la importancia de un buen aprendizaje desde su nacimiento en ese pequeño pueblo aragonés desde donde voló a su primera cátedra a la ahora insólita edad de 29 años. Fue clave en la modernización de la enseñanza de la física en nuestro país con la introducción del estudio de la mecánica cuántica y las partículas elementales, hasta entonces ausentes en los planes de estudio, primero en cursos especiales apoyados en la creación del Grupo Interuni-

versitario de Física Teórica, que él fundó, y pronto en la docencia regular para la formación de todos los licenciados. Ha sido el suyo, por lo excepcional, un ejemplo no fácil de seguir.

«LA DISTANTE CERCANÍA DE UN MAESTRO»

«Herding scientists is like herding cats:
a futile attempt»

ACADEMIC TRUISM

No todos dejan la misma huella en sus discípulos, porque no todos enseñan bien lo que investigan. Cuando se jubiló, cumplidas cuatro décadas en la cátedra, un grupo de sus discípulos organizó en su honor el «Encuentro de Física Fundamental Alberto Galindo». Participaron muchos físicos notables, antiguos discípulos hoy catedráticos e investigadores en distintas universidades y centros de investigación nacionales e internacionales. Todos hallan en sus propias trayectorias científicas trazas del trabajo de Alberto Galindo.

La publicación resultante recoge, junto a trabajos de investigación, otros de carácter personal. Uno de los más entrañables refleja en su título, *«La distante cercanía de un maestro»*, esa curiosa mezcla de cariño próximo y admiración reverencial que solo algunos grandes hombres saben despertar o, más bien, despiertan sin querer. El calibre de los discípulos es el mejor indicador de la calidad de un científico. Su mente, sus ideas, su personalidad, todo él, están continuamente expuestos al escrutinio de los más exigentes jueces, sus jóvenes colaboradores, cuyo éxito futuro debe arrancar de esa primera vinculación paterno-científica. La relación entre un investigador y sus discípulos es, en efecto, compleja. No tiene el elemento de idolatría que conlleva la relación de un músico magistral con sus seguidores. El joven científico, tanto más cuanto más brillante, intenta siempre hacer algo nuevo, diferente, y pronto se duele de la preeminencia del maestro. No sé si es mera coincidencia, pero Alberto Galindo es un buen violinista; otro Alberto, Einstein, también tocaba el violín.

La historia, y la leyenda, entre sus alumnos transparenta que estamos ante un profesor brillantemente heterodoxo, que supo llevar la libertad de cátedra hasta sus más benéficos, y también extremos, límites. El tono con que uno de sus discípulos decía que «haber sido su alumno imprime carácter» sugería goce y congoja, cual dos estados cuánticos de idéntica probabilidad y no mutuamente incompatibles. Su intensa personalidad nunca hizo fácil la indiferencia. Es hombre cuya real cortesía no impide hacer patentes sus opiniones, como ten-

dremos ocasión de ver, estoy seguro, en nuestros siempre sinceros y animados debates académicos.

RECONOCIMIENTO A UNA LABOR

«We live in a society exquisitely dependent on science and technology, in which hardly anyone knows anything about science and technology»

CARL SAGAN

Tales merecimientos no han quedado sin recompensa. A lo largo de su fructífera vida, Alberto Galindo ha recibido innumerables premios científicos como el Premio Nacional de Investigación, la Medalla de la Real Sociedad Española de Física o, tan próximo a esta casa, el Premio Nacional de Investigación Ramón y Cajal. Muy querido para él fue el Premio Aragón, la máxima distinción científica de su tierra natal. Incluso, en un tono más ligero, el Premio Golondriz al Humor Inteligente, que otros dos académicos nos honramos en compartir con él. Ha sido, además, profeta en su tierra, y ve su nombre honrando en la provincia de Huesca un parque y, como no podía ser de otro modo, un centro docente.

Trabajador siempre incansable y concienzudo, tras su jubilación de la cátedra se incorporó como miembro activo del Colegio Libre de Eméritos y en él continúa una tarea que anteriormente hubo de compatibilizar con otras muchas ocupaciones como el Patronato del Instituto Cervantes, el Consejo de Estudios Europeos, el Instituto Universitario Ortega y Gasset, así como distintas fundaciones culturales, incluida una muy relevante para esta institución que hoy le recibe, la Fundación Ciencias de la Salud.

Pero, sobre todo, el Instituto de España le quiso ya en su seno desde 1977 y ello hace del profesor Galindo uno de esos pocos, muy pocos, elegidos que, como nuestro Marañón, han de pasar más de una vez por este solemne, pero amable, trance del discurso académico de ingreso. Hace ya más de tres décadas que es académico numerario de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, y de ella fue presidente hasta el año 2009. Académico es también de la de Ciencias de Zaragoza y de la Academia Europea y marca en ellas la huella profunda de su quehacer científico pero también dio un impulso, como le pedimos que haga entre nosotros, a una no menos importante tarea, tan querida del presidente de esta su nueva casa: la de acercar la Academia a la sociedad.

UN FUTURO PARA APRENDER

«The outcome of any serious research can only be to make two questions arise where only one grew before»

THORSTEIN VEBLEN

Sr. Presidente, Sres. Académicos:

Nuestra corporación recibe hoy a uno de los más brillantes físicos españoles y es así para su bien, en un momento en que la medicina basada en la evidencia, en la investigación traslacional a que nos dirigimos, necesita apoyarse cada vez más en las ciencias básicas, la física, la química y la biología. Ellas explican y dan sustento al cada vez mejor conocimiento de los complejísimos procesos fisiológicos, patológicos y terapéuticos, así como a los sofisticados tratamientos y diagnósticos actuales: láseres, radiomedicina, RMN, scanners, TAC.

Profesor Galindo: esperamos deseosos tu contribución a la noble tarea de esta, tu ahora nueva casa. Queremos aprender de ti. Queremos entre todos hacer buena esa convicción tuya de que la física está, y su estudio debe estar, siempre presente en la base misma de la biología y la medicina; una física que has cultivado con precisión y máximo rigor considerándola siempre, por encima de cualquier otra, la reina de las ciencias. Aún recuerdo cómo hace algún tiempo, cuando discutíamos un matiz físico sobre quiralidad molecular, me ofreciste el que sin duda sentías como tu mejor cumplido: «Me sorprende que un químico sea tan riguroso».

Como físico, pues, vas a recibir una medalla prestigiosa, vas a ocupar un sillón notable que, como nos has recordado en tu magnífico discurso, acogió antes a tres grandes de nuestra física contemporánea: Julio Palacios, Luis Bru y José Aguilar. Sabemos que la antorcha que hoy la Academia deposita en tus manos te confiere una gran responsabilidad, pero sabemos también que al entregártela no nos equivocamos.

He dicho.

AGRADECIMIENTOS

Mi reconocimiento agradecido a compañeros, discípulos y colaboradores de Alberto Galindo por los datos directa o indirectamente aportados.