



Observabilidad, procesos y pseudoprocesos en astronomía

Observability, Processes, and Pseudoprocesses in Astronomy

Observabilidade, processos e pseudoprocessos em astronomia

Maximiliano Bozzoli

Centro de Investigaciones, Facultad de Filosofía y Humanidades

Universidad Nacional de Córdoba (UNC), Argentina

maxibozzoli@ffyh.unc.edu.ar

0000-0003-4086-3612 

→ **Recibido:** 30/04/2026

→ **Aceptado:** 03/06/2026

→ **Publicado:** 31/08/2026

→ **Artículo Dossier II**

“Filosofía y Fundamentos de la Física”

© 2026 Maximiliano Bozzoli

CC BY 4.0

→ **Cómo citar:** Bozzoli, M. (2026). Observabilidad, procesos y pseudoprocesos en astronomía. *Culturas Científicas*, 7(1), pp. 19–46
doi.org/10.35588/cc.v7d8356

[RESUMEN]

El presente artículo examina problemáticas epistemológicas actuales vinculadas a las prácticas observacionales de la astronomía contemporánea. Estas prácticas no se limitan a la detección y manipulación de procesos y señales físicas, sino que se organizan a partir de sofisticados modelos de observación que integran observaciones y simulaciones astrofísicas, entornos instrumentales y modelos de datos, esquemas inferenciales y estrategias de validación. Se argumentará que la noción de observabilidad, en esta disciplina científica, debería extenderse al ámbito computacional. Ello facilitaría ciertos modos de acceso epistémico, mediados por dichos modelos, donde los fenómenos serían accesibles a través de configuraciones estructurales que codifican información causal sustancial. Al considerar ejemplos astronómicos recientes, se mostrará que estas representaciones son patrones de relaciones entre objetos y propiedades astrofísicas observables que surgen de la interacción de múltiples procesos causales y que, sin constituir un proceso autónomo, contienen información relevante sobre las dinámicas subyacentes. De esta manera, los pseudoprocesos no son meros auxiliares metodológicos, sino elementos con funciones epistémicas específicas dentro de los modelos de observación, permitiendo identificarlos, estabilizarlos y validarlos. Esta concepción amplía el concepto clásico de observabilidad al incorporar dimensiones adicionales de la situación observacional, como la escala, la perspectiva y el punto de vista del observador.

[PALABRAS CLAVES]

Prácticas científicas; observación; simulación; pseudoprocesos; astronomía

[ABSTRACT]

This article examines current epistemological issues related to observational practices in contemporary astronomy. These practices are not limited to the detection and manipulation of physical processes and signals; rather, they are structured through sophisticated observational models that integrate observations and astrophysical simulations, instrumental environments and data models, inferential frameworks, and validation strategies. It will be argued that the notion of observability in this scientific discipline should be extended to the computational domain. This extension would enable certain modes of epistemic access, mediated by such models, in which phenomena become accessible through structural configurations that encode substantial causal information. By considering recent astronomical examples, it will be shown that these representations consist of patterns of relations among objects and observable astrophysical properties that arise from the interaction of multiple causal processes and that, without constituting autonomous processes, nonetheless contain relevant information about underlying dynamics. In this way, pseudoprocesses are not merely methodological auxiliaries, but elements with specific epistemic functions within observational models, allowing for their identification, stabilization, and validation. This conception broadens the classical concept of observability by incorporating additional dimensions of the observational situation, such as scale, perspective, and the observer's point of view.

[KEY WORDS]

Scientific Practices; Observation; Simulation; Pseudoprocesses; Astronomy

1. Introducción

La observabilidad ha sido caracterizada a partir de la dicotomía entre entidades observables y entidades inobservables. Algunos filósofos de las ciencias sostienen que no hay un criterio de demarcación que sea lo suficientemente robusto; por ello proponen nociones de observabilidad gradual, tales como la idea de un “continuo unidimensional” entre tales entidades (Maxwell, 1962). Otros en cambio, proponen esquemas diferentes de esta dicotomía afirmando que una entidad es observable si “en principio” podría ser observada por seres humanos en condiciones apropiadas (van Fraassen, 1980). Varios intentan alejarse de estas distinciones poniendo énfasis en las interacciones y procesos físicos, definiendo así “lo que cuenta como observable” (Shapere, 1982).

