

Einstein, Eddington y la teoría de la relatividad

Dr. Diego Alfredo Pérez Rivas¹

¹ Investigador invitado, Dipartimento di Filosofia della Università degli Studi di Torino.
Miembro del Sistema Nacional de Investigadores (categoría I).
E-mail: diego.perez.rivas@ucm.es

Resumen: En el artículo se confronta la física de Einstein con la interpretación que Eddington ofrece de la teoría de la relatividad. Primero se revisan algunas interpretaciones de la teoría de la relatividad y se analizan cuáles fueron los obstáculos no científicos de la teoría. Después se analizan algunos aspectos importantes de la teoría de la relatividad. Posteriormente, se reconstruye la observación crucial de Eddington. En cuarto lugar, se estudia la interpretación filosófica que ofrece Eddington de la física einsteniana. Finalmente, se ofrece una comparación de las concepciones de Eddington y Einstein.

Palabras clave: epistemología, relatividad, física, espacio, tiempo.

Abstract: This paper compares Einsteinian physics with Eddington's interpretation of the theory of relativity. Firstly, various interpretations of the theory of relativity are examined and the non-scientific obstacles of the theory are analysed. Secondly, the most important aspects of the theory of relativity are highlighted. Thirdly, Eddington's crucial observation is explored. Fourthly, Eddington's philosophical interpretation of the theory of relativity is investigated. Finally, Eddington's and Einstein's interpretations are compared.

Keywords: epistemology, relativity, physics, space, time.

Este proyecto fue financiado por el Conacyt con fondos de Estancias Posdoctorales en el Extranjero.

La teoría de la relatividad a través de sus intérpretes

La labor intelectual de Albert Einstein ha sido tan importante para la historia de la ciencia moderna que cualquier análisis sobre el estado actual del conocimiento científico sería incompleto en caso de no referirse a la revolución paradigmática generada por la física einsteniana. Antes de los escritos sobre la *Teoría Especial de la Relatividad* (1905) y la *Teoría General de la Relatividad* (1915), el modelo newtoniano dominaba casi todos los campos de la física. El paradigma clásico era tan poderoso que se creía que era aplicable a todo el universo. En palabras de Einstein:

Newton fue el primero que logró deducir un gran número de fenómenos mediante un razonamiento matemático, lógico y cuantitativo que armoniza con la experiencia. Verdaderamente, él podía esperar que la base fundamental de su mecánica hubiera logrado proporcionar con el tiempo la clave para la comprensión de todos los fenómenos (1986: 140).

Sin embargo, con el advenimiento de la nueva teoría de la relatividad, el universo se presentaría al físico moderno mediante fenómenos cosmológicos peculiares, ofreciendo en muchas ocasiones resultados que desafían al sentido común y a los postulados fundamentales de la física newtoniana.

En el ejemplo más representativo de la teoría de Einstein, la gravedad es entendida por primera vez como el resultado de la curvatura del espacio, dejando de ser considerada como una fuerza atractiva que actúa a distancia. En el universo descrito en la teoría de la relatividad, las *líneas aparentemente rectas* que recorren los rayos de luz en el espacio son en realidad *líneas que se curvan*. La gravedad sería entendida, por lo mismo, como el fenómeno físico en términos de esa curvatura, en lo que se ha llamado “espacialización de la gravedad”.

Einstein buscaría durante gran parte de su vida una teoría del campo unificado en la que pretendía agrupar este nuevo paradigma con la concepción electromagnética de Faraday, Maxwell y Lorentz. Los trabajos de Einstein son tan importantes para la ciencia moderna que sus teorías sobre la gravedad, el movimiento browniano, el efecto fotoeléctrico, la equivalencia de la masa y la energía, y sobre el gas cuántico, se suman a una larga lista de contribuciones en las que destaca la teoría de la relatividad y donde queda el gran vacío de la teoría del campo unificado.

La mayor parte de los especialistas en historia de la ciencia han brindado especial atención al significado de la revolución provocada por la física de la relatividad. Aunque actualmente existe un gran consenso respecto al *valor intrínseco* de la teoría de Einstein, la mayoría de los intérpretes filosóficos y científicos entienden ese valor de un modo particularmente diferente. Entre las interpretaciones más importantes se pueden resaltar las siguientes:

1. Bertrand Russell pensó que “la teoría general de la relatividad fue sobre todo una teoría geométrica de la gravitación. Esta parte de la teoría puede considerarse firmemente establecida. Pero tiene también aspectos más especulativos. Contiene en sus ecuaciones la constante cósmica, que determina el tamaño del Universo en cualquier momento” (2000: 33).
2. Rudolf Carnap consideró que “desde el punto de vista no-euclidiano de la teoría de la relatividad, no hay ninguna fuerza de gravedad, en el sentido de una acción de fuerzas elásticas o electromagnéticas. La gravitación, como fuerza, desaparece de la física y es reemplazada por la estructura geométrica de un sistema de espacio-tiempo tetradimensional [...] Lo que debemos destacar es que, como a la teoría de la gravitación de Einstein se la llamó geometría, hubo una propensión a considerarla como si fuera matemática pura. Pero la geometría física no es matemática; es una teoría del espacio físico” (1969: 224).
3. Karl Popper señaló: “Un caso de una hipótesis auxiliar insatisfactoria podría ser la hipótesis de Fitzgerald y Lorentz de la contracción, que no tenía consecuencias falsables, sino que servía meramente para restaurar el acuerdo entre la teoría y la experimentación; en esta situación fue únicamente la teoría de la relatividad la que logró un progreso al predecir nuevas consecuencias y nuevos efectos físicos, y abrió con ello nuevas posibilidades de contrastación y de falsación de la teoría” (1980: 79-80).
4. Thomas Kuhn matizó: “Einstein no parece haber previsto que la relatividad general explicara con precisión la conocida anomalía en el movimiento del perihelio de Mercurio y experimentó el triunfo consiguiente cuando lo logró” (2004: 240).
5. Alan Chalmers sostuvo: “Su teoría de la relatividad especial predijo que la masa sería una función de la velocidad, y que la masa y la energía se podrían transformar la una en la otra, y su teoría general predijo que los rayos de luz podrían ser desviados por fuertes campos gravitatorios. Los intentos de refutar la teoría einsteniana mediante los nuevos fenómenos fracasaron. La falsación de la teoría de Einstein sigue siendo un desafío para los físicos modernos. Su éxito, si se produjera finalmente, marcaría un nuevo paso adelante en el progreso de la física” (1990: 73).
6. Lakatos explicó: “El trabajo de Einstein sobre gravitación se originó en un cambio creativo de la heurística positiva de su programa especial de la relatividad y ciertamente no en una reflexión acerca del perihelio anómalo de Mercurio o acerca de las erráticas e inexplicadas aberraciones de la Luna” (1983: 166).
7. Fritjof Capra señaló: “Con la teoría de la relatividad el concepto newtoniano de un espacio absoluto, escenario de los fenómenos físicos, fue

totalmente abandonado, y lo mismo ocurrió con el concepto de tiempo absoluto. Espacio y tiempo se convirtieron en simples elementos del lenguaje, que un observador particular podrá utilizar para describir los fenómenos que observa” (2000: 73).

8. Stephen Hawking apuntó: “La teoría de la relatividad general de Einstein predecía un movimiento de Mercurio ligeramente distinto del de la teoría de Newton. El hecho de que las predicciones de Einstein se ajustaran a las observaciones, mientras que las de Newton no lo hacían, fue una de las confirmaciones cruciales de la nueva teoría. Sin embargo, seguimos usando la teoría de Newton para todos los propósitos prácticos ya que las diferencias entre sus predicciones y las de la relatividad general son muy pequeñas en las situaciones que normalmente nos incumben” (2000: 35). A lo que posteriormente agregó: “La teoría de la relatividad general de Einstein parece gobernar la estructura a gran escala del universo. Es lo que se llama una teoría clásica, es decir, no tiene en cuenta el principio de incertidumbre de la mecánica cuántica, como debería hacer para ser consistente con otras teorías...la relatividad general clásica, al predecir puntos de densidad infinita, predice su propia caída, igual que la mecánica clásica predijo su caída, al sugerir que los átomos deberían colapsarse hasta alcanzar una densidad infinita” (2000: 131).

