

ESTUDIOS, NOTAS, TEXTOS Y COMENTARIOS

EL LENGUAJE DE LAS CIENCIAS FÍSICAS. ASPECTOS FORMALES, TÉCNICOS Y FILOSÓFICOS DE LA FÍSICA

MANUEL BÉJAR GALLEGO

Universidad Pontificia Comillas (Cátedra CTR), Madrid

RESUMEN: La física actual es una disciplina hiperformalizada. El avance en la investigación física requiere de tal especialización que se hace prácticamente imposible conseguir una visión de conjunto ajustada de toda la realidad física. Las exigencias técnicas dificultan el análisis metafísico de la investigación física al tiempo que proporciona potentes vías para profundizar con precisión en la estructura ontológica de la realidad. La física cuántica desarrollada en el siglo xx ha constatado una arquitectura fenomenológica que exige una revisión crítica de los presupuestos ontológicos clásicos. Todavía en el siglo xxi la física cuántica sigue desplegando su alcance explicativo y ya se han iniciado las primeras tentativas que proyectan su concepción de la materia hacia otros campos tradicionalmente abordados por las ciencias humanas clásicas. Sin duda nuestra concepción ilustrada de la realidad ha de abrirse a la luz de la física moderna y prepararse para una nueva cosmovisión de referencia que oriente el desarrollo del nuevo humanismo científico. En este artículo ofrecemos siete derivaciones metafísicas de la física moderna.

PALABRAS CLAVE: historia de la física, formalización físico-matemática, campos clásicos, física cuántica, partículas elementales, entrelazamiento, *qubits*, metafísica, ontología, neurología cuántica.

The language of the physical sciences. Formal, technical and philosophical aspects of physics

ABSTRACT: Nowadays modern physics is a highly formalized discipline. It is almost impossible to build a model of the whole reality because physical research requires too much specialization in local areas. Technical difficulties make harder the metaphysical analysis of the investigation. But physics is a powerful path to the very fundamental ontology. Quantum physics developed in the xx century has discovered new physical phenomena that demand a new revision of the classical ontological sets. Actually quantum physics continues improving its potential. In fact there are some heuristic theories that use quantum physics to operate in some research fields of classical human sciences. Certainly our old fashioned model of reality must be open to the last theories of modern physics. We should prepare for developing the new scientific-oriented humanism. In this paper we offer seven metaphysical derivations of quantum physics.

KEY WORDS: history of physics, mathematical and physical formalization, classical fields, quantum physics, elementary particles, entanglement, *qubits*, metaphysics, ontology, quantum neurology.

La física se ha consolidado en la historia como la ciencia de referencia por su alcance explicativo de la realidad y su potencial para predecir fenómenos. Si establecemos su origen como ciencia de la naturaleza en los siglos xv y xvi, podemos afirmar que el lenguaje argumentativo de sus inicios es bien distinto del sofisticado nivel de abstracción y

formalización matemática que caracterizan hoy a los modelos físicos contemporáneos. En caso de situar el nacimiento de la ciencia física, al menos germinalmente, en la cultura griega clásica, el recorrido evolutivo es aún mayor. Existe una marcada tendencia a despegarse cada vez más de los entresijos ontológicos, para permanecer sobre la superficie de los fenómenos y, desde lo fenoménico, fundamentar las matemáticas como lenguaje auxiliar de las ciencias físicas.

A lo largo de la historia, las matemáticas se han alzado como el lenguaje por excelencia de la física. En el siglo XIX, la teoría clásica de la luz fue interpretada como modulaciones del campo electromagnético a la luz de las ecuaciones de Maxwell. La teoría electromagnética es una importante cota del proceso de formalización de los modelos físicos. Sin embargo, las dos teorías físicas fundamentales del siglo XX, la Relatividad y la Cuántica, representan el triunfo de la formalización matemática y el ocaso de alternativas explicativas más conceptuales, propias de la filosofía de la naturaleza. Especialmente la física cuántica desarrolló unos exitosos niveles de abstracción matemática que, en cierto modo, derivó en la implementación ciega de un lenguaje técnico y preciso, para conseguir unas predicciones sin parangón en la historia de la ciencia.

En la actualidad, las ciencias físicas se nutren de un complejo lenguaje físico-matemático que exige una elevada especialización técnica tanto para la investigación en los distintos campos del conocimiento físico como para entender sus modelos físicos de la realidad. Ahora bien, los refinados lenguajes de la física, tan valiosos para explicar independientemente el cosmos a gran escala (cosmología relativista) y el microcosmos subatómico (teoría cuántica de campos), parecen incompatibles a la hora de ofrecer una imagen unitaria y global del universo físico en su conjunto. Los arduos trabajos de los físicos matemáticos para estirar al límite el lenguaje de la cosmología relativista y el lenguaje de la teoría cuántica de campos no han ofrecido resultados físicos en los últimos cincuenta años.

En esta línea, la denominada teoría de supercuerdas ofrece un exótico lenguaje matemático de geometrías multidimensionales sin referencia a fenómenos físicos. Semejante abstracción matemática se ha desligado de la realidad física que fundamenta la investigación físico-matemática. El exitoso proceso de formalización del lenguaje físico-matemático desarrollado durante los tres últimos siglos parece haber alcanzado un estadio donde es ya más propio hablar de dos lenguajes: el lenguaje formal consecuente con la abstracción matemática de los modelos físicos y un nuevo lenguaje físico por descubrir que integre nuevos conceptos físico-matemáticos: gravedad cuántica, energía del vacío, fondo de Planck...

La manera de producir conocimiento físico ha evolucionado en el tiempo. Existe un distanciamiento ontológico en el lenguaje actual de la física, cuyo enfoque principal se proyecta hacia una excesiva formalización matemática sin una imagen física clara de la realidad. En este artículo ofrecemos una visión evolutiva de los distintos lenguajes de la física en cada etapa de su proceso histórico, nos adentramos en algunas de las consecuencias ontológicas de la formalización matemática de los lenguajes cuántico y relativista en el siglo XX, y finalizaremos este trabajo iluminando un incipiente lenguaje humanista que sirva de plataforma conceptual para contribuir a la investigación de un lenguaje físico-metafísico capaz de abordar la realidad sin fisuras ni burbujas, en su conjunto.

1. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS LENGUAJES DE LA FÍSICA

La física es una ciencia experimental que trata los problemas más fundamentales de los fenómenos naturales, como la constitución de la materia hasta el nivel de partículas

elementales y la estructura del cosmos a gran escala. En su intento por dar a conocer el mundo, atendiendo a su estructura y funcionamiento, la física usa un lenguaje específico para describir las regularidades del universo y prepara el camino para formular la pregunta acerca de la posible existencia de una realidad última, unitaria y global.

Desde el punto de vista epistemológico más laxo, la ciencia física nace ya con la mitología clásica usada por el hombre para dar respuesta a los interrogantes de la existencia. La incesante y siempre insatisfactoria búsqueda de respuestas a los misterios de la naturaleza ha ido conformando y puliendo con el tiempo una forma de expresar los conocimientos del mundo. Nos referimos al lenguaje de las ciencias físicas. En un sentido más estricto, la física nace entre los siglos XVII-XVIII cuando los físicos modernos usan ya el lenguaje de las matemáticas en sus modelos físicos de la realidad. Pero no siempre fue así. Los griegos buscaban dotar de exactitud, coherencia y globalidad al lenguaje conceptual que empleaban en sus discursos filosóficos de la naturaleza. El legado griego, enriquecido por los árabes, llega al Occidente medieval donde acontece el nacimiento de la ciencia moderna¹.

En la actualidad, ya no es siempre tan evidente la lógica del discurso filosófico clásico en los modelos físicos de la realidad. Los conceptos más filosóficos que atienden a la realidad misma, se pierden entre la neblina de un lenguaje matemático muy técnico y sólo apto para iniciados. Hoy en día, no es posible comprender el lenguaje de la física sin entender la dimensión física del lenguaje matemático, pero no siempre fue así. Desde el mismo origen epistemológico de las ciencias físicas el conocimiento físico producido esgrimía un lenguaje referenciado a la ontología de la realidad. Sabemos que este conocimiento metafísico ha sido desacertado en muchas ocasiones y ha exigido reiteradas revisiones profundas a la luz de los nuevos experimentos y teorías científicas.

A nuestro entender el esfuerzo científico por comprender la realidad es siempre limitado y el conocimiento metafísico que se desprende es siempre perfectible. La realidad se antoja misteriosa y probablemente nunca pueda ser desvelada. Esta evidencia puede generar desasosiego entre los científicos y animarles a refugiarse permanentemente en la aparente seguridad funcional de un lenguaje físico restringido a la formulación de principios matemáticos que se ajusten al fenómeno observado. El fundamento epistemológico de la física es conocer la actividad física de la realidad y buscar sus causas en la realidad misma. Descuidar estos presupuestos epistemológicos está produciendo un creciente empobrecimiento del lenguaje físico que, sin quererlo, oscurece aún más el limitado acceso a la realidad en su conjunto. Como veremos perder definitivamente de vista la necesidad de un soporte material que cause la actividad física fenomenológica conlleva un insostenible irracionalismo causal.

1.1. *De la explicación mitológica del cosmos al lenguaje matemático de la física*

La ciencia es una actividad de conocimiento que forma parte de la cultura humana, la influye y se ve influida por ella. Como tal, la ciencia está enraizada en el pensamiento y la historia de los hombres. El lenguaje científico, por tanto, emplea conceptos epistemológicos culturales para explicar la realidad. En su evolución histórica, la ciencia ha ido refinando sus conceptos hasta conformar un lenguaje suficientemente inequívoco para expresar organizadamente el conocimiento producido en la observación de fenómenos naturales y su posterior experimentación.

¹ Cf. BOWLER, P. J., y MORUS, I. R., *Panorama general de la ciencia moderna*, Barcelona: Crítica, 2007.

La ciencia no siempre dispuso de un lenguaje capaz de desplegar el potencial epistemológico actual. El lenguaje de la ciencia es fruto de un proceso que arranca desde las formas más primitivas de conocimiento natural y que, poco a poco, van mejorándose a la luz de la razón crítica. El lenguaje de la física cosmológica es hoy el resultado de un largo proceso de desmitificación de la cosmogonía clásica. Es el producto de un tránsito epistemológico desde el saber cosmogónico cultural a la ciencia de la cosmología en su versión más experimental. Es decir, desde las explicaciones ligadas a los dioses a la implementación de un lenguaje más apto y práctico para describir físicamente la constitución y funcionamiento del cosmos. A medida que la sociedad va evolucionando y se va haciendo más compleja, se necesitan respuestas más precisas y adaptadas a las nuevas necesidades. En la ciencia actual, más desprovista del lenguaje filosófico, sigue dándose por supuesto que la naturaleza puede ser comprendida racionalmente. Esto es un presupuesto científico de marcado corte filosófico².

A partir del siglo VI a. C., los antiguos mitos son sustituidos por la filosofía de la naturaleza. La reflexión racional sobre el principio último de la naturaleza de las cosas sustituye a la pregunta por el origen mismo de la naturaleza. Esto supone una desviación epistemológica desde las causas que originan el mundo físico hacia un mundo eterno asumible por el lenguaje de la geometría.

Fueron los griegos quienes desarrollaron un lenguaje escrito eficaz para desarrollar sistemas de pensamiento filosófico que han influido a lo largo de la historia hasta nuestros días. Pronto las matemáticas ocuparon un lugar relevante en el pensamiento griego. También en Grecia, empieza la ciencia teórica, orientada a comprender la naturaleza en sí misma. Surge, pues, una preocupación de carácter fundamental que no se limita a la resolución de problemas prácticos. El pensamiento griego sobre la naturaleza se centra en explicar la compleja coexistencia de la unidad en la multiplicidad, del cambio y la permanencia. Los griegos se preguntan si existe una unidad última ontológica que fundamente el despliegue de la aparente multiplicidad fenomenológica³.

El lenguaje matemático parece ser la clave para desvelar el universo material, pues posee una formalización capaz de explicitar la regularidad de los fenómenos físicos. Las matemáticas de los modelos físicos trascienden la mera aplicabilidad a la resolución de problemas aritméticos y empiezan a calar como parte constituyente de los modelos físicos de la naturaleza⁴. La aplicación de las matemáticas a la mecánica fue sobre todo obra de Arquímedes en el siglo III a. C., quien pasó a la historia como el primer físico que implementó las matemáticas en el lenguaje de la física, con el objetivo de fundar una ciencia general, coherente y exacta. Con el deseo de dar coherencia a las generalidades de la física se impregna la ciencia de un lenguaje geométrico para crear una metodología que asemeje los modelos físicos a la exactitud de los teoremas matemáticos. Galileo se consideró siempre un discípulo de Arquímedes. La ruptura entre la física aristotélica y la aplicación de las matemáticas a los fenómenos naturales fue acrecentándose en algunos autores griegos posteriores.

En el siglo II D. C. Tolomeo diría que sólo el método matemático proporciona un conocimiento cierto y fiable porque estudia las cosas que son siempre lo que son, así como por su comprensión clara y ordenada. Está claro que Tolomeo aboga por la necesidad de implementar el lenguaje eterno de las matemáticas en las ciencias físicas para expli-

² Cf. MONSERRAT, J., *Epistemología evolutiva y teoría de la ciencia*, Madrid: Universidad Pontificia Comillas, 1984.

³ Cf. KRAGH, H., *Historia de la cosmología. De los mitos al universo inflacionario*, Barcelona: Crítica, 2008.

⁴ Cf. FEYNMAN, R., *El carácter de la ley física*, Barcelona: Tusquets, 2000.

car el cambiante mundo físico. *Almagesto* es la obra fundamental de Tolomeo, el compendio de astronomía más antiguo que usa el lenguaje matemático para explicar y predecir los movimientos celestes. No se trata, pues, de una nueva propuesta explicativa de corte puramente clásico; sino de un modelo que, en sintonía con la eterna estabilidad celeste de la filosofía griega clásica, pretende predecir los movimientos celestes y calcular sus posiciones pasadas. Es, sin duda, *la gran composición matemática de la astronomía*⁵. La terminología del lenguaje matemático empleado, *excéntricas, epiciclos, ecuan-tes y deferentes*, son la clave para entender el cosmos ptolemaico a partir de una combinación de técnicas geométricas.

En el medioevo, las matemáticas no se consideran verdaderas ciencias. Ya Aristóteles no las consideraba parte de la filosofía natural y Tomás de Aquino las aleja aún más del lenguaje físico, porque sus conclusiones son más bien parte de un proceso de abstracción que radica en la imaginación y no en la física de los sentidos. A su modo de ver, semejante nivel de abstracción sitúa el lenguaje matemático fuera de la ciencia, pues las demostraciones matemáticas son pruebas formales independientes de la realidad física. En contraposición, Bacon insistía en la necesidad del estudio de las matemáticas para descifrar los fenómenos de la naturaleza, incluso para teólogos. Bacon introdujo un estilo de pensamiento muy distinto. Empezó explicando a Aristóteles en París y reorientó a mitad del siglo XIII su dedicación hacia las matemáticas y la ciencia experimental con sus estudios de óptica. Si la teología entiende la creación como un acto libre de Dios, entonces el lenguaje de la naturaleza no puede construirse desde principios filosóficos necesarios. No hay razón para afirmar con seguridad que el origen mismo del universo fuera un acto necesario. Por el contrario, la regularidad de los patrones observados en el universo sí requiere de una descripción que, necesariamente, depende tanto de la experimentación como de las matemáticas. Se empieza así a revalorizar la conveniencia del lenguaje físico-matemático en el quehacer de las ciencias experimentales.

A partir del XIII surgen con fuerza nuevos estudios acerca del movimiento de los cuerpos sublunares, que pugnan contra la tradición aristotélica dominante que ligaba el movimiento a la sustancia. El círculo del Meron College de Oxford apoyó vigorosamente la idea de poder estudiar matemáticamente el movimiento como un fenómeno físico ajeno a las causas que lo producen. Aparecen las primeras interpretaciones geométricas que diferencian los movimientos uniformes de los uniformemente acelerados sin referencia a la sustancia del móvil. Las ideas platónicas más geométricas empiezan a atraer la atención hacia un estudio matemático-accidental del mundo físico, que se distancia del análisis cualitativo-sustancial de la física aristotélica y deriva en el nacimiento de una nueva forma de hacer filosofía natural a partir de principios matemáticos.

Observamos ya, antes de la revolución científica de la modernidad, una progresiva formalización matemática del lenguaje físico-filosófico. Las insalvables dificultades epistemológicas para conocer la realidad ontológica y la creciente facilidad para describir matemáticamente la regularidad de los fenómenos cosmológicos supusieron una incipiente transformación del lenguaje físico que se acentuaría gravemente tras la explosión de la ciencia moderna. Las repercusiones de este cambio de tendencia previo a la revolución científica han sido claramente positivas para la humanidad. El progreso cultural, tecnológico, social y económico ha sido evidente. Ahora bien, desde nuestra perspectiva contemporánea es inquietante cómo la persuasión por la funcionalidad predictiva y la coherencia geométrica de los siglos pasados nos sitúan frente a una eternidad matemá-

⁵ Cf. Udías, A., *Historia de la física: de Arquímedes a Einstein*, Madrid: Síntesis, 2004.

tica asumida, que no ha sido reformulada sólidamente en un lenguaje físico-metafísico capaz de ofrecer una imagen científica de la realidad.

