

Seminario de la Cátedra de Ciencia, Tecnología y Religión

EINSTEIN, SU CIENCIA Y LA NATURALEZA DEL CONOCIMIENTO CIENTÍFICO

*Crónica de la primera sesión general
(25 de noviembre de 2005)*

**Prof. Azcárraga, Catedrático de Física Teórica de la Universidad de Valencia.
Prof. Fernández Rañada, Catedrático de Física Teórica de la Universidad
Complutense de Madrid.**

El comienzo de este nuevo ciclo de seminarios abiertos coincide con el final de la celebración del centenario del *annus mirabilis* de la física. No podríamos, pues, iniciar mejor este curso 2005/06 que dedicando esta primera sesión al estudio de la física y pensamiento del mayor puntal científico del siglo XX: el genial Albert Einstein, que con solo veintiséis años publicó en 1905 cuatro artículos que revolucionarían la ciencia y el pensamiento del siglo XX.

El ponente principal de esta sesión, el Prof. Azcárraga, comenzó su exposición con una revisión histórica de los conceptos físicos más importantes previos al pensamiento de Einstein. Antes de 1900, la ciencia física funcionaba según las directrices marcadas por Newton en sus *Principia* (1687). El tiempo y el espacio eran hasta entonces conceptos absolutos: un intervalo espacial o temporal era el mismo en cualquier región del Universo con independencia de las condiciones físicas del observador. La física de Newton –hoy también denominada física clásica– no conocía los fenómenos microscópicos de carácter cuántico y aún no aceptaba con rigor científico la existencia de los átomos. Todas las observaciones físicas del momento podían describirse, con buen grado de precisión, mediante tres principios newtonianos (Inercia, Fundamental y de Acción-Reacción), la ley de gravitación universal¹ y las ecuaciones de Maxwell (1873). Estas últimas describen los fenómenos electro-magnéticos y predicen la existencia de ondas electromagnéticas (ondas de radio, la luz, rayos X...). Se trata de una concepción de la física donde no aparece la dualidad onda-corpúsculo y sólo algunos fenómenos *residuales* no podían ser explicados: el movimiento anómalo del perihelio de Mercurio (43 segundos cada siglo), la radiación del cuerpo negro (catástrofe ultravioleta) y el problema de la existencia del éter luminífero. Por lo general, estas leyes clásicas son sencillas y singulares. Es decir, ocupan poco espacio, son únicas y no admiten modificación alguna. Cualquier pequeño cambio (la modificación de la Ley de Gravitación Universal por una relación cúbica en vez de cuadrática) provocaría la inexistencia de órbitas cerradas y la consecuente imposibilidad

¹ La fuerza de atracción entre dos cuerpos es proporcional al producto de sus masas (M y m) e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia (d), siendo $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kg \cdot s^2}$ la constante

de proporcionalidad: $F = G \cdot \frac{M \cdot m}{d^2}$

para la formación de sistemas planetarios y el desarrollo de la vida. Ahora bien, como demostró Einstein, se trata de ecuaciones inexactas e incompletas.

El año 1905 pasó a la historia de la ciencia como *annus mirabilis* de la física. En la soledad de su trabajo en la oficina de patentes de Berna, Einstein descubrió en solo seis meses los cuantos energéticos de luz que explicaban el efecto fotoeléctrico (la emisión de electrones cuando incide luz adecuada sobre una placa metálica), el movimiento browniano (la compleja trayectoria que siguen partículas como granos de polen en el agua), la electrodinámica de los cuerpos en movimiento (la Relatividad Especial) y la equivalencia de masa y energía (la famosa ecuación $E=mc^2$). Cualquiera de estos trabajos hubiera bastado para recibir el Premio Nobel de física; pero fue por su explicación del efecto fotoeléctrico según paquetes de energía cuántica por lo que recibió el galardón en 1923.