Ya sea que se considere que el valor de la teoría de la relatividad reside en: 1) el instrumental lógico-conceptual que ofrece (Russell, Carnap, Capra), 2) los experimentos cruciales que posibilitan la falsabilidad de sus predicciones (Popper, Kuhn, Chalmers y Hawking) o 3) el programa investigativo del cual es fruto (Lakatos), la teoría debe ser encuadrada dentro de la vieja tradición mecanicista-determinista. En el cuadro general de la física moderna, la mecánica relativista ofrece un instrumental poderoso para predecir fenómenos cosmológicos y astronómicos relevantes, mientras que el modelo probabilista de la física cuántica parece ofrecer un aparato lógico que prescinde de las nociones clásicas. El modelo probabilista de la física cuántica fue considerado incompleto e insatisfactorio por Einstein, pues se adscribió a la concepción determinista que se remonta a Newton y Laplace. Einstein puede ser encuadrado como el último representante de esta visión en la que el universo es concebido como un complejo mecanismo que se puede describir matemáticamente con funciones fijas y determinadas.

Actualmente, la física cuenta con dos modelos teóricos que para especialistas como Hawking parten de premisas contradictorias y mutuamente excluyentes (1996: 12), pero que para otros como Brian Greene (2006:11) pueden ser mutuamente compatibles. En todo caso, actualmente se acepta que la teoría de la relatividad sirve para explicar únicamente los fenómenos a macroescala en el universo, mientras que se asume que la física cuántica es un modelo

idóneo para explicar los fenómenos a escala subatómica. Uno de los grandes retos de la física contemporánea reside precisamente en desarrollar mecanismos que conduzcan a un paradigma total.

Aunque actualmente se reconoce plenamente el valor científico de la teoría de la relatividad, la cual se puede considerar uno de los dos pilares que sostienen nuestra actual comprensión del universo, su consolidación entre la comunidad científica internacional fue un proceso lento y progresivo. Las teorías elaboradas concienzudamente por un joven físico teórico judío, en un contexto histórico en el que el antisemitismo resurgió con mucha fuerza, tendrían que superar diversos obstáculos antes de ser universalmente aceptadas. Algunos de esos obstáculos fueron *no-científicos*, dado que las críticas y las oposiciones a sus contribuciones serían de naturaleza ideológica y racial. Nuestro ensayo explicará en qué consistían algunas de estas oposiciones y cuál fue su alcance.

Posteriormente, trataremos de contextualizar las contribuciones de Einstein, explicando qué tipo de cambios possibilitó, cuáles fueron las herramientas de las que se sirvió y cuáles son los rasgos fundamentales de la teoría de la relatividad. Ulteriormente, se revisará cuál fue el papel de Eddington como el primer científico capaz de realizar una *observación crucial* para falsificar las predicciones de Einstein. Después exploraremos la filosofía de la física de Eddington, resaltando la interpretación que ofrece de la teoría de la relatividad. Finalmente observaremos en qué aspectos coincide la concepción de Eddington con la concepción de Einstein.

En nuestra interpretación de la teoría de la relatividad es importante considerar los siguientes aspectos: 1) la crítica de Russell a la constante cosmológica aplica tanto a la concepción de Einstein como a la concepción de Eddington, 2) la geometría de la teoría de la relatividad es considerada por ambos como geometría física, no como geometría pura, 3) el valor científico de la teoría de la relatividad reside en gran medida en los fenómenos que consigue predecir y en sus falsificaciones, así como en los instrumentos matemáticos que permitieron su desarrollo, 4) aunque actualmente se acepta la validez de la teoría de la relatividad, en realidad sus correcciones en el *mundo mediano* son tan pequeñas que se sigue usando la física newtoniana en la elaboración de cálculos que no requieren demasiada precisión, 5) la crítica de Hawking a la física einsteniana sobre su no aplicación en los puntos de densidad infinita constituye actualmente uno de los aspectos críticos de la teoría.

Los enemigos de la física einsteniana

El 9 de noviembre de 1922 el Comité de física del *Nobel Prize* decidió otorgar el reconocimiento de 1921 al joven físico teórico Albert Einstein. Después de una larga y radical oposición de un bloque de científicos contra la teoría de la relatividad y su propio creador, una solución diplomática permitió concluir la

polémica en torno *al caso Einstein*. Dicha polémica se remontaba al menos a 1909, año en el que el joven físico obtuvo su primera nominación al premio.

La concesión del Nobel a Einstein fue posible gracias al físico teórico sueco Carl Wilhelm Oseen, pues después de su ingreso al Comité se encargaría de facilitar un consenso para reconocer sus aportaciones por el *efecto fotoeléctrico*. El efecto predicho en 1905 propuso una concepción radicalmente diferente a la teoría dominante a inicios del siglo XX, esto es, la concepción ondulatoria de la luz de Maxwell. La verificación experimental realizada en 1915 por Robert Andrews Milikan, abriría paso a una nueva concepción de la luz y de la propia materia, basada en la dualidad onda-corpúsculo. Actualmente, esta intuición está en la base de la teoría de las cuerdas, la cual constituye un intento de unificación de las cuatro fuerzas fundamentales (gravedad, electromagnética, fuerte y débil). En palabras de Brian Greene:

Según la teoría de cuerdas, los componentes elementales del universo no son partículas, sino diminutos filamentos unidimensionales, algo así como tiras de goma infinitamente delgadas, que vibran de un lado para otro (...) La teoría plantea que son unos componentes microscópicos que constituyen las partículas de las que están formados los propios átomos (2006: 121)

El reconocimiento de la teoría de la relatividad en el *Nobel Prize* pudo sentar un importante precedente, en caso de haber sido reconocida su capacidad de corregir los postulados de la física newtoniana. Sin embargo, la teoría de la relatividad no fue espontáneamente aceptada por la comunidad científica internacional, al ser considerada generalmente como demasiado abstracta, planteando resultados contra-intuitivos y ofreciendo conclusiones ininteligibles. En el largo camino hasta su consolidación como *teoría normal* tuvo que solventar diversos obstáculos para ser aceptada entre los sectores más reaccionarios de la comunidad científica.

El 10 de diciembre de 1922, en la ceremonia de entrega del premio a la que no asistió el premiado, Svante August Arrhenius (también Nobel en Química en 1903) ofreció un discurso para explicar los aportes más relevantes de Einstein a la física moderna. En la *Royal Swedish Academy of Science* advirtió, primeramente, por qué razón la condecoración fue concedida por su descubrimiento del efecto fotoeléctrico y no por la teoría de la relatividad. Aquel discurso ejemplifica muy bien algunas de las travesías que la nueva teoría tuvo que superar.

El desarrollo de los argumentos de Arrhenius era predecible hasta cierto punto, pues en 1920 él mismo elaboró un informe al Comité, poniendo en duda la veracidad de la teoría de la relatividad. A estas críticas se pueden agregar las dudas que existían sobre la objetividad de las observaciones astronómicas efectuadas por Arthur Eddington en 1919. A pesar de esto, tales observaciones se convertirían a largo plazo en la primera falsificación crucial de la teoría.

Del diplomático discurso de Arrhenius se pueden destacar dos argumentos generales. En primer lugar, la teoría de la relatividad fue considerada por el orador como una cuestión interesante para el debate filosófico y epistemológico, pero dando por sentado que sus importantes implicaciones astrofísicas debían ser todavía rigurosamente examinadas y verificadas. Para Arrhenius la teoría de la relatividad no debería ser considerada, en ese momento, como la más importante contribución de Einstein a la ciencia. En la segunda parte de su discurso, mencionó algunas de sus aportaciones en el campo de la física teórica hasta antes de 1922, dando por hecho que tales contribuciones valían, por sí mismas, la condecoración.

Entre las contribuciones atribuidas a Einstein, Arrhenius resaltó, en primer lugar, la clarificación y resolución del movimiento browniano. Gracias a la formulación del joven físico “fue posible fundar una incipiente teoría cinética compatible con la mecánica clásica, generándose una nueva rama de la ciencia denominada química coloidal”. En segundo lugar, pormenorizó algunos de los detalles técnicos de la contribución de Einstein a la teoría cuántica fundada por Max Planck en 1900, aclarando que “la ley sobre el efecto fotoeléctrico se había consolidado como la base cuantitativa de la fotoquímica, del mismo modo que anteriormente la ley de Faraday se había erigido en la base de la electroquímica” (Nobel Lectures: 25).

En el fondo, el discurso de Arrhenius elogiaba el trabajo teórico de Einstein respecto a sus contribuciones que extendían el campo de comprensión de la física newtoniana y de la física cuántica, pero también subestimaba la relevancia de la teoría de la relatividad, la cual lo había convertido en un personaje de culto popular después de las primeras confirmaciones de 1919.

