

Toda la verdad



CIENCIA Y REALIDAD

LA COLECCIÓN *CIENCIA Y REALIDAD* ES UN
PROYECTO IMPULSADO POR LA FUNDACIÓN SICÓMORO

Comité editorial

José Luis Villacañas (Presidente)

Antonio Diéguez

Fernando Broncano

Laura Nuño

José María Fuster

Guillermo Escolar Martín

Todos los volúmenes de la colección *Ciencia y Realidad* se someten a un proceso de evaluación con todas las garantías académicas que incluye, en el caso de las obras inéditas, un doble arbitraje anónimo por parte de expertos en la disciplina sobre la que versan.

P.J.E. Peebles

Toda la verdad

**Reflexiones de un cosmólogo
en busca de la realidad objetiva**

Traducción de Luigi Bosetti



Título original: *The Whole Truth: A Cosmologist's Reflections
on the Search for Objective Reality*

Traducción revisada por
María del Mar Blasco Lorenzo

1ª edición, 2025

© 2022 by Princeton University Press

© De la traducción, Luigi Bosetti

© Guillermo Escolar Editor S.L.
Calle Princesa 31, planta 2, puerta 2
28008 Madrid
info@guillermoescolareditor.com
www.guillermoescolareditor.com

Diseño de cubierta: Javier Suárez

Maquetación: Equipo de Guillermo Escolar Editor

ISBN: 978-84-19782-92-2

Depósito legal: M-9577-2025

Impreso en España / Printed in Spain

Reservados todos los derechos. De acuerdo con lo dispuesto en el Código Penal, podrán ser castigados con penas de multa y privación de libertad quienes, sin la preceptiva autorización, reproduzcan o plagien, en todo o en parte, una obra literaria, artística o científica, fijada en cualquier tipo de soporte.

Para Alison, mi mejor amiga.

Prefacio

¿Qué hay en el corazón de lo que hacemos en las ciencias naturales? En mi opinión buscamos la naturaleza de la realidad, pero ¿qué significa esto? La mayoría de los científicos en activo no tendrá una respuesta preparada; prefieren trabajar en los problemas que emergen en las investigaciones del momento. Sin embargo, hay líneas de pensamiento provenientes de la filosofía, la sociología y la historia de la ciencia que son buenas descripciones de lo que yo considero que está en el corazón de lo que hacemos en las ciencias. Pretendo explicar, con ilustraciones de la cosmología, la teoría de la expansión del universo a partir de un estado denso caliente.

Comencé a trabajar en cosmología hace medio siglo, cuando las ideas eran meras especulaciones y la evidencia escasa. La he visto crecer y convertirse en una de las ramas mejor establecidas de la ciencia física. La experiencia me ha llevado a reflexionar sobre lo que hemos estado haciendo mis colegas y yo, y sobre lo que hemos aprendido, además de cómo solucionar más o menos bien problemas que se plantean según van apareciendo. El resultado se expone en este libro.

Quiero que esta obra sea accesible a todos aquellos que no estén familiarizados con el lenguaje de la física, pero se interesan por lo que hacen los científicos y por qué. Algunos colegas se sorprenderán al verme discutir cuestiones de sociología y filosofía y sobre las pruebas que aportan las ciencias naturales acerca de una realidad física objetiva. Estos no son temas comunes de conversación entre mis colegas, pero creo que son esenciales para obtener una imagen más completa de lo que aprendemos de la investigación en ciencias naturales. No intento evaluar el pensamiento de la filosofía y la sociología de la ciencia sobre la realidad, pero espero que las voces autorizadas de esos campos encuentren interesante cómo las ideas provenientes de sus disciplinas tienen resonancia en la práctica de las ciencias naturales.

Los científicos tienen formas diferentes de pensar sobre este tema. En mi caso me ubico en el lado empirista del espectro; me fascina ver

debates resueltos mediante mediciones. Pero, a pesar de mi inclinación empírica a concentrar la atención sobre el estado de las pruebas experimentales u observacionales de las teorías físicas, y a quedarme ahí, he llegado a pensar que la ciencia impulsada por la curiosidad ha producido buena evidencia de una noción abstracta: la realidad objetiva. Esta noción, tal como se aplica en las ciencias, puede ser falsada por el fracaso del método científico. Nunca se puede probar, pues la precisión de la evidencia empírica siempre es limitada. El tema de este libro es que los resultados empíricos de las ciencias naturales, presentados en los ejemplos prácticos de la cosmología física, proporcionan un argumento convincente a favor de una realidad independiente del observador. Esto es lo mejor que podemos hacer en nuestra ciencia.