La física de Einstein permitió evolucionar la física newtoniana. Su novedosa mecánica sustituye a la de Newton, que fracasa en sus predicciones físicas para sistemas con velocidades próximas a la de la luz. No se trata de una propuesta suplementaria sino complementaria. Es decir, la Teoría de la Relatividad de Einstein amplía el límite de validez experimental de la mecánica newtoniana y la reproduce en el límite de velocidades mucho menores que la de la luz. La Relatividad indica cómo deben modificarse las leyes de Newton para mantener la constancia de la velocidad de la luz con independencia del sistema de referencia. Consecuentemente, el tiempo y el espacio pierden el carácter absoluto de la física newtoniana y se funden en un único concepto: el espacio-tiempo introducido por un profesor de Einstein en Zurich, el matemático Hermann Minkowski. Los conceptos absolutos, infinitos y matemáticos (ideas) del espacio y tiempo newtoniano son reemplazados por una única entidad física (materia) de cuatro dimensiones cuya medida depende del sistema de referencia empleado: el espacio-tiempo. De nuevo, parafraseando una metáfora deportiva de Einstein: *la Relatividad no gana a la teoría newtoniana por K.O. sino por puntos.*

En 1915, Einstein propone una generalización de su Relatividad de 1905, la Relatividad Restringida, a sistemas de referencia no inerciales: la Relatividad General. La Teoría de la Relatividad General es una propuesta clásica geométrica que describe la dinámica del espacio-tiempo en relación con la distribución de materia. La ampliación de la Relatividad Restringida a sistemas acelerados (no inerciales) supone la inclusión de la fuerza gravitatoria en la geometría espaciotemporal; es decir, el campo gravitatorio se describe como una distorsión del espacio-tiempo. La materia curva el espacio-tiempo y esta curvatura provoca desviaciones de las trayectorias rectilíneas en los cuerpos (el equivalente einsteiniano al Principio Fundamental de Newton). La luz, formada por partículas carentes de masa, debería permanecer siempre en movimiento rectilíneo uniforme de acuerdo con el Principio de Inercia newtoniano. Sin embargo, según la Relatividad General, la luz sigue una trayectoria curva impuesta por la topología misma del espacio-tiempo. La desviación experimental de los haces de luz o fotones estelares cuando atraviesan regiones cercanas a grandes objetos gravitatorios queda, con excelente grado de precisión, explicada por la Relatividad General. Así pues, en el marco relativista podemos decir que la luz *pesa*², aunque los experimentos no le asignen

² En síntesis, las ecuaciones de campo de Einstein² $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \chi T_{\mu\nu}$ relacionan la geometría del espacio-tiempo (primer miembro) con su contenido de materia (segundo

una masa. En 1919, Arthur Eddington organizó dos expediciones a las islas del Príncipe en Guinea y a Sobral en la costa este de Brasil. Aprovechando un eclipse solar, fotografió la luz estelar que pasaba cerca del Sol y comprobó la desviación de los rayos estelares predicha por Einstein, como consecuencia de la curvatura espaciotemporal producida por el Sol. Esta comprobación experimental catapultó a Einstein a la fama. Como apuntó Joseph J. Thomson, presidente de la *Royal Society*: *ha nacido un nuevo genio de la física que derroca a Newton*.

Después de esta introducción al trabajo de Einstein sobre gravedad, el Prof. Azcárraga expuso algunas nociones sobre la otra teoría física original del siglo XX: la Mecánica Cuántica. El 14 de Diciembre de 1900 a las 17:00h. nacía una idea física revolucionaria que llegaría a ser la mayor teoría jamás construida por el hombre: la Teoría Cuántica de Campos. En esta fecha –reunida la sociedad alemana de física– uno de los participantes, Max Planck presentó un modelo teórico que explicaba la radiación térmica del cuerpo negro a partir de pequeños paquetes de energía (los posteriormente llamados *quanta* de energía). La curva de radiación predicha por Planck se ajustaba correctamente a los datos experimentales. Consecuentemente, la estadística termodinámica clásica de Ludwig Boltzmann fue reemplazada por la distribución cuántica de Planck³. La teoría de Planck permitiría, casi un siglo después, corroborar la hipótesis del Big Bang a través de la medida de la radiación de fondo de microondas realizada por el satélite C.O.B.E. en 1995. La distribución de Planck se ajustaba con un excelente grado de aproximación al espectro térmico de la radiación de fondo. La Mecánica Cuántica revolucionó la física durante la década de los años veinte. La imagen planetaria del átomo de Ernest Rutherford fue reemplazada por el modelo de orbitales cuánticos del danés Niels Bohr donde la posición de los electrones es descrita por una función de onda que permite calcular la probabilidad⁴ de que ocupen una cierta región espacial. Esto conlleva una nueva imagen de la materia: los electrones no son partículas puntuales con posiciones y velocidades clásicas sino una densidad local de energía distribuida en el espacio-tiempo.