El Comité del Nobel otorgó el premio de 1921 a Einstein por dos de los cuatro importantes artículos publicados en el *annus mirabilis*. En 1905, desde un puesto marginal en la ciencia europea, el joven físico se dio a conocer a través de cuatro artículos sobre: 1) el efecto fotoeléctrico y la naturaleza corpuscular de la luz, 2) el movimiento browniano como producto del movimiento aleatorio de partículas microscópicas, 3) la electrodinámica de los cuerpos en movimiento o teoría especial de la relatividad; y 4) la fórmula de equivalencia de la masa y la energía.

Con el discurso de Arrhenius en la Academia se hizo evidente que la *cuestión Einstein* podía zanjarse aceptando sus importantes contribuciones en el campo de la física clásica y de la física cuántica, pero dejando al tiempo la cuestión de si la física relativista podía resultar verdadera y útil. El tiempo se encargaría de dar la razón a la teoría de la relatividad, exponiendo la obstinación y, en algunos casos específicos, la intransigencia de algunos de sus más radicales opositores.

Actualmente se encuentra muy bien documentado el hecho de que el Nobel otorgado a Einstein por *el efecto fotoeléctrico y por sus importantes contribuciones a la física teórica*, formó parte de un estratagema político para neutralizar las protestas de los acérrimos críticos de la teoría de la relatividad, en un período político en el que el antisemitismo era una fuerza emergente en Europa. Entre los mayores opositores, el físico experimental alemán Philipp Lenard asumió la tarea de orquestar una campaña sumaria contra la *física semítica* y contra el propio Einstein. Con el ascenso del nazismo, muchos científicos e intelectuales de la época adoptarían una posición radical de corte orgánico. Recordando algunos casos ejemplares de tales posicionamientos de ideologización radical de la ciencia, en 1920 se creó en Alemania una liga anti-Einstein, y en 1931 se publicó en Leipzig el manifiesto *Hundert Autoren Gegen Einstein* (Cien autores contra Einstein).

Al lector contemporáneo puede resultar extraño el hecho de que en el debate científico los argumentos de corte nacionalista o racial pudieran constituir recursos válidos para contradecir las teorías. Lo cierto es que en el periodo que abarcó desde la Primera Guerra Mundial hasta la culminación de la Segunda, las posiciones políticas radicales adquirieron bastante poder e influencia en algunos círculos académicos. Durante su período de permanencia en Berlín, Einstein sufriría en carne propia una serie de amenazas, persecuciones y campañas negras, orquestadas muchas veces desde las propias instituciones científicas. Tan radical era esta oposición que el hecho de que la teoría fuera escrita por un físico judío constituyó un serio problema adicional (no científico) para su aceptación.

De la época en la que los ataques contra la teoría de la relatividad y contra Einstein adquirieron matices peligrosos por su impronta anticientífica y antisemítica, Leopold Infeld recordaba:

En 1921, cuando fui a estudiar a Berlín, vi con sorpresa el desdichado espectáculo que acompañaba a la fama de Einstein. Era todavía doce años antes de Hitler. Vi diarios conservadores con editoriales que atacaban la teoría de Einstein: Si cree en su teoría, que conteste a nuestros argumentos. Seremos justos y publicaremos su respuesta. Pude ver carteles que anunciaban conferencias contra la teoría de Einstein en una de las más grandes salas de concierto de Berlín [...] En aquel tiempo todavía no era oportuno atacar a Einstein abiertamente en su condición de judío, y sin embargo esto se hizo, no una, sino centenares de veces de una forma más velada. En la superficie estaba en Alemania la República de Weimar, pero debajo de esta delgada y mísera superficie podían advertirse los comienzos del inminente torbellino (en Einstein, 1988: 21-22).

En un par de años las descalificaciones raciales se convertirían en habituales métodos de combate contra la teoría de la relatividad. El físico cuántico Werner Heisenberg describió también que en el verano de 1922, cuando asistía a una conferencia de Einstein en Leipzig, recibió un panfleto que decía: “La

teoría (de la relatividad) es solamente una maraña de conjeturas infundadas, pregonadas por la prensa hebrea y contraria al genuino espíritu alemán”. Al conocer que esta campaña contra Einstein había sido orquestada por uno de sus más radicales y ciegos adversarios, Heisenberg apuntó:

“En tales circunstancias, los medios empleados por un físico famoso para confutar la teoría de la relatividad eran tan indignos e inconsistentes que se podría concluir solamente una cosa: el estudioso había perdido todas las esperanzas de lograr confutar la teoría de la relatividad a través de argumentaciones científicas” (1984: 54-55).

Para el joven Heisenberg, el fanatismo generado por el nacionalsocialismo había desbordado todos los límites de la razonabilidad científica, llegando a contaminar las discusiones académicas a través de perversas campañas de intensa politización de las teorías científicas. La ciega oposición del nazismo a la física creada por científicos judíos fue duramente criticada por intelectuales de gran peso. El matemático David Hilbert dijo en 1934 al Ministro de Cultura del Führer, que después de los despidos masivos de los científicos hebreos no quedaba ya rastro alguno de la ciencia en Alemania. De hecho, el propio Einstein abandonaría Berlín en 1932, iniciando un itinerario que lo portaría en 1933 al *Institute of Advanced Study en Princeton*. A pesar de haber sido considerado durante su juventud por científicos de la talla de Max Planck como el *Copérnico del Siglo XX*, la incompreensión de su trabajo y la radicalización del movimiento nacionalsocialista en Alemania, obligarían a Einstein a expatriarse en el nuevo mundo hasta el final de sus días.

Sobre la teoría de la relatividad

La respuesta de Einstein contra sus radicales adversarios no se haría esperar demasiado tiempo. El 11 de Julio de 1923, frente a la *Nordic Assembly of Naturalists at Gothenburg*, daría su conferencia *Fundamental ideas and problems of the theory of relativity*. En dicha ocasión, aprovecharía su participación para especificar los aspectos más importantes de su teoría de la relatividad. Con esta participación, realizaría una defensa impecable de su nueva teoría, detallando qué aspectos resultaban particularmente interesantes para el físico del futuro.

En primer lugar, Einstein se ocupó de aclarar cuáles eran las principales implicaciones del problema de la relatividad física. En este sentido, explicó que su teoría “reformulaba esencialmente la cuestión de si existen preferencias físicas de *states of motion* en la naturaleza y qué forma presentan”. En segundo lugar, señaló que “el desarrollo de los conceptos y de las distinciones que surgen de sus postulados tiene un carácter epistemológico de fundamental importancia para el lenguaje de la física” (en *Nobel Lectures*: 482). La teoría de la relatividad debía considerarse importante porque ofrecía una nueva interpretación física de las magnitudes clásicas, dado que los conceptos y

las herramientas que la desarrollan simplifican la sintaxis científica. En este sentido, no cabe duda que Einstein consideraba que la teoría de la relatividad era importante porque describía fenómenos físicos nuevos a través de predicciones teóricas, pero también porque reformulaba todo el lenguaje de la física, abandonando viejos conceptos o nociones absolutas heredadas de la metafísica newtoniana. Su trabajo intelectual puede considerarse *stricto sensu* como un *capolavoro* en el sentido de que consiguió poner en jaque al modelo científico dominante desde el siglo XVII, armado con poderosos instrumentos matemáticos y con un arsenal de intuiciones físicas adecuadas.

La primera cuestión sobre los *states of motion* era resuelta por la física clásica mediante la elaboración de un sistema de referencia inercial considerado absoluto (el modelo de la geometría euclidiana), así como con la defensa de falsos presupuestos como la rigidez absoluta de los cuerpos y la idea de que se podía superar la velocidad de la luz. Además, en la física mecánica de Newton la preferencia física de un movimiento entre dos puntos cualesquiera sería siempre una línea recta. Einstein detalló, usando estas ideas, que en la física clásica el espacio y el tiempo se definen mutuamente a través de la ley de la inercia. En cambio, “la teoría especial de la relatividad constituía el más importante intento de adaptación de la física clásica a los principios establecidos por la electrodinámica de Maxwell-Lorentz, dado que tales principios no se aplican a los cuerpos rígidos de la física newtoniana, sino simplemente al postulado de invariación de la velocidad de la luz en el vacío”. En segundo lugar, Einstein explicó a detalle cómo “la teoría general de la relatividad respondía a la pregunta sobre los *states of motion* afirmando que en un campo de gravitación puro el movimiento es una geodésica, no una línea recta” (*Nobel Lectures*: 484).

