

EL PROBLEMA DE INCOMPATIBILIDAD (INTER)TEÓRICA EN LA CIENCIA

ISRAEL SALAS LLANAS

RESUMEN: A lo largo de la historia de la ciencia, los grandes cambios de paradigma han estado siempre precedidos por prolongadas etapas de diálogo irreconciliable entre distintas formas de entender el mundo. La coexistencia de modelos mutuamente incompatibles —competidores por ofrecer una visión matemática unificadora de la realidad física— ha sido objeto de profundo debate en el ámbito de la filosofía de la ciencia. En este artículo se examina el problema de incompatibilidad interteórica en la ciencia, así como su relevancia en el debate filosófico contemporáneo.

PALABRAS CLAVE: incompatibilidad interteórica; modelo científico; mecanicismo; relatividad; filosofía de la ciencia.

The Problem of (Inter)Theoretical Incompatibility in Science

ABSTRACT: Throughout the history of science, major paradigm shifts have invariably been preceded by extended periods of irreconcilable dialogue between competing worldviews. The coexistence of mutually incompatible models —each vying to provide a unifying mathematical framework for physical reality— has long been a subject of profound philosophical scrutiny. This paper examines the problem of intertheoretical incompatibility in science and its enduring significance in contemporary philosophical discourse.

KEY WORDS: Intertheoretical incompatibility; Scientific model; Mechanicism; Relativity; Philosophy of Science.

1. INTRODUCCIÓN: DOS UNIVERSOS INCOMMENSURABLES

«Pero también es verdad que aquellos eran tiempos oscuros en los que un hombre debía pensar cosas que se contradecían entre sí.»

UMBERTO ECO, *El nombre de la rosa*.

La ciencia ha convertido la historia de la investigación en la historia de la modelización, decantándose por el estudio de sistemas simples —modelos— en detrimento de sistemas complejos —el Universo—. Si por algo se caracteriza la ciencia es por su reduccionismo; es decir, por su capacidad para abstraer de la fenomenología observable todos aquellos aspectos considerados como irrelevantes a la luz de la investigación. Los modelos en ciencia facilitan esta abstracción, simplificando la profunda complejidad del mundo en una síntesis matemática de su comportamiento. Ahora bien, pese a ser la simplificación y la abstracción rasgos inherentes a la actividad científica, esto no implica menoscabar el valor de los modelos en el contexto de la investigación, pues, más allá de si estos brindan o no una imagen fiel de cómo es el mundo, no cabe duda de que muchos de ellos se han consolidado como formulaciones racionales singularmente creativas acerca de la naturaleza de

la realidad, así como herramientas notablemente exitosas a la hora de acometer predictivamente su estudio.

Un ejemplo paradigmático lo ofrece el célebre modelo mecanicista¹ de Newton [MMN], que puso el broche de oro a un sinfín de observaciones experimentales e indagaciones teóricas llevadas a cabo durante siglos, desde las propuestas por los precursores de Ptolomeo en Grecia y Persia hasta las formuladas por algunos de los más destacados científicos del siglo XV y XVI, como Copérnico, Brahe o Kepler. Finalmente, con la publicación de los *Principia* de Newton en 1687, el MMN instauró una renovada visión del mundo como un sistema susceptible de ser estudiado en términos de materia y movimiento. La irrupción científica que este modelo trajo consigo no solo supuso un cambio profundo en el modo de entender la física de los cuerpos, sino que consolidó toda una nueva filosofía en su conjunto, a la que el propio Kant contribuyó decisivamente en su primera *Critica* al afirmar que todos

[...] los cambios tienen lugar de acuerdo con la ley que enlaza causa y efecto (Kant 1997, p. 220).

Es más, dado su enorme éxito predictivo a la hora de acometer el estudio de los cuerpos en movimiento, el MMN comenzó a gozar de una universalidad que poco a poco fue trascendiendo el terreno de lo científico y a invadir el ámbito religioso, hasta tal punto que eminentes pensadores de la época llegaron a afirmar que el enigma del mundo físico casi se había resuelto. Tal fue el caso de Cotes, quien en su prefacio a la segunda edición de los *Principia* sostuvo:

La teoría de esos cuerpos era totalmente desconocida para los astrónomos hasta que nuestro excelente autor [Newton] la descubrió tan felizmente, demostrando su veracidad con las observaciones más seguras (Newton 2011 [2^a ed., 1729], pp. 15-16).