1.2. *De las armonías celestes al lenguaje matemático de la mecánica clásica*

En la misma línea experimental de los empiristas de los siglos XIII y XIV, Ockham defendió que los conceptos universales son meros nombres (nominalismo) sin existencia real (realismo). Usó frecuentemente el principio de que en filosofía la explicación más sencilla es la que debe aceptarse: *no se debe afirmar una pluralidad sin necesidad*. Hablamos de la célebre navaja de Ockham.

El revolucionario giro del tradicional geocentrismo clásico al nuevo modelo heliocéntrico del cosmos representa un buen ejemplo de la navaja de Ockham. En el siglo XVI Copérnico deseaba evitar las complicaciones de la cosmología de Tolomeo, especialmente en lo referente a la inclusión de ideas geométricas innecesarias como la del ecuante. Su apuesta por el heliocentrismo se debe a un principio de simplicidad epistemológica que derivó en un lenguaje explicativo más conciso y de mayor sencillez matemática.

El giro copernicano pone en tela de juicio muchas ideas de la tradición aristotélica. Si la Tierra no está en el centro del universo, la gravedad no es exclusiva de la Tierra y debe extenderse a todos los astros. Y, más aún, la separación del mundo terrestre y el celeste deja de tener sentido. Sin embargo, la pretensión de Copérnico era simplemente adaptar el modelo tolemaico a los nuevos datos astronómicos. Es decir, su trabajo partió de la misma filosofía aristotélico-tolemaica que explicaba los movimientos celestes mediante combinaciones de movimientos circulares uniformes provocados por las esferas. Lo que empezó siendo una propuesta simplificada del modelo tolemaico acabó convirtiéndose en el modelo cosmológico de referencia que mejor se ajustaba a las nuevas observaciones celestes.

Las observaciones de cometas rompen definitivamente con la cosmología aristotélico-tolemaica. Observaciones más precisas convencen de la mayor funcionalidad del modelo de Copérnico. La labor de observación más importante fue realizada por Tycho Brahe con el apoyo del rey danés Federico II, quien le cedió la isla de Hven para instalar su observatorio astronómico: el Uraniborg. De sus observaciones se sigue que al menos los planetas interiores giran alrededor del Sol. Su pretensión fue crear un modelo alternativo al de Copérnico que, derivado de las observaciones, evitara el incómodo movimiento terrestre. Brahe presentó una nueva alternativa en cosmología: el denominado modelo tychónico, que fue el preferido por los célebres astrónomos jesuitas tras la condena eclesiástica del heliocentrismo⁶.

Finalmente, Brahe abandona Dinamarca para trabajar como matemático real en la corte de Rodolfo II en Praga, ciudad de la cultura y el comercio europeo, donde conocería a Kepler. Kepler termina haciéndose con los datos experimentales celosamente custodiados por Brahe y se hace consciente de que el danés no había sacado todas las posibles consecuencias físicas de sus excelentes observaciones astronómicas. A partir del bagaje experimental de Brahe, Kepler dedujo tres leyes matemáticas sobre el movimiento planetario, introdujo la elipse y suprimió los epiciclos que aún conservaba el modelo copernicano. La cinemática de la escuela mertoniana de Oxford obtuvo así un mérito de dimensiones cosmológicas, pero reminiscencias de la filosofía aristotélica exigían

⁶ Cf. WHITEHOUSE, D., *Galileo. Vida y destino de un genio renacentista*, Köln: Evergreen, 2009.

esclarecer la pregunta por las causas del movimiento. ¿Qué pone en movimiento los planetas?

A esta pregunta Galileo dio respuesta en el siglo XVII postulando una extraña inercia circular de los planetas, insistiendo siempre en exponer matemáticamente los problemas suscitados por la mecánica celeste. Propuso que la pregunta clave no es tanto la finalidad del movimiento como la relación entre el espacio, tiempo y velocidad. Galileo defendió el sistema de Copérnico basando su juicio en las observaciones. Sin embargo, contrariado por las elucubraciones de Kepler —que aún expresaba el movimiento planetario con un lenguaje plagado de imágenes de esferas y armonías celestes— no supo aprovecharse de las verdaderas aportaciones científicas del astrónomo alemán. En realidad, la vertiente supersticiosa de la astrología kepleriana mantuvo una prudente distancia intelectual entre Galileo y Kepler. Consciente de la problemática consecuente al profundo cambio epistemológico revolucionario que suponía defender la teoría copernicana como modelo de la realidad física y no como una artimaña que facilitara los cálculos astronómicos, Galileo no participó de los consiguientes debates ontológicos sobre la revolución copernicana, mantenidos por Bruno.

Como hombre de carácter que fue, Galileo se vio envuelto en disputadas dialécticas acerca de la preponderancia de los distintos modelos cosmológicos, así como mantuvo polémicas discusiones científicas con astrónomos jesuitas. A saber, con Sheiner sobre la prioridad en el descubrimiento de las manchas solares y con Grassi sobre la observación de los cometas que, interpretados como astros celestes en la línea de Copérnico y Kepler, refutaban los modelos clásicos. Galileo no pudo presenciar las observaciones de un cometa por enfermedad y optó por defender la tesis aristotélica afirmando que eran simples fenómenos producidos en la atmósfera terrestre.

Con el avance matemático de las escuelas de Oxford y Cambridge se intensifica el proceso de formalización matemática de la física y comienzan a esclarecerse conceptos del lenguaje físico tan importantes para los siglos venideros como la inercia o la cantidad de movimiento de los cuerpos movimiento, las fuerzas que causan las variaciones en los movimientos o los primeros apuntes de la gravedad como fuerza centrípeta que rige los movimientos celestes. Poco a poco, los físicos de la tradición clásica van quedando al margen y se implanta una visión mecanicista, matemática y experimental de la naturaleza, muy alejada de la física aristotélica. La geometría analítica (equivalencia entre figuras geométricas y ecuaciones algebraicas), el cálculo diferencial e integral y el cálculo de probabilidades potencian esta asimilación del lenguaje matemático por las ciencias físicas. Con Descartes se introduce ya de una manera clara la idea de la inercia. En consecuencia, el movimiento circular sólo puede darse si existe una acción externa sobre el cuerpo que se mueve. Newton acabaría por precisar la acción gravitatoria que explica el movimiento de los cuerpos celestes.

Con Newton la filosofía de la ciencia se centra en los principios generales de las observaciones y experimentos. El lenguaje matemático se considera como la última formalización explicativa de los fenómenos físicos. Newton no participó en el debate filosófico sobre las causas de la gravedad, pues no cabían dentro de la filosofía experimental del método científico. Sin embargo, su propuesta físico-geométrica sería decisiva en la historia de la ciencia.

Copérnico supo situar el planeta Tierra al mismo nivel que los demás errantes. Brahe consiguió eliminar las innecesarias esferas celestes y propuso un ímpetu como motor de los planetas. Galileo eliminó la idea aristotélica del lugar natural de los cuerpos asignando una especie de inercia circular a los astros y dotando a cada uno de ellos de una tendencia gravitatoria natural dirigida hacia el centro de los cuerpos. Kepler rompió el hechizo clásico del círculo al introducir las órbitas elípticas y usó un extraño efluvio mag-

nético que dirigía y cohesionaba el sistema solar. Descartes unifica cualitativamente el movimiento de los astros con la caída de graves en la Tierra. Con Newton, todo sería cuantitativamente unificado con su principio de gravitación universal. Ahora bien, su propuesta de fuerzas gravitatorias a distancia configuró un lenguaje mecánico que no satisfizo sus inquietudes más ontológicas. ¿Qué causa las fuerzas físicas a distancia?

Los siglos XVIII y XIX producen un enorme desarrollo de la actualmente denominada mecánica clásica y se confirma la decadencia de las universidades medievales de teología. La Ilustración nace de la confianza del hombre en el uso de su razón para transformar la sociedad, la cultura, la política y la religión. Es precisamente en esta época cuando se acuñan los términos *científico* y *físico*. El lenguaje usado para describir la concepción del universo es fuertemente mecanicista, determinista y proclive a subrayar la autonomía física del universo. En algunos casos estas posturas condujeron a proponer la ciencia como un sustituto de la religión. El lenguaje usado primeramente en las universidades de Göttingen y Berlín, y posteriormente en Oxford y Cambridge fue evolucionando hacia tomar una orientación predominantemente científica.

La mecánica clásica del siglo XVIII se caracteriza por la aplicación sistemática del cálculo a los problemas de física en la nueva mecánica analítica. Euler fue el primero en representar las velocidades y las aceleraciones con la notación moderna del lenguaje matemático de las derivadas. Lagrange profundizó en la resolución de problemas físicos restringiéndose al uso argumentos intuitivos formales propios del álgebra y del cálculo. Hamilton reformuló el principio de mínima acción de Maupertuis con el lenguaje de la mecánica analítica, cuyas exitosas aplicaciones inundaban campos tan variados como la dinámica de fluidos o la ingeniería civil, avalada por el éxito del nuevo lenguaje matemático-analítico de las ciencias físicas. La obra más relevante del siglo XIX sobre la aplicación de los principios de la mecánica newtoniana al movimiento de los astros fue el tratado de mecánica celeste de Laplace, quién usó el lenguaje de la probabilidad para tratar problemas de la ocurrencia de sucesos en la naturaleza. Fiel a la filosofía de la ilustración, Laplace entendía el universo como un sistema totalmente determinista regulado por las leyes eternas de la mecánica. Con los debidos datos experimentales, un endiablado científico podría conocer a su antojo los estados pasados y futuros de todo el universo. La eternidad que caracterizaba antiguamente a los armónicos movimientos celestes queda recogida en la modernidad como parte de un nuevo lenguaje mecánico de leyes físicas eternas, universales y necesarias⁷.

Tras la revolución científica de la modernidad se consolida el triunfo del formalismo matemático en el lenguaje de la física, avalado por el exitoso funcionalismo físico-matemático para describir la regularidad del cosmos. La culminación del poder descriptivo del lenguaje físico-matemático no fue un camino sin tropiezos. A nuestro entender, el postulado de la inercia circular de Galileo es un intento por salvar la eterna regularidad de las esferas celestes y esquivar la gran pregunta que suscita la realidad: ¿qué origina el movimiento? Descartes reformula el concepto de inercia y Newton interpreta las acciones físicas como irrupciones en la inercia lineal de los cuerpos. Sin embargo, Newton no olvidó preguntarse por la naturaleza de la acción gravitatoria a distancia; aunque no nos consta que ofreciera interpretación alguna. Quizás por ello el lenguaje de la física dio por supuesta la autonomía de un universo reglado por leyes matemáticas. La paulatina mecanización del lenguaje de la física no fue perfecta y sin lugar a la duda. El mismo Newton introdujo conceptualmente el caos en el universo y asignó a Dios la necesaria

⁷ Cf. SÁNCHEZ RON, J. M., *Historia de la ciencia. Edad contemporánea*, Madrid: Espasa Calpe, 2008.

potestad de regular las afecciones caóticas. Igualmente Laplace, el padre del determinismo universal, fue él mismo quien introdujo el concepto de probabilidad. Caos y azar son elementos de análisis que se formularán con mayor precisión en el nuevo lenguaje de la física en los siglos XIX y XX.

1.3. *Del lenguaje industrial de la física del siglo XIX a los albores de la física moderna*

El Renacimiento supuso una época de importantes innovaciones técnicas de la mecánica con relevantes consecuencias culturales y económicas, que afectaron al lenguaje científico. La cultura tecnocientífica trascendió los límites universitarios alcanzando las fronteras de la política y la estrategia militar. En general, la cultura se fue impregnando del saber tecnocientífico y la epistemología de la ciencia en particular recogió esta predisposición cultural al conocimiento. De ahí que la física de los siglos XVII, XVIII y XIX se denomine física mecánica o mecánica clásica.

En la misma línea, la investigación matemática se dedicó especialmente al desarrollo de la mecánica teórica que configuraría el programa tecnocientífico de la revolución industrial. Durante la revolución industrial la ciencia se vio claramente favorecida por su relación con la tecnología; aunque según avanza la historia queda más difuminada la frontera entre lo puramente científico y lo estrictamente técnico. Sin duda, los avances tecnocientíficos fueron la principal señal de identidad de la sociedad europea de la revolución industrial. Más allá de los claustros académicos, la popularización de la tecnociencia experimental permitió difundir el lenguaje científico, entre la sociedad general⁸.

A comienzos del siglo XIX, una vez establecidos los principios de la electrostática por Coulomb y la corriente eléctrica por Galvani, se había dejado de lado la búsqueda de las causas de los fenómenos eléctricos. Los científicos se centraron en la investigación de las estimulantes consecuencias tecnológicas de la electricidad. Dos fenómenos conocidos desde la Antigüedad como la electricidad y el magnetismo empezaron a interpretarse como partes constituyentes de una misma realidad campal denominada electromagnetismo. A partir de las observaciones de Oersted y los experimentos posteriores de Ampère, *el Newton de la electricidad*, se demostró que electricidad y magnetismos son dos fenómenos físicos interdependientes. Pero fue Faraday quien introdujo un nuevo lenguaje de líneas de fuerzas y campos que reorientarían la interpretación conceptual moderna del electromagnetismo de las teorías de campos.

El afortunado caso de Faraday, un aprendiz de encuadernación, es realmente asombroso por su escasa formación académica, su increíble habilidad como experimentador y su fina intuición física. Su influjo en la nomenclatura moderna de la física de campos fue decisivo para que otro gran científico consolidara matemáticamente sus propuestas conceptuales. El perfil académico e investigador de Maxwell es diametralmente opuesto al de Faraday. Su minucioso trabajo teórico condujo no sólo a la unificación de la electricidad y el magnetismo como un único fenómeno campal electromagnético, sino también a entender la luz desde el lenguaje matemático de los campos electromagnéticos y a poder analizar su composición ondulatoria mediante espectrógrafos. El análisis espectrográfico de la luz fue decisivo para entender la composición química de las estrellas y la estructura atómica de la materia⁹. Como consecuencias de esta interpretación campal de las ondas, la técnica de los sistemas

⁸ Cf. EDGERTON, D., *Historia de la tecnología moderna*, Barcelona: Crítica, 2007.

⁹ Cf. SÁNCHEZ RON, J. M., *Historia de la física cuántica I. El período fundacional*, Barcelona: Crítica, 2001.

de comunicación a distancia se pobló del lenguaje físico de los campos electromagnéticos. La lenta comunicación por mar se vio beneficiada de la alta velocidad de propagación de información a través de ondas electromagnéticas de radio. Nos referimos a la transmisión comercial de mensajes por radio diseñada por Marconi.

Otro ejemplo paradigmático que enriqueció el lenguaje de la física —y a la larga ofrecería una idea aproximada de los estadios finales del universo— fue la creación de la termodinámica. Los conocimientos tecnocientíficos de Watt sobre el calor y su transformación en trabajo mecánico fueron decisivos tanto para la creación de la máquina de vapor que revolucionó la industria, como para la construcción de una nueva mecánica estadística que explicara las propiedades termodinámicas macroscópicas a partir de resultados estadísticos del régimen microscópico. La máquina de vapor transforma la energía termodinámica del vapor de agua en energía mecánica. Las aplicaciones industriales de la máquina de vapor son numerosas: bombas mecánicas, locomotoras, motores marinos... Una aplicación a destacar, por cumplir con la unificación práctica del electromagnetismo y la termodinámica del siglo XIX, es la conversión de energía mecánica en electricidad; es decir, un generador eléctrico que transforma la energía cinética de los sistemas termodinámicos en energía eléctrica.

La mecánica estadística pretende explicar las propiedades macroscópicas de los sistemas termodinámicos formados por un elevado número de partículas a partir de leyes estadísticas de sus constituyentes atómicos. El lenguaje de la termodinámica invadió rápidamente el vocabulario del acervo popular. La energía es un término físico clásico que se clarificó y popularizó en el siglo XIX. La entropía termodinámica, inicialmente definida para definir los estados termodinámicos de equilibrio, se usa hoy también en varios campos de la física moderna: en teoría de la información para medir el ruido de una comunicación, en cosmología para describir la dinámica evolutiva del universo o en la física de sistemas complejos alejados del equilibrio como en los sistemas biológicos vivos. El cero absoluto de temperatura es un límite infranqueable para los sistemas físicos. No puede haber menos energía que ninguna energía en absoluto. Todo sistema físico tiene una energía fluctuante residual con importantes consecuencias cosmológicas desarrolladas en la física cuántica del siglo XX.

2. EL LENGUAJE DE LA FÍSICA CLÁSICA EN EL SIGLO XX

La física, como ciencia experimental que es, está basada en las relaciones entre observables físicos y medidas instrumentales. Estas relaciones se expresan mediante leyes físicas que plasman en lenguaje físico-matemático los invariantes observados experimentalmente. Al tratarse de una ciencia positiva los invariantes serán siempre relativos, es decir, refutables en futuros experimentos. El lenguaje de la física sintetiza los conocimientos de las estructuras estables de la dinámica física universal, que son explicados mediante leyes físicas con una estructura matemática que permanece invariante frente a ciertas transformaciones matemáticas.

La epistemológica de la ciencia ha evolucionado hacia una idea relativista del orden físico. Si bien Newton habla en sus *Principia*¹⁰ de un espacio y tiempo absolutos como sensorio de Dios, tanto él como Galileo conciben un universo físico donde no existe un centro espacial distinguido, ni una reseña temporal característica. Con sus estudios de

¹⁰ Cf. NEWTON, I., *Principios matemáticos de la filosofía natural*, Madrid: Alianza, 2011.

la naturaleza, Galileo y Newton condujeron a la ciencia física hacia un terreno relativista sin sistemas de referencia especiales donde las leyes físicas son las mismas con independencia de rotaciones en el sistema de referencia, de acuerdo con la dinámica newtoniana. Newton ponía la confianza en un Dios relojero que ajusta la mecánica celeste para que el cosmos no decayera en un caos planetario debido a las pequeñas descompensaciones en las fuerzas gravitatorias. Su cosmología personal difiere mucho de la cosmología actual fundada en los modelos cosmológicos acerca de un universo dinámico en continua evolución, pero su idea del dinamismo cósmico estacionario influiría en la cosmología de Einstein, el personaje más influyente del siglo xx.