¿Cómo hemos llegado hasta el estado actual de las ciencias naturales y al argumento a favor de una realidad objetiva? Un punto de inflexión en mis ideas sobre esta cuestión lo originó el reconocimiento de una experiencia común en física: cuando aparece una idea interesante, son bastante altas las posibilidades de que alguien más ya la haya expresado, o de que lo vaya a hacer de forma independiente, si las palabras no viajan lo suficientemente rápido. Un ejemplo de otra rama de la ciencia, del que incluso yo tenía conciencia hace mucho tiempo, es el reconocimiento independiente del concepto de la evolución por selección natural en Charles Darwin y Alfred Wallace. He observado otros ejemplos de la ciencia física desde que era estudiante de posgrado, pero hasta hace poco no había pensado en ellos. No creo que mi experiencia sea especial en este asunto. Sin embargo, nunca he escuchado a un físico señalar que la ocurrencia de múltiples descubrimientos sea un fenómeno que pueda enseñarnos algo. Pero me di cuenta de que el hecho de que Darwin y Wallace dieran ambos con la idea de la selección natural refuerza el argumento de que esta idea es sensata. Después de todo, dos personas con los pies sobre la tierra tuvieron conocimiento, independientemente, de la evidencia. De una forma similar, la impresionante cantidad de descubrimientos múltiples en las exploraciones a gran escala de la naturaleza y de la evolución del universo sugiere que las pruebas brindaban una motivación sensata sobre lo adecuado de las direcciones que marcaban el rumbo nuestros pensamientos.

Mi búsqueda de aquellos que identifican estos «múltiples» como un fenómeno que se debe considerar para evaluar las ciencias naturales me llevó a los sociólogos, que reconocen este fenómeno. Así, vi que tenía

algo que aprender de los libros de sociología sobre la práctica de la ciencia física, y a partir de ahí me acerqué a la filosofía, a libros que nunca antes había pensado consultar.

Un resultado de esto fue mi reconocimiento tardío de que el concepto sociológico de construcciones sociales y construcciones empíricas explica una situación curiosa de un libro que atesoro, *The Classical Theory of Fields*, de Landau y Lifschitz (1951; mi copia es la traducción al inglés de 1948 a partir de la segunda edición rusa). Los primeros dos tercios de la obra son un análisis de los aspectos básicos de la teoría clásica de la electricidad y el magnetismo, que es una teoría bien probada y ampliamente usada. El último tercio del libro presenta la teoría general de la relatividad de Einstein. En los tiempos en que me uní al Grupo de Investigación de la Gravedad de Bob Dicke, cuando era estudiante de posgrado en 1958, sabía que esta teoría tenía un apoyo empírico escaso, muy diferente al caso del electromagnetismo. Entonces ¿por qué en *The Classical Theory of Fields* se le dedica casi el mismo espacio a la relatividad que al electromagnetismo? La sociología de las construcciones, que estudiaremos en la Sección 2.2, me permitió entender esta situación. Es uno de los temas de este libro.

Sigo sin saber nada de sociología y filosofía, pero ahora veo que en estas disciplinas hay ciertas cosas relevantes sobre la práctica de las ciencias. Para quienes como yo no somos sociólogos o filósofos, las lecciones se aprecian mejor aplicándolas a la experiencia concreta de la investigación en ciencias físicas. Lo considero un ejemplo práctico, similar a los problemas que planteamos a los estudiantes con ciertos pasos dados para su solución. La cosmología física, el estudio de la naturaleza a gran escala del universo a nuestro alrededor, es un buen ejemplo práctico de investigación en ciencias físicas. En su versión moderna, el tema comenzó hace un siglo con un grupo razonablemente claro de ideas de partida; la persecución de estas ideas trajo consigo interesantes episodios de confusión y descubrimiento que finalmente llevaron a una conclusión satisfactoria. Las pruebas de esta teoría son lo suficientemente abundantes y su fiabilidad está lo bastante comprobada como para que la mayoría de los físicos que le han dedicado su tiempo estén de acuerdo en que se trata de un argumento convincente en favor de que contamos con una buena aproximación a lo que realmente ocurrió cuando nuestro universo se expandía y enfriaba.