Respecto al segundo asunto, sobre los cambios epistemológicos y sintácticos generados por la teoría de la relatividad, la revolución de la física de Einstein consistió fundamentalmente en ofrecer una nueva visión del mundo físico en la que los conceptos absolutos de tiempo, espacio o simultaneidad, perdían su razón de ser. El camino que está revolución científica había puesto en marcha se apoyaba en una larga serie de intuiciones iniciadas por matemáticos como Gauss, Riemann y Lobachevsky, y por físicos como Faraday, Maxwell y Lorentz. En este sentido, la síntesis realizada por Einstein puede considerarse similar a la realizada por Newton, siglos atrás, basándose en los trabajos de Kepler, Galileo y Hooke.

En *La teoría especial de la relatividad* de 1905, Albert Einstein propuso un experimento mental en el que el espacio y el tiempo dejan de ser representados como intuiciones absolutas en la mente de Dios. El ensayo sobre *La electrodinámica de los cuerpos en movimiento* publicado en la prestigiosa revista científica dirigida por Max Planck (*Annalen der Physik*), planteó una importante reinterpretación de las nociones absolutas de tiempo, espacio y

simultaneidad. El primer postulado de su teoría asegura que todas “las leyes físicas son las mismas en todos los sistemas de referencia inercial (con movimiento uniforme)”. El segundo principio describe que “la velocidad de la luz en el vacío tiene el mismo valor en los sistemas de referencia inercial, independientemente de la velocidad del observador o de la velocidad de la fuente de la luz” (Einstein, 1996: 24-25).

En el artículo sobre la teoría especial de la relatividad aparece expresada por primera vez la idea de que la simultaneidad absoluta es un presupuesto epistémico insostenible, así como un presupuesto experimental no falsificable. A cambio de ese presupuesto, la teoría de la relatividad especial propone la idea de pensar en la *simultaneidad relativa* como algo que depende del sistema inercial del observador, por lo cual puede ser calculada y prevista con mucha precisión considerando las condiciones estructurales de la observación. La materia gris de este paradigma es que se parte de la idea de que no existe ningún experimento mecánico, electromagnético u óptico capaz de diferenciar un objeto que permanece en absoluta quietud de uno que se mueve a velocidad constante. En suma, su teoría sostenía dos conclusiones que le separaban radicalmente de la física newtoniana: en primer lugar, no existe un estado de quietud o de movimiento uniforme absolutos; en segundo lugar, ningún cuerpo puede superar la velocidad de la luz. En la física newtoniana, no obstante, la quietud absoluta era justificada en la existencia de Dios, en cuya mente residía esta impronta metafísica del observador absoluto.

En realidad, el artículo sobre la relatividad especial tenía como finalidad aclarar cuál era la teoría correcta (la física newtoniana o la teoría electromagnética de Maxwell) en lo que respecta a la existencia de un *tiempo absoluto* o de diversos *tiempos locales*, así como respecto a la posibilidad de que un cuerpo viajará a una velocidad superior a la luz y no solamente respecto a la existencia del éter como normalmente se piensa. Es cierto que como antecedente empírico, Einstein pudo contar potencialmente con evidencias experimentales sólidas (esencialmente las ecuaciones de Maxwell y el experimento Michelson-Morley), que se habían mostrado como contradictorias con el sentido común y con los presupuestos de la física clásica. Pero en anécdotas posteriores, en las que Einstein relató cuál fue el camino reflexivo que lo llevó a la formulación de su escrito de 1905, se desentendió del experimento Michelson-Morley, al que dijo no conocer en el momento de la formulación de su artículo. A pesar de esto, el valor de su nueva teoría residía precisamente en la unificación de las leyes del electromagnetismo, la mecánica y la óptica mediante el principio de equivalencia, que suponía los resultados del experimento más famoso de la física. Al mismo tiempo, se puede decir que las transformaciones de Lorentz, las cuales contienen el recurso teórico del *tiempo local*, fueron formuladas por su creador como un mero truco matemático para facilitar algunos cálculos, pero la gran intuición de Einstein consistió en dar un sentido físico y

epistémico a dicha concepción. La teoría de la relatividad especial afirmaba, contrariamente a la física newtoniana, que la velocidad de la luz posee un valor absoluto, convirtiéndose en una constante universal por excelencia. Actualmente tal valor sigue manteniendo ese *status*.

No obstante lo dicho hasta aquí, la relatividad especial nunca negó los fundamentos mecanicistas de la física clásica, sino que, más bien, planteaba una forma de traducir los movimientos relativos de un sistema de coordenadas a otro. A través de las transformaciones de Lorentz se podían elaborar correcciones que contuvieran la contracción del espacio y la dilatación del tiempo. Por lo mismo, la teoría de la relatividad especial abriría las puertas a una nueva rama de la física denominada como cinemática y dinámica relativistas, basándose en este recurso matemático de las transformaciones de Lorentz. Su limitación más importante sería, sin embargo, que solamente puede describir y explicar la traducción de un sistema inercial a otro cuando se cumple la condición de que se trate de movimientos uniformes. La teoría especial de la relatividad es incompleta en el sentido de que es incapaz de explicar la condición de los cuerpos con movimientos acelerados.

La verdadera punta de lanza de la física einsteniana, en tanto que teoría de la relatividad, puede considerarse su teoría de la gravedad, la cual permitiría plantear un conjunto de postulados teóricos de aplicación más amplia que los obtenidos mediante la teoría especial. En la nueva formulación de Einstein, los efectos producidos por la gravedad podían ser imitados mediante la aceleración. En esta concepción, Einstein se sirvió de la teoría sobre las superficies de Gauss para explicar la fuerza gravitatoria como un efecto en términos de la curvatura del espacio. En su teoría general, la trayectoria de los cuerpos es siempre una geodésica la cual es causada por la relación de la masa de los cuerpos con la forma del espacio. Por la misma razón, para el físico Robert Laughlin:

La teoría de la gravedad de Einstein fue una invención que no hubiera podido ser descubierta accidentalmente después de algún tiempo en otro laboratorio. Se trata de una cuestión todavía controvertida actualmente, muy lejos del alcance de los experimentos posibles. Su más importante previsión es que el espacio es dinámico...Contamos con muchas pruebas indirectas de la exactitud de las previsiones respecto a las ondas gravitacionales, la más importante es la constante disminución del periodo orbital de la famosa pulsar binaria descubierta por Joseph Taylor y Russell Hulse en 1975. Por otro lado, no existen pruebas directas. Individuar pruebas de este tipo constituye uno de los objetivos principales de la moderna física experimental, pero en ausencia de tales pruebas la mayor parte de los físicos sostienen la opinión de que la teoría gravitacional de Einstein debe ser considerada correcta (2005: 137-8).

La teoría de la relatividad especial sostiene que todos los objetos sujetos a una fuerza gravitacional determinada caen a la misma velocidad, independiente-

mente de su masa. Por otra parte, en la teoría general de 1915 la gravedad es considerada ya como el efecto producido por los cuerpos de masa superior, los cuales curvan el espacio. En la actualidad dicha curvatura es interpretada y predicha mediante las ecuaciones de campo de Einstein. Tales ecuaciones son tan poderosas que permiten calcular con mucha exactitud la relación existente entre la masa de un cuerpo y la curvatura del espacio. En el lenguaje del cálculo tensorial tales ecuaciones son representadas como una relación entre el *stress-energía* y la curvatura del espacio-tiempo tetradimensional.

En el universo descrito por las matemáticas de la relatividad general se plantea la necesidad de que el espacio se pueda curvar y extender. Las ondas gravitacionales predichas por la teoría de Einstein obedecen, por lo mismo, a un modelo similar al que explica la propagación de las ondas sísmicas sobre la superficie terrestre (Steinhardt, 2010: 211). Actualmente, una parte de la comunidad astronómica internacional dedica su tiempo y sus energías en individuar las ondas gravitacionales, las cuáles son teóricamente detectables cuando son producidas por la explosión de una supernova. Algunos de estos proyectos tienen sede en Europa (GEO 6000, VIRGO), en Estados Unidos (LIGO) y en Asia (TAMA 300). A lo que se puede agregar también la misión espacial LISA (*Laser Interferometer Space Antenna*), un nuevo proyecto conjunto entre la NASA y la ESA, que tiene como finalidad crear un triángulo equilátero extremadamente sensible, el cual será colocado en el espacio y realizará su individuación a través de rayos laser.