Sin embargo, con el tiempo, nuevas observaciones astronómicas revelaron que las órbitas de algunos cuerpos en movimiento no obedecían fielmente las leyes de Kepler. La explicación residía en que, para derivar sus leyes del movimiento, Newton se vio obligado a ignorar toda atracción gravitatoria salvo la que tenía lugar entre cada planeta y el Sol —un claro ejemplo de reduccionismo científico—, razón por la cual los resultados obtenidos presentaban serias limitaciones al abordar el estudio de sistemas con más de dos cuerpos sujetos a mutua atracción gravitatoria. Asimismo, a finales del siglo XIX y comienzos del XX, las ecuaciones de Maxwell en el campo del electromagnetismo, que describían la luz como una onda electromagnética que se propaga a una velocidad finita y constante en el vacío, contradijeron

¹ El mecanicismo da nombre a una concepción del mundo natural que alcanzó su plena madurez entre los siglos XVI y XVII, en paralelo con la eclosión de la ciencia moderna. Su impulso inicial puede situarse en 1543, con la publicación de *De revolutionibus orbium coelestium* de la mano de Nicolás Copérnico, y su culminación teórica en 1687, con la aparición de *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* de Isaac Newton. Bajo esta cosmovisión, el Universo se concibe como una vasta maquinaria de precisión cuyos fenómenos son, en última instancia, reducibles a las interacciones regulares y necesarias de partículas materiales dotadas de propiedades intrínsecas e irreductibles. Como filosofía natural, el mecanicismo reinterpreta en clave experimental y matemática ciertos principios atomistas heredados de Leucipo y Demócrito, articulando sobre ellos un marco teórico que privilegia la descripción cuantitativa de la naturaleza y la formulación de leyes universales.

la ley de adición de velocidades de la mecánica newtoniana, poniendo una vez más en tela de juicio la presunta universalidad del MMN.

La ineeficacia predictiva del MMN para dar cuenta de fenómenos originados en entornos gravitacionales masivos o en velocidades próximas a las de la luz propició el surgimiento de un nuevo modelo basado en una concepción radicalmente distinta del espacio y del tiempo: el modelo relativista de Einstein [MRE]. La irrupción del MRE no solo desestabilizó los cimientos de los postulados heredados, sino que inauguró una nueva visión del mundo inasequible a la intuición sensible, en la que el espacio y el tiempo dejaban de constituir un marco fijo e inmutable para aparecer ligados en una misma entidad, descrita en términos de geometría curva del espacio-tiempo. La validación empírica del MRE, al reinterpretar los nuevos desafíos de la física del siglo XX, alentó a numerosos científicos a buscar la conciliación de los postulados newtonianos y relativistas en pos de articular una teoría unificada. Este diálogo irreconciliable entre modelos competidores por ofrecer una descripción completa y unificada de la realidad física se presenta como un fenómeno recurrente en la historia de la ciencia, y se enmarca dentro del conocido problema de incompatibilidad interteórica.

2. INCOMPATIBILIDAD INTERTEÓRICA Y VIABILIDAD PREDICTIVA

A la hora de analizar el problema de incompatibilidad interteórica, el MMN se vuelve paradigmático una vez más, dado el gran número de aplicaciones metodológicas que ofrece². Entre las muchas, cabe destacar su notable éxito en el cálculo de la masa del Sol:

$$M_{\odot} = \frac{4\pi^2 d^3}{G_N p^2},$$

así como de la Tierra:

$$M_{\oplus} = \frac{gr^2}{G},$$

siendo $M_{\odot} = 2 \times 10^{30}$ kg y $M_{\oplus} = 5,9 \times 10^{24}$ kg, respectivamente. Asimismo, el MMN también se muestra exitoso a la hora de calcular la densidad crítica ρ_c del Universo:

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}.$$

Si consideramos un modelo esférico de Universo

$$V = \frac{4\pi r^3}{3},$$

² Cf. RIVADULLA 2004, pp. 141-144.

con una velocidad de recesión

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

y hacemos uso de la ley de Hubble, donde

$$v_e = Hr,$$

basta con elevar al cuadrado ambos miembros de la ecuación y sustituir M por la expresión correspondiente, obteniendo así

$$H^2 r^2 = \frac{2Gv}{r}.$$

Al reemplazar por

$$H^2 r^2 = \frac{2G \frac{4\pi r^3}{3} \rho_c}{r},$$

se obtiene la densidad crítica

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}.$$

Además, el MMN también permite estimar con alto grado de acierto el número de cuerpos estelares de nuestra galaxia: la Vía Láctea. Conociendo su forma de espiral barrada, la distancia del Sol con respecto del centro del bulbo galáctico (7,97 kpc) y su trayectoria orbital ($v \approx 251 \text{ km/s}$), cuyo periodo $p \approx 2,25 - 2,50 \times 10^8$ años, basta con introducir estos datos en las ecuaciones de Kepler y reemplazar $M = M_g$, obteniendo así un valor aproximado de $2,5 \times 10^{11} \pm 1,5 \times 10^{11}$ masas estelares.

Jan Oort fue el primero en calcular el número de masas estelares presentes en la Vía Láctea, estimando la distancia entre Sol y el centro de esta. El número de masas estelares que Oort predijo fue aproximadamente 1×10^7 . Posteriormente, en 1932, en su estudio de la rotación de las galaxias, Oort postuló la existencia de una nueva componente de materia —invisible a los instrumentos de detección directa— al observar que las estrellas se desplazaban a una velocidad mayor de la que se pensaba en aquel entonces. La hipotética existencia de esta nueva componente, imperceptible, desestabilizó los cimientos de la cosmología, pues, conforme a los principios del MMN, la velocidad orbital de las estrellas debía decrecer a medida que aumentaba su distancia respecto del centro galáctico.