Otras propuestas (Kosso, 1988, 2006) sugieren hacer hincapié en los procesos involucrados en la adquisición de la información observacional. Precisamente, al identificar y distinguir las diversas formas en las cuales se puede obtener tal información, Kosso sostiene que la observabilidad posee grados de libertad o dimensiones asociadas a interacciones que no son sólo físicas. En términos generales, esta postura afirma que la observación consiste en obtener información del mundo físico, considerando su transmisión desde la fuente hasta el observador. Cabe destacar que este autor distingue dos procesos, es decir, la naturaleza de la señal transmitida y la señal como transporte de la información. La primera alude a las interacciones físicas fundamentales, mientras que la segunda hace referencia a aquellas “interacciones” dadas a partir procesos epistémicos variados. El valor de estas últimas se corresponde al contenido informacional adquirido en los reportes observacionales de determinados objetos y de sus respectivas propiedades observables.

Aunque Kosso sostiene que la observabilidad está relacionada a las cualidades o atributos cuantificables, Chang (2004) considera que en este vínculo sigue habiendo una fuerte dependencia de los objetos físicos. Según este último autor, existen numerosas observaciones que no están asociadas a objetos particulares sino a procesos dados, ya sean tanto por relaciones, así como también por correlaciones entre diferentes propiedades observables. Estas últimas pueden asociarse a mediciones de cantidades determinadas que no poseen una referencia concreta con los eventuales objetos involucrados en un hecho o situación observacional particular, la cual es configurada por la escala de observación, la perspectiva y el punto de vista del observador. Estos tratamientos sugieren un corrimiento de nociones de la observabilidad basadas exclusivamente en objetos a otras que contemplan procesos que incluyen propiedades y relaciones entre ellas. Esta postura diluye, parcialmente, el clásico debate realismo-antirrealismo en la astrofísica. Sin embargo, siguiendo algunas líneas de autores más recientes conducen a aceptar un realismo de propiedades observables (Humphreys, 2004, 2013).

A los propósitos de este artículo, se adoptará la propuesta de Humphreys acerca de la centralidad de las propiedades en las prácticas observacionales, en consonancia con las distinciones entre los procesos y los pseudoprocesos causales (Dowe, 2000; Kitcher, 1989; Quezada y Pavez, 2011, 2016; Salmon, 1971, 1984; Woodward, 2003). A partir del análisis de estudios de casos recientes de la astronomía, se argumentará que estas prácticas no se limitan a la detección y manipulación de procesos y señales físicas, sino que se organizan mediante modelos de observación que articulan observaciones y simulaciones, entornos instrumentales, esquemas inferenciales y estrategias de validación. Se sostiene que la observabilidad en astronomía debe entenderse como una condición de acceso epistémico mediada por estos modelos, en la que los fenómenos son accesibles a través de configuraciones estructurales que codifican información

causal. En este sentido, una configuración estructural es entendida como un patrón relacional de propiedades físicas observables (espaciales, geométricas o estadísticas) que emerge de la interacción de múltiples procesos causales y que, sin constituir un proceso autónomo, contienen información relevante sobre las dinámicas subyacentes. En este marco, los pseudoprocesos no son meros auxiliares metodológicos, sino elementos que cumplen funciones epistémicas concretas en estos modelos, permitiendo identificar, estabilizar y validar dichas configuraciones como objetos del conocimiento. Esta concepción implica extender el concepto clásico de observabilidad incorporando “dimensiones” adicionales del hecho o la situación observacional, tales como la escala, la perspectiva y el punto de vista del observador, entre otras.

2. Observabilidad y empirismo científico

El empirismo constructivo ha sido uno de los enfoques alternativos al realismo científico más destacados de las últimas décadas. Para algunos críticos, esta perspectiva ha revivido la tradición de salvar los fenómenos, al aceptar una teoría científica y dejar de lado aquellas creencias epistémicas que aluden a las entidades inobservables postuladas por la misma (Vollmer, 2000). van Fraassen sostiene que la existencia de tales inobservables descansa, en última instancia, en una inferencia injustificada a partir de la teoría que los postula. Sin embargo, ello no implica rechazar la teoría en sí, sino cuestionar la justificación de las creencias acerca de la existencia de tales entidades. En este sentido, una teoría puede considerarse empíricamente adecuada en tanto dé cuenta correctamente de los fenómenos observables, sin que ello suponga un compromiso ontológico con entidades inobservables. Por este motivo, otros autores afirman que la observabilidad no es un criterio lo suficientemente robusto para dar sustento a este tipo de compromisos en ciertas ramas de la ciencia (Contessa, 2006). De acuerdo con este enfoque, limitar el compromiso ontológico estrictamente a lo observable resulta tan problemático como extenderlo hacia las entidades inobservables. De esta manera, el empirismo constructivo sostiene que la adecuación empírica de las teorías no justifica necesariamente la creencia en la existencia de entidades inobservables que éstas postulan.