Algunas de las herramientas metodológicas que posibilitaron el desarrollo de la teoría de la relatividad fueron: las geometrías no euclidianas (específicamente la teoría de Minkowsky sobre el espacio-tiempo) y el cálculo tensorial. Estos potentes instrumentos de cálculo matemático sentaron las bases para una concepción contra-intuitiva de las leyes físicas. A diferencia de la física newtoniana, que había sido desarrollada mediante la geometría euclidiana y perfeccionada a través del cálculo diferencial, la teoría de la relatividad ofrecía una visión del universo en el que los ángulos de un triángulo no forman 180° o en el que los cuerpos con gran cantidad de masa deforman las cuatro dimensiones que constituyen el espacio-tiempo. En este sentido, la teoría de la relatividad es coherente con la concepción que Einstein sostuvo acerca de los fundamentos de la física teórica al afirmar que la

“ciencia es el tentativo de hacer corresponder la variedad caótica de nuestra experiencia sensible con un sistema de pensamiento lógicamente uniforme. En este sistema las experiencias singulares deben estar relacionadas con la estructura teórica de modo que la coordinación resultante sea única y convincente” (1986: 114).

En suma, la teoría de la relatividad reformuló el lenguaje de la física desterrando para siempre algunos presupuestos metafísicos de la física clásica. Gracias a la nueva teoría las ideas absolutas de tiempo, espacio y simultanei-

dad fueron desechadas, erigiendo una concepción en la que las geometrías no euclidianas, el cálculo tensorial y las transformaciones de Lorentz permiten ofrecer una concepción más exacta de la gravitación. Es importante considerar que la teoría de la relatividad no hubiera sido posible si la evolución de las matemáticas no hubiera dotado a la física moderna de poderosos instrumentos de análisis, así como de un lenguaje abstracto capaz de dar sentido a las formulaciones teóricas. Sin embargo, a esto se debe agregar que la consolidación de la teoría de la relatividad como *teoría normal* dependió fundamentalmente de la falsificación de sus predicciones.

El problema de la falsificación de la teoría de la relatividad

El más grave problema al que se enfrentó la teoría de la relatividad en su proceso de consolidación fue con toda probabilidad el hecho de que era considerada por los especialistas más como una teoría filosófica ininteligible que como una teoría física capaz de predecir algo. Por la misma razón, el problema científico más importante de la teoría fue encontrar los procedimientos adecuados que pudieran falsificarla. Como veremos en este apartado, la relación de Arthur Eddington con la física de Einstein comenzó precisamente por el interés desarrollado por el joven astrónomo británico por la epistemología de la teoría de la relatividad. Al reconocer el valor intrínseco de la nueva teoría, Eddington fue el primero en ponerla a prueba, por lo que pasaría a la historia como el primer científico responsable de falsificarla.

Actualmente existen al menos cuatro observaciones o experimentos cruciales que falsifican la teoría de la relatividad. En primer lugar, la teoría de la relatividad general es capaz de predecir la órbita anómala de Mercurio, la cual se había demostrado como el gran problema predictivo de la teoría de la gravedad de Newton. En segundo lugar, el efecto de deflexión de los rayos de luz provocado por la curvatura espacio-temporal cerca de un campo gravitacional poderoso, el cual fue observado por primera vez por Eddington. En tercer lugar, la observación del *desplazamiento Einstein*, que es una consecuencia directa del principio de equivalencia, pues se predice el corrimiento hacia el rojo en las líneas espectrales de las estrellas. Por último, las observaciones de la velocidad de fuga de las galaxias, las cuales cristalizan en la Ley de Hubble, obedeciendo las ecuaciones de campo de Einstein.

En 1911, Einstein publicó su artículo sobre *La influencia del campo gravitacional en la propagación de la luz*. En tal escrito planteó la posibilidad de individuar experimentalmente, durante un eclipse total de sol, la desviación de la luz de una estrella que pasará cerca del campo gravitacional solar. Los cálculos originales de Einstein predecían que dicha desviación debía ser de 0.83 segundos de arco. El 21 de agosto de 1914, el joven astrónomo Erwin Freundlich se dispondría a realizar la primera observación crucial en Crimea, pero el advenimiento de la guerra no se lo permitió. Freundlich fue arrestado

antes de realizar la observación, pues las autoridades locales pensaron que se trataba de un espía. El retraso de la falsificación de la teoría de la relatividad favoreció, sin embargo, a Einstein. En una conferencia dictada en noviembre de 1915, el creador de la teoría de la relatividad corrigió su primera estimación, prediciendo una desviación de 1.7 segundos.

El papel que jugó Eddington en la consolidación de la teoría de la relatividad fue de vital importancia, pues su particular habilidad para realizar observaciones cruciales le permitió falsificar la predicción de Einstein para la desviación de la luz en un campo gravitacional intenso. Desde su puesto de profesor y director del Observatorio de Cambridge, Eddington preparó a un equipo de científicos que registrarían el fenómeno y que analizarían los datos obtenidos con la máxima minuciosidad metodológica.

En su libro de difusión científica *Space, Time and Gravitation. An Outline of the General Relativity Theory* de 1920, Eddington explicó detalladamente los aspectos más relevantes de la observación de mayo de 1919. En primer lugar, el astrónomo británico retomó el problema del peso de la luz en la física newtoniana. Para Newton, que defendía una concepción corpuscular era natural pensar que la luz tenía un peso, dado que todos los cuerpos sufren el influjo de la atracción gravitacional. Los cálculos emanados de la física newtoniana predecían un resultado bastante similar al que Einstein había obtenido en 1911. Según la teoría de Newton, la curvatura del rayo de luz debía ser del orden de 0.87 segundos de arco.

Algunos experimentos habían demostrado que la luz posee una cierta cantidad de masa y de inercia como las otras formas de energía electromagnética, pero gracias a la teoría de la relatividad de Einstein la masa y el peso se relacionaban a través de una proporcionalidad matemática rigurosa. En este sentido, Eddington detalla:

“La teoría de Newton no sugiere de hecho como calcular esta desviación, pero se contenta con preverla en líneas generales. La teoría de Einstein proporciona un medio, esto es la variación de la velocidad de las ondas” (1997: 146-7).

Desde marzo de 1917 iniciaron los preparativos en el Observatorio para falsificar la predicción sobre la desviación de la luz en el campo gravitatorio solar. Desde esa fecha hasta el 29 de mayo de 1919, Eddington preparó a su equipo para afrontar los diversos riesgos asociados a una observación tan delicada. Especial atención fue dedicada en prevenir efectos ópticos como la refracción y la aberración, así como en solucionar problemas vinculados con la orientación de las placas fotográficas durante el registro del eclipse solar. Es importante señalar la profunda aptitud técnica que requiere una observación de este género con los instrumentos a disposición en 1919, pues cualquier pequeño error en la manipulación del instrumental fotográfico o durante el eclipse solar hubiera podido contaminar los resultados obtenidos. Para zan-

jar todas estas dificultades técnicas, el equipo utilizó dos expediciones que intentarían, de modo autónomo, obtener registros independientes del evento astronómico.

En primer lugar, varios meses antes de la observación crucial se realizaron registros fotográficos de las estrellas implicadas con el mismo equipo que utilizaron en las expediciones, para tener una forma de contrastar los resultados obtenidos. Una de las expediciones se dirigió a Sobral en Brasil (Crommelin-Davidson) y otra a Isla Príncipe (Cottinham y Eddington), en el Golfo de Guinea. El análisis de los registros dio como resultado: 1.98 segundos de arco con un margen de error de 0.12 en el caso de Brasil; y 1.61 segundos de arco con un margen de error de 0.30 en el caso de Isla Príncipe. Con estas primeras observaciones, que falsificaban la teoría de Einstein se daba inicio a un nuevo capítulo en la historia de la ciencia: la concepción de la gravedad del joven Albert Einstein resultaba mejor y más exacta que la concepción ofrecida por Sir Isaac Newton. Esta falsificación era una cuestión de matemáticas, es decir, de capacidad de predicción, un terreno en el que la teoría de la relatividad se reveló como especialmente fértil desde sus orígenes

El filósofo inglés Alfred North Whitehead recordaba con detalle la atmósfera que permeaba en la Royal Society de Londres, aquel día de noviembre de 1919 en el que Arthur Eddington daría a conocer al mundo los resultados que obtuvo su equipo de la observación crucial diciendo:

La atmósfera de nerviosa atención era exactamente igual a la de la tragedia griega. Nosotros éramos el coro, que comentaba lo que decretaba el destino, tal como se revelaba en el desenvolvimiento de un evento supremo. En la propia escenografía había algo dramático: el ceremonial tradicional y en el fondo el retrato de Newton, recordando que ahora, a dos siglos de distancia, la más grande de las generalizaciones científicas estaba a punto de ser modificada. No faltaba el interés humano: una gran aventura del pensamiento había llegado sana y salva a su puerto (en Bernstein, 2004: 135).