La física ha ido incorporando del lenguaje matemático una serie de transformaciones que han configurado geoméricamente la cosmovisión física moderna. Desde tiempos de Galileo se estudió las transformaciones de coordenadas entre dos observadores en movimiento relativo que describen el movimiento de un mismo cuerpo. Con la teoría electromagnética de Maxwell, fue necesario establecer nuevas transformaciones cuando las velocidades se acercaban al límite clásico de la velocidad de la luz. Estas nuevas transformaciones, denominadas transformaciones de Lorentz, suponen una nueva interpretación geométrica de la gravedad y del espacio-tiempo. La idea de espacio y tiempo es muy diferente para Newton y su física fundada en las transformaciones de Galileo, que para Einstein, cuya ley de gravedad fundamenta sus modelos cosmológicos espaciotemporales.

El lenguaje de la física del siglo xx es el resultado de la formalización físico-matemática de la revolución epistemológica iniciada en la modernidad. Se mantiene la idea de una ley como principio rector del orden físico, pero los fundamentos físicos se difieren a la interpretación geométrica de un lenguaje matemático más técnico. Este aparato matemático no es experimental en sí mismo, sino que proyecta leyes físico-matemáticas, que sí pueden someterse a la experimentación. Sin embargo, la estructura matemática subyacente no es física en sí misma y, por tanto, no ofrece conclusiones metafísicas. De este modo, el lenguaje de la física se desliga cada vez más de lo ontológico y se nutre, casi exclusivamente, de un andamiaje matemático de marcado corte idealista. Se va anticipando una tendencia que no hará sino calar profundamente en la comunidad científica de los físicos del siglo xxi hasta, incluso, llegar a afirmar que toda la realidad física es, en última instancia, pura información. Sin una definición experimental de información, sin más que un lenguaje matemático que no distingue entre información y probabilidad, parece lógico caer en un idealismo formal¹¹.

2.1. *De las transformaciones de coordenadas a la geometría del universo*

En la física aristotélica existe una concepción absoluta del espacio descrita por la geometría de Euclides¹². Todos los puntos del espacio físico mantienen su identidad con el paso del tiempo como los puntos de un espacio euclidiano de tres dimensiones (E^3). Según Aristóteles, el mundo es eterno; por tanto, no existe un instante de tiempo privilegiado, digamos un tiempo cero. Consecuentemente, el tiempo aristotélico es un espacio infinito unidimensional euclidiano (E'). Desde el lenguaje de la física-matemática, podemos pensar que la estructura del mundo aristotélico, es una correspondencia entre

¹¹ Véase más adelante el punto 3.4 de este artículo.

¹² Aunque Euclides fuera un niño a la muerte de Aristóteles, éste pudo conocer la geometría euclidiana, pues parece ser que Euclides no innovó, sino que realizó un compendio de toda la geometría descubierta hasta entonces.

espacio (E^3) y tiempo (E^1); es decir, un espacio-tiempo absoluto ($E^3 \times E^1$) donde es posible diferenciar las distancias espaciales y los intervalos temporales, pues espacio y tiempo son realidades independientes.

En el siglo XVI, Galileo estableció el principio de invariancia de las leyes físicas frente a cambios de sistemas de referencia inerciales, es decir, sistemas sin aceleración. De acuerdo con este principio, las leyes de la física permanecen inalterables con independencia de la velocidad del sistema de referencia no acelerado. Galileo ya había descubierto que el estado de movimiento de un cuerpo descrito por dos observadores inerciales (x, X) es el mismo si se toman en cuenta unas transformaciones de las coordenadas de los sistemas de referencia ($x = X + Vt$).

Las transformaciones de Galileo ligan las posiciones de un cuerpo observadas por dos observadores que se mueven relativamente a velocidad constante (V) y, por tanto, perciben velocidades diferentes para un tercer móvil que se observe desde uno (v_x) o desde el otro (v_X). Básicamente, estas transformaciones de referencia mantienen la ley de la suma de velocidades ($v_x = v_X + V$) y postulan que el tiempo medido por cada observador es el mismo ($t = T$). Se trata, pues, de una concepción clásica del espacio y del tiempo como magnitudes absolutas independientes, donde no es posible diferenciar el movimiento del reposo absoluto. En realidad es imposible decidir si X se mueve y x está parado, o viceversa, pues sólo los movimientos relativos son físicamente detectables.

El principio de invariancia de Galileo exige una transformación del espacio-tiempo aristotélico. En el espacio-tiempo de Aristóteles no hay criterio para afirmar o negar que un punto del espacio ocupado por una partícula, sea el mismo en otro instante. Sin embargo, de acuerdo con la física de Galileo, carece de sentido afirmar absolutamente que una partícula permanece en un mismo punto del espacio durante un cierto intervalo de tiempo; puesto que no es posible diferenciar si está en reposo o en movimiento absoluto. En consecuencia, el lenguaje de la física debe ser invariante ante la posibilidad de movimiento absoluto. No es posible afirmar o negar que la partícula ocupe el mismo punto del espacio en términos absolutos. Pero el espacio absoluto es irrelevante en el lenguaje de la física, porque las transformaciones de Galileo exigen que la física no dependa de estas cuestiones metafísicas. La física no puede distinguir el estatus ontológico de la partícula referido a un sistema absoluto; simplemente, es invariante ante transformaciones de sistemas de referencia relativos. En el mejor de los casos, el lenguaje físico-matemático queda a ras de un desconocido fondo ontológico.

Como es imposible mantener una relación entre las posiciones espaciales de una partícula en dos instantes de tiempo, se requiere ampliar el lenguaje físico-matemático con una nueva geometría que describa un espacio-tiempo provisto de la invariancia de Galileo. Para ello, se necesita una nueva estructura geométrica denominada *fibrado*, que asocia a cada instante de tiempo de (E^1) todo un espacio (E^3) distinto. De esta manera se pierde la identificación entre los puntos del espacio de un instante a otro, aunque la estructura sigue gozando de cierta unidad matemática, que permite el movimiento o reposo relativos de una partícula a través de infinidad de espacios (E^3) a lo largo de un tiempo absoluto (E^1). Con el principio de invariancia, Galileo destierra parte del lenguaje metafísico del campo de acción de las ciencias físicas. Su estudio, sin embargo, es limitado; pues, sólo trata de movimientos uniformes. Al incluir las aceleraciones de los movimientos, será necesario introducir nuevos elementos geométricos que modifican la estructura geométrica del universo físico¹³.

¹³ Cf. PENROSE, R., *The road to reality. A complete guide to the laws of the universe*, New York: Knopf, 2005.

Sabemos que la electrodinámica clásica de Maxwell impulsó la física tanto a nivel técnico (ondas de radio) como conceptual (campos de luz). Sin embargo, la formalización matemática clásica del electromagnetismo es representante también de un hito teórico que reorienta el lenguaje de la física en sus versiones clásica decimonónica y cuántica contemporánea. La velocidad de propagación de los campos electromagnéticos resulta de la teoría de Maxwell como una constante absoluta que tan sólo depende de las propiedades electromagnéticas del medio y, por tanto, es independiente del estado de movimiento del observador. Es decir, las leyes del electromagnetismo no dependen del sistema inercial de referencia, en perfecto acuerdo con el principio de invariancia de Galileo. Ahora bien, la ley de suma de velocidades de Galileo ya no se cumple, pues todo observador debe medir la misma velocidad de la luz, independientemente de su estado de movimiento.

El carácter absoluto de la velocidad de la luz exige introducir un nuevo principio de invariancia para que, con independencia de la velocidad del sistema de referencia, todo observador mida invariante la misma velocidad de propagación lumínica (c). La constancia de la velocidad de la luz dota al espacio-tiempo de una estructura fundamental que afecta tanto al espacio como al tiempo. La Teoría de la Relatividad espacial de Einstein (1905) incluye el principio de invariancia de Galileo y lo generaliza para preservar la constancia de la velocidad lumínica. De esta manera, las leyes de cambio de las coordenadas de dos observadores inerciales siguen las transformaciones espaciotemporales de Lorentz.

Estas son las nuevas transformaciones que preservan la invariancia relativista de la velocidad de la luz. A bajas velocidades las transformaciones relativistas se reducen a la clásica suma de velocidades. Por este motivo las sorprendentes consecuencias de la Relatividad no se perciben en los sucesos cotidianos. Se recupera así la invariancia clásica y la estructura del espacio-tiempo se asemeja al espacio y tiempo de Galileo.

Como consecuencia de esta estructura lorentziana que preserva la invariancia de la velocidad de la luz, espacio y tiempo dejan de ser magnitudes absolutas independientes. La magnitud de referencia es ahora el espacio-tiempo. Los intervalos temporales entre dos sucesos, así como las distancias que los separan son magnitudes relativas al sistema de referencia. Conceptos clásicos como la distancia, duración o simultaneidad pierden su carácter absoluto. Las leyes de la física, independientes del estado metafísico de reposo o movimiento uniforme, no distinguen cuestiones acerca de la permanencia ontológica del lugar (principio de invariancia de Galileo) ni entre el espacio y el tiempo absolutos (principio de relatividad de Einstein). El lenguaje de la física relativista no habla ya de espacio y tiempo en el sentido epistemológico de Newton, sino de reglas y relojes con longitudes y ritmos en dependencia directa con el movimiento relativo del observador. Es más, la invariancia Lorentz sitúa en pie de igualdad a todos los puntos del fibrado y, por tanto, las cuestiones metafísicas se hacen más indistinguibles aún.

La constancia de la velocidad de la luz estructura el espacio-tiempo de tal manera que se asocia un cono de luz a cada punto del fibrado. La luz se propaga en trayectorias tangentes a cada cono de luz y cualquier otra partícula se desplaza por el interior de estos conos. Así, no todos los puntos del fibrado pueden formar parte de la misma trayectoria y la estructura de conos de luz permite hablar del principio de causalidad física que establece una relación causal pasado-futuro entre algunos sucesos del espacio-tiempo. Dos sucesos en conexión causal están separados por un intervalo temporal y dos sucesos sin conexión causal lo están por un intervalo espacial. En general, para cualesquiera dos sucesos en conexión causal existe al menos un observador que los ve en el mismo espacio. Y para cualesquiera dos sucesos en conexión temporal existe al menos un observador que los ve simultáneamente. De donde se sigue que un mismo suceso está en el futu-

ro para un observador, mientras que el otro ya lo recuerda como pasado. Ni espacio ni tiempo son absolutos.

Con la publicación de los *Principia* en 1687 se presenta el principio fundamental de la dinámica, que permite distinguir entre movimientos rectilíneos uniformes y movimientos acelerados. En ausencia de fuerzas (caso galileano) la partícula describe una trayectoria recta con velocidad constante como indica el primer principio de Newton, el principio de inercia. Cuando aparecen fuerzas, las partículas ya no están *obligadas* a describir trayectorias rectilíneas, pudiendo trazar una mayor variedad de caminos; se dice entonces, que las partículas sufren aceleraciones. Newton distingue entre fuerza viva (*vis viva*), la inercia o energía cinética de un cuerpo en movimiento uniforme y *vis impressa* como agente del cambio de velocidad en un movimiento. Ante tal diversidad de trayectorias (con y sin aceleración) se necesita introducir un elemento geométrico distintivo en física relativista: la derivada covariante o conexión.

A diferencia de los objetos físicos de la mecánica clásica y su dinámica newtoniana, en la teoría de Einstein aparecen sucesos y procesos que surgen y transcurren en el espacio-tiempo. Según la teoría de la relatividad, existe una relación de semejanza entre sucesos-procesos y ciertas cantidades invariantes bajo ciertas transformaciones. Las leyes de la física deben tener la misma forma en cada sistema de referencia. Este postulado, el principio de relatividad, es una propuesta heurística que no ha encontrado refutación experimental alguna. En este marco, las partículas no pueden considerarse como puntos de partida para el razonamiento del mundo físico. Más bien, son abstracciones de una única totalidad indivisible en continuo dinamismo: el espacio-tiempo donde se producen la síntesis de partículas en un orden físico explícito, a partir de la condensación del campo de energía implicada. Se trata de una entidad formada por sucesos espacio-temporales conectados localmente; es decir, que los acontecimientos en una región de espacio-tiempo sólo afectan a otra región distante una vez ha transcurrido el tiempo suficiente para que la última sea afectada causalmente por la primera. Así, pues, el lenguaje de la física relativista presupone la continuidad, el determinismo y la localidad.

El principio de equivalencia de Einstein (1907), incluido en su teoría de la relatividad general, establece que no es posible distinguir si una fuerza constante es consecuencia de una interacción gravitatoria o de un estado de aceleración. De esta manera no es posible distinguir entre una caída libre en un campo gravitatorio y una trayectoria acelerada cualquiera. Por tanto, se puede pensar que la caída libre en un campo gravitatorio equivale a un movimiento natural por un espacio-tiempo curvo cuya curvatura produce la aceleración del sistema. En consecuencia, no es posible distinguir como Newton entre movimientos inerciales y acelerados. Por el principio de equivalencia no hay manera local de distinguir un campo de gravedad o una aceleración. Es más, la caída libre en un campo de gravedad es experimentada como un movimiento inercial por el observador que cae. El principio de equivalencia exige una nueva estructura que generalice la noción de movimiento inercial: la conexión. La conexión estructura el espacio-tiempo y permite discriminar entre geodésicas, trayectorias rectilíneas en un espacio dado, de cualesquiera otras trayectorias aceleradas definidas por una cierta curvatura. La gran intuición de Einstein fue ver la equivalencia entre movimientos acelerados y las geodésicas en espacio-tiempo curvos.

La física relativista proporciona una imagen de la geometría del mundo físico basada en las transformaciones matemáticas de las coordenadas entre sistemas de referencia inerciales, así como en la equivalencia de sistemas inerciales y sistemas en caída libre. Cuanto más usa la física el lenguaje matemático, tanto más prescinde de las cuestiones metafísicas para dar cuenta de fenómenos físicos como el carácter absoluto de la velocidad de la luz. Aún así nos ofrece una concepción ontológico-geométrica del mundo.

Nos dice cómo debe ser la ontología geométrica del mundo físico para que acontezcan los fenómenos físicos observados. Puede haber quien opte por continuar pensando una metafísica racional al margen de la física. La alternativa es pensar una metafísica coherente con las teorías físicas que permitan entender cuestiones metafísicas con futuras implicaciones físicas. Nos referimos a pensamientos metafísicos contruidos desde las teorías físicas que permitan explicar cuestiones puramente metafísicas como el origen del tiempo o qué condiciones ontológicas son necesarias para que emerja el orden de las estructuras físicas complejas.

2.2. *De la física relativista al modelo cosmológico del Big Bang*

La cosmología clásica griega se basaba en una concepción circular del tiempo pausada por los eternos movimientos circulares de las esferas celestes. Con su Teoría de la Relatividad Einstein refutó la idea de un tiempo cósmico absoluto. No existe un río del tiempo absoluto. En el lenguaje de la física relativista los conceptos *ahora*, *antes* y *después* pierden su significado clásico y carecen de la validez universal para ordenar instantes de tiempos en una secuencia lineal. No existe un río temporal ni circular (concepción griega) ni lineal (concepción cristiana). En física relativista parece que el tiempo es simétrico y no fluye¹⁴. Sin embargo sí se acepta cierto dinamismo, pues las partículas se entienden como concentraciones locales de energía en el espacio-tiempo. De igual manera la geometría de nuestro universo es especial y acepta un tiempo cosmológico coordinado, es decir, una referencia temporal universal que fundamenta fechar el origen de la actividad física del un universo en un Big Bang acontecido hace trece mil quinientos millones de años¹⁵.

Laplace estaba convencido de que la gravedad afectaba por igual a la luz que al resto de materia. De hecho, fue el primero en predecir cómo una estrella se haría invisible al convertirse en un agujero negro por interacción gravitatoria. Con las fuerzas a distancia de Newton, el campo gravitatorio diverge al infinito cuanto más se comprime un cuerpo en un punto. De acuerdo con la teoría general de la relatividad (1915) cualquier tipo de energía es una fuente gravitatoria. Con este presupuesto y el dinamismo geométrico del espacio-tiempo la relatividad de Einstein ofrece una explicación de la gravedad prescindiendo de fuerzas a distancia. Además, la nueva teoría de la gravedad da cuenta de fenómenos inexplicables por la física newtoniana como son los agujeros negros, la rotación de las órbitas planetarias, las ondas gravitatorias y los efectos gravitatorios sobre la luz: curvatura de los haces de luz y su variación de frecuencia en presencia de gravedad¹⁶.

Durante las tres primeras décadas del siglo xx, cuajó la idea de un universo eterno. Cualquier comienzo físico en el tiempo suponía una singularidad temporal inaceptable. Desde 1917 la Teoría de la Relatividad de Einstein se aplica a los modelos cosmológicos. Fiel a su época y a la regularidad del cosmos, Einstein propuso un primer modelo estático del universo. El tiempo no fluye y consecuentemente el cosmos es eterno. Para ello, introdujo un término en sus ecuaciones de campo que dependía de una constante cosmológica. El valor de la constante cosmológica se fijaba para que el universo fuese está-

¹⁴ Cf. NOVIKOV, I. D., *The river of time*, Cambridge: University Press, 1998.