Años más tarde, en 1957, Vera Rubin planteó que la mayoría de las estrellas en galaxias espirales se desplazaban prácticamente a la misma velocidad, siendo la velocidad orbital de aquellas más alejadas del bulbo galáctico aproximadamente constante (Rubin et al. 1980, pp. 71-487). Esta afirmación se vio refrendada por ulteriores observaciones experimentales.

En 1959, Louise Volders realizó una observación que supuso un golpe inesperado para la dinámica galáctica clásica. Al estudiar la rotación de la galaxia espiral M33, mostró que su comportamiento no se correspondía con las predicciones de la mecánica clásica. Según el MMN, las estrellas ubicadas en las regiones externas

—en el halo galáctico— debían exhibir velocidades decrecientes en un patrón similar al de los planetas que orbitan el Sol; sin embargo, contra toda expectativa, Volders constató que la velocidad de rotación no solo no disminuía con la distancia, sino que se mantenía constante.

En la actualidad, la curva de rotación de los halos galácticos no es el único fenómeno que desafía la presunta universalidad del MMN. Otro caso paradigmático sería el de las ondas gravitacionales: perturbaciones en la curvatura del espacio-tiempo que se propagan a la velocidad de la luz. La naturaleza de estas ondas queda fuera del alcance predictivo del MMN, ya que sus postulados no fueron concebidos para abordar fenómenos originados en entornos de intensa gravedad, como en las proximidades de un agujero negro. Veamos esto con un ejemplo³.

Un agujero negro de Schwarzschild responde a un objeto matemático que representa una región del espacio-tiempo definida por un único parámetro —su masa— y delimitada por un horizonte de sucesos. En la métrica de Schwarzschild, el intervalo de tiempo propio se expresa mediante la siguiente relación:

$$d\tau = \left(1 - \frac{2Gm}{rc^2}\right)^{1/2} dt,$$

siendo el radio de Schwarzschild

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}.$$

Al introducir estos valores en la ecuación anterior, obtenemos

$$d\tau = \left(1 - \frac{r_g}{r}\right)^{1/2} dt.$$

En términos de frecuencia, la relación se transforma en

$$f_o = \left(1 - \frac{r_g}{r}\right)^{1/2} f_e,$$

siendo f_o y f_e , la frecuencia observada y emitida, respectivamente. Teniendo en cuenta esto y sabiendo que el corrimiento gravitacional al rojo viene dado por

$$z \approx \left(\frac{f_e}{f_o}\right) - 1,$$

si hacemos uso del MMN, el resultado obtenido es el siguiente:

$$z \approx \left(1 - \frac{r_s}{2r}\right)^{-1} - 1,$$

con el límite

$$\lim_{r \rightarrow r_s} z = 1.$$

Esta predicción no se ajusta a los resultados observacionales, ya que, según el MMN, la luz emitida desde las inmediaciones del horizonte de sucesos debería seguir siendo visible, aunque con una frecuencia aproximadamente la mitad de la

³ Cf. RIVADULLA 2003, pp. 244-249.

originalmente emitida. Una conclusión claramente incompatible con el estado observacional y que evidencia, una vez más, la incapacidad predictiva del MMN a la hora de abordar fenómenos propios de entornos gravitacionales masivos.

Por el contrario, si utilizamos el MRE, el resultado es distinto, ya que el corrimiento gravitacional al rojo se define como

$$z \approx \left(1 - \frac{r_s}{r}\right)^{-1/2} - 1,$$

con el límite

$$\lim_{r \rightarrow r_s} z = \infty.$$

Esto muestra que, cuando $z \rightarrow \infty$ al acercarse a distancias menores que r_s , la luz deja de ser observable dada la intensa fuerza gravitatoria. Una predicción bastante acertada tratándose de un agujero negro.

Como puede comprobarse, el éxito del MRE frente al MMN al acometer predictivamente el cálculo del corrimiento al rojo radica en la redefinición de las nociones clásicas de espacio y tiempo. Según el MRE, la gravedad no es una fuerza en el sentido clásico, sino la manifestación de la curvatura del espacio-tiempo. De modo que, siempre que exista un objeto físico —una estrella, un planeta o cualquier concentración de materia—, el espacio que lo rodea se curvará en función de su masa. Esto se debe a que, en el MRE, el espacio y el tiempo no son entidades separadas, sino que conforman un continuo inseparable y tanto uno como otro se ven alterados por la presencia de materia.

Ahora bien, el éxito del MRE al predecir fenómenos como el corrimiento gravitacional al rojo, la desviación de la luz o el avance del perihelio de Mercurio, no debe servir para menospreciar la efectividad del MMN a la hora de abordar los desafíos propios de su tiempo, como el cálculo de la masa de la Tierra y el Sol, el estudio de la densidad crítica del Universo o la estimación del número de cuerpos estelares en la Vía Láctea.