Eddington y la teoría de la relatividad

Los historiadores de la ciencia dividen la obra de Eddington en dos categorías. En primer lugar, las publicaciones estrictamente científicas en las que, a través de un instrumental matemático poderoso, realizó importantes aportaciones materiales a la física. En segundo lugar, las publicaciones de carácter divulgativo en las que, haciendo uso de un lenguaje filosófico, ha brindado una interpretación interesante sobre la naturaleza de las investigaciones de la física moderna.

Entre sus contribuciones más sobresalientes de carácter científico destacan: 1) la previsión de la generación de energía en el interior de las estrellas mediante reacciones termonucleares; 2) la previsión del mecanismo radioactivo que permite la transmisión de calor al interior de las estrellas, 3) la fórmula

que permite poner en relación la masa y la luminosidad de las estrellas y 4) el cálculo del número cósmico a partir del modelo estático de Einstein. En cambio, en sus obras de carácter filosófico se pueden resaltar las siguientes contribuciones: 1) el papel atribuido a la epistemología científica en la física moderna, 2) la apelación a las nociones de *selectivismo subjetivo* y de *estructura* para explicar los procesos cognitivos y metodológicos en los que se basa la física moderna, 3) el intento de integración de la física einsteniana con la física cuántica en un modelo sintético del conocimiento científico y 4) la prioridad concedida a los experimentos y observaciones como actos capaces de falsificar las predicciones científicas.

Las críticas más duras que ha recibido la obra divulgativa de Eddington han puesto especial atención en su impronta idealista y mística. En el presente apartado exploraremos las nociones sobre la naturaleza del mundo físico, la filosofía de la física y la teoría de la relatividad, para poder determinar hasta qué punto son compatibles con las ideas de Einstein.

La naturaleza del universo físico

La distinción que permitió a Eddington diferenciar la naturaleza del universo físico de la naturaleza del universo no físico fue un viejo instrumento filosófico dualista en el que se establece una distinción entre el mundo de las ideas y el mundo sensible. Inspirado en la versión kantiana de ese dualismo, la diferencia entre conocimiento *a priori* y conocimiento *a posteriori* fue interpretada por Eddington en el sentido de que el universo físico era el campo al que tenemos acceso a través de los sentidos y cuya herramienta de organización más poderosa son las matemáticas. Por otro lado, se encontraría una especie de realidad mística o espiritual compuesta de sentimientos, fines y valores (como en la moral kantiana).

Eddington puede considerarse como un defensor del dualismo, dado que acusó la incapacidad del materialismo científico para dar una explicación satisfactoria de la espiritualidad humana (específicamente de la *fuerza espiritual*). Cuando se refería a este aspecto inmaterial del universo, Eddington dice:

El valor que atribuimos a la permanencia crea el mundo de la sustancia aparente; y en este sentido, quizá, el Dios interior crea al Dios de la Naturaleza. Pero ninguna concepción completa se puede obtener hasta que separemos nuestra conciencia del mundo del que forma parte [...] Para contemplar el mundo desde un punto de vista práctico se necesita tomar como norma los valores de la conciencia humana (1987: 273).

En la concepción dualista de Eddington, el mundo físico y el mundo espiritual se relacionan a través del mundo de las ideas, una concepción que en el contexto de la ciencia del siglo XX podía ser entendido como el mundo

de la psique o mente. En esta concepción: 1) la mente usa los átomos materiales de modo que los movimientos corporales son controlados por voliciones mentales, 2) en algún lugar del cerebro el comportamiento de algunos elementos del mundo físico (átomos) está directamente determinado por las decisiones mentales, 3) la mente puede influenciar grandes cantidades de átomos. Las conclusiones de Eddington pueden ser cuestionadas preguntando de qué manera interactúan esas dos dimensiones (la mente y el mundo físico). El materialista responderá que la mente, las voliciones y la conciencia son simplemente fenómenos emergentes del mundo físico, mientras que el dualista entenderá ese mundo mental como algo radicalmente diferente y que, en ciertos casos, puede gobernar el mundo físico. Eddington defendía este tipo de dualismo que se refugiaba en la dimensión de la mente para sostener la existencia de un universo no físico.

Por otra parte, cuando el astrónomo británico se refería a la naturaleza del universo físico lo entendía como lo haría un positivista lógico, esto es, considerándolo como “un campo de conocimiento, no como algo que posee una propiedad de existencia no definible, un campo libre de cualquier contaminación metafísica” (1987: 8). La ciencia física sería concebida por Eddington como una serie de procesos de investigación fuertemente determinados por los procesos mentales y observacionales. Para entender la manera en la que concibió la interacción de la mente con el mundo físico resulta necesario comprender la naturaleza de su filosofía de la física.

La filosofía de la física

En su obra de divulgación, Eddington siempre se mostró como un ferviente defensor de la utilidad de la filosofía en el desarrollo de la ciencia moderna. Desde su punto de vista, la filosofía natural podría considerarse de hecho como el tronco del que surgió la física en un momento dado de su evolución y especialización. Por otra parte, a la epistemología la concibió como “la rama de la filosofía que estudia la naturaleza del conocimiento”. En este cuadro general, la epistemología científica era simplemente el “estudio del estado del universo físico” (1987: 6). En su concepción de la filosofía de la física, la epistemología científica ofrece un tipo de conocimiento que posee un grado razonable de certeza o probabilidad, no un tipo de conocimiento apodíctico o necesario como el que ofrecen las matemáticas. De hecho, su concepción que diferencia el mundo abstracto de las matemáticas del mundo sensible de la física da continuidad a la interpretación del modelo dualista kantiano. Para Eddington, las matemáticas constituyen un tipo especial de saber *a priori* en el que la experiencia es irrelevante, mientras que en la ciencia física la experiencia es la *última corte de apelación* para decidir sobre la verdad de los asertos y las predicciones científicas.

La filosofía de la física de Eddington parte de la idea de que el conocimiento científico debe contener ciertas reglas fundamentales para poder ser considerado como válido. La regla principal consiste en que “cada artículo de conocimiento sea una aserción de lo que ha sido o podría haber sido el resultado de efectuar un determinado proceso de observación” (1987: 15). Su concepción de la física como ciencia experimental se conecta con el empirismo y con toda la tradición materialista. Pero en su visión, aunque es la experiencia la última corte de apelación, las teorías tienen reservado un lugar especial. Para Eddington el desarrollo de la física es el producto de numerosas combinaciones mentales en las que las teorías y las observaciones experimentales se retroalimentan. En ese contexto, la epistemología científica tendría la misión de ser el canal de comunicación entre la filosofía y las ciencias empíricas. Eddington estaba convencido que la epistemología científica, entendida como un proceso de revisión de los conceptos fundamentales establecidos por la física newtoniana, había permitido las dos grandes revoluciones en la física del siglo XX: la física de la relatividad y la física cuántica

La concepción del conocimiento físico en Eddington pone a la luz un hecho de especial importancia. A pesar de las distinciones que se realizan académicamente entre teorías y experimentos, lo cierto es que en las teorías siempre están incluidos datos experimentales, mientras que los experimentos siempre comprenden ciertas consideraciones teóricas. La evolución de la ciencia solamente puede ser comprendida como el resultado de la interacción y mutua corrección entre experimentos y teorías. De hecho, se puede afirmar que el experimento condiciona la teoría en el sentido de que la falsifica, pero la teoría condiciona el experimento porque le indica qué es lo que se va a observar y cómo deben ser interpretados los datos obtenidos. Quizá uno de los ejemplos más adecuados para entender esta retroalimentación sea precisamente la observación realizada por su equipo en 1919. En ese caso específico, la teoría predecía un fenómeno que jamás había sido observado ni calculado, pero la observación crucial se encargaría de determinar si las predicciones teóricas se correspondían con los hechos.