¹⁵ Cf. CHAITIN, G.; DA COSTA, N., y DORIA, F. A., *Gödel's way. Exploits into an undecidable world*, London: CRC Press, 2012, p. 123.

¹⁶ Cf. NOVIKOV, I. D., *Black holes and the universe*, Cambridge: University Press, 1990.

tico en el tiempo. Sin embargo, este modelo presentaba una característica desconocida por el mismo Einstein: se trataba de un modelo inestable que, ante pequeñas perturbaciones produciría una expansión o una contracción.

En 1919, gracias a las observaciones de Hubble con el telescopio de Monte Wilson, se descubrió que cada parte del Universo está separándose de cualquier otra con una velocidad proporcional a la distancia entre ambas. El espacio-tiempo se está deformando de tal manera que produce la expansión del Universo. Poco después, en 1922, Friedmann y Lemaître encontraron independientemente soluciones dinámicas a las ecuaciones de campo y Einstein no tardó en reconocer su error. Posteriormente, Robertson y Walker formularon el primer modelo cosmológico dinámico con simetría temporal.

De acuerdo con las observaciones el universo físico es homogéneo e isótropo a gran escala; es decir, no existen direcciones ni lugares privilegiados. Por tanto, carece de sentido hablar de un centro del Universo a partir del que se produce la expansión; pues desde cualquier observación se llega a la falsa percepción de ocupar un lugar privilegiado. Fue Lemaître quien postuló que el universo emergió en un gigantesco destello radiativo, en un Big Bang usando el lenguaje irónico de Hoyle que, junto a Bondi y Gold, defendían aún un modelo cosmológico estacionario.

La Teoría del Big Bang no ofrece una explicación de cómo llegó a existir. Los cosmólogos habían evitado el problema de la creación. Tampoco valía pensar que había sido creado de la nada o a partir de una singularidad inicial, pues son términos carentes de significado físico. Tryon en 1973 propuso que el universo es una fluctuación a gran escala de la energía del vacío. En sus propias palabras: *el universo es simplemente una de esas cosas que ocurre de tiempo en tiempo*. Veneziano y Penrose han postulado algunas teorías sobre el antes del Big Bang¹⁷.

2.3. *Del orden determinista clásico al nacimiento de los sistemas complejos*

La teoría cinética de los gases, desarrollada —entre otros— por Dalton, Gay-Lussac, Avogadro, Boltzmann y Maxwell, es otra de las teorías físicas decimonónicas cuyos resultados cuestionaban el determinismo de la mecánica clásica. Las propiedades macroscópicas de la materia gaseosa (presión, energía, temperatura...) eran explicadas estadísticamente con independencia de las condiciones físicas precisas de cada partícula individual. Debido al orden caótico de las moléculas de un gas, cualquier pequeño cambio en las propiedades físicas de una partícula (su posición o velocidad) altera el conjunto del orden microscópico sin repercutir en el macroscópico. Parece ser que, la insensibilidad de las magnitudes macroscópicas a cambios microscópicos se debe a la cancelación de los efectos individuales a gran escala. Las fluctuaciones microscópicas se cancelan y aparecen agregados macroscópicos cuyas propiedades termodinámicas son correctamente descritas estadísticamente. Había nacido la mecánica estadística, cuyas predicciones físicas eran más precisas cuanto más partículas constituían el sistema.

La revolución industrial auspició el nacimiento de la termodinámica, que explicaba todo el conocimiento ingenieril de la industria con el lenguaje de la física clásica. Carnot, hijo del ministro de la guerra del gobierno de Napoleón, trabajó para aumentar el rendimiento de los motores de vapor. Se sumergió en los principios de la conversión de calor (energía) en trabajo mecánico y su reversibilidad. Es posible elevar la temperatu-

¹⁷ Cf. PENROSE, R., *Cycles of time. An extraordinary new view of the universe*, London: Bodley Head, 2010.

ra de un fluido agitándolo, pero no hay manera de recuperar la energía mecánica invertida a partir del calor generado. Se percató de que sin la presencia de un foco frío, el calor es un tipo de energía inútil que no produce resultados mecánicos. Debe de existir un gradiente de temperatura que ponga a fluir el calor. Clausius completó la investigación de Carnot, formalizando la primera y la segunda ley de la termodinámica. Es imposible convertir enteramente calor en trabajo, pues algo de energía se corrompe siempre en la transformación. Una vez que la energía se disipa en calor, no realiza trabajo. Decimos que la energía se ha degradado.

La noción de fluctuación estadística no encajaba bien en el lenguaje de la mecánica clásica, pues no existía una correspondencia con una entidad material objetiva. Sin embargo, hoy sabemos que dichas fluctuaciones termodinámicas existen en ciertos contextos físicos y pueden ser predichas estadísticamente con buena precisión experimental. La temperatura de un sistema físico está bien determinada a partir de la noción de energía media del conjunto de partículas constituyentes. Predicciones más precisas requieren un estudio de las fluctuaciones termodinámicas que dependen de la estructura interna de las partículas del sistema físico. La teoría cinética de los gases partía de átomos o moléculas como nivel fundamental. Cálculos más precisos deben tener en cuenta la estructura interna de dichos átomos. Por tanto, la mecánica estadística no explica por sí misma la naturaleza de las fluctuaciones termodinámicas conectadas también a una estructura de orden más profundo como el nivel subatómico.

A finales del siglo XIX, las leyes de la naturaleza se expresaban mediante un lenguaje propio de los métodos estadísticos, que describía con buena precisión las propiedades macroscópicas de los agregados físicos. Era, pues, posible prescindir del conocimiento del par posición-velocidad de cada partícula y describir la evolución de un sistema físico en términos estadísticos. La mecánica estadística suponía la primera renuncia al estricto determinismo de Laplace, aunque mantenía la idea epistemológica de que el universo podía ser explicado mecánicamente mediante parámetros estadísticos. Las leyes estadísticas se preciaban entonces más fundamentales que las leyes newtonianas. Sin embargo, la epistemología continuaba siendo atomística. Toda la materia en cualquiera de sus estados físicos se comprendía como distintos agregados de átomos con existencias separadas. Los constituyentes fundamentales de los cuerpos físicos seguían siendo diminutos cuerpos macizos preferentemente esféricos o partículas ideales sin extensión. Este conjunto de partículas puntuales en interacción física descrita por leyes deterministas producen la dinámica mecanicista de todo el universo.

Boltzmann profundizó en el concepto de probabilidad introducido anteriormente por Laplace y ofreció una visión no determinista del mundo microscópico capaz de explicar la realidad macroscópica. Su idea de la evolución en los sistemas termodinámicos puede sintetizarse del siguiente modo: la evolución física sigue la dirección más probable al estilo de la evolución natural propuesta por Darwin.

La genialidad de Boltzmann fue reformular la termodinámica en términos de la distribución estadística de los microestados energéticos dentro del sistema. Ante la imposibilidad —salvo para el demonio de Laplace— de calcular las trayectorias individuales de cuatrillones de partículas, es posible explicar la evolución del sistema termodinámico atendiendo a su comportamiento colectivo. Boltzmann fue capaz de salir de la esfera del determinismo corpuscular clásico e introducir en el lenguaje de la física novedosas relaciones de conceptos como: persistencia, complejidad e información¹⁸.

¹⁸ Cf. CERCIGNANI, C., *Ludwig Boltzmann: The man who trusted atoms*, Oxford: University Press, 2006.

El origen de la complejidad se explica por la capacidad de un sistema termodinámico para alcanzar un estado metaestable alejado del equilibrio. Estos sistemas pueden adquirir información para conseguir la energía necesaria para persistir alejados del peligroso estado de equilibrio. Los estados de equilibrio son el final más probable para el futuro de un sistema. Para un ser vivo, el estado final de equilibrio coincide con la muerte. Para el universo, el estado final predicho por la cosmología clásica se caracteriza por ser una inmensa burbuja de vacío, frío y oscuridad.

A diferencia de los sistemas aislados, condenados irreversiblemente a confundirse con su entorno, los sistemas claramente alejados del equilibrio evolucionan con mayor libertad hacia un futuro abierto que depende fuertemente de sus condiciones iniciales y de su capacidad para ganar información y energía. En otras palabras, los sistemas termodinámicos alejados del equilibrio pueden experimentar transformaciones cualitativas que originan la emergencia de nuevos niveles de realidad.

Con el desarrollo de la mecánica estadística empieza a fortalecerse la idea de que los sistemas físicos dependen solo parcialmente de la física de sus componentes a menor escala. Decimos parcialmente porque no toda la física del microcosmos se hace patente en el macrocosmos, aunque dependa estructuralmente de los soportes físicos del nivel más básico. Consecuentemente, el concepto de niveles de realidad comienza a integrarse en el lenguaje de la física. Así las propiedades físicas de los sistemas complejos como los gases se pueden entender como la consecuencia estructural emergente de la interacción de múltiples componentes de un nivel estructural microscópico cuya física produce un nuevo nivel de realidad que no se reduce a la física del microcosmos.

El lenguaje de la física clásica produce una imagen física de la realidad basada en la asunción de la reversibilidad temporal y el determinismo causal. El propio Newton admitía que la naturaleza es simple, reversible y determinista. Sin embargo los experimentos físicos del siglo xx han evidenciado que las partículas elementales han resultado ser casi todas inestables y distan mucho de servir del soporte permanente de las apariencias cambiantes. En la misma línea, la cosmología contemporánea describe la evolución del universo como el despliegue irreversible de estructuras cada vez más complejas¹⁹. La física se reafirma, pues, en su búsqueda de conocimiento por los terrenos del indeterminismo, la no-linealidad, la no-localidad, la complejidad y el caos. Igualmente, la termodinámica de no-equilibrio ofrece un lenguaje emergentista que asume la posibilidad de expresar distintos niveles físicos de realidad, en función de su energía y complejidad. Tendremos oportunidad en el apartado sobre el lenguaje de la física cuántica para ahondar en la emergencia de nuevos niveles de realidad. ¿Cómo emerge la realidad clásica del proceloso fondo cuántico de energías?

3. EL LENGUAJE DE LA FÍSICA CUÁNTICA

La novedosa mecánica cuántica de la segunda década del siglo xx supuso una revolución epistemológica en la ciencia física. Si ya la mecánica estadística decimonónica asestó un duro golpe a quienes pretendían explicar el Universo a partir de un conjunto determinista de ecuaciones diferenciales con unas condiciones iniciales concretas, el desarrollo de la física cuántica hizo prevalecer las predicciones estadísticas sobre las

¹⁹ Cf. PRIGOGINE, I., *¿Tan solo una ilusión? Una exploración del caos al orden*, Barcelona: Tusquets, 2004.

deterministas. El indeterminismo cuántico de Niels Bohr y otros fundadores derrocaba a la epistemología newtoniana de un universo determinista descrito por leyes universales y necesarias. El nacimiento de la física cuántica traería consigo el desarrollo de un nuevo lenguaje físico, más técnico y sorprendente.

Los experimentos de finales del siglo XIX y principios del XX que provocaban la interacción entre luz y materia producían resultados inexplicables en el marco clásico. La incidencia de luz sobre una lámina de metal producía un espectro de electrones (efecto fotoeléctrico) con distintas velocidades cuyas características sobrepasaban cualquier explicación clásica. Del mismo modo, el estudio de la interacción de luz con las paredes de un cuerpo negro, originaba un espectro térmico que desafiaba a la estadística clásica de Maxwell-Boltzmann. Otros resultados como el discreto espectro de luz que emitían los átomos de la materia, o los fenómenos de interferencia y difracción de luz por la estructura de la materia, no hacían sino poner en entredicho la teoría clásica y sugerir la introducción de nuevos conceptos en el lenguaje de la física cuántica.

La mecánica cuántica es una teoría unitaria que admite la superposición de diferentes estados del sistema, cuyo lenguaje descriptivo asume discontinuidad, indeterminismo y no-localidad. El estado de un objeto cuántico puede ser una combinación lineal de distintos estados cuánticos, que evolucionan unitariamente en el tiempo, sin perder la coherencia de la superposición. Por ejemplo, un electrón en el régimen cuántico, es descrito por una función de estado que lo ubica simultáneamente en dos regiones distintas, correspondientes a dos estados en coherencia cuántica. Si el sistema cuántico está suficientemente aislado del entorno, la evolución temporal unitaria de la función de onda, simétrica en el tiempo, mantiene la coherencia cuántica de los estados superpuestos; es decir, el electrón sigue, simultáneamente, distintos caminos cuánticos.

El proceso de reducción del estado cuántico, la medida de un sistema cuántico, supone una pérdida, con carácter absoluto, de la relación de fase (coherencia) entre los estados en superposición. Una vez se mide un observable del sistema, el sistema se encuentra en uno de los anteriores estados en superposición coherente. Se trata de un proceso que impide al sistema revertir el efecto de la medida y volver al estado de superposición cuántica. La reducción del vector de estado es pues, un proceso asimétrico en el tiempo que no evoluciona unitariamente. La medida cuántica sigue una evolución no unitaria y temporalmente asimétrica.

Como vemos, el lenguaje de la física cuántica incluye ya toda una terminología basada en la posibilidad de describir la evolución de una multiplicidad de estados físicos simultáneos que no son observables. Las leyes estadísticas permiten describir los patrones clásicos que resultan tras una sucesión de medidas cuánticas. Las fluctuaciones cuánticas impiden en general predecir el estado clásico concreto que emerge tras un proceso de medida. Sin embargo, estas fluctuaciones son balanceadas cuando el número de medidas es suficientemente elevado para que se forme un patrón estadístico. En el límite clásico las fluctuaciones cuánticas se anulan y el proceso estocástico de la medida se reduce a una simple medición clásica bien determinada.

Con el desarrollo exitoso de la mecánica cuántica se intensifica el proceso de tecnificación del lenguaje físico y surgen nuevos conceptos sin referencia en la física clásica, que originan nuevas carencias ontológicas. Desprovistos de un soporte ontológico bajo el ras del lenguaje matemático de la física cuántica es muy razonable caer en un idealismo formal, que tan solo es una interpretación bastante reduccionista de la realidad con altas probabilidades de rozar un cierto irracionalismo causal. Esto es, entender la realidad como una manifestación sin causas: un epifenómeno cuántico que se liga muy

fácilmente con la idea de un mundo ideal entendido como la fenomenología de una información cuántica sin más soporte ontológico que ella misma.

3.1. *Del indeterminismo de la mecánica cuántica al irracionalismo causal*

El nuevo lenguaje de teoría cuántica queda globalmente caracterizado por el principio de indeterminación de Heisenberg: es imposible conocer con exactitud, simultáneamente, la posición y velocidad de una partícula. Tanto más indeterminado es el valor de la posición de un electrón cuanto más precisa es la medida de su velocidad, y viceversa. En el lenguaje técnico de la física cuántica se dice que posición y momento son magnitudes conjugadas. Al igual que la posición y el momento, magnitud que resulta del producto de la velocidad por la masa de la partícula, son magnitudes conjugadas, existen otros ejemplos físicos como el tiempo y la energía.

Antes de la medida de la posición de un electrón, la interpretación canónica de la teoría cuántica afirma que existe una nube de carga negativa espacialmente distribuida, sin una posición concreta. Posteriormente, una vez realizada la medida cuántica, observamos un sistema físico con posición bien definida (en el instante mismo de la medida), es decir, una partícula puntual: un electrón con una determinada posición. ¿Qué es, pues, el electrón: onda o partícula? A la vista de los experimentos, Bohr concluyó que el electrón es una onda y una partícula: una *ondícula*. De acuerdo con su principio de complementariedad, la naturaleza del mundo físico sólo es inteligible en términos de conceptos complementarios que se manifiestan, de un modo (onda-momento) u otro (partícula-posición), según las condiciones experimentales.

La naturaleza ondulatoria de la materia que anticipó de Broglie con el principio de dualidad onda-corpúsculo fue desarrollada con mayor precisión matemática por Schrödinger, quien obtuvo una ecuación diferencial que determinaba la evolución de la onda. La famosa ecuación de Schrödinger es el análogo cuántico para las ondas de las ecuaciones clásicas de Maxwell que describen los fenómenos electromagnéticos. Los electrones —superada ya la idea atomista clásica de las partículas esféricas macizas— se concebían como ondas de densidad de carga cuya evolución era predicha por la ecuación de Schrödinger. Esta interpretación, factible en sistemas electrónicos confinados (como el átomo), fracasaba cuando las partículas eran libres, pues la onda de carga se desperdigaba rápidamente por todo el espacio.

El esparcimiento espacial de la onda suponía que las partículas no tenían una posición bien definida sino que se asemejaban a una especie de nube electrónica. Desde la perspectiva de la física cuántica, el átomo se concebía como una pobremente definida y ligera nube electrónica alrededor de un diminuto núcleo pesado y positivo, cuya forma dependían de las condiciones físicas del entorno. Esta idea de los electrones no podía comprenderse a la luz de los experimentos con electrones libres que eran casi siempre detectados dentro de una cierta región especial limitada.