Ya en Princeton, después de emigrar a EE.UU. en 1933, Einstein se planteaba las consecuencias epistemológicas de la dimensión estadística de la Mecánica Cuántica en su predicción de los sucesos naturales. Einstein no aceptó la teoría cuántica (de corte estadístico) como teoría final de la naturaleza de la realidad. En palabras suyas: *Dios no juega a los dados*. Los miembros de la Escuela de Copenhague defendían que todo el conocimiento del mundo físico quedaba dentro de los límites de la Mecánica Cuántica. Podemos decir que reducían la ontología natural a la epistemología de la física. Entre ellos, Bohr y Werner Heisenberg, sostenían imposibilidad de extrapolar las ideas del mundo macroscópico al microscópico. Consideraban que la ecuación principal de la

miembro); es decir, la geometría espaciotemporal ($g_{\mu\nu}$) está determinada por la distribución de materia ($T_{\mu\nu}$). $\Lambda g_{\mu\nu}$ es el término de repulsión donde Λ es la famosa constante cosmológica.

³ La relación entre la intensidad de la radiación (I) y la frecuencia (ν) viene dada por la expresión:

$$I(\nu) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}; \text{ donde } T \text{ es la temperatura del cuerpo negro, } h \text{ es la constante de Planck, } k \text{ la}$$

constante de Boltzmann y c la velocidad de la luz.

⁴ La función de onda Ψ describe la densidad de probabilidad de encontrar una partícula (electrón) en una región del espacio. El módulo cuadrado de esta función ($|\Psi|^2$) indica su probabilidad.

Mecánica Cuántica, la ecuación de Schrödinger, es causal pero que existían limitaciones intrínsecas que no podían eliminarse. Por su parte, Einstein discrepaba de estas ideas positivistas sobre la naturaleza cuántica del mundo físico, manteniendo asiduas discusiones epistemológicas con Bohr, figura principal de la Escuela de Copenhague. Para Einstein, las limitaciones establecidas por la Mecánica Cuántica radican en el seno de su formalismo. Una teoría mejorada podría lograr predicciones deterministas, ajenas a la aleatoriedad estadística, con la introducción de nuevos parámetros; aquéllos que posteriormente se conocerían en la literatura científica, gracias a David Bohm, como variables ocultas. Los trabajos teóricos de John Bell y la comprobación empírica de la existencia de interacciones físicas a distancia por Alain Aspect parecen indicar que las ideas epistemológicas de Bohr prevalecen sobre la ontología de Einstein. Las investigaciones de Bell y Aspect refutan la existencia de las supuestas variables ocultas ontológicas de Bohm-Einstein; al menos, en su versión local. Sólo el desarrollo de una teoría no local de variables ocultas permitiría replantear la idea epistemológica de Bohr sobre la Mecánica Cuántica que, para cualquier propósito práctico, es una teoría con un extraordinario grado de predicción experimental.

Por lo general, como destacó el Prof. Azcárraga, el avance de la ciencia se dirige por la paulatina eliminación de los posibles rasgos antropomórficos de sus teorías. Así fue como el sistema físico universal tolemaico se reemplazó por el sistema heliocéntrico de Copérnico. Del mismo modo, las teorías físicas modernas, Relatividad General y Mecánica Cuántica, desafían el sentido común de la experiencia ordinaria y plantean exóticas predicciones en los límites de altas velocidades o de acciones físicas comparables con la constante de Planck (h), más allá de la sensibilidad inmediata del hombre. También en Biología, Darwin eliminó toda referencia a una condición humana especial en favor de una especie más de la cadena evolutiva. En síntesis, el Prof. Azcárraga piensa, con una clara perspectiva popperiana, que la ciencia progresa a través de la falsación o refutación. Ninguna teoría es integralmente verificable; tan sólo puede ser comprobada experimentalmente en un marco limitado. Más allá de este dominio, no hay razón para que la teoría siga siendo válida. Es más, es posible que no lo sea y nuevas teorías sean requeridas para explicar otros posibles fenómenos. Siguiendo la tesis expuesta por Kuhn en su obra *La estructura de las revoluciones científicas*: el avance científico queda definido por el tránsito de un estado normal de la ciencia hacia un nuevo paradigma surgido de una revolución teórica o experimental.