La concepción de Eddington respecto a la diferencia entre conocimiento *a priori* y conocimiento *a posteriori* es *sui generis*. Su filosofía de la física considera que el conocimiento que deriva de las observaciones debe ser pensado como conocimiento *a posteriori*, mientras que el saber *a priori* consiste en un cierto proceso mental que permite el estudio epistemológico del procedimiento de observación. En su concepción de la filosofía de la física, la labor del epistemólogo moderno consistiría fundamentalmente en ser observador de los observadores, esto es, el epistemólogo debería convertirse en observador de los físicos experimentales. La labor más importante del epistemólogo consistiría básicamente en ofrecer elementos para diferenciar las buenas observaciones de las malas observaciones. El criterio más importante para distinguir la cali-

dad de la observación estaría condicionado por su nivel de *estandarización*. Esto significa que cuanto más detallado y repetible es un experimento, la observación podrá considerarse de mejor calidad. Parece bastante claro que Eddington tenía presente que la repetitividad de las observaciones posibilitaba el progreso de la física gracias a la conversión de hechos individuales en grandes generalizaciones.

La filosofía de la física de Eddington sostiene el dualismo al explicar los procesos de conocimiento científico como determinados por el *subjetivismo selectivo* y por el concepto de *estructura*. Estos dos componentes del proceso cognitivo pueden considerarse como el lado subjetivo y el lado objetivo-formal del conocimiento. Cuando se refiere al *subjetivismo selectivo* en su texto epistemológico, Eddington dice que la selección subjetiva depende de las facultades físicas e intelectuales de las que están dotados los seres humanos. En este sentido, utilizó la metáfora de la red para detallar que lo que llega a la mente humana está filtrado por las posibilidades de la experiencia. Por otro lado, el concepto de estructura constituiría la parte formal y objetiva del conocimiento, en tanto que permitiría matematizar los artículos de conocimiento de la física. La experiencia y la mente a través del subjetivismo selectivo y el concepto de estructura, interactuarían para dar vida al campo de conocimiento de la física.

Eddington estaba firmemente convencido que toda la física podía ser reducida a conocimiento de estructuras mediante la introducción de símbolos y desarrollando cálculos relacionales como los que permiten las matemáticas modernas. Por eso mismo, la estrategia que utilizó para intentar resolver los problemas inherentes al dualismo fue disolver la noción de universo físico en la noción de conocimiento físico, abrazando la idea de que “la teoría matemática de la estructura es la respuesta de la física moderna al problema del conocimiento”. En esta concepción, “el punto de partida de la física es el conocimiento de la estructura de grupo de una serie de sensaciones dadas en una conciencia” (1987: 169).

En la concepción de Eddington, el universo físico debe ser comprendido como una serie de complejas estructuras cognoscibles a través de recursos matemáticos, respetando una larga tradición que concibe a las matemáticas como el lenguaje natural para organizar el conocimiento físico del universo. Lo que no detalló con éxito es la naturaleza de la supuesta relación entre saber matemático y saber físico, conformándose con aseverar que el centro en el que reside esta unión mística es la mente humana. Su filosofía de la física puede considerarse como una epistemología profundamente respetuosa con la tradición empírica y materialista, ya que atribuye un elevado valor a las observaciones y los experimentos. Pero, al mismo tiempo, su concepción dualista prevé la existencia de un universo no físico que reside en la espiritualidad y en la mente humana. La crítica más seria que se puede hacer a esta concepción

es que niega la posibilidad de estudiar empíricamente ese universo no físico o inmaterial, portándonos a una solución mística.

La teoría de la relatividad

Al parecer de Eddington el aspecto más relevante de la teoría de la relatividad consistió en ofrecer una nueva aproximación epistemológica del universo físico capaz de coincidir con las observaciones. Al mismo tiempo consideraba relevante su nuevo lenguaje científico, ya que las cantidades físicas son concebidas como el resultado de procesos de medición particulares, y no como el resultado de mediciones absolutas (como en la física newtoniana). En sus palabras, gracias a la teoría de Einstein:

“El físico crea un matrimonio honorable con la metrología. Cantidades como la largueza y la extensión temporal son introducidas solamente con el objetivo de dar una descripción sucinta de las medidas experimentales reales o hipotéticas” (1984: 86).

En la concepción del físico británico, la teoría de la relatividad había sido capaz de desechar toda la metafísica del modelo newtoniano, proponiendo un nuevo lenguaje matemático en el que cada cantidad física medible es explicada por la teoría de modo descriptivo.

En la concepción de la física de Eddington existen dos paradigmas que dominan diferentes campos de la realidad, pero que, en el fondo, deberían mostrarse como mutuamente compatibles. Por un lado, la física microscópica o física cuántica que se aplica a los sistemas en escala subatómica y que describe probabilidades. Por otro lado, la física molecular en la que aplica la teoría de la relatividad y que describe relaciones. Es importante insistir en el hecho de que para Eddington la compatibilidad de ambos paradigmas terminaría por consolidarse en la evolución futura de la ciencia física. En sus propias palabras:

“La relatividad consiste más en un nuevo modo de ver cuyas consecuencias deben desarrollarse gradualmente, que en un axioma o hipótesis particular que pueda traducirse en un instante en una formulación definitiva” (1987: 39).

Hasta hoy todos los intentos de unificación han fracasado, existiendo posibles problemas de fondo sobre su posible compatibilidad.

En la concepción de la física de Eddington, la teoría de la relatividad representaba la forma moderna de crear conocimiento físico. Desde su punto de vista, la teoría de Einstein fue considerada inicialmente como una mera visión filosófica porque no se entendió muy bien que lo que en realidad hacía era simplificar el lenguaje de la física, eliminando todos los errores que limitaban su evolución. En esta visión, la física de la relatividad es comprendida como una nueva epistemología, pero también como una nueva metodología capaz de explicar la gravedad. En sus palabras:

“La teoría de la relatividad mostró que la separación usual entre espacio y tiempo es subjetiva, pues depende del movimiento del observador, por lo que introdujo un espacio a cuatro dimensiones que fuera independiente del observador” (1987: 99).

Para Eddington, la teoría de la relatividad logró crear un nuevo paradigma científico en el que se distingue la geometría natural (obtenida mediante mediciones materiales y ópticas) y la geometría formal (basada solamente en el principio de coherencia). En su interpretación sobresale la idea de que el físico relativista niega tres tesis de la física clásica: 1) que exista en la naturaleza un ente absoluto para determinar la largueza, 2) que la geometría de esta largueza absoluta sea euclidea, y 3) que mediciones prácticas determinen esta largueza detalladamente cuando no existen fuerzas gravitatorias (1997: 20). La teoría de la relatividad parte de la idea de que la posición, el movimiento y la unidad de medida son las condiciones que influyen en la observación. La interpretación filosófica de Eddington consiste en asegurar que en la teoría de la relatividad:

El observador y el mundo están indisolublemente unidos. Todos los términos familiares de la física –largueza, duración, movimiento, fuerza, masa, energía, etc.- se refieren principalmente a este conocimiento relativo del mundo [...] la largueza y la duración no son propiedades intrínsecas del mundo externo, se trata de relaciones entre los objetos del mundo externo y un observador particular (1997: 51).

La interpretación ofrecida por el astrónomo británico de la teoría de la relatividad parte de un hecho fundamental que ya hemos mencionado anteriormente. En su visión, la física clásica había fracasado al presuponer la existencia de un observador absoluto. La teoría de la relatividad, en cambio, había desechado la posibilidad de concebir un espacio o un observador absolutos. En la teoría general, la eliminación de la metafísica newtoniana permite la elaboración de una concepción geométrica de la gravedad en la que dicha fuerza es interpretada en términos de la curvatura del espacio. Por la misma razón, “en la mecánica relativista todos los observadores tienen la misma importancia, no existe un súper-observador” (1997: 93). Eddington estaba convencido que la revolución de la física einsteniana pasaba fundamentalmente por estas nuevas concepciones de la observación, la gravedad, el espacio, la simultaneidad, la materia y hasta la energía. En sus palabras:

La teoría de la relatividad deduce a partir de principios geométricos la existencia de la gravitación y las leyes de la mecánica de la materia. La mecánica es derivada de la geometría, no agregando hipótesis arbitrarias, sino eliminando suposiciones no necesarias, de modo que un geómetra como Riemman hubiera podido entrever las características más importantes del universo real (1997: 212).