Fue Born quien propuso que la función de onda de la ecuación de Schrödinger se interpretara como una densidad de probabilidad; es decir, la probabilidad matemática de encontrar el electrón en una cierta región espacial. El punto de vista de Bohr restringe el alcance de la función de onda como descripción precisa de una sola partícula (electrón) en el régimen cuántico. La interpretación de Born sobre la función de onda, tan acorde con los resultados experimentales donde intervienen muchas partículas, fracasa cuando el sistema físico bajo estudio es una sola partícula. En este caso, debido a fluctuaciones cuánticas, no es posible determinar, con mayor precisión que la permitida por

el principio de Heisenberg, el momento y posición de la partícula individual. En el mejor de los casos es posible restringir una región espacial donde existe la máxima probabilidad de encontrar al electrón después de medir su posición, sin certeza de que tal predicción ocurra finalmente.

La nube electrónica se interpretó en el lenguaje matemático como una nube de probabilidad que, pudiendo localizarse por todo el espacio físico, permanece más o menos confinada en una región espacial donde la función de onda marca probabilidades más altas. Al medir la posición de electrones que tuvieran la misma función de onda, se alcanzaría un patrón de medida cuya distribución espacial coincidiría con la predicha por la función de onda. La mayoría de las medidas daría una posición del electrón próxima al máximo de la función de onda y sólo tras muchas medidas más se apreciaría una distribución de electrones alejados de dicho máximo. La facilidad de la mecánica cuántica para describir con gran precisión las probabilidades de transición entre distintos estados cuánticos (órbitas estacionarias de un átomo) permitió la consolidación, hasta nuestros días, de la interpretación estocástico-estadística de la teoría cuántica.

En rigor positivista, la actuación del aparato de medida sobre el sistema observado modifica su estado físico previo de tal manera, que la medida cuántica genera un sistema físico distinto al que se pretendía estudiar. Siguiendo esta epistemología empirista radical, los positivistas llegaron a la conclusión de que no tiene sentido hablar de las propiedades previas de un sistema físico: las nubes electrónicas no tienen propiedades físicas hasta que no les son atribuidas por una determinada observación experimental. La posición o el momento de un electrón no son propiedades internas del ente físico, sino adquiridas momentáneamente en un proceso de medida.

De acuerdo con el lenguaje de la teoría cuántica estándar los estados físicos de los sistemas cuánticos evolucionan unitariamente y deterministamente bajo el rectorado de la ecuación de Schrödinger. Consecuentemente, todo sistema en superposición cuántica no puede transformarse en un estado concreto clásico. Una vez más, la teoría física no se adecua correctamente a la experimentación, puesto que no se observan sistemas físicos en estados cuánticos superpuestos. La observación es el resultado clásico de la medida de alguna magnitud del sistema. El hecho de medir un sistema cuántico produce la pérdida de coherencia cuántica interna y genera un proceso no unitario e indeterminista que finaliza en la concreción del estado clásico.

Con el principio de complementariedad de Bohr, la epistemología de la física cuántica retoma la propuesta inicial de de Broglie plasmada en su principio de la dualidad onda-corpúsculo. En vez de reconsiderar la nebulosa ontología de los experimentos cuánticos, la ciencia física se consagró a un lenguaje técnico sin cabida para el discernimiento ontológico. Los grandes físicos condujeron a la ciencia del mundo físico hacia una década dorada de relevantes descubrimientos en el campo de las partículas elementales y sus interacciones fundamentales; aunque a un elevado precio: la pérdida de todo sustrato físico donde basar los fenómenos cuánticos. Fueron los grandes momentos del positivismo físico-matemático donde Bohr y el prestigioso matemático John Von Neumann parecían dar por definitiva la doctrina que reducía la ontología a una triunfante epistemología de predicciones físicas basadas en complejos cálculos matemáticos.

Von Neumann enfatizó la dimensión lógica y coherente del formalismo cuántico hasta construir una estructura matemática, el teorema de von Neumann, que corroboraba el principio de complementariedad de Bohr. En él se afirma que es imposible verificar experimentalmente cualquier teoría causal que prediga de modo determinista el comportamiento de un sistema físico individual. Con otras palabras, la teoría cuántica de Bohr contiene todo el conocimiento accesible de la naturaleza. La ausencia de tra-

vectorias cuánticas, las incertidumbres en la posición y momento de una partícula cuántica, no son limitaciones propias del desarrollo tecnológico-experimental sino consecuencias físicas manifiestas de la ausencia de leyes sub-cuánticas que determinen la evolución física. En última instancia, el teorema de von Neumann niega cualquier interpretación causal que explique por qué una partícula se detecta en un determinado lugar. Es decir, no hay explicación posible para la existencia de las fluctuaciones cuánticas observadas experimentalmente en sistemas de partículas individuales. El azar, la arbitrariedad es la ley estocástica fundamental que rige los sistemas cuánticos. Sólo un sistema de muchas partículas, donde se contrarresten dichas fluctuaciones, puede ser descrito con determinación estadística sujeta a caprichosos golpes de suerte en la naturaleza del mundo físico.

A continuación enumeramos las tres primeras afecciones ontológicas consecuentes con el nuevo lenguaje de la física cuántica, de un total de siete que presentamos en este artículo.

1) Fin del determinismo ontológico

El principio de incertidumbre invalida cualquier referencia a leyes causales que predijeran resultados bien determinados. La incertidumbre en las condiciones iniciales de las partículas supone el fin del determinismo en la ciencia física. No es posible conocer la evolución futura exacta de una partícula sin medir con precisión absoluta su posición y velocidad. Sin importar cuán sofisticado sea el diseño instrumental de un experimento, la precisión de la medida de dos magnitudes conjugadas (momento-posición, energía-tiempo) no puede ser inferior al límite establecido por Heisenberg: la mitad del cuanto mínimo de acción (h).

La incertidumbre cuántica no es solamente una limitación experimental que impide conocer simultáneamente la posición y la velocidad precisas de una partícula. La física cuántica describe una realidad cuántica donde las magnitudes clásicas como la posición y la velocidad no están bien definidas. No solamente la partícula clásica pierde sus atributos clásicos. También la misma idea clásica de partícula se desvanece en favor de una existencia cuántica distinta. En consecuencia, el determinismo causal propio del lenguaje de la física clásica se resiente ante un tipo de existencia sin los parámetros clásicos que predicen el comportamiento futuro de una partícula que, cuánticamente, ya no se entiende como una pieza individual de materia.

La física cuántica presenta una realidad cuántica de fondo muy distinta del mundo clásico macroscópico. La materia se presenta en un estado de indefinición cuántica con el potencial de producir la realidad clásica ordinaria. Esta falta de determinismo ontológico exige una alternativa epistemológica que explique el incontrolable e impredecible resultado de una medida cuántica. De acuerdo con los cánones de la física cuántica, la definición de las propiedades físicas clásicas se produce tras un proceso indeterminista en el régimen cuántico conocido como la transición clásico-cuántica en la medida de un sistema cuántico.

El denominado problema de la medida cuántica arroja luz sobre el fondo ontológico de la realidad cuántica. Aún hoy el problema de la medida es controvertido y suscita interesantes debates entre los físicos cuánticos. El planteamiento del problema es cómo explicar la emergencia de la realidad concreta y delimitada del régimen clásico desde un fondo cuántico indefinido. La incertidumbre cuántica hace inviable una explicación causal *bottom-up*. No es fácil explicar la determinación del sistema físico clásico desde un fondo cuántico de indeterminación. En el mejor de los casos es posible explicar el pro-

blema de la medida cuántica como una anulación de las fluctuaciones cuánticas cuando se observa el sistema cuántico con la interacción de un instrumento de medida clásico. La compensación de las fluctuaciones es un proceso indeterminado que solo puede ser estudiado clásicamente a partir de leyes estadísticas cuando el número de sucesos es elevado. En este sentido, la indeterminación cuántica se entiende desde la indefinición ontológica de la realidad que se proyecta clásicamente en un conjunto de sucesos individualmente estocásticos cuya regularidad solo admite leyes estadísticas cuando se repite muchas veces.

La consideración absoluta del principio de Heisenberg exige renunciar a la imagen de un mundo físico macroscópico constituido por entidades microscópicas bien definidas en interacción causal. No es posible, pues, mantener por más tiempo la idea griega de un mundo determinista constituido por átomos. Más bien, la teoría cuántica invita a pensar en una realidad ontológica dinámica e indefinida. Desde nuestra habitual perspectiva clásica, fruto de la experiencia de fenómenos concretos y bien definidos, diríamos que el mundo clásico emerge de un turbulento fondo de indefinición cuántica.

2) Fin del continuismo ontológico

La renuncia de la continuidad del movimiento de una partícula en el régimen cuántico, así como la pérdida de la causalidad clásica en la mecánica cuántica, fueron consideradas por Bohr como las irracionales consecuencias de haber introducido el cuanto elemental de acción física. Podemos decir que la irracional epistemología advertida por Bohr fue el precio que los físicos fundadores de la mecánica cuántica se dispusieron a pagar para poder explicar —con excelente grado de precisión experimental— los novedosos fenómenos físicos que hicieron temblar los cimientos de la física clásica.

Como consecuencia del fin del determinismo ontológico, es lógicamente necesario prescindir del concepto de trayectoria en sentido clásico. El concepto clásico de trayectoria desaparece en el régimen microscópico, pues no es posible definir experimentalmente la geometría lineal continua descrita por la partícula. Conocer la trayectoria exige determinar con absoluta precisión los sucesivos valores de la posición de una partícula. Si bien la relación matemática del principio de incertidumbre permite conocer sin error la posición de una partícula ($\Delta x = 0$), la incertidumbre consecuente en su momento se hace infinita ($\Delta p \rightarrow \infty$) y la partícula se dispersa en una región de espacio enorme, impidiendo así, hallar su posición en un instante posterior. En el mejor de los casos, se puede regular la precisión de la posición y velocidad de la partícula y describir una banda geométrica donde con probabilidad se encuentre la partícula.

Desde nuestra perspectiva clásica diríamos que la incertidumbre en la posición y velocidad haría que la partícula fuera saltando cuánticamente de una posición a otra de la banda de probabilidad que sustituye a la trayectoria clásica. Ahora bien, desde la teoría cuántica las consecuencias son aún más sorprendentes, pues ni siquiera podemos decir que haya una partícula clásica definida. Si la analogía con el mundo clásico fuera posible, entonces la partícula describiría una trayectoria discontinua. Pero en la realidad ontológica que se intuye bajo la teoría cuántica no hay una partícula siquiera —al menos en sentido clásico. La incertidumbre cuántica impide definir tanto la continuidad de la trayectoria como la continuidad de la partícula. La partícula en sentido figurado es un concepto clásico. En sentido cuántico la partícula se diluye en un fluido cuántico desperdigado cuya geometría no asume necesariamente el continuismo clásico, sino que tiene una existencia más modulable como consecuencia de una ontología fluctuante que aún no se ha definido en una realidad clásica concreta.

3) Fin de la causalidad ontológica clásica

En mecánica clásica los fenómenos físicos son efectos consecuentes con unas causas que lo preceden. Las leyes de causa y efecto de la física permiten predecir el comportamiento futuro de numerosos sistemas clásicos. Especialmente, la evolución futura de los sistemas planetarios, galácticos y cosmológicos se rige de manera precisa por leyes clásicas universales. La prolongación de la incertidumbre cuántica hasta el nivel planetario obliga a renunciar al determinismo y tener en cuenta factores caóticos que impiden predecir claramente el futuro de un sistema físico. Igualmente, en retrospectiva, la ley de la causa y el efecto nos sitúa frontalmente y sin escapatoria con el clásico problema filosófico acerca del primer origen de toda actividad física. Al seguir la concatenación causa-efecto se alcanzaría finalmente el primer efecto con sentido físico sin posibilidad de explicarlo físicamente a partir de una causa precedente o sin recurrir a una sucesión ilimitada de causas y efectos. No es posible, por tanto, explicar el origen del universo físico sin recurrir a una primera causa de origen metafísico.

En mecánica cuántica la dimensión casual propia de un proceso de medida —suer-te en última instancia— es una parte integrada en los fenómenos cuánticos descrita en términos estocásticos y generalizables a leyes estadísticas. La dinámica natural es esencialmente azarosa. Desde la perspectiva clásica diríamos que está regida por leyes casuales cuya explicación trasciende las fronteras de la ciencia física. En física cuántica no hay una explicación causal para la definición clásica de un sistema físico desde la indefinición ontológica que rige el comportamiento cuántico. No existe una ley causa-efecto que defina la trayectoria desde lo clásico a lo cuántico. Es más, algunas interpretaciones físicas introducen la idea de un salto cuántico totalmente opuesto a la idea del continuismo clásico.

La alternativa física más consolidada actualmente para explicar el proceso de medida entiende la transición cuántico-clásica como un proceso de decoherencia, donde la indefinición cuántica va paulatinamente debilitándose a medida que el sistema cuántico va interactuando con su entorno clásico. Decimos que la coherencia cuántica de un sistema lo permite estar en un estado de indefinición ontológica clásica. Al acoplarse con el medio macroscópico la coherencia se diluye según se perfila el sistema hasta que finalmente se vuelve clásico a todos los efectos prácticos. La decoherencia cuántica permite suavizar y cuantificar el proceso de medida pero, últimamente, la emergencia del estado clásico concreto y bien definido es una transición estocástica sin explicación causal.

Consecuentemente, la física debe desprenderse del clásico anhelo de crear un conjunto de leyes causales que predigan cuanto existe en el Universo. Ciertas cualidades del mundo físico no puede explicarse mediante leyes causales deterministas, pues están fuera de su alcance explicativo. El origen del universo físico o la emergencia del mundo clásico desde un fondo cuántico indeterminado son problemáticas abiertas que dejan entrever una realidad ontológica que desborda el enrejado de las leyes deterministas de causa y efecto. Sin embargo, observamos experimentalmente que los fenómenos clásicos emergen de esta realidad cuántica y debemos cuestionarnos cómo una ontología indefinida puede originar un proceso de definición ontológica que finaliza en la concreción de nuestro mundo clásico.

El trabajo de Bohm se encamina a buscar una explicación, más allá de la física, de estas manifestaciones azarosas que surgen del fondo de la naturaleza física y que han obligado a integrar conceptos matemáticos como probabilidad y leyes estadísticas para expresar la naturaleza objetiva de las fluctuaciones cuánticas²⁰. Bohm propone un movimiento meta-

²⁰ Cf. BOHM, D., *La totalidad y el orden implicado*, Barcelona: Kairós, 1980.

físico que despliega la ontología cuántica hasta que emerge la realidad estructural definida de los fenómenos clásicos. El dinamismo ontológico es últimamente la causa del mundo clásico. Ahora bien, este proceso causal no puede ser determinista, pues contradeciría el indeterminismo cuántico. A nuestro juicio, la propuesta de Bohm trata de responder a la exigencia metafísica que nos planteamos y su mecanismo causal no-determinista es coherente tanto con los conceptos de indeterminación y discontinuidad cuánticos, como con el hecho de que los fenómenos clásicos emergen de la realidad cuántica.

En síntesis, la física cuántica descubre una ontología dinámica, indiferenciada y caótica, con el potencial de hacer emerger una realidad clásica estable, concreta y con un grado elevado de determinismo.

3.2. *Del cuanto elemental de acción a las entrelazadas acciones no locales*

Planck y Einstein desarrollaron la idea del quantum elemental de energía o fotón, como elemento fundamental e indivisible del intercambio de energía entre la luz y la materia ordinaria, para explicar el efecto fotoeléctrico y la radiación del cuerpo negro. La relación de Planck-Einstein ($E = h \cdot f$) expresa que la energía (E) del fotón resulta de multiplicar su frecuencia (f) por el cuanto mínimo de acción (h). Con la misma idea, Bohr utilizó el quantum elemental de acción (h) para explicar la existencia de estados estacionarios de energía constante donde los electrones orbitaban alrededor del núcleo. La pérdida de energía en la transición electrónica (materia) desde una órbita estacionaria a otra de menor energía era compensada por la aparición de un quantum de energía (luz) registrado por los espectrógrafos.

Resulta conocida la dialéctica epistemológica que mantuvieron Einstein y Bohr²¹ a lo largo de sus vidas desde que en 1927 se conocieron durante el Congreso Solvay, que reunía las mentes científicas más preclaras del momento. Mientras que Bohr disgregaba los conceptos físico-matemáticos de la realidad, Einstein lanzaba una tentativa realista de la ciencia física y el mundo físico.

A disgusto con el dualismo clásico-cuántico, con la dictadura operacionalista de los físicos cuánticos y con la naturaleza estocástica de la teoría cuántica, Einstein diseñó un experimento mental (*gedankenexperiment*), publicado en el *Physical Review* en un famoso artículo firmado junto a Podolsky y Rosen²². Este trabajo ha supuesto un hito importantísimo en el desarrollo posterior de la física. La pretensión inicial fue mostrar la inconsistencia de la teoría cuántica y oponerse así, a las consecuencias epistemológicas de los desarrollos matemáticos de von Neumann sobre el formalismo canónico de la mecánica cuántica. Einstein quería probar la incompletitud de la teoría cuántica de Bohr y poner de relieve que una teoría cuántica completa debía dar cuenta de los elementos de realidad del mundo físico; es decir, aquellas magnitudes físicas susceptibles de ser medidas sin perturbar el sistema físico observado.

La teoría de Einstein, Podolsky y Rosen (EPR) predijo la posibilidad de que posición y momento lineal pudieran ser simultáneamente elementos de realidad. Su experimento mental demostraba que posición y momento de una partícula eran elementos ontológicos perfectamente correlacionados. Es decir, una partícula puede tener posición y

²¹ Cf. WHITAKER, A., *Einstein, Bohr and the quantum dilemma. From quantum theory to quantum information*, Cambridge: University Press, 2006.