Debo advertir que no se puede confiar en que esta teoría estándar aceptada sea extrapolable hacia un futuro remoto, o hacia el pasado,

a densidades arbitrariamente grandes. Hay algunas ideas interesantes sobre lo que va a pasar. Seguramente sean familiares los términos *gran implosión* (o *Big Crunch* en inglés), *gran congelación* y *gran desgarró* (o *Big Rip* en inglés), al igual que las ideas sobre lo que sucedía antes del Big Bang, sea lo que sea lo que eso signifique. Pero tales especulaciones están fuera del ámbito de este estudio sobre las lecciones que cabe extraer de cómo un ejemplo de práctica de la física llega a aceptarse de modo general. Para el propósito de este libro contentémonos con la teoría de lo que dejaron los fósiles que hemos sido capaces de identificar e interpretar.

Las ciencias naturales son fascinantes para aquellos que nos sentimos atraídos por ellas. Se puede añadir mucho más al argumento a favor de la realidad objetiva a partir de la amplia variedad de predicciones bien probadas de la física cuántica. Recomendando consultar la discusión del libro de Steven Weinberg, *Dramas of a Final Theory: The Search for the Fundamental Laws of Nature* (1992). Pero lo que se aprende de la física de la relatividad y del establecimiento de la teoría relativista de la evolución del universo también sirve para ilustrar el argumento según el cual encontramos aproximaciones útiles desde el punto de vista operacional a la idea abstracta de una realidad objetiva. La historia y la física de la cosmología son más simples, pero no encuentro otra razón para favorecer este ejemplo por encima de los temas de la física cuántica.

Las propiedades de los productos de la materia orgánica desempeñan un importante papel en esta historia, como ejemplos del tipo de cuestiones que plantea el estudio de los sistemas físicos complejos. El presupuesto habitual es que los sistemas vivos son manifestaciones del funcionamiento de la misma realidad objetiva a la que se aproximan de manera útil la relatividad y la física cuántica, según lo evidencian las pruebas en sistemas más simples como aquellos que son objeto de la relatividad y la mecánica cuántica. Pero debemos convivir con el hecho de que una demostración clara de que esto es así va más allá de los métodos actuales de análisis.

No puede haber una guía universal sobre la naturaleza de la ciencia, pues las condiciones operativas determinan lo que se puede hacer y estas condiciones son extremadamente diferentes en ramas distintas de la ciencia. Pero podemos sacar conclusiones útiles a partir de un ejemplo práctico específico, la cosmología física. Ayuda que sea una rama rela-

tivamente simple de las ciencias naturales. También ayuda el hecho de que conozco el tema bastante bien; llevo más de medio siglo trabajando en él y lo he visto crecer.

La historia del desarrollo de la cosmología física, presentada en los capítulos 3 a 7, tiene por objeto ilustrar tres cosas. Primero, es un ejemplo de cómo se hace la ciencia física. Segundo, es una guía de pensamiento proveniente de lo que los sociólogos y los filósofos dicen que hacemos y que es particularmente relevante desde el punto de vista de un científico. Por supuesto, otras ideas de estas disciplinas no parecen tan directamente relevantes. Tercero, muestra la naturaleza del argumento a favor de la realidad física objetiva que se obtiene a partir de la práctica de las ciencias naturales.

Comienzo esta argumentación con algunas consideraciones acerca de la historia de las ideas sobre la naturaleza de las ciencias físicas. Me remonto al siglo pasado, al momento en el que Einstein reflexionaba sobre la posible naturaleza de una teoría satisfactoria de la gravedad y de un universo lógicamente construido. Queda mucho por aprender de la historia más temprana de las ciencias, pero la coherencia se ve beneficiada al limitar la atención a los desarrollos posteriores, los más directamente relevantes. Incluso este limitado periodo de la historia es bastante rico; tan solo puedo ofrecer ejemplos que ilustran las ideas que según creo han influido en la forma en que ahora pensamos sobre las teorías físicas dentro de la cultura de las ciencias y la sociedad. Me arriesgo a extraer de estos ejemplos, y de mi propia experiencia, una declaración sucinta sobre los supuestos de trabajo de la física: las ideas que son la base fundamental de lo que hacemos en este área.