Eddington estuvo firmemente convencido que la teoría de la relatividad simplificaba el lenguaje de la física. Pensaba que la física se simplifica cuando la geometría que describe el mundo físico se hace más compleja, al punto que sostenía que todo el campo estaba destinado a desarrollarse a través de una teoría geométrica del universo. En esta interpretación de la teoría de la relatividad, Eddington consideró que la física de Einstein es un paradigma basado en el concepto de estructura, no en la materia. En suma, en la visión de Eddington, la física de la relatividad había conseguido tres grandes conquistas: 1) reformular todo el campo de la física, 2) unificar las grandes leyes y 3) convertir a la física en el conocimiento de las formas estructurales, no en el conocimiento del contenido (1997: 251).

Conclusiones

La colaboración entre Einstein y Eddington es un hito en la física moderna, dado que las observaciones cruciales del segundo falsificaron por primera vez las predicciones de la teoría de la relatividad respecto al efecto de deflexión de los rayos de luz. En un contexto internacional en el que los acontecimientos políticos dificultaban la colaboración entre científicos de diferentes naciones, la relación profesional entre Einstein y Eddington resalta como un ejemplo de ética científica. En este sentido, el perfil de ambos científicos resulta un aspecto relevante para entender algunos de sus puntos de acuerdo y desacuerdo.

Eddington fue un astrónomo meticuloso con grandes dotes como observador y experimentador. Su particular visión sobre lo que significaba ser un epistemólogo científico le ayudó a entender el valor de la teoría de la relatividad. Su capacidad como científico le permitió falsificar las predicciones de la teoría de Einstein a través de una observación crucial que podía ser estandarizada. Sin embargo, a diferencia de Einstein, Eddington fue un ferviente religioso practicante de la tradición cuáquera. Su concepción filosófica del mundo físico y del conocimiento físico estuvo determinada por estas creencias. En su defensa del dualismo y del misticismo está latente la idea de que existe un mundo espiritual que Einstein jamás hubiera admitido. A esto se puede agregar, que Einstein no hubiera afirmado que su teoría se basaba solamente en el concepto de estructura sin considerar la materia. A pesar de esto, las concepciones de Einstein y de Eddington coinciden en algunos aspectos fundamentales, entre los cuales se pueden resaltar:

1. La física es vista como una ciencia escrita en el lenguaje de las matemáticas.
2. La teoría de la relatividad es concebida como una teoría que desarma los presupuestos metafísicos de la física newtoniana.
3. La geometría de la relatividad describe el mundo físico, no siendo una mera interpretación matemática del espacio.

4. La importancia atribuida al cálculo de la constante cósmica.
5. La concepción que interpreta las probabilidades de la física cuántica como un defecto del *estado de conocimiento* y no como algo que pertenece al verdadero estado de las cosas (velocidad y posición de las partículas).
6. La creencia en el posible desarrollo de una teoría del campo unificado.

La interpretación que Eddington ofreció de la física de Einstein puede considerarse parcialmente acertada, dado que supo interpretar muy bien la importancia del instrumental matemático en la elaboración de la teoría de la relatividad, así como la simplificación sintáctica que comportaba. Su particular interés filosófico le permitió ofrecer también una interpretación epistemológica *sui generis* en la que la física einsteniana es vista como un sofisticado análisis estructural del mundo físico a nivel molecular. Con Einstein compartió sobre todo su creencia en la posibilidad de desarrollar una teoría del campo unificado capaz de simplificar todo el conocimiento físico. A pesar de esto, la interpretación de Eddington se basa en la idea de que el universo descrito por la física de la relatividad es incapaz de explicar el mundo no físico. Este dualismo radical de la filosofía de la física de Eddington resulta con toda probabilidad el rasgo menos compatible con la visión concepción de Einstein. P

BIBLIOGRAFÍA

Agazzi, Evandro; Palladino, Dario 1998 *Le geometrie non euclidee e i fondamenti della geometria* [La geometría no euclidea y los fundamentos de la geometría] (Brescia: La scuola)

Bernstein, Jeremy 2000 *L'uomo senza frontiere. Vita e scoperte di Albert Einstein* [El hombre sin fronteras. Vida y descubrimientos de Albert Einstein] (Milano: Il Saggiatore)

Bernstein, Jeremy 2004 *Einstein* (Bologna: Il Mulino)

Carnap, Rudolf 1969 *Fundamentación lógica de la física* (Buenos Aires: Editorial Sudamericana)

Capra, Fritjof 2000 *El Tao de la física* (Málaga: Sirio)

Chalmers, Alan 1990 *¿Qué es esa cosa llamada ciencia? Una valoración de la naturaleza y el estatuto de la ciencia y sus métodos* (México: Siglo XXI)

Eddington, Arthur 1984 *Filosofia della fisica* [Filosofía de la física] (Roma-Bari: Laterza)

- Eddington, Arthur 1987 *La natura del mondo fisico* [La naturaleza del mundo físico] (Roma: Laterza)
- Eddington, Arthur 1997 *Spazio, tempo e gravitazione* [Espacio, tiempo y gravedad] (Torino: Bollati Boringhieri)
- Einstein, Albert 1986 *Pensieri degli anni difficili* [Pensamientos de años difíciles] (Torino: Boringhieri)
- Einstein, Albert 1988 *Este es mi pueblo* (Buenos Aires: Raíces)
- Einstein, Albert (1996 a) *El significato della relatività* [El significado de la relatividad] (Torino: Bollati Boringhieri)
- Einstein, Albert; Infeld, Leopold (1996 b) *L'evoluzione della fisica. Dai concetti iniziali alla relatività dei quanti* [La evolución de la física. Desde conceptos iniciales a la relatividad cuántica] (Torino: Bollati Boringhieri)
- Einstein, Albert 1997 *Pensieri di un uomo curioso* [Pensamientos de un hombre curioso] (Milano: Mondadori)
- Einstein, Albert 2004 *Sobre la teoría de la relatividad especial y general* (Madrid: Altaya)
- Greenberg, Marvin 1993 *Euclidean and Non-Euclidean Geometries: Development and History* [Geometrías euclidianas y no-euclidianas: Desarrollo e historia] (New York: Freeman and Company)
- Greene, Brian 2006 *El universo elegante* (Barcelona: Drakontos)
- Hawking, Stephen; Penrose, Roger 1996 *La natura dello spazio e del tempo* [La naturaleza del espacio y del tiempo] (Milano: Sansoni)
- Hawking, Stephen 2000 *Dal big bang ai buchi neri. Breve storia del tempo* [Del big bang a los agujeros negros. Breve historia del tiempo] (Milano: BUR)
- Heisenberg, Werner 1984 *Fisica e oltre. Incontri con i protagonisti 1920-1965* [Física y más allá. Reuniones con los protagonistas 1920-1965] (Torino: Paolo Boringhieri)
- Isaacson, Walter 2010 *Einstein. La sua vita, il suo universo* [Einstein. Su vida, su universo] (Milano: Mondadori)
- Kragh, Helge 1999 *Cosmology and Controversy* [Cosmología y controversia] (Princeton: Princeton University Press)
- Kuhn, Thomas 2004 *La struttura de las revoluciones científicas* (México DF: Fondo de Cultura Económica)
- Laughlin, Robert 2005 *Un universo diverso. Reinventare la fisica da cima a fondo* [Un universo diferente. Reinventar la física de arriba a abajo] (Torino: Codice)

Lakatos, Imre 1983 *Las metodologías de los programas de investigación científica* (Madrid: Alianza)

Nobel Lectures 1967 *Physics 1901-1921* [Física 1901-1921] (Amsterdam: Elsevier Publishing Company)

Parellada, Ricardo 2002 "La síntesis a priori y las geometrías no euclidianas", en *Thémata. Revista de Filosofía* (Sevilla, España), Número 28.

Penrose, Roger 2005 *Equilibrio perfetto: le grandi equazioni della scienza moderna* [Equilibrio perfecto: las grandes ecuaciones de la ciencia moderna] (Milano: Il Saggiatore)

Popper, Karl 1980 *La lógica de la investigación científica* (Madrid: Tecnos)

Russell, Bertrand 2000 *El conocimiento humano* (Barcelona: Folio)

Smart, James 1988 *Modern Geometries* [Geometrías modernas] (Pacific Grove: Thomson Brooks)

Sparzani, Antonio 2003 *Relatività, quante storie* [Relatividad, cuántas historias] (Torino: Bollati Boringhieri)

Recibido: Abril 15, 2015. Aceptado: Abril 5, 2017