3. PAUTAS METODOLÓGICAS PARA LA RECONCILIACIÓN INTERTEÓRICA: DERIVABILIDAD MATEMÁTICA Y CORRESPONDENCIA SEMÁNTICA

El afán de la ciencia por articular un modelo unificado de la realidad física ha encontrado en la incompatibilidad interteórica un enemigo a abatir. Ante la coexistencia de modelos mutuamente incompatibles, pero predictivamente exitosos por separado —como es el caso del MMN y el MRE—, una vía metodológica plausible para abordar la reconciliación sería atender a dos criterios fundamentales: 1) la derivabilidad matemática y 2) la correspondencia semántica. Si bien tanto el primer criterio como el segundo pueden analizarse de forma independiente, solo una resolución conjunta permitirá alcanzar una unificación teórica completa.

Derivar matemáticamente un modelo a partir de otro implica reconciliar la estructura matemática de ambos dentro del mismo contexto de ecuaciones. Para ilustrar esto —y recurriendo una vez más al MMN y al MRE como ejemplos paradigmáticos—, consideraremos las ecuaciones de transformación de Lorentz:

$$x' = \gamma(x - vt)$$

$$y' = y; z' = z$$

$$t' = \gamma \left(t - \frac{vx}{c^2} \right),$$

donde

$$\gamma = \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-\frac{1}{2}}.$$

Si la velocidad v de los cuerpos es mucho menor que c , las ecuaciones de Lorentz se reducen a las transformaciones de Galileo propias de la mecánica clásica, dado que en ese caso $\gamma \approx 1$ y $vx/c^2 \approx 0$. Como consecuencia, algunos fenómenos relativistas, como la contracción de longitudes y la dilatación temporal, desaparecen; la segunda ley de la dinámica newtoniana se recupera y la expresión clásica de la energía cinética reaparece. En palabras de Einstein:

Si se particularizan las ecuaciones de la teoría general de la relatividad al caso de que los campos gravitatorios sean débiles y de que todas las masas se muevan respecto al sistema de coordenadas con velocidades pequeñas comparadas con la de la luz, entonces se obtiene la teoría de Newton como primera aproximación; así pues, esta teoría resulta aquí sin necesidad de sentar ninguna hipótesis especial, mientras que Newton tuvo que introducir como hipótesis la fuerza de atracción inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre los puntos materiales que interactúan (Einstein, 1994, pp. 87-88).

Aunque en la actualidad resulta posible derivar matemáticamente las ecuaciones del MMN a partir de las del MRE, señalando el primero como *caso límite* del segundo, surge un nuevo problema al intentar establecer una correspondencia entre el significado de los términos involucrados en dichas ecuaciones. En lo que respecta al problema de correspondencia semántica, Kuhn plantea la siguiente reflexión:

Con todo, la derivación es espuria, al menos en este punto. Por más que los N_i sean un caso especial de las leyes de la mecánica relativista, no son las leyes de Newton. O al menos no lo son, si no se reinterpretan dichas leyes de un modo que hubiera resultado imposible antes de la obra de Einstein. Las variables y parámetros que representan en los E_i la posición espacial, el tiempo, la masa, etc., siguen apareciendo en los N_i , y siguen representando el espacio, el tiempo y la masa. Pero los referentes físicos de esos conceptos einsteinianos no son en absoluto idénticos a los de los conceptos newtonianos que llevan el mismo nombre [...] A menos que cambiamos las definiciones de las variables de los N_i , los enunciados que hemos derivado no son los newtonianos. Si las cambiamos, no podemos decir con propiedad que hayamos derivado las leyes de Newton, al menos no en ningún sentido de derivar actualmente aceptado por todo el mundo [...] No se ha logrado mostrar que las leyes de Newton sean un caso límite de las de Einstein, pues en el paso al límite no solo han cambiado las formas de las leyes, sino que hemos de alterar al mismo tiempo los elementos estructurales fundamentales de que se compone el universo al que se aplican (Kuhn, 2004, pp. 179-180).

Este argumento resulta coherente: si la masa es constante en el MMN, pero no lo es en el MRE, la reconciliación semántica parece imposible. En palabras de Feyerabend:

Thus in classical, prerelativistic physics the concept of mass [...] was absolute in the sense that the mass of a system was not influenced [...] by its motion in the coordinate system chosen. Within relativity, however, mass has become a relational concept whose specification is incomplete without indication of the coordinate system to which the spatiotemporal descriptions are all to be referred. Of course, the values obtained on measurement of the classical mass and of the relativistic mass will agree in the domain D' , in which the classical concepts were first found to be useful. This does not mean that what is measured is the same in both cases: what is measured in the classical case is an *intrinsic* property of the system under consideration; what is measured in the case of relativity is a relation between the system and certain characteristics of D' . It is also impossible to define the exact classical concepts in relativistic terms or to relate them with the help of an empirical generalization (Feyerabend, 1981, pp. 81-82).