van Fraassen critica la distinción entre términos teóricos y términos observacionales establecida por el empirismo lógico. Él sostiene que esta dicotomía surge de dos problemáticas bien diferentes. Por un lado, de la posibilidad de diferenciar términos teóricos de no teóricos; por el otro, de identificar objetos y propiedades y poder clasificarlos como entidades observables o inobservables. Este autor afirma la imposibilidad del primer problema, dado que todo el lenguaje de la ciencia está “infectado” de teoría. Con respecto al segundo, sostiene su viabilidad sobre la base de lo que puede y no puede ser observable. Así, este último término define, a través del acto humano de la percepción (sin asistencia instrumental), qué entidades pueden o no existir. Como van Fraassen sostiene, la distinción observable/inobservable radica en identificar algunos de los actos humanos como observaciones, distintos de aquéllos como la capacidad de cálculo, por ejemplo. De esta forma, un acto de observación prototípico no está mediado, ni instrumental ni conceptualmente. Según él, la mayoría de los instrumentos científicos detectan entidades. En este sentido, la detección es diferente a la observación. Ello significa que dichos aparatos no permiten una observación (directa) del fenómeno en cuestión, sino que posibilitan su acceso epistémico, es decir, los instrumentos producen una representación visual del objeto, la cual es observada, o sea, percibida por el agente humano (Azzouni, 1997, 2004; Psillos, 2004). Por lo tanto, un sistema instrumental no extiende el rango de lo que este último puede

observar, sino más bien, crea una serie de fenómenos que deben ser explicados cuando tal agente observa las imágenes logradas a través de dicho sistema (van Fraassen, 2002).

Otra característica importante del acto prototípico es no presuponer que el observador posea algún concepto o información afín al objeto que está observando. En otras palabras, cualquier creencia o conocimiento del sujeto con respecto a lo que es la entidad observada, no es condición necesaria para tal acto. Dado que para el empirismo constructivo es crucial no confundir entre “observar” y “observar que”, esto es, entre una observación pura (o pre-teórica) y otra que no lo es, no niega la eventualidad de actos de observación mediados conceptualmente, aunque no sean prototípicos. La distinción entre observables e inobservables es fundamental a la hora de sostener las tesis principales del empirismo constructivo. De esta manera, la ciencia tiene como objetivo proveer teorías adecuadas, más que verdaderas. Así, aceptar una teoría significa creer que es empíricamente adecuada, es decir, que lo que la teoría describe o dice acerca de lo que es observable para los humanos es verdadero (van Fraassen, 1980). En este sentido, para este tipo de empirismo, el alcance de lo que es observable coincide con lo que es epistémicamente accesible a la percepción humana; lo que es observable determina tanto las expectativas de las teorías, como el grado de creencias involucradas para su aceptación.

La distinción tajante, antes mencionada, ha sido utilizada como línea divisoria entre lo que es y no es evidencia aceptable para el empirismo, el cual intenta mantener las garantías epistémicas en base al conocimiento adquirido por la experiencia, a través de los sentidos. No obstante, Humphreys (2004) sostiene que la información perceptual directa de lo observable no siempre es una manera viable, ya que muchos observables pasan a ser inobservables debido a que simplemente han dejado de existir, es decir, las creencias asociadas a ellos fueron abandonadas, por ejemplo. Trazar la división entre lo observable y lo inobservable, al estilo del empirismo, conduce inevitablemente al problema del respaldo epistémico involucrado. Según este autor, la problemática no proviene del estatus intrínseco de lo que es observable, o no, sino de cómo los detectores son empleados para garantizar el conocimiento adquirido. Ningún método de detección es completamente confiable; sin embargo, la superioridad de los instrumentos con respecto al aparato perceptual humano es ampliamente aceptada. No obstante, la mayoría de las versiones empiristas aceptan el rol crucial de la experiencia, la cual alude a aquello que se le presenta al sujeto, estimulando su sistema sensorial. Dado que el criterio de observabilidad está atado a observadores ideales en perfectas condiciones, no hay forma de diferenciar un criterio en principio de otro que tenga en cuenta las habilidades perceptuales que se requieren en la misma práctica.