²² Cf. EINSTEIN, A.; PODOLSKY, B., y ROSEN, N., «Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?», *Phys. Rev.* 47, 777-780 (1935).

momento bien definidos independientemente de la observación experimental. Bastaba medir la componente de espín de un fotón para conocer la respectiva componente de otro fotón entrelazado, sin necesidad de experimentar directamente sobre él. Sin embargo, esta defensa del realismo físico supuso la aparición de unas fantasmagóricas interacciones no-locales entre distintas partes muy distanciadas de algunos sistemas físicos, que revelaban elementos de realidad no apreciados por la mecánica cuántica. Consecuentemente, la teoría de Bohr debía ser incompleta. Einstein asentó un duro golpe a los cuánticos de Copenhague. Su célebre *gedakenexperiment* daba tregua al ocaso del realismo físico y dejaba terreno libre para desarrollar una teoría cuántica completa: una teoría de nuevas variables.

Dicen que hasta los errores del genio fueron geniales. Sin pretenderlo, Einstein descubrió que la realidad física no es enteramente local, porque existen fenómenos instantáneos de acción a distancia que acoplan las partes de un sistema físico por muy distantes que se encuentren. Esta acción no-local disgustaba a Einstein, pero los experimentos de Aspect²³ o los espectaculares y modernos experimentos de Innsbruck²⁴ son evidencias empíricas bien constatadas del carácter no-local de la realidad. Aunque Einstein pretendió usar las fuerzas instantáneas a distancia como un absurdo que resultaba de una teoría cuántica incompleta, en realidad descubrió la existencia de interacciones no-locales en la materia. En la actualidad, esta acción no-local se ha comprobado experimentalmente y se usa en los modernos laboratorios de información cuántica para teleportar estados cuánticos. Los ingenieros cuánticos confían en esta interacción cuántica para progresar en el diseño de los ordenadores cuánticos.

Seguimos la enumeración de las afecciones ontológicas consecuentes con el nuevo lenguaje de la física cuántica iniciadas en el punto 3.1.

4) Fin de la invariabilidad ontológica

Bohr entendía la realidad física escindida en dos mundos inconmensurables. Por un lado encontraríamos el mundo físico observable de los fenómenos clásicos. Es el mundo clásico estable de nuestras percepciones directas o indirectamente inducidas a través de la tecnología. Por otro lado contamos con los conceptos matemáticos de la mecánica cuántica. En este caso, las ideas de la teoría cuántica no se corresponden con percepciones de la realidad hasta el momento de iniciar un proceso de medida y desencadenar la transición cuántico-clásica que concluye con la emergencia de un estado clásico observable. Aunque la idea de la decoherencia cuántica suaviza el desnivel entre el mundo cuántico y el clásico, en última instancia la emergencia del estado clásico es el resultado de un salto emergente.

De acuerdo con la física cuántica, con anterioridad al proceso de medida carece de sentido atribuir propiedades físicas al sistema cuántico tales como posición, momento o una cierta componente de espín. A diferencia del pretendido realismo de Einstein, los sistemas cuánticos no tienen propiedades reales como los objetos clásicos. Más bien, son el producto emergente que resulta tras la conclusión del proceso de medida. En este sentido, los sistemas cuánticos sintetizan sus atributos clásicos cuando se cumple la transición cuántico-clásica al finalizar el proceso de decoherencia. Por tanto, las propiedades físicas, tal y como se entienden desde la perspectiva clásica, son una realidad emergente

²³ Cf. ASPECT, A., *et al.*, «Bell's inequality test: More ideal than ever», *Nature* 398, 189 (1999).

²⁴ Cf. URSIN, R., *et al.*, «Quantum teleportation across the Danube», *Nature* 430, 849 (2004).

que sigue al acto de medida, sin existencia previa en el régimen cuántico. En la epistemología de Bohr, diríamos que las propiedades físicas clásicas son etiquetas aplicadas sobre un mundo cuántico estrictamente epistemológico, sin fundamento ontológico. Debido a la incertidumbre cuántica, Bohr defendía que cuando se conoce el momento de una partícula, su posición carece de sentido físico. No es real.

Pensamos que es posible ofrecer una interpretación intermedia sin necesidad de concluir en el epifenomenalismo de Bohr ni en el realismo ingenuo de Einstein que él mismo refutó con su *gedankenexperiment*. Afirmar que los fenómenos físicos son un epifenómeno sin soporte ontológico es ir en contra de la experiencia consciente de que vivimos en un mundo real. Pensar que nuestra epistemología clásica para interpretar el mundo es aplicable también en el extraño régimen cuántico es ir en contra de los resultados experimentales. En ambos casos el presupuesto básico es tomar conciencia de la realidad: ya sea experiencial (conciencia de realidad) o experimental (conciencia empírica). Negar la experiencia del mundo, experiencial o empírica, es contradecir nuestra experiencia consciente de realidad que fundamenta todo conocimiento.

De acuerdo con nuestra experiencia consciente de la realidad no podemos afirmar la existencia de un mundo invariable de esencias. Hay distintos niveles de existencia. Tampoco podemos renunciar a un soporte material del mundo físico, pues la realidad física se fundamenta en la actividad física de la materia que registran los instrumentos de medida. Hay un soporte ontológico donde emerge el mundo físico. Esta ontología no puede ser invariable, pues lo óptico del régimen clásico no es aún en el régimen cuántico. En el régimen cuántico la materia existe en un nivel de realidad distinto al nivel experiencial de los fenómenos clásicos. De alguna manera el soporte ontológico del mundo físico es capaz de producir un despliegue de nuevos niveles de realidad. Este despliegue no puede ser mera evolución causal determinista, ya que la física cuántica no asume el clásico continuismo. Decimos entonces que las interacciones cuánticas del soporte ontológico generan un orden óptico emergente donde ya es posible definir las propiedades clásicas de los sistemas físicos que evolucionan causalmente en el tiempo y provocan nuestros estados conscientes.

5) Fin de la localidad ontológica

Einstein defendió una visión realista de la física. El último gran físico clásico concebía un universo del ser, un mundo físico objetivo y real donde los sucesos físicos no acontecían sin explicación causal. De acuerdo con su epistemología realista la incertidumbre cuántica es una limitación cognitiva. El realismo entiende que las propiedades físicas tienen ya una existencia real en el régimen cuántico. Sin embargo, Einstein abrió una nueva dimensión física de interacciones no-locales con importantes consecuencias ontológicas.

En los experimentos con fotones entrelazados que experimentan acciones a distancia no-locales se comprueba que carece de sentido hablar de constituyentes ópticos del sistema antes de un proceso de medida. Dos fotones entrelazados conforman un estado cuántico de la materia que no es reducible a la suma de sus constituyentes. Es más, solo es posible hablar técnicamente de constituyentes cuando la medida cuántica deshace el entrelazamiento cuántico anterior. En realidad, el sistema cuántico entrelazado presenta una ontología distinta que el conjunto de realidades ópticas sintetizadas tras el proceso de decoherencia. Decimos que la materia en el régimen cuántico es de una forma distinta a como es la materia en el nivel de realidad clásico. No hay una evolución suave, sino una transición entre distintos niveles de realidad. Desde la perspectiva cuántica

podríamos pensar que de la ontología cuántica emerge el nivel óptico clásico cuando las interacciones físicas diluyen las fluctuaciones cuánticas.

La física descubre una ontología dinámica y fluctuante cuya esencia es producir niveles de realidad con propiedades físicas características de cada nivel. Además los experimentos de acción a distancia con partículas cuánticas entrelazadas desvelan que esa ontología dinámica soporta conexiones a distancia capaces de sintetizar sistemas cuánticos conexos con existencia global. Existe el conjunto sin existencia fragmentaria constituyente. Es decir, existe la totalidad sin que pueda atribuirse constituyentes a su ontología. Cuando esa ontología conexa pierde la coherencia cuántica se produce una fragmentación ontológica que origina los elementos ópticos del régimen clásico del nuevo nivel de realidad. Así ocurre, como veremos a continuación, con la realidad de las partículas físicas. Un protón no es la suma de sus componentes. Un protón es una realidad global sin constituyentes ópticos. Ahora bien, cuando se bombardea el protón y se fragmenta su ontología emergen productos ópticos con individualidad propia. Es decir, bajo ciertas condiciones la ontología cuántica despliega su potencial para producir nuevas realidades ópticas dotadas de una individualidad indefinida antes de romper la ontología unitaria del protón.

En síntesis la física cuántica nos devela una realidad metafísica sorprendente desde nuestra perspectiva de sujetos conscientes en el régimen clásico. Desde el punto de vista clásico es difícil entender cómo las partículas pierden su individualidad para formar sistemas holísticos en coherencia cuántica. Sin embargo, desde la ontología dinámica reconocible en el régimen cuántico se hace más inteligible pensar que las partículas clásicas son el producto emergente que resulta tras la pérdida de la coherencia cuántica. La ontología pierde su conexión cuántica y produce la dinámica causal de los elementos ópticos en el régimen clásico. De esta manera se muestra la variabilidad ontológica. Lo que es en el régimen cuántico es ontológicamente distinto a las entidades ópticas del régimen clásico. La fragmentación de la conectividad cuántica ontológica tras el proceso de decoherencia produce la individualidad de los elementos clásicos. La amortiguación de las acciones a distancia no-locales termina por sintetizar partículas clásicas con una realidad óptica distinta a la ontología holista que soporta la realidad física.

3.3. *Del orden cuántico en física de partículas al fondo cuántico de energías*

La física de partículas elementales es por antonomasia y mérito una disciplina ejemplar dentro de una ciencia paradigmática. Íntimamente ligada al desarrollo de la teoría cuántica, la física de partículas nos ofrece un conocimiento inestimable tanto del mundo físico microscópico como del macrocosmos. El desarrollo de sofisticados aceleradores donde se hacen chocar partículas a velocidades casi lumínicas ha producido un amplísimo conocimiento acerca de los componentes físicos fundamentales de la materia y de sus interacciones.

El carácter fundamental de las partículas es un concepto histórico que depende de las energías usadas en el estudio de la materia. A energías en torno a 10^{15} eV, existen tres tipos de partículas fundamentales que conforman la materia fermiónica: leptones, neutrinos y quarks. Toda la materia ordinaria está constituida por partículas de alguno de estos tres tipos. Cada uno presenta tres familias. Existen tres tipos de leptones [electrones (e^-), muones (μ^-) y tauones (τ^-)] asociados con sus respectivas familias de neutrinos [electrónicos (ν_e), muónicos (ν_μ) y tauónicos (ν_τ)] y tres familias de quarks [up-down ($u-d$), charm-strange ($c-s$), bottom-up ($b-u$)]. En total son doce las partículas

fundamentales distribuidas en tres familias con los mismos números cuánticos pero distinta masa.

En la actualidad resulta bien conocido que todas las partículas fundamentales interactúan gravitatoria y débilmente, pero sólo los quarks sufren la interacción fuerte. Las partículas fundamentales fermiónicas se ligan unas con otras a través del intercambio de otras partículas denominadas bosones mediadores. Construida desde principios matemáticos de invariancia gauge, la teoría cuántica de campos explica el amplio espectro de partículas a partir de las doce partículas fundamentales y tres bosones mediadores, también denominados bosones gauge.

La mecánica cuántica es una teoría dependiente de las relaciones de fase, pero no de la fase global de un sistema físico cuántico. No importa el valor de la fase elegido localmente sino las diferencias de fase entre las partes de un sistema. Puesto que la teoría cuántica es sensible a los incrementos de fase, la elección previa debe ser la misma para todo el sistema. Se requiere de una invariancia global de fase para no introducir perturbaciones extraordinarias. Ahora bien, ¿cómo es posible que todas las partes de un sistema acuerden en la misma elección física sin violar la causalidad local de la Relatividad?

No existe ninguna onda relativista que homogeneice la fase global de un sistema físico si no está globalmente conectado de algún modo intrínseco. Es imprescindible, pues, desde el punto de vista físico introducir desviaciones locales de fase entre una parte y otra del sistema. Consecuentemente, la evolución física del sistema cuántico quedará perturbada, digamos, a priori; es decir, previamente a la acción de las interacciones físicas. Para evitar estas molestas perturbaciones basta incluir en las ecuaciones de las teorías de campos un elemento que contrarreste el efecto, un término que devuelva la invariancia global requerida: esto es, un término gauge. Tras aceptar cambios locales de fase e introducir el término gauge, la función de onda del sistema verifica una ecuación equivalente a la de Schrödinger que es invariante bajo transformaciones locales de fase²⁵ e incluye las correcciones relativistas pertinentes. Curiosamente, los cambios válidos para dejar invariante la ecuación de la electrodinámica cuántica son los mismos que los permitidos en la elección del gauge electromagnético del potencial vector del electromagnetismo clásico. La libertad gauge clásica equivale a la invariancia gauge cuántica.

El alcance de las cuatro interacciones fundamentales depende de la masa de sus respectivos bosones. De acuerdo con el principio de Heisenberg, cuanto mayor sea su energía en reposo, menor es el tiempo de vida media y, por tanto, pueden recorrer distancias menores, reduciéndose su alcance. Las interacciones de alcance ilimitado son la electromagnética y gravitatoria, mediadas respectivamente por el fotón y el gravitón, que carecen de masa. Los bosones débiles son realmente masivos (10^{11} eV). Por ello, la interacción débil queda limitada al interior del núcleo. Los mediadores sólo pueden conectar partículas a distancias típicas de la escala subnuclear. De igual manera, los gluones sólo hacen interactuar a quarks que comparten el mismo recinto nuclear. A diferencia de los bosones débiles, los gluones carecen de masa, pero debido a interacciones entre ellos se forma una masa efectiva equivalente no nula que limita el alcance de la interacción. Podemos decir que el gluón desnudo de masa nula es revestido con una energía de interacción que lo dota de masa y, en consecuencia, la interacción fuerte se hace de corto alcance.

²⁵ Es posible deducir la ecuación de Schrödinger de las ecuaciones de campos a energías no relativistas. Por ejemplo, la ecuación de Dirac es la generalización de la ecuación de Schrödinger y el punto de partida de la teoría cuántica del campo electromagnético de Swinger y Feynman, entre otros.

Junto a las doce partículas fundamentales y los tres bosones mediadores descubiertos se encuentran una gran variedad de partículas resultantes de los procesos de síntesis. En primer lugar, por cada partícula elemental existe una compañera con cargas físicas opuestas. Son las partículas de antimateria que, al interactuar con la materia ordinaria, se transforman en radiación electromagnética.

Existen partículas que permanecen estables durante un brevísimo periodo de tiempo (10^{-23} s) hasta desintegrarse por interacción fuerte en partículas más estables como protones, neutrones y piones. Son las partículas delta y sigma, que son resonancias bariónicas: partículas con mayor energía que las fundamentales. Es posible, incluso, que existan un número ilimitado de estas resonancias con mayor masa y espín. A energías mucho más elevadas que la de los modernos aceleradores (10^{17} eV) no sería posible otorgar el calificativo de fundamental a los electrones, neutrinos y quarks frente a las resonancias. La elementalidad de las partículas depende de la energía del entorno en cuestión²⁶.

Tras presentar la fenomenología de la composición física de la materia nos disponemos a indagar en la idea que la física de partículas ofrece acerca de la actividad física de la materia. La elementalidad de las partículas fundamentales depende de la energía del universo. No es algo absoluto. A altísimas energías, la física de partículas no puede distinguir los elementos básicos de la materia. Todo es un energético dinamismo que hace emerger multitud de partículas denominadas resonancias. Incluso, en situaciones de menor energía, cuando las interacciones físicas determinan las partículas fundamentales por su mayor estabilidad, podemos seguir hablando de la naturaleza emergente de la materia desde un soporte básico primario.

Los hadrones son partículas resultantes de una interacción entre elementos físicos, los quarks, que carecen de existencia individual. El protón no es la mera suma de tres quarks, pues el quark individual carece de sentido. No existe un quark aislado. En realidad el protón es producto emergente de las interacciones cuánticas entre gluones y quarks. El protón es el todo surgido de una sinergia física. Su individualidad y propiedades físicas están mejor definidas que las de sus constituyentes. En su dinámica desde un soporte energético fundamental, la materia emergente evoluciona hacia estados de mayor definición física como consecuencia de sus interacciones cuánticas básicas. Observamos cómo se va adquiriendo una mayor individualidad sin anular definitivamente el potencial emergente de su verdadera ontología. La física supera la epistemología newtoniana clásica de partículas elementales que se entienden como constituyentes básicos individuales de la materia. La individualidad de una partícula es un producto emergente que resulta de la interacción. El protón es lo que es por la interacción de los campos cuánticos y no por la suma de las individualidades de sus constituyentes.

En sintonía con el carácter fundamental de las partículas físicas, el espacio-tiempo de Einstein tampoco es un concepto absoluto. El espacio-tiempo es una estructura dinámica que sufre la presencia de las partículas a través de la interacción gravitatoria. Recíprocamente, este dinamismo perturba el contexto relacional de las partículas. A través de la interacción gravitatoria, el espacio-tiempo participa de la dinámica del zoo de partículas. Es, en definitiva, materia. Se trata de materia con unas propiedades físicas tan bien definidas como las de las partículas: curvatura, densidad de energía, constante dieléctrica, permeabilidad magnética... Podríamos decir, incluso, que el espacio-tiempo es una macropartícula que universaliza al resto de partículas, unificándolas en una región

²⁶ Cf. HOOF, G. T., *Partículas elementales. En busca de los elementos más pequeños del universo*, Barcelona: Crítica, 2001.

que favorezca su interacción mutua. La gravedad moldea la forma del espacio-tiempo e indirectamente determina las leyes físicas de las demás interacciones físicas.