El Prof. Azcárraga finalizó su intervención refiriéndose a la cuestión sobre la aparentemente irrazonable efectividad de las matemáticas para describir el mundo físico, que ya Eugene Wigner había planteado a la ciencia. Todo pensamiento físico es, en última instancia geométrico; pues toda descripción física está referida a un espacio-tiempo definido geométricamente. El objetivo de la ciencia física es encontrar una geometría adecuada para describir un conjunto universal de leyes de la naturaleza. Con tal ambiciosa empresa, resulta natural cuestionarse si existe un teoría capaz de explicar todo cuanto sucede en la realidad, es decir, lo que se denomina una teoría del todo. En la actualidad, las teorías candidatas a teoría del todo, como la teoría de supercuerdas, se alejan mucho de predecir las constantes físicas básicas: carga, masa y espín de las partículas fundamentales. Hace dos décadas, el prestigioso físico teórico que ocupa la Cátedra Lucasiana en Cambridge, Steven Hawking, afirmó que el fin de la física teórica se avecinaría en tan solo veinte años. Pasado este tiempo, Hawking vuelve a proponer un intervalo de tiempo similar para que el científico logre finalmente construir una

verdadera teoría del todo. En opinión de nuestro ponente, resulta creíble la existencia de esta teoría del todo; pero quizás nuestra mente no esté capacitada para aprehenderla.

Como *discussant* de las ideas expresadas durante la ponencia principal, el Prof. Fernández-Rañada realizó una excelente exposición sobre la naturaleza y alcance de los errores científicos de Einstein, personaje del siglo XX por la revista *Times*. Einstein fue un científico que se equivocó muchas veces. Principalmente destaca la introducción de su famosa constante cosmológica y su empeño por mantener una epistemología basada en un realismo local puro. A diferencia de los errores comunes, ambas reseñas son hoy en día el campo de trabajo de los grandes físicos del siglo XXI. Einstein introdujo la constante cosmológica como artimaña matemática para evitar soluciones no estacionarias de sus ecuaciones de campo que predecían la expansión del Universo, hoy comúnmente aceptada. En la línea de Espinoza, gustaba de entender el Universo como un sistema perfecto, bien determinado, donde no había lugar para una hipotética expansión. Einstein tuvo que detractarse de su error cuando Edwin Hubble dedujo la expansión del Universo a partir del análisis de luz emitida por las galaxias. Aquel error de Einstein, su idea de una constante cosmológica que describiera una supuesta fuerza de repulsión en equilibrio con la atracción gravitatoria, vuelve a ser relevante en los modernos debates científicos donde se propone como candidata para explicar determinados fenómenos físicos como la aceleración del Universo.

El otro gran error de Einstein fue su filosofía determinista sobre un universo causal sin interacciones instantáneas a distancia. Su realismo local lo alejó de la mayoría de los físicos de la época, orgullosos por la fiabilidad de las predicciones cuánticas. Fue en 1927, en el Congreso Solvey⁵, que reunía a los grandes científicos del momento, donde se inició una trascendente discusión epistemológica entre Einstein y Bohr. Mientras que Einstein defendía una teoría causal ontológica de la realidad física, Bohr proponía que la Mecánica Cuántica representa todo el conocimiento al que puede tenerse acceso sobre la naturaleza. En 1935, Einstein y dos de sus colaboradores, Boris Podolsky y Nathan Rosen, publicaron un artículo que demostraba que la teoría cuántica no era una descripción última de la naturaleza; era incompleta. El experimento mental de Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) concedía a Einstein una cierta ventaja en su debate con Bohr. Se abrió así, de nuevo, la posibilidad de descubrir las causas profundas de los fenómenos físicos: lo que Einstein denominaba el saber universal o el pensamiento de Dios. Como ya mencionara el Prof. Azcárraga en su exposición, la idea de un realismo determinista sin fuerzas a distancia quedó refutada por el experimento de Alain Aspect que demostró la existencia de interacciones físicas no locales. Este otro error de Einstein pone en tela de juicio la cuestión sobre el determinismo absoluto de los seres físicos y su relación con el libre albedrío y la ética. De nuevo se trata de un error genial cuya investigación puede hacer avanzar el pensamiento hacia ese saber universal. El Prof. Fernández Rañada finalizó esta breve discusión reseñando la incoherencia entre la concepción ética de Einstein y su epistemología determinista local con la pregunta: *¿habría sido Einstein más coherente con su ética de haber aceptado la Mecánica Cuántica?* Quizás, la generalización no local del realismo ontológico de Einstein por su colega de Princeton, David Bohm, podría aportar luz a esta cuestión.

M. Béjar.
Cátedra Ciencia Tecnología y Religión.

⁵ Solvay fue un millonario industrial belga de productos químicos que financiaba una importante reunión de los grandes físicos por el simple placer de escuchar sus teorías de la naturaleza.