Humphreys afirma que una división contundente entre observables e inobservables es errónea, ya que no logra captar la importancia de lo que cuenta como observable en la ciencia actual. Así, tal línea divisoria no está fija y de hecho su corrimiento se define a partir de los avances y adelantos tecnológicos de los sistemas instrumentales. En esta dirección, este autor considera que una propiedad u objeto no observado se mueve de los límites entre lo inobservado a lo observado, y no a lo largo de la línea entre lo observable y lo inobservable. De esta manera, una entidad inobservada en un momento, puede hallarse en otro, disponible para su inspección directa. En otras palabras, él sostiene que cuando una entidad se observa, la misma posee la propiedad disposicional de ser observable, dado que es posible crear una situación dentro de la cual es observada. Pero si dicha entidad tiene esa propiedad cuando no se está observando, siguiendo el criterio empirista, continúa siendo un observable. Así, la misma cruza el límite de lo no observado a lo observado e igualmente, en la dirección opuesta. Este corrimiento, de un extremo al otro, define la continuidad de la existencia de ciertos tipos de entidades, aun cuando

se hallen en el reino de lo inobservado (Humphreys, 2004). En consecuencia, la observación a través del empleo de instrumentos justifica las afirmaciones acerca de aquellas entidades que han permanecido ocultas a la percepción humana. Esta justificación es posible mediante el “argumento de la disolución”. Humphreys sostiene que no es el movimiento en sí, de lo visualmente observado a lo visualmente inobservado y viceversa, lo que justifica las creencias sobre la existencia de un fenómeno físico, sino la instrumentación disponible. Precisamente, a partir de esta última, se logra la evidencia instrumental que sirve como base a la hora de postular la continuidad de la propiedad de un objeto dado. De esta manera, se deja de lado la perspectiva empirista, la cual restringe la conformación del soporte evidencial al sistema perceptual humano.

El argumento mencionado antes no es general, sino uno específico para definir la existencia de entidades que son inobservadas. En este sentido, hay objetos observables que son observados y pasan a ser inobservados debido a una transformación de su estado físico. Por ejemplo, una entidad puede pasar de ser visualmente observada a ser visualmente inobservada, pero puede seguir siendo observada a través de otro de los sentidos humanos. De este modo, dicha entidad sería verificable y aceptable para el empirismo. Sin embargo, Humphreys sostiene que esta inferencia puede estar equivocada, ya que, durante el cambio de un estado físico a otro, el objeto dejaría de existir como tal; incluso, aunque se intentara restituir su visibilidad, a partir de ciertas técnicas experimentales, no sería el mismo. Ello significa que algunas de las propiedades físicas asociadas al objeto, pueden ser alteradas de tal forma que se pierden, o bien, se transforman en otras. No obstante, este autor destaca la necesidad de un supuesto de identidad que garantice la inferencia de una continuidad en la existencia del objeto mientras se dé un cambio de estado, fase o magnitud física que pueda variar algunas de sus propiedades observadas. Lo más importante, según él, es conocer los procesos causales involucrados, los cuales generan dichos cambios, permitiendo preservar la identidad de la entidad en cuestión. La necesidad de este conocimiento específico hace que tal argumento no pueda aplicarse de forma general, aunque sí puede ser chequeado a través de otro llamado el “argumento de superposición”. Esta clase de argumento establece un solapamiento entre observaciones simultáneas que respaldan que lo que se observa son propiedades del mismo objeto. Así, el acceso instrumental provee las garantías epistémicas que establecen, de una vez, que la línea de demarcación entre observables e inobservables es continua y no está fija.