Estas hipótesis de trabajo se presentan en el capítulo 1 y se enumeran y discuten al final del mismo. Se centran en la idea, que es una suposición, de que nuestras mejores teorías son aproximaciones útiles a la realidad objetiva. Para algunos la noción de realidad objetiva es obvia, para otros es bastante dudosa. Mis ejemplos en apoyo de la primera opinión los he extraído de los desarrollos de la teoría relativista de la naturaleza a gran escala del universo. Como dije, hay muchos más ejemplos prácticos de la física cuántica, pero los de la relatividad sirven para nuestro propósito.

La naturaleza social de la ciencia física es una parte importante de la cultura de los científicos. Esto lo reconocen más claramente los historiadores, los filósofos y los sociólogos que los propios físicos, lo cual debería

remediarse pronto. Ofrezco el ejemplo de cómo la sociología de la ciencia física y nuestros supuestos de trabajo implícitos en la investigación sobre este tema influyeron en el desarrollo y acogida de la teoría general de la relatividad de Einstein, en su eventual establecimiento por medio de pruebas exigentes y en el desarrollo de ideas sobre su aplicación a la teoría de la naturaleza a gran escala del universo. Para este propósito, la investigación tiende a ser más informativa en sus movimientos iniciales. Los avances posteriores a la adopción de una línea particular de investigación que ha sido considerada prometedora tienden por lo general a ser más directos y menos instructivos, a menos que falle el planteamiento. Solo resumo brevemente los movimientos de clausura de ideas que hasta ahora han probado ser exitosas.

Son necesarias algunas explicaciones sobre terminología. Algunas veces escribo sobre física, ciencia física, ciencias naturales o ciencia. Con el primer término me refiero a la exploración de fenómenos que son lo suficientemente simples como para servir de pruebas de las teorías físicas, que aspiran a ser aproximaciones útiles a lo que asumimos como un tipo de realidad objetiva que funciona racionalmente. Una ciencia física, como por ejemplo la química, añade a la física regularidades y teorías fenomenológicas que son demasiado complejas como para ser deducidas rápidamente a partir de las aproximaciones a la realidad objetiva que la física afirma haber encontrado. Doy por sentado que los fenómenos químicos se basan en la misma realidad que la física, pero comprobarlo es difícil. Las ciencias naturales pasan de la química a la geología, la botánica y la biología y siguen hasta la naturaleza de los seres vivos y el funcionamiento de la mente humana. Se ordenan en un grado creciente de complejidad. Quiero subrayar que no se trata de un orden de mérito o interés, en ninguna dirección; todas son análisis valiosos y fascinantes del mundo que nos rodea. Como dije, tomo a la cosmología como ejemplo práctico del funcionamiento de las ciencias naturales porque es una ciencia relativamente simple y la interacción entre teoría y observación es bastante fácil de juzgar.

Al objeto de estudio de las ciencias naturales se le suele llamar «naturaleza» o «Naturaleza». En mi caso utilizo «realidad» para poder escribir «la naturaleza de la realidad». Las pocas excepciones que hago a esta regla vienen exigidas por el contexto. Utilizo a menudo la expresión «realidad objetiva», que es redundante pero le añade énfasis. Tenemos ideas preconcebidas sobre la naturaleza o, mejor dicho, sobre la realidad;

es lo que vemos a nuestro alrededor, lo que está justo frente a nosotros. Doy por supuesto que la silla en la que estoy sentado es real, dado que parece absurdo pensar que estoy soñando. Las ciencias naturales parten implícitamente del mismo supuesto, que la naturaleza del mundo es independiente de las ideas que tengamos sobre él. La sociedad influye en nuestro modo de pensar, pero presuponemos que la consulta de la evidencia empírica corrige los pensamientos erróneos.