A lo que Sneed añade:

The mass function in classical particle mechanics and the mass function in special relativity theory are to be regarded as two theoretical functions appearing in distinct theories of mathematical Physics. One should not expect that means of determining the values of one *necessarily* have anything to do with determining the values of the other. Of course, it is an interesting fact that classical particle mechanics stands in a reduction relation to special relativity and the mass functions in the theories correspond in this reduction relation. But this should not obscure the fact that these functions have different formal properties and, in this sense, they are associated with different concepts (Sneed, 1971, pp. 305-306).

Asumiendo esto, no resulta sencillo establecer un diálogo coherente entre los postulados del MMN y los del MRE, ya que cada uno se sustenta en una concepción ontológica particular de la física. Si bien es cierto, cuando un modelo se considera un caso límite de otro —como ocurre con el MMN respecto del MRE—, la reconciliación se vuelve posible desde un punto de vista matemático, pero no desde un punto de vista semántico que unifique el significado atribuido a los términos involucrados y, por ende, la referencia empírica de los mismos. La transición de la mecánica newtoniana a la mecánica relativista ilustra con particular claridad esta incompatibilidad semántica: el espacio —absoluto— y el tiempo —eterno— en el MMN dejan de constituir el escenario donde ocurren los fenómenos y pasan a considerarse fenómenos en sí mismos en el MRE, conformando una única entidad descrita en términos geométricos: el espacio-tiempo. En cuanto a la masa, esta se conserva en el MMN, mientras que en el MRE se transforma, lo que implica que la masa newtoniana no es directamente traducible a la masa einsteiniana, ya que, aunque el término empleado sea el mismo, su significado no lo es.

4. INCOMPATIBILIDAD INTERTEÓRICA Y VERDAD CIENTÍFICA

El problema de la incompatibilidad interteórica comporta importantes repercusiones ontológicas y epistemológicas, tanto en el ámbito de la investigación científica como en el de la reflexión filosófica. La coexistencia de modelos mutuamente incompatibles aviva una vez más el debate acerca del valor de verdad atribuido a

los modelos y teorías científicas. En *El mito del marco común*, Karl Popper reflexiona acerca de este criterio de veracidad y plantea la siguiente cuestión:

Can any model be true? I do not think so. Any model, whether in Physics or in the social sciences, must be an over-simplification (Popper, 1994, p. 172).

Aun así, Popper no logra desprenderse por completo de la atractiva idea de que

[...] science aims at truth, or at getting nearer to the truth (*Op. cit.*, p. 174);

una postura que reafirma más adelante al señalar que

Copernicus' model appears to be a better approximation to the truth than Ptolemy's, Kepler's a better approximation than Copernicus', Newton's theory a better approximation still, and Einstein's better again (*Op. cit.*, p. 176).

Con esta reflexión, Sir Karl aboga por una visión de la ciencia como una aproximación progresiva a la verdad, una idea a la que Laudan aludiría años más tarde con el término *realismo convergente* (Laudan, 1986). En este sentido, considero conveniente rescatar brevemente esta noción de progreso convergente de la ciencia, ya que incide directamente en las implicaciones epistemológicas derivadas del problema de incompatibilidad interteórica.

La idea de que la ciencia progresa mediante aproximaciones sucesivas a la verdad es compartida por la gran mayoría de prominentes científicos y filósofos de la ciencia contemporáneos. Entre ellos destaca Sklar, para quien la ciencia se encuentra

[...] on the road to truth, and that in the future [science] will be looked upon as having been headed in the right direction (Sklar, 2000, pp. 87-88);

Boyd, quien afirma que

[...] if scientific theories weren't (approximately) true, it would be miraculous that they yield such accurate observational predictions (Boyd, 1983, p. 47);

o Kitcher, para quien

[...] in the history of science there has been within a field a sequence of theories T_p, \dots, T_n (or explanatory schemata, statements, terms, instruments, ...) such that, for each i , T_{i+1} has been accepted as superior to T_i then for every j greater than $i + 1$, T_{i+1} appears closer to the truth than T_j from the perspective of T_i (more correct or complete in the case of explanatory schemata, equipped with a more adequate reference potential in the case of terms, and so forth). So, we can expect that our theories will appear to our successors to be closer to the truth than those of our predecessors (Kitcher, 1993, p. 137).