Más allá de la caracterización que Humphreys propone sobre los instrumentos, precisamente sobre los tres aspectos de la detección (exactitud, precisión y resolución), cabe destacar que las capacidades del sistema sensorial humano pueden ser consideradas como tipos de instrumentos peculiares, a veces más eficientes que los detectores artificiales. Aunque la percepción natural posee cierto grado de eficacia en ámbitos específicos, los sentidos se hallan limitados en los dominios de la ciencia que demanden una aproximación cuantitativa y no cualitativa de la detección; sobre todo al llevar a cabo mediciones de cantidades en aquellas observaciones que lo requieran. De todas maneras, uno de los rasgos característicos de los sistemas instrumentales es que poseen la capacidad de establecer vínculos entre los observadores y aquellas propiedades que presentan los objetos físicos, las cuales suelen ser inaccesibles a la percepción. En este sentido, la observación suele llevar no sólo a la detección de propiedades cuantificables, a través de aparatos artificiales, sino a la captación natural de atributos de forma cualitativa. Siguiendo con el argumento de solapamiento propuesto por este autor, a partir de un rango inicial de observaciones, validadas a través del sensorio humano, las mismas son extendidas por los instrumentos. El quid de la cuestión es poder justificar estas últimas observaciones

que se hallan fuera, no sobreponiéndose al reino de los sentidos. Así, un uso efectivo de los instrumentos podría facilitar, al proveer información adecuada acerca de las propiedades de un objeto detectado, la justificación de aquellas entidades inalcanzables a la percepción.

3. Observabilidad, causación y simulaciones

Según Humphreys, los instrumentos de observación (aparatos y variadas piezas de equipo) generan imágenes que suelen representar determinadas propiedades y/o magnitudes físicas de los objetos que son observados a través de ellos. La señal física contiene la información sobre estas propiedades, causando una serie de efectos en los detectores de tales sistemas instrumentales. Ello permite registros estables de dichas propiedades, los cuales son interpretados posteriormente. Como se desarrollará más adelante, un enfoque afín a la propuesta de Salmon y de Dowe, los procesos e interacciones causales involucrados podrían ser entendidos, en este sentido, como aquéllos que inician la cadena causal, transmitiendo “marcas” que confluyen y culminan en la producción de ciertos tipos de representaciones visuales. De esta manera, el observador tiene cierto acceso epistémico al patrón observable derivado, es decir, a la imagen procesual que es registrada. En este punto, la posición de Humphreys resulta especialmente interesante, ya que lo observado no son propiamente los objetos físicos, sino sus propiedades detectadas y registradas mediante instrumentos diseñados especialmente para captarlas:

“... para interpretar una imagen dada es necesario conocer no sólo lo que ella representa, sino saber cómo ha sido producida... son las propiedades, detectadas por los aparatos, las que son observadas y no los objetos en sí... un objeto es observado sólo a través de sus propiedades o atributos físicos. Así, la clase de objeto que está siendo observado puede depender de qué propiedad está siendo detectada.” (Bozzoli y Domínguez, 2023, p. 257)

En términos ontológicos, los procesos causales subyacentes (por ejemplo, la interacción entre la radiación electromagnética y la materia, o entre campos gravitacionales y trayectorias lumínicas) constituyen el compromiso fuerte de la explicación física. No obstante, las imágenes producidas por los instrumentos no son procesos causales autónomos en el sentido estricto de Salmon-Dowe; son más bien “estructuras” organizadas que emergen de la convergencia de múltiples interacciones. Estas configuraciones pueden entenderse como derivadas de procesos concretos. A nivel fenomenológico, tales regularidades poseen sustento físico como manifestaciones observables. Así, se presentan como patrones accesibles a través de dispositivos instrumentales que transforman, eventualmente, señales físicas en representaciones visuales analógicas o digitales. Como se mencionó antes, la interpretación adecuada de estas imágenes exige no sólo identificar qué propiedades representan, sino comprender el proceso y los mecanismos de producción que las generan. Para Humphreys, la dependencia teórica de la observación no constituye un obstáculo, sino una condición necesaria para garantizar la confiabilidad del resultado, o sea, sólo conociendo el funcionamiento causal de las plataformas multi-instrumentales es posible discriminar entre señal y ruido y, por ende, entre información relevante e información irrelevante.

Esta concepción filosófica parece conducir a un realismo de propiedades, cuyas entidades se hallan constituidas por conjuntos de propiedades relacionadas causalmente, y son estas últimas (no los objetos concebidos como sustancias independientes) las que poseen eficacia causal. Siguiendo a Humphreys, el “principio de localización de la propiedad” enuncia que cada instancia de una propiedad contiene toda la fuerza causal de la misma. Así, no son

las instancias espacio-temporales aisladas las que producen los efectos observables, sino las propiedades mismas en cuanto tales, combinadas en configuraciones sofisticadas. En el plano epistemológico, las imágenes procesadas y las técnicas de visualización científica desempeñan un papel central (Bozzoli y Stasyszyn, 2020). Las representaciones resultantes no son meros reflejos pasivos, sino condensaciones anidadas de información causal; a partir de ellas se infieren características físicas que suelen no ser directamente accesibles al sensorio humano. En este sentido, los patrones observados funcionan como indicios e indicadores confiables de los procesos subyacentes, aunque no constituyan procesos autónomos.