Evito usar la palabra «creencia» debido a su connotación religiosa, al igual que «prueba» (*proof*), en el sentido de tener pruebas de algo, así como «demostración» y «verificación», porque parecen transmitir excesiva confianza en las ciencias naturales. Utilizo la palabra «hecho» porque aparece en interesantes discusiones que hay que analizar, pero la empleo entendiendo que en este tema un hecho es una aproximación, tan buena como lo sean los datos que la apoyan. Lo mismo sucede con «verdadero», aunque la palabra aparece —de modo ciertamente incómodo— muy a menudo en este libro porque es muy conveniente. Prefiero el término «indicio» para referirme a la interpretación razonable de una observación, y los términos incómodos, pero precisos, «establecido de manera persuasiva» y «un argumento persuasivo» para aplicarlos a teorías que superan las suficientes pruebas predictivas como para convencer a la comunidad de que acepte la teoría, siempre a la espera de que se reconozcan nuevas pruebas que puedan obligar a la búsqueda de una teoría aún mejor. Por supuesto, cuanto más abundantes sean las predicciones exitosas, más persuasivos serán los argumentos en favor de su establecimiento. Utilizo la expresión «evaluación comunitaria» para las ideas que la comunidad investigadora en general ha decidido aceptar como razonables, y la expresión «estándar y aceptado» para referirme a las ideas de la comunidad que están tan bien fijadas en nuestra mente que se han vuelto canónicas. La palabra «canónica» tiene la connotación de un argumento establecido de forma permanente, pero en las ciencias, por supuesto, esto no tiene por qué ser así.

Por lo general, se tiende a considerar una «teoría» como más completamente probada y prescrita que un «modelo», el cual suele ser más esquemático y especulativo. Pero las ideas de la cosmología tienden a estar a medio camino entre ambas situaciones. Por tal razón sigo la práctica común de tomar las palabras «teoría» y «modelo» como términos intercambiables, a menos que el contexto sugiera que estamos ante ideas particularmente esquemáticas que se caracterizan mejor como «mode-

los». Utilizo el término «cosmología física» para la teoría y observación de la naturaleza a gran escala del universo, e incluyo el adjetivo «física» pues hay muchos otros tipos de cosmología.

El espacio está lleno de una distribución casi uniforme de radiación de microondas. Está establecido de manera convincente que se trata de un remanente, un fósil, del universo primitivo. Su nombre estándar es radiación de fondo de microondas, o CMB por sus siglas en inglés. Esto me inquieta porque las longitudes de onda de esta radiación eran mucho más cortas en el pasado, y aunque para nosotros en la Tierra la radiación es un fondo que nos llega desde el cielo, sería más apropiado llamarla un mar que llena casi uniformemente el espacio. En mi caso lo denomino «mar de radiación fósil».

Los espectros de galaxias se desplazan hacia el rojo debido a los movimientos de las galaxias que se alejan de nosotros. Este movimiento solía conocerse como recesión general de las galaxias. Un observador en otra galaxia vería la misma recesión general; en la cosmología estándar no hay una posición especial en el espacio. En promedio, excepto por los movimientos de las galaxias entre sí producidos por las variaciones locales de la fuerza de la gravedad, la distancia entre dos galaxias, medida por reglas y relojes estándar, se incrementa a un ritmo que es proporcional a la distancia entre ambas. Esta es la ley de Hubble, y la constante de proporcionalidad es la constante de Hubble, H_0 . (Esto es, la velocidad v de recesión de una galaxia a una distancia r es $v = H_0 r$). La Unión Astronómica Internacional ha determinado que la relación debe conocerse como ley Hubble-Lemaître, pues Herman Weyl la anticipó y Georges Lemaître realizó una predicción directa antes de que Edwin Hubble reconociera la evidencia astronómica de esta relación. Pero para ser más breve he decidido utilizar el nombre antiguo.

Se dice a veces que el espacio se expande, pero esto puede generar confusión. Nosotros no nos expandimos más allá de los efectos biológicos habituales, y las galaxias no se expanden, excepto por los efectos de aumento de masa por acumulación y de pérdida por los vientos. Es mejor decir que los espacios entre las galaxias están aumentando, eso es todo: que en promedio las galaxias se están alejando.

La física newtoniana de la gravedad es el límite no relativista de la teoría general de la relatividad de Einstein. Utilizo el término de Einstein para referirme a su teoría siempre que me parece apropiado, pero muy a menudo me serviré de la versión más corta, relatividad general.