Aunque la tesis de que la ciencia progresa por aproximación a la verdad resulta muy intuitiva en un primer análisis, esta no explica cómo se resuelve la incompatibilidad que media entre dos modelos competidores. Es más, incluso siendo posible una reconciliación tanto a nivel de derivabilidad matemática como de correspondencia semántica, no habría forma de asignar al modelo resultante un mayor o menor grado de veracidad con respecto a cómo es realmente el mundo. Sin embargo, lo que sí puede evaluarse, así como verificarse o refutarse experimentalmente, es la viabilidad de un modelo concreto a la hora de establecer predicciones sobre fenómenos particulares. Si el modelo resulta predictivamente exitoso en sus estimaciones, entonces puede evaluarse en términos de viabilidad (*viability*) o ajuste

funcional (*functional fit*) (Glaserfeld, 2001). Al circunscribir toda evaluación posible a las categorías de viabilidad o ajuste funcional, cualquier pretensión de atribuir valor de verdad a un modelo —más allá del éxito predictivo que este pueda ofrecer— carece de justificación epistémica desde una perspectiva epistemológica, pues el único criterio factible para su aceptación depende de la relación funcional entre la estructura teórico-matemática del modelo y el comportamiento observacional —mesurable— de la física del mundo. En palabras de Lombardi:

[...] se establece una relación compleja, de sistema a sistema, donde algunas variables del sistema real pueden no aparecer en el modelo [...] y, a su vez, algunas variables del modelo pueden no poseer su correlato en el sistema (Lombardi, 1998, p. 11).

Solo cuando las variables asumen un valor derivado de una medición es posible establecer una correspondencia biunívoca entre aquellas presentes en el modelo y la física del mundo. En tal caso, la determinación empírica de esas variables permite evaluar la viabilidad predictiva del modelo, pero no inferir una presunta veracidad en términos de semejanza, verosimilitud o isomorfismo entre la estructura teórico-matemática del modelo y la naturaleza misma de los fenómenos estudiados. Esta es la razón por la que, dado un sistema real, resulta posible la coexistencia de diferentes modelos que describan predictivamente dicho sistema, tal y como ocurre con el MMN y el MRE. Cada modelo puede diferir del otro en la selección de las variables consideradas relevantes, ya que la preferencia de unas respecto de otras, así como la elección de un modelo frente a otro, obedece en última instancia a los objetivos marcados por la propia investigación.

5. UN EJEMPLO DE RECONCILIACIÓN INTERTEÓRICA: Λ CDM

El descubrimiento en 1997 de la expansión acelerada del Universo favoreció el desarrollo de un nuevo modelo cosmológico de consenso: Lambda-CDM (Λ CDM, por sus siglas en inglés: *Lambda-Cold Dark Matter*). Este modelo nace como un intento de reconciliar en un marco unificado los fundamentos gravitacionales de la relatividad general con los principios que rigen la teoría cuántica de campos en el modelo estándar de física de partículas. La formulación matemática de Λ CDM parte de la combinación de lagrangianos fundamentales de ambos marcos teóricos. Por un lado, el lagrangiano gravitacional

$$\mathcal{L}_{GR} = \frac{1}{16\pi G} (R - 2\Lambda) \sqrt{-g},$$

que describe la gravedad en relatividad general, incluyendo la constante cosmológica Λ , asociada a la energía oscura; y, por otro, el lagrangiano del modelo estándar

$$\mathcal{L}_{SM} = -\frac{1}{4} F^{\mu\nu} F_{\mu\nu} + \bar{\psi}(i\gamma^\mu D_\mu - m)\psi + \dots,$$

que representa el comportamiento de los campos y partículas elementales (electrones, quarks, fotones, etc.). El lagrangiano total del modelo Λ CDM se expresa como

$$\mathcal{L}_{total} = \mathcal{L}_{GR} + \mathcal{L}_{SM} + \mathcal{L}_{DM} + \mathcal{L}_\Lambda,$$

donde se incluyen, además de la gravedad y las partículas del modelo estándar, las contribuciones de la materia oscura (DM) y de la energía oscura (asociada a Λ).

Atendiendo a la derivabilidad matemática, Λ CDM recupera el término de constante cosmológica Λ , propuesto por Einstein por vez primera en 1917, y lo introduce en las ecuaciones de campo de la relatividad general:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + [\Lambda g_{\mu\nu}] = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu},$$

o bien en su forma expresada mediante el tensor de Einstein $G_{\mu\nu}$:

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu},$$

donde

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu}.$$

Este marco respeta los principios locales de conservación de energía y momento, expresados a través de la nulidad de la divergencia covariante

$$\nabla^\mu G_{\mu\nu} = 0 \quad \text{y} \quad \nabla^\mu T_{\mu\nu} = 0,$$

asegurando la conservación local de la energía y el momento.

El efecto de incluir la constante Λ en el contexto de las ecuaciones implica dotar a la gravedad de una acción repulsiva a gran escala espacio-temporal. En el marco teórico de Λ CDM, el Universo evoluciona desde una fase inicial dominada por la gravedad atractiva hacia una etapa de expansión acelerada, conforme disminuye la densidad de materia. Esta dinámica queda descrita por la ecuación de Friedmann:

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3},$$

que determina la tasa de expansión del universo $H(t) = \dot{a}/a$ en función de la densidad total de energía ρ , la curvatura espacial k y la constante cosmológica Λ . Asimismo,

$$\left(\frac{\ddot{a}}{a}\right) = -\frac{4\pi G}{3}\left(\rho + \frac{3p}{c^2}\right) + \frac{\Lambda}{3}$$

describe cómo varía la aceleración de la expansión, con un primer término que desacelera la expansión y un segundo término, dominado por Λ , que impulsa una aceleración positiva. La transición entre ambas etapas se cuantifica mediante el parámetro de desaceleración

$$q = -\frac{\ddot{a}a}{\dot{a}^2} = \frac{1}{2}\Omega_M - \Omega_\Lambda,$$

donde Ω_M y Ω_Λ son los parámetros de densidad normalizados para la materia y la energía oscura, respectivamente. Así, si $q < 0$, el Universo experimenta una expansión acelerada, indicando que la energía oscura domina conforme el Universo se expande.