Curiosamente, esta idea puede extenderse al ámbito de las simulaciones computacionales. Humphreys distingue entre instrumentos causales no computacionales (que reciben y transforman las señales físicas) e instrumentos causales computacionales, los cuales convierten y codifican digitalmente estas señales. En ambos casos se mantiene una cadena causal, aunque en el segundo intervienen implementaciones algorítmicas que median dicha transformación y le dan un sentido causal distinto. En esta dirección, es sabido que las simulaciones no operan procesos físicos concretos, sino modelos formales y semi-analíticos de esos procesos. No obstante, más allá de preservar o no su arquitectura causal, generan patrones que, al ser representados visualmente, son comparables con los resultados obtenidos empíricamente. En pocas palabras, hay diferentes niveles de representación en juego. Estos últimos se corresponden tanto al modelado teórico del fenómeno considerado como a sus respectivas parametrizaciones y a las transformaciones de los datos numéricos en visualizaciones gráficas (datos simulados). En ese sentido, las simulaciones implican varios niveles de representación, los cuales van desde la formalización abstracta hasta la formación de imágenes que finalmente son accedidas e interpretadas por los agentes epistémicos (naturales y/o artificiales). Ello permite desantropocentrizar el concepto de observación, estableciendo contrastes y validaciones, internas como externas, entre los procesos y los resultados alcanzados tanto por la vía observacional tradicional, como así también por la simulacional.

De este modo, en la observación instrumental clásica como en la simulación computacional se reproduce la misma organización triádica: procesos causales subyacentes (a nivel ontológico), situaciones observables y configuraciones representadas (en el rango fenomenológico) y capacidades inferenciales de dichas conformaciones (en el plano epistemológico). Las prácticas científicas no se agotan en la descripción de los procesos físicos, sino que emplean de forma sistemática estructuras derivadas que, aunque no transmitan cantidades conservadas como unidades autónomas, condensan información causal relevante. En suma, la propuesta de Humphreys no conduce a un realismo ingenuo de objetos directamente accesibles, sino uno mediado por propiedades y procesos, donde la inteligibilidad del mundo físico se construye en el tránsito desde la dinámica causal subyacente hacia las configuraciones estructurales que los instrumentos, y eventualmente las simulaciones, hacen visibles. Así, estas últimas no se limitan a producir imágenes o representaciones gráficas, sino que forman parte de una cadena representacional más amplia en la que modelos formales, implementaciones computacionales y técnicas de visualización se articulan para generar patrones que aúnan información relevante sobre los procesos que se pretenden comprender. Las imágenes resultantes no son simples ilustraciones, sino herramientas epistémicas que permiten acceder indirectamente a la dinámica de los sistemas modelados.

Según Humphreys (2013), es posible distinguir entre dos tipos de datos que intervienen en las prácticas científicas. Por un lado, se encuentran los datos empíricos (e), entendidos como aquellos que poseen un origen físico concreto y que son producidos mediante interacciones

materiales entre los fenómenos estudiados y los dispositivos de medición. Por el otro, este autor introduce la noción de datos *about* (a), cuyo contenido informacional remite sólo al modelo del fenómeno bajo investigación. Mientras que los primeros surgen directamente de procesos físicos detectables por los instrumentos involucrados, los segundos contienen información interpretativa acerca del marco teórico que organiza y da sentido a esos registros. Sin embargo, él sostiene que el origen causal de los datos, considerado de manera aislada, no basta para determinar su contenido informativo. Aunque los datos (a) puedan ofrecer indicios acerca de las fuentes causales que generan los datos (e), la relación entre ambos no suele ser nítida. Esto es debido a cómo la información puede hallarse alojada o anidada, lo cual depende (parafraseando a Shapere) del grado de concordancia entre la “teoría de la fuente” y la “teoría de la transmisión” consideradas.