En su condición de materia, la naturaleza física del espacio-tiempo depende de las condiciones energéticas. Si a bajas energías el espacio-tiempo se comporta como un soporte básico donde se manifiesta la actividad física, resulta bien conocido que el influjo de cuerpos muy masivos o campos muy energéticos transforman gravemente su naturaleza, alcanzándose un estado físico que las ciencias físicas no aciertan a describir con precisión. Al igual que con las partículas, a elevadas energías el espacio-tiempo parece descomponerse y dejar paso a un orden subyacente más básico. ¿De dónde surge, pues, el espacio-tiempo?

La pregunta que formulamos nos sitúa en la frontera del conocimiento científico, al borde de la especulación metafísica. Aun conscientes de las limitaciones científicas de estudiar un espacio-tiempo ultra-energético, trataremos de permanecer del lado de la ciencia relacionando las especulaciones teóricas con algunos de los fenómenos cuánticos del comienzo del capítulo. Si bien es cierto que la energía de los aceleradores sólo perturba ligeramente la estructura espacio-temporal, no resultan despreciables los efectos físicos que se producen. Las partículas que chocan violentamente en regiones espaciotemporales muy localizadas experimentan procesos físicos inexistentes en las condiciones ordinarias clásicas. Tras un choque energético no es posible predecir con certeza cuáles son las partículas resultantes. Posiblemente porque antes del choque no está definida la individualidad de los constituyentes de las partículas que colisionan. En cada colisión de partículas en los aceleradores resultan numerosos y distintos tipos de partículas. Es después del choque cuando la interacción de los campos cuánticos genera la individualidad de los nuevos productos de partículas. De forma efectiva, parece que la colisión provoca la emergencia de nuevas partículas. Así pues, aun a energías insuficientes para disgregar el espacio-tiempo, es posible comprobar su naturaleza emergente.

Extrapolando las teorías de campos cuánticos a energías más y más altas, se llega a fascinantes conclusiones acordes con el espectro de fenómenos cuánticos observados. La teoría de campos establece que tanto mayor ha de ser la energía de las partículas cuanto más profundamente se desee desentrañar la materia. A energía de 10^{17} eV es posible alcanzar los escondijos del núcleo atómico hasta sentir la presencia de las interacciones fuerte y débil que experimental los quarks a escalas de 10^{-18} m. Según reducimos la escala espacial y localizamos mejor la región espaciotemporal en cuestión, producimos una mayor indefinición en su cantidad de momento o energía, de acuerdo con el Principio de Heisenberg. Es decir, al acotar cada vez más una sección de espacio-tiempo, ésta se vuelve más indefinida. Tiene una dinámica tan energética y localizada que, lejos de ser un espacio-tiempo plano o suavemente curvado, presenta un patrón cuántico fluctuante de lo más irregular. El espacio-tiempo adquiere una estructura compleja con múltiples interconexiones²⁷. Con energías suficientes para alcanzar los 10^{-35} m, en la escala de Planck, se pierde toda definición: el espacio-tiempo tal y como lo conocemos deja de tener sentido físico. Siguiendo la analogía de Greene, se inspeccionaría la caldera principal de la fábrica del cosmos. El espacio-tiempo relativista tampoco es el fundamento primario de la realidad material. Si él mismo se descompone a energías de Planck, debemos preguntarnos cómo se compone el espacio-tiempo a partir del fondo planckiano²⁸.

²⁷ Cf. YNDURÁIN, F., *Electrones, neutrinos y quarks*, Barcelona: Crítica, 2001.

²⁸ Cf. GREEN, M., *The fabric of the cosmos. Space, time and the texture of reality*, New York: Knopf, 2005.

Al hablar de fondo planckiano no debemos pensar en una esencia física de carácter absoluto. Tanto epistemológicamente como científicamente carece de sentido atribuir la condición de absoluto a un ente físico. En este fondo de energía desaparece la idea clásica de materia atómica en favor de una concepción más campal, múltiplemente conexas, donde emergen las estructuras físicas capaces de mantener estas propiedades cuánticas bajo determinadas condiciones. El fondo de energía planckiano es materia a 10^{28} eV. No es una energía independiente. Es un campo de energía ligado con la materia fenoménica, tanto corpuscular como campal. Se trata de energía en interacción que produce el espacio-tiempo y las partículas que en él se sintetizan. En la frontera del espacio y del tiempo, el fondo de Planck es energía cuya razón de ser pierde todo sentido físico si su esencia fuese independiente de la materia explícita. La materia existe gracias a la actividad física de este fondo cuya esencia física es producir el espacio-tiempo, las partículas y los campos.

Las propiedades físicas están íntimamente ligadas con el entorno. La física de partículas no concibe partículas desnudas independientes como si tratara de pequeños corpúsculos indivisibles. Las partículas, cuya naturaleza física fundamental es siempre relativa, son objetos materiales revestidos o apantallados por la actividad del vacío²⁹. En el vacío están constantemente sintetizándose partículas virtuales que afectan a las propiedades físicas observables. Pretender interactuar con la esencia física de la partícula es un sinsentido pues no existe esencia física pura sino interrelación. En síntesis, podemos concluir que cada partícula es más un todo a través de su ligazón a una ontología capaz de hacer emerger materia, que un mero constituyente. La materia es en sí misma más interacción que individualidad, aunque la materia pueda gozar de una relativa independencia a través de estructuras más complejas surgidas en este orden físico holístico.

Desde el punto de vista de la física todo es materia en actividad física. Precisamente esta actividad de la materia, el dinamismo físico, permite su estudio científico. La materia es, pues, el resultado de una interrelación entre un fondo omnipresente interactivo cuyo estado de mínima energía es el vacío cuántico, siempre fluctuante, de donde emerge en condiciones energéticas adecuadas el espacio-tiempo y las partículas, como condensaciones del oscilante vacío a energías de Planck.

No existe una materia física fundamental. Cualquier partícula fundamental no es una entidad individual independiente de este fondo de energía. No es tanto una individualidad cuanto el producto de una necesaria coexistencia. Por ello, los físicos de partículas niegan que la masa de una partícula libre sea un observable. Carece de sentido físico porque cualquier partícula está siempre en interacción. Por tanto, al referirse a la masa de una partícula se entiende la masa efectiva que resulta bajo la acción del entorno energético.

Las partículas son concentraciones de la energía del vacío revestidas de fluctuaciones del vacío cuántico. No es posible pensar científicamente en un sustrato más fundamental, pero sí generar una explicación de la ligazón implicada-explicada entre el fondo de Planck y el espacio-tiempo. El espacio-tiempo es la consecuencia física explicada de una interacción holística más profunda en el fondo de energía de Planck. Es la macropartícula resultante de la interacción coherente de la energía subyacente, donde prima la interacción sobre la individualidad.

Alcanzamos ya la sexta afección ontológica en el lenguaje de la física.

²⁹ Cf. SHUMM, B. A., *Deep down things. The breathtaking beauty of particle physics*, Baltimore: John Hopkins University Press, 2005.

6) Fin del absoluto ontológico

La física nos conduce hacia un fondo de energía de cuya interacción surgen el espacio-tiempo, los campos y las partículas. Todo fenómeno físico apunta hacia un mismo origen. El lenguaje de las modernas teorías físicas pretende definir un estatus básico de interrelación para la materia. A nuestro entender, no se pretende ya tanto buscar un orden causal hasta el origen de la materia cuanto hallar una interrelación mutua coherente de la materia. No hay partículas sin campos, ni campos sin espacio-tiempo, ni estructura espaciotemporal sin el entrelazamiento coherente del fondo de energía. Ni, siquiera, fondo de energía sin partículas virtuales, pues sólo se entiende como una ontología cuya actividad física hace emerger la materia.

Todo es materia interconectada en el fondo planckiano de energía. Sólo existe el todo. Las partes no pueden entenderse sin referirlas coherentemente a un único todo. Es decir, el inabarcable todo es cuanto existe; pero su esencia puede ser aprehendida en la interrelación de sus partes. Es en el comportamiento colectivo emergente de la materia donde se capta su esencia consecuente con el conjunto de principios básicos más fundamentales. El lenguaje de la física no se refiere ya a una esencia en sentido absoluto. Más bien, la esencia radica en un holismo con potencial para hacer emerger los fenómenos desde una interrelación global que deja al absoluto ontológico en un plano marginal.

Es posible pensar que tanto permanecer al resguardo del ingenuo realismo, el lenguaje de la física termina rozando el idealismo epistemológico. Esta es la posición de la escuela de Bohr. Al final todos son conceptos, muy bien relacionados, que permiten explicar la realidad como epifenómeno. En la actualidad, con los descubrimientos de la física cuántica, es posible materializar los conceptos en una ontología que fundamente el ser físico. Esta ontología no entiende de determinismos clásicos, ni de leyes causa-efecto, ni siquiera de la continuidad del mundo macroscópico. La razón de ser de esta ontología es ser en relación. Y producir los seres como resultado de la fragmentación de interacciones en distintos niveles de realidad. Hasta tal punto es así que sabemos cómo la decoherencia de las interacciones no-locales de esta ontología produce nuevos elementos de realidad. La realidad es no-local y según se destruye la no-localidad la globalidad genera individualidad. Por eso decimos que la ontología no acepta la localidad clásica y que las partículas clásicas son elementos ónticos de una ontología dinámica menos conectada.

En síntesis, desde nuestra interpretación metafísica del lenguaje de la física no podemos decir que la física descubra una realidad última fundamental. No parece que exista una ontología que es lo que es y no puede ser de otra manera. La experiencia física nos desvela que existen múltiples niveles de realidad en correspondencia con distintos órdenes de conexión de una ontología dinámica con potencial para fragmentarse y sintetizar los elementos ónticos que constituyen las estructuras presentes en nuestras experiencias conscientes. No tenemos experiencia de esta ontología como soporte de la actividad física, pero sí es posible derivarla como consecuencia metafísica de los experimentos cuánticos. Ahora bien, no hay razón para dotarla de un carácter absoluto; porque los experimentos muestran variabilidad ontológica. Podría decirse que lo absoluto es la relación, pero si es relación no es absoluto. Y en este sentido hablamos del fin del absoluto ontológico.

3.4. *La última frontera de la física: la realidad como información cuántica*

Los experimentos cuánticos forzaron un giro en el lenguaje de la física desde el continuismo clásico hacia la discontinuidad en el espectro de valores posibles para algunas magnitudes observables. A diferencia del caso clásico un sistema cuántico dispone de un

número discreto de estados distinguibles. Por ello, basta una cantidad finita de información para registrarlos. Las leyes cuánticas hacen finita la cantidad de información necesaria para especificar el estado de un sistema físico en el régimen cuántico. Sin alternativas no hay información, porque la rigidez absoluta sería única y no necesitaría ser etiquetada.

La diversidad y la sorpresa hacen posible la información. Si todo estuviera determinado los acontecimientos presentes no producirían información. La información ya se tendría de antemano. Del mismo modo si todo fuera absolutamente único no habría posibilidad de que generara información, puesto que todo es de una sola manera y no hay posibilidad de que informe ser de manera distinta. Esto no es así en realidad. Solo la nada y lo absoluto se registrarían con cero bits de información. La realidad es que los procesos cuánticos generan información cuando se resuelve la incertidumbre cuántica y se genera el estado clásico observable. En la práctica, el número de alternativas cuántica en un sistema finito es finito y, por tanto, la información también es finita y cuantificable.

La reciente computación cuántica explota precisamente el extraño comportamiento del régimen microscópico. Los ordenadores cuánticos son dispositivos capaces de procesar la información de átomos individuales, fotones y demás sistemas microscópicos. En la actualidad se han construido pequeños ordenadores cuánticos a escala microscópica. Sabemos cómo hacer que unos pocos átomos realicen computaciones simples con la información que almacenan. Pero aún no disponemos de ordenadores cuánticos macroscópicos.

Con el desarrollo de la teoría de la información el lenguaje de la física integró en su vocabulario el *bit* como expresión de la unidad mínima de información. La relevancia creciente de la teoría de la información en la física cuántica ha provocado una readaptación del lenguaje físico en su aplicación a la interpretación de la realidad. Aparecen novedosos conceptos como el de campo de información que origina la realidad material del orden fenomenológico. Desde la perspectiva de la información cuántica, el universo entero se entiende hecho de bits.

Los bits clásicos tienen un único valor individual bien definido: el cero o el uno. A diferencia de un bit clásico, un bit cuántico o *qubit* puede registrar una combinación de los dos valores a la vez. De acuerdo con la interpretación de la realidad cuántica seguida en este artículo diríamos que el qubit no tiene un individualidad óptica definida, pues permanece en una ontología cuántica que aún no se ha fragmentado para producir el bit clásico concreto y la consiguiente determinación del valor cero o uno. Puesto que el qubit goza de las propiedades cuánticas de su ontología, un ordenador cuántico puede ejecutar simultáneamente varias computaciones. El procesamiento cuántico en paralelo es distinto del clásico, ya que no se trata de una mera asociación de procesadores operando juntos. Más bien, en computación cuántica un único procesador realiza varios procesos simultáneamente, del mismo modo que una partícula cuántica puede estar en varias posiciones al mismo tiempo. El ordenador cuántico se beneficia de la ontología cuántica para procesar la información del mismo modo que lo hace la realidad cuántica por su razón de ser ontológica.

Un ordenador cuántico se entiende como una colección de qubits. Su potencia de computación es proporcional al número de qubits. Diez qubits pueden realizar 1024 operaciones simultáneas. Con n qubits se realizarían 2^n operaciones simultáneamente. El universo en su conjunto es un inmenso ordenador cuántico que procesa los bits registrados en el campo de información. Cuando decimos que el universo computa entendemos que su lenguaje de computación son las leyes físicas. La computación del universo

no parece ser clásica, ya que los bits clásicos no funcionan bien para almacenar la información de un sistema cuántico. Al ser cuántico el nivel fundamental del universo, el cosmos debe comportarse como un computador cuántico. Ante la pregunta de qué información se está procesando, se respondería que el universo se computa a sí mismo, pues el universo es información. El universo es un todo autosuficiente de información capaz de procesarla para ganar en complejidad.

El concepto de universo computacional no se opone a la idea clásica de universo físico. La cuestión de fondo a discutir del universo computacional es: ¿de dónde procede la energía? A este interrogante la física cuántica responde que la energía es analizable físicamente en términos de campos cuánticos, que conforman la fábrica del universo y de cuyo oleaje emergen las partículas elementales. En este sentido, la información y la energía desempeñan funciones complementarias en el universo. La energía hace que las cosas sean y la información les dice qué deben ser. Hacer algo cuesta energía y especificarlo necesita información. La sorpresa y la diversidad tan características de nuestro mundo físico, biológico, psíquico y cultural indican que la concreción de nuestro mundo requiere procesar la información que hace posible la determinación individual en el orden global.

En el lenguaje actual de la física podemos asegurar que información y energía están al mismo nivel fundamental. La complejidad de las estructuras fenomenológicas del universo es una manifestación del potencial cósmico para computar la información cuántica fundamental que gobierna los procesos microscópicos. Todos los sistemas físicos son últimamente cuánticos. Y, por tanto, registran, procesan y generan bits de información. El valor de un bit de información no es algo absoluto por su valor específico sino, más bien, algo en relación con otros bits involucrados en el proceso de información. No importa tanto la parte como el todo para entender cómo surge la evolución dinámica del universo hacia la complejidad desde el procesamiento de información en sistemas cuánticos. Es más, de nuevo la parte no está definida como individualidad en la ontología cuántica y por ello tiene mayor importancia el carácter holístico de la realidad.

Avanzar en la tecnología de ordenadores cuánticos permitirá profundizar en cómo el universo genera estructuras complejas a partir del registro y procesamiento de su propia información. Si pensamos que el ordenador cuántico macroscópico universal es el propio universo, entonces el objetivo principal es revelar el papel fundamental que la información desempeña en la evolución del universo. En opinión de algunos físicos actuales, un ordenador cuántico artificial realizaría el mismo procesamiento de la información siguiendo las mismas instrucciones y obtendría los mismos resultados.

Según Lloyd³⁰, un supuesto observador no sería capaz de distinguir el procesamiento cuántico del universo del de un simulador. El universo no puede ser completamente desvelado salvo que se obtenga un duplicado indistinguible del original. A su modo de ver, el ordenador cuántico y el universo serían esencialmente idénticos; pues, a su juicio todo es una manifestación de la computación cuántica del universo. Lloyd se lamenta de que aún no se disponga de un simulador cuántico universal, pero afirma que bastaría un ordenador cuántico que realizara 10^{122} operaciones por segundo con un total de 10^{92} bits. Un ordenador cuántico funcionaría como un simulador universal del mismo modo que propio universo físico. La simulación podría llegar a ser tan precisa que el

³⁰ Cf. LLOYD, S., *Programming the Universe. A Quantum Computer Scientist Takes On the Cosmos*, New York: Alfred A. Knopf, 2006.

comportamiento del ordenador fuera indistinguible del universo. ¿Quiere decir esto que un futuro ordenador cuántico creado con una tecnología futura podría producir un nuevo universo?