Desde la perspectiva de la correspondencia semántica, para dar cuenta del estado observacional, Λ CDM redefine el contenido energético del Universo mediante la introducción de la materia oscura, una componente no bariónica que, al no emitir ni absorber radiación electromagnética, no es observable directamente, pero cuya existencia se infiere por su influencia gravitacional en la dinámica de galaxias y cúmulos. En Λ CDM, la densidad total de energía se descompone como:

$$\rho = \rho_b + \rho_{CDM} + \rho_\Lambda + \rho_r,$$

donde ρ_b es la densidad de materia bariónica, ρ_{CDM} la de materia oscura fría (*Cold Dark Matter*), ρ_Λ la energía oscura asociada a Λ , y ρ_r la densidad de radiación. A gran escala, esta materia oscura se manifiesta a través del potencial gravitacional ϕ , descrito por la ecuación de Poisson:

$$\nabla^2 \phi = 4\pi G(\rho_b + \rho_{CDM}),$$

que conecta la distribución de materia con el campo gravitacional. Las fluctuaciones de densidad a escala R se modelan mediante la varianza

$$\sigma^2(R) = \int_0^\infty \frac{dk}{k} \frac{k^3 P(k)}{2\pi^2} |W(kR)|^2,$$

donde $P(k)$ es el espectro de potencia y $W(kR)$ una función ventana que define la escala de suavizado. Estas funciones son determinantes en el colapso gravitacional que da lugar a galaxias y cúmulos. Su evolución temporal se modela mediante

$$\delta(k, t) = \delta(k, 0)D(t),$$

donde $D(t)$ es el factor de crecimiento, que describe la evolución temporal de las perturbaciones de densidad iniciales. La capacidad de Λ CDM para reproducir observaciones cosmológicas queda reflejada en su predicción de las anisotropías del fondo cósmico de microondas, representadas por

$$C_\ell^{TT} = 4\pi \int \frac{dk}{k} P_\phi(k) [\Delta_\ell^T(k)]^2,$$

que determina la distribución angular de las anisotropías de temperatura en función del multipolo ℓ .

Estas predicciones han sido contrastadas con los datos observacionales recogidos por el satélite Planck, a saber:

- Fracción de densidad correspondiente a materia oscura: $\Omega_{CDM} h^2 \approx 0.12$
- Fracción de densidad de energía oscura: $\Omega_\Lambda \approx 0.68$
- Fracción de densidad bariónica: $\Omega_b h^2 \approx 0.022$

Es indudable que la inclusión de dos nuevas entidades —materia oscura y energía oscura—, cuya naturaleza física permanece desconocida, conlleva una fuerte apuesta ontológica; sin embargo, el compromiso filosófico que ello implica se ve compensado por el ajuste empírico sin precedentes que ofrece Λ CDM, tanto a escala de estructura como en la reproducción del fondo cósmico. Ahora bien, si bien la reconciliación entre la relatividad general y la teoría cuántica de campos mediante el término cosmológico Λ ha reformulado nuestra comprensión de la gravedad,

también ha acentuado una de las tensiones más profundas de la física teórica contemporánea: la discrepancia entre el valor observado de la constante cosmológica y el valor predicho por la energía del vacío cuántico. Esta última, según la teoría cuántica de campos, cortada a cierta escala Λ_* , se estima como

$$\rho_{void}^{QFT} = \frac{\hbar}{2} \int_0^{\Lambda_*} \frac{4\pi k^2 dk}{(2\pi)^3} \sqrt{k^2 + m^2},$$

lo que arroja un valor desmesurado frente al valor observado:

$$\rho_\Lambda^{obs} \sim 10^{-47} GeV^4 \neq \rho_\Lambda^{QFT} \sim 10^{71} GeV^4;$$

es decir, una discrepancia de más de 120 órdenes de magnitud:

$$\Lambda = \frac{\rho_\Lambda^{QFT}}{\rho_\Lambda^{obs}} \sim 10^{120}.$$

Esta discrepancia se conoce como el problema de la constante cosmológica —o catástrofe del vacío—, la mayor divergencia conocida entre teoría y experimento en la historia de la física moderna.

CONCLUSIONES

La incompatibilidad interteórica se presenta como un fenómeno recurrente en la historia de la ciencia. La imagen del mundo ofrecida por el modelo mecanicista de Newton (MMN), erigida sobre un estricto determinismo regido por leyes mecánicas universales, comenzó a mostrar sus carencias a la luz de los nuevos descubrimientos gestados en el terreno de la electricidad y el electromagnetismo a comienzos del siglo XX. Fue entonces cuando un nuevo modelo basado en una concepción del mundo muy distinta, el modelo relativista de Einstein (MRE), introdujo nuevos desafíos epistemológicos. Al reinterpretar la noción clásica de masa heredada por el MMN y redefinir la gravedad en términos de la geometría curva del espacio-tiempo, el MRE mostró que siempre que exista un objeto físico, como una estrella o un planeta, el espacio que lo rodea se curvará en función de su masa. Como en el MRE el espacio es inseparable del tiempo, este último también se verá afectado por la presencia de la materia.

En este trabajo he propuesto dos criterios metodológicos que deben cumplirse conjuntamente para que sea posible la reconciliación entre modelos incompatibles: la derivabilidad matemática y la correspondencia semántica. Aunque derivar la estructura matemática de un modelo a otro —reformulando ambas estructuras dentro de un nuevo contexto de ecuaciones— es condición necesaria, no es por sí sola suficiente. Para que dicha reconciliación sea completa, ambos modelos deben conferir el mismo significado a los términos con los que operan, así como compartir la misma referencia empírica.

El modelo Λ CDM emerge como un paradigma ineludible de reconciliación interteórica entre dos grandes dominios de la física: la relatividad general y la física de partículas. No obstante, pese al notable éxito predictivo en sus estimaciones,

resulta problemático asignarle un estatus ontológico o epistemológico definitivo, así como atribuirle un mayor o menor grado de veracidad frente a sus predecesores. Esto se debe a que, para preservar su eficacia predictiva, Λ CDM incorpora en su ontología una enigmática componente de materia oscura, cuya inclusión plantea serios desafíos epistemológicos en términos de falsabilidad y verificabilidad. Si bien la introducción de esta nueva componente está justificada desde un punto de vista metodológico, su naturaleza ignota suscita importantes desafíos en el terreno de la filosofía de la ciencia, especialmente en lo relativo a la justificación del estatus epistémico de los modelos en ciencia. Tales desafíos ponen de manifiesto una vez más la necesidad imperiosa de un diálogo riguroso y fecundo entre ciencia y filosofía, pues solo mediante esta alianza crítica será posible trascender las fronteras del conocimiento actual y dar forma a una visión más profunda, audaz y reveladora sobre la naturaleza del Universo.

BIBLIOGRAFÍA

- Boyd, R. (1983). «On the Current Status of the Issue Scientific Realism», en: *Erkenntnis*, 19(1/3), pp. 45-90.
- Einstein, A. (1994). *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*. Madrid: Alianza.
- Feyerabend, P. K. (1981). «Explanation, Reduction and Empiricism», en: P. K. Feyerabend (ed.), *Realism, Rationalism & Scientific Method. Philosophical Papers*, Vol. 1. Cambridge: Cambridge University Press.
- Glaserfeld, E. (2001). «The Radical Constructivist View of Science», en: A. Riegler (ed.), *Foundations of Science*, 6(1-4), pp. 31-43.
- Kant, E. (1997). *Critica de la razón pura*. Madrid: Santillana.
- Kitcher, P. (1993). *The Advancement of Science*. Oxford: Oxford University Press.
- Kuhn, T. (2004). *La estructura de las revoluciones científicas*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Laudan, L. (1986). *El progreso y sus problemas. Hacia una teoría del crecimiento científico*. Madrid: Ediciones Encuentro.
- Lombardi, O. (1998). «La noción de modelo en ciencias», en: *Educación en ciencias*, 2(4), pp. 5-13.
- Newton, I. (2011). *Principios matemáticos de la Filosofía Natural*. Madrid: Tecnos.
- Popper, K. (1994). *The Myth of the Framework*. London: Routledge.
- Rivadulla, A. (2003). *Revoluciones en Física*. Madrid: Trotta.
- Rivadulla, A. (2004). *Éxito, razón y cambio en física*. Madrid: Trotta.
- Rubin, V., Ford, W. K. y Thonnard, N. (1980). «Rotational Properties of 21 SC Galaxies with a Large Range of Luminosities and Radii from NGC 4605 /R=4kpc/ to UGC 2885 /R=122kpc/», en: *Astrophysical Journal*, 238, pp. 471-487.
- Sklar, L. (2002). *Theory and Truth*. Oxford: Oxford University Press.
- Sneed, J. (1971). *The Logical Structure of Mathematical Physics*. Dordrecht: D. Reidel.

Doctor en Lógica y Filosofía de la Ciencia
 (Universidad Autónoma de Madrid/ Osaka University)
 (En la actualidad no vinculado a ninguna institución).
 israelsalasllanas@gmail.com

ISRAEL SALAS LLANAS

[Artículo aprobado para publicación en marzo de 2021]