Recordemos que información y energía están en el mismo nivel fundamental. Si hipotéticamente se dispusiera de un ordenador cuántico que procesara la información como el propio universo, tendríamos un gran simulador cósmico que, en el mejor de los casos, nos permitiera influir en la evolución del universo —como en realidad ya hacemos en el presente a escala planetaria—. Pero no debemos pensar que podríamos crear un nuevo universo, porque ¿de dónde se obtendría la energía? Si nuestro universo no ha producido aún un universo hijo probablemente se deba a que todo el universo carece de la energía necesaria para hacerlo factible. Centrémonos, pues, en la explicación del origen de nuestro universo desde la teoría cuántica de la información.

El universo primitivo, simple y ordenado, podía ser descrito con unos pocos bits de información. Tras el inicio de la expansión, la energía libre primordial disponible en los campos cuánticos permitió que se materializara el procesamiento de la información cósmica en las primeras partículas elementales. A medida que el universo se expandía fue procesando información, transformándose y registrando nuevos bits de información que guiaron los siguientes estadios característicos de la evolución hacia la complejidad. Cuando el universo se enfrió lo suficiente para evitar que las partículas perdieran su individualidad, empezaron a formarse los primeros condensados locales de partículas. El universo fue aumentando su entropía, aunque, seguía siendo uniforme y sin estructura a gran escala. Entonces, ¿cómo surgió la estructura cósmica a gran escala?

Los orígenes de la estructuración macroscópica del universo se explican en la sinergia entre las leyes de la gravedad y de la física cuántica. Debido a fluctuaciones cuánticas algunas regiones del universo se volvieron ligeramente más densas que otras. La gravedad amplificó estas fluctuaciones de densidad hasta el nivel macroscópico. En este proceso se generaron nuevas cantidades de energía libre que permitiría en el futuro la estructuración y emergencia de los seres vivos. Esta facultad de la gravedad se asemeja a las propiedades del caos: una levísima diferencia puede producir grandes divergencias en el futuro. El azar es también un elemento importante en la evolución del universo. La generación de bits aleatorios de información juega a favor de la emergencia de la complejidad en el universo. Un sistema absolutamente estable no evoluciona pues no tantea alternativas que lo hagan mejorar. Al azar muchas de estas alternativas son contraproducentes, pero algunas sí podrían ser beneficiosas. Los bits aleatorios dependen últimamente de las fluctuaciones cuánticas en el despertar del universo. Parece posible, pues, que la aleatoriedad cuántica haga mejorar el programa del comportamiento futuro del universo sin necesidad de recurrir a un centro de inteligencia que lo diseñara absolutamente desde el principio. En este sentido, el universo se haría inteligente a sí mismo.

Boltzmann argumentaba que la complejidad del universo se debía al azar; es decir, lo atribuía a la consecuencia de una fluctuación estadística como en el caso gravitatorio. En la actualidad muchos patrones de complejidad matemática pueden ser producidos por programas informáticos simples. En la física clásica de Boltzmann, conocer las partes de un sistema es comprender el sistema como un todo. Pero en física cuántica el sistema en su conjunto puede estar en estado holístico bien definido, aunque sus constituyentes no tengan definida su individualidad. Así, en un entrelazamiento cuántico podemos conocer el estado un sistema cuántico en su conjunto, pero no los estados cuánticos individuales de sus constituyentes. Tiene sentido físico el conjunto, pero no las partes que se derivan tras la fragmentación del estado cuántico en el proceso de decoherencia. De acuerdo con Lloyd el entrelazamiento es el responsable de la generación de

información en el universo. De esta manera se contempla la posibilidad de producir información física en el lenguaje actual de la física cuántica.

Las leyes de la física cuántica están permanentemente inyectando nueva información en el universo debido a las omnipresentes fluctuaciones cuánticas. Las fluctuaciones cuánticas están reprogramando el universo, de la misma manera que el azar físico regula la recombinación genética en un embrión. Aunque el universo era simple de inicio pudo intrínsecamente generar con el tiempo estructuras complejas debido a la superposición coherente de estados cuánticos. En estado de superposición cuántica el universo pudo realizar en paralelo todas las posibles computaciones y generar la complejidad que hoy percibimos. Siguiendo a Lloyd, los qubits podrían representar valores locales de la densidad de energía en el universo primitivo. Las superposiciones coherentes propagaron la información y originaron los procesos de transformación cuántico-clásica de algunos qubits en bits. En este proceso de reducción clásica la gravedad se acopló a las fluctuaciones de energía de los qubits y operó como un amplificador macroscópico que causó la gravedad clásica, liberó grandes cantidades de energía gravitatoria, rompió el equilibrio cuántico y originó la compleja estructura del universo a gran escala.

7) Fin de la unicidad del diseño ontológico

De acuerdo con la moderna teoría cuántica de la información el universo es capaz de diseñarse a sí mismo. Debido al carácter holístico de su existencia la historia del universo podría haber sido muy distinta. Abusando del lenguaje de las teorías de la información cuántica diríamos que el universo no nace, sino que se hace. Cuando se afirma que el universo funciona como un ordenador cuántico se entiende que el universo procesa simultáneamente todas sus posibles historias y termina produciendo una realidad física concreta. En este sentido, concluimos en esta séptima aficción ontológica del lenguaje físico afirmando que no hay razón física para afirmar la preexistencia de un diseño ontológico previo al comienzo de la actividad física del universo. Más bien, se desprende de las teorías físicas que el soporte del universo físico es un sustrato ontológico totipotente. Algo parecido a las células totipotentes cuyo diseño no está preestablecido en su naturaleza sino que se determina en función de la información que procesa en convergencia con otras células de su entorno.

A nuestro modo de ver la carencia de elementos de realidad que constituyan la ontología cuántica es un indicador de que no hay un absoluto ontológico y de que la ontología del universo es capaz de producir novedades que se concretan en los elementos ónticos del régimen clásico. Usando el lenguaje de la física de la información cuántica, el universo produce información cada vez que emergen las realidades individuales clásicas de un fondo ontológico más holístico. Esa información es necesaria para dar forma a la ontología cuántica que se fragmenta. En la formalización del mundo clásico la interacción gravitatoria ha sido fundamental al introducir nuevos grados de libertad que se han aprovechado para que la complejidad emergiera en un universo que en sus inicios fue puramente cuántico.

Sabemos que la gravedad es la única interacción física que no ha desvelado experimentalmente un comportamiento cuántico. Posiblemente la asimetría entre la gravedad y las tres interacciones cuánticas sea el origen de la estructuración y complejidad creciente en la evolución cósmica a gran escala. Quizás de haber sido también una interacción cuántica tan potente el universo físico que observamos no existiría porque todo perduraría en su ontología cuántica original. Es posible que la gravedad también tenga una naturaleza cuántica. De ser así, sería interesantísimo estudiar los sistemas físicos

con gravedad cuántica. Es de suponer que estos sistemas estarían muy próximos a la ontología cuántica primordial y podríamos seguir profundizando en la naturaleza ontológica de la realidad. La observación de la evolución de estos sistemas gravitatorios cuánticos abriría nuevas ventanas hacia la metafísica de la realidad y se descubrirían potentes vías heurísticas para conocer cómo se debió fragmentar la ontología primordial y comenzó a diseñar el universo de las estructuras físicas, de los seres vivos y de la conciencia. Por este motivo la gravedad cuántica pudiera aportar alguna luz acerca del despertar cósmico de la actividad física y la emergencia de los seres vivos que la sienten y toman conciencia de su naturaleza.

4. DERIVACIONES METAFÍSICAS DEL LENGUAJE FÍSICO

El lenguaje de la física es un modo de hablar acerca de lo fenoménico. Como hemos explicado en este trabajo, parte del lenguaje de la física se ha especializado en dotar de andamiajes matemáticos a los fenómenos físicos como explicación última de su realidad. La versión más matemática de los lenguajes de la física se reduce a diseñar estructuras matemáticas que fundamenten las observaciones. Pero la física no se agota con la teoría matemática. El concepto de teoría en el lenguaje de la física es mucho más preciso que lo que comúnmente entendemos por teoría, como algo que podría funcionar. Los físicos desean construir teorías físicas que, de acuerdo con los resultados experimentales, permitan dar cuenta de la realidad.

A nivel fundamental el lenguaje de la física ofrece una comprensión profunda de la realidad que exige una reflexión metafísica. No es posible ofrecer una visión física de la realidad que se contenga a sí misma. Sin tiempo no hay actividad física que observar y la creación no es posible en la física. Las raíces del lenguaje físico dejan entrever un sustrato metafísico necesario para comprender el marco físico de la realidad. En este artículo hemos expuesto siete consecuencias metafísicas que se desprenden de la reflexión conceptual de las teorías físicas.

De acuerdo con las modernas teorías de la física la realidad no admite un determinismo ontológico donde todo está preestablecido desde el inicio del universo. Más bien se ofrece la imagen de una realidad que es fundamentalmente abierta capaz de hacer emerger un orden clásico concreto de un fondo dinámico de actividad indeterminada. En consecuencia con este incesante dinamismo no es posible asumir el estricto continuismo de las leyes causa-efecto propias de la mecánica clásica. Sin trayectorias clásicas se hace necesario suponer que el universo físico es últimamente emergente, es decir, un orden emanado de una realidad capaz de producirlo globalmente. La pérdida de causalidad física en el fondo permite el origen espontáneo del universo físico en una ontología que es naturalmente abierta. Las propiedades físicas emergen de un fondo de realidad que permite la variabilidad ontológica hasta el punto de que al llegar a ser lo que son no se pueden entender sin recurrir a nuevos niveles de realidad. La emergencia de estos niveles produce un orden de la realidad con propiedades físicas surgidas del despliegue ontológico.

En una realidad metafísica sin espacio ni tiempo sería razonable suponer la existencia de conexiones espontáneas y holistas en su fondo ontológico. Lo sorprendente es que esta conectividad no-local se ha manifestado también en el orden físico bajo condiciones de amparo suficientes. La presencia de acciones a distancia cuasi-instantáneas invita a reflexionar sobre una ontología múltiplemente conectada que puede proceder más allá del esquema conexionista de la causa y el efecto. En el fondo la realidad es pura

conectividad. La relación de fondo consigo misma conforma una ontología sin un absoluto que sea el origen de todo. La realidad carece de un absoluto básico. Lo primordial es su capacidad para producir todo porque toda ella es relación de todo. En este sentido esta ontología de la realidad enlaza muy bien con las consecuencias físicas de la moderna teoría de la información. La ontología produce el mundo físico porque es información capaz de modelarse.

Hemos visto que la elaboración de teorías físicas moderna exige explicar lo observado dejando al margen observadores absolutos. Pero la realidad es que es imposible conocer completamente el mundo físico sin la observación. En consecuencia toda descripción física es siempre relativa a un observador. Y, por tanto, buscar un fundamento ajeno al observador es una tarea distinta de los cometidos de las ciencias físicas. Por ello, la física actual parece dejar a un lado las cuestiones metafísicas que exigen un compromiso interpretativo de la realidad. En el mejor de los casos se abusa de lenguaje físico-matemático que valide los fundamentos de la realidad física.

En realidad, como vemos, muchas cuestiones que se inician desde el lenguaje de la física terminan derivando en cuestiones filosóficas que muchos físicos abandonan por ser meramente metafísicas. Ante esta derivación hacia lo metafísico y la resistencia de muchos físicos por lo metafísico, conviene subrayar que la física tiene una dimensión intuitiva irreducible al lenguaje matemático. La intuición metafísica y su planteamiento físico han sido los motores de los grandes descubrimientos y teorías en la historia de la ciencia. En la segunda mitad del siglo xx, la física se ha dejado atrapar por la belleza del formalismo matemático hasta llegar a reducir la realidad a información intangible. Sin duda la riqueza de la naturaleza física es superior, tal y como se ha demostrado repetidamente en su inigualable historia.

La sola aproximación a la ontología física que soporta la realidad experimental nos proyecta hacia nuevos interrogantes que trascienden lo puramente físico. No necesariamente hablamos de proyecciones sobre lo filosófico o temas profundos de la filosofía de la naturaleza como el origen del tiempo físico en una realidad eterna metafísica. La simple emergencia de órdenes de complejidad en la realidad física nos mueve hacia otras fronteras de la ciencia donde el concepto de orden es aún más trascendente. El emergentismo es todavía hoy una corriente más filosófica que científica. No por ello se ha quedar reducido al margen del quehacer propio de la ciencia. La ciencia puede servirse de las intuiciones metafísicas que, desde el emergentismo, se proyectan hacia distintos ámbitos de realidad (físico, biofísico y psicobiofísico) que demandan una comprensión de fenómenos emergentes (la reducción cuántico-clásica, el orden complejo, la conciencia...) carentes aún de una explicación científica.

La física que gobierna unas pocas partículas es muy diferente del comportamiento colectivo de los sistemas múltiples debido a la emergencia de correlaciones entre constituyentes. El modelo estándar de la física de altas energías no puede reproducir los movimientos holísticos de las partículas. A bajas energías emerge todo un mundo de fonones independiente de las interacciones atómicas. Junto a los fonones emergen nuevas leyes físicas de interacciones dipolares que forman bloques de materia muy diferentes de las partículas de altas energías. Existen nuevos órdenes emergentes de la materia inabordable desde las teorías físicas reduccionistas. Surge un nuevo orden topológico que determina la realidad física. El orden topológico es aún metafísico, pero su rápido desarrollo matemático y aplicación en la física de la materia condensada pueden proporcionar claves para una nueva ontología física más unitaria y global.

Supuesta esta ontología física emergente, resulta natural explicar el origen y evolución del universo como un producto de este substrato metafísico que se hace explícito a

través de procesos cuánticos consolidados en el régimen clásico de la experiencia. Las estructuras físicas, los seres vivos, el psiquismo animal y la conciencia son productos que últimamente emergen de esta ontología dinámica. La incesante actividad de esta realidad subyacente dinamiza todo el proceso evolutivo del cosmos, generando estructuras clásicas más complejas y estables, capaces de resonar las propiedades cuánticas de su naturaleza material, tal y como los fenómenos cuánticos macroscópicos mantienen sus propiedades cuánticas a nivel de experimentación.

Análogamente, las propiedades psíquicas de los animales superiores o la formación de sofisticados estados conscientes en el hombre son productos resultantes de la evolución cósmica de estructuras materiales. Las estructuras psíquicas son resonadores más finos capaces de explicitar las propiedades psíquicas de la ontología material. No sólo canalizan la actividad física de la materia, como durante miles de millones de años hizo el universo físico, sino que activan la dimensión psíquica de la materia. En este sentido, la actual neurología propone una coordinación entre las regiones del cerebro más primitivo y del moderno neocórtex, más susceptible al comportamiento psíquico.

4. CONCLUSIÓN

Se ha dicho frecuentemente que el siglo XXI es el tiempo de la biología. A mi modo de ver, sin duda es el tiempo de la biología en su dimensión más física e interdisciplinar. El estudio de la formación de nuevos órdenes en la materia para la vida es una de las tareas más apasionantes para los biofísicos que se preocupen de las cuestiones científicas fundamentales como el origen físico de la vida. Coincido plenamente con el premio Nobel de física Murray Gell-Mann cuando afirma: «Se hace cada vez más necesario complementar la especialización con la integración. Dedicarse a poner en claro lo que otros han hecho, o a extraer lo que vale la pena de entre lo accesorio, es una dedicación que ofrece menos facilidades para hacer carrera, pero sería mejor para la humanidad»³¹.

Este siglo ya ha dado importantes frutos en técnicas de neuroimagen y estudio del cerebro como un todo orgánico. Ahora bien, aún sigue siendo un enigma cómo se produce científicamente la emergencia de la conciencia. No hay un patrón definido por las neurociencias que clarifique la explicación científica de este fenómeno. Sin embargo, el carácter enigmático y escurridizo de la conciencia hace pensar que la conciencia sea un fenómeno holístico cuyas propiedades se asemejan a las propiedades de la física cuántica.

Es muy razonable pensar que esta hipótesis sea muy arriesgada. De hecho, lo es. No hay experimentos que permitan comprobarla, ni tampoco ha sido refutada. Sus partidarios tan solo cuentan con pequeños indicios de una incipiente biología cuántica en el nivel más primario de la vida. Parece ser que la transformación de la energía solar en energía química en los vegetales en el proceso de fotosíntesis es tan eficiente porque se trata de un proceso cuántico. Este fenómeno de adaptación cuántica a la luz solar puede abrir nuevas líneas de investigación que apunten hacia una cosmovisión holística de la naturaleza (física, biológica y neurológica) basada tanto en la interpretación metafísica de los campos cuánticos de la física como en el nuevo lenguaje físico de la comunicación en términos de entrelazamiento.

³¹ Cf. GELL-MANN, M., *El quark y el jaguar*, Barcelona: Tusquets, 1995.

Concluyo este artículo advirtiendo el nacimiento de un nuevo lenguaje interdisciplinar nacido de la convergencia entre los fenómenos neurológicos de la conciencia y las propiedades cuánticas de la física. La denominada neurología cuántica podría llegar a convertirse en una enriquecedora fuente de nuevas terminologías científicas que apoyaran la idea metafísica de una totalidad campal. En su apoyo la teoría cuántica de la información, una de las disciplinas físicas más fructíferas en la actualidad, está construyendo un lenguaje físico de la información desde las ideas cuánticas de teleportación y acoplamiento entrelazado de los estados físicos, que podría ser adaptado e implementado para describir físicamente el procesado físico de la información sensorial en el cerebro de un ser vivo. Al igual que el universo físico se diseña a sí mismo, el cerebro puede también modelarse a sí mismo.

Universidad Comillas
Cátedra Ciencia, Tecnología y Religión
mbejar@recuerdo.es

MANUEL BÉJAR

[Aprobado para publicación en este número extraordinario en diciembre 2012]