Humphreys se propone ampliar la concepción tradicional de datos empíricos para incluir también datos acerca de su origen, incorporando de este modo aquellos producidos mediante procedimientos computacionales. Estos últimos incluyen inferencias inversas, las cuales permiten reconstruir la relación entre la fuente física de los datos y el detector en cuestión, pasando del resultado observable hacia las condiciones que lo generaron¹. De esta manera, el conocimiento acerca de los procesos implicados en la producción de estos datos resulta fundamental para evaluar su confiabilidad. A partir de esta idea, él sostiene que el contenido de los datos (a) puede interpretarse de dos maneras complementarias: o bien como una referencia al mecanismo de producción que los genera, o bien como una referencia al marco teórico dentro del cual esos datos son interpretados. Esta ambigüedad resulta especialmente significativa cuando el análisis se traslada al ámbito de las simulaciones. En ese contexto, los datos generados por la simulación pueden remitir, por un lado, al modelo formal sobre el cual se basa la misma simulación, y por otro lado al modelo del fenómeno que está siendo representado. El modelo de simulación puede ser considerado como un dispositivo que extiende las capacidades epistémicas de una observación tradicional, permitiendo una forma de observación mediada por simulaciones y abriendo la posibilidad de procesos de validación cruzada entre diferentes modos de producción de datos.

¹Aunque las inferencias inversas suelen implementarse mediante procedimientos iterativos, ambos conceptos no son equivalentes. Por esta razón, conviene distinguirlos. En simulaciones computacionales, iterar significa repetir un mismo conjunto de cálculos varias veces, de modo que cada repetición utilice los resultados obtenidos de la anterior. Cada repetición se denomina iteración y permite actualizar las variables del modelo, paso a paso, describiendo así la evolución de un sistema o acercándose progresivamente a una solución determinada. Este proceso se mantiene hasta alcanzar una cierta condición, como un número específico de pasos, un tiempo simulado o un nivel de precisión suficiente. Las iteraciones son fundamentales en muchos ámbitos científicos, ya que permiten simular el comportamiento de sistemas complejos o aproximar soluciones a ecuaciones que no pueden resolverse de forma directa. La iteración no debe confundirse con la noción de inferencia inversa, que es un tipo de razonamiento en el que se intenta deducir las causas, mecanismos o parámetros que generaron ciertos datos observados. Mientras que iterar describe un procedimiento computacional basado en la repetición de cálculos, la inferencia inversa se refiere a un objetivo analítico: inferir, a partir de los resultados, qué condiciones o procesos podrían haberlos producido. En muchos casos, sin embargo, ambos conceptos se relacionan, ya que los métodos de inferencia inversa suelen implementarse mediante algoritmos iterativos que prueban diferentes parámetros hasta encontrar aquéllos que reproducen mejor los datos observados.

4. Representaciones y modelos de señales

En la mayoría de los ámbitos astronómicos, la señal física predominante es de naturaleza electromagnética. Ésta no siempre constituye el fenómeno de interés primario, sino que es el medio a través de la cual se accede a procesos físicamente distintos, como ser interacciones gravitatorias. En este sentido, la señal detectada funciona como una instancia de mediación causal; ello significa que aunque pertenece (ontológicamente) a un dominio físico específico, su estructura interna codifica la información acerca de otras dinámicas que no son sólo electromagnéticas. Por lo tanto, esta señal no replica un proceso gravitatorio particular sino que lo subroga epistémicamente, permitiendo su inferencia a partir de regularidades estructurales impresas o marcadas causalmente en ella. En otras palabras, debido a que no hay un acceso directo a ciertos procesos astrofísicos, lo que se logra son en gran medida mediaciones de este tipo. Así, el conocimiento observacional obtenido resulta altamente inferencial e indirecto, dependiendo de señales que pueden funcionar como sustitutos epistémicos de fenómenos basados en variadas interacciones físicas fundamentales.

A diferencia de su acepción técnica², se propone aquí una caracterización epistemológica de la noción de señal subrogada. Como se mencionó antes, en la astronomía observacional tradicional, la señal directamente observable es típicamente la luz recogida por los instrumentos y no necesariamente coincide con el fenómeno que se pretende investigar, tales como cuerpos celestes que se orbitan. No obstante, en virtud de un acoplamiento causal sistemático, la dinámica de este último proceso deja huellas estructurales en la señal captada. Esta última no es una construcción artificial, sino una entidad física que funciona como sustituto inferencial de un fenómeno diferente. En este sentido, la subrogación no es formal-estadística sino epistémica. Así, la señal observable sustituye al fenómeno, indirectamente accesible, al constituirse en su mediación causal. Lo que se infiere no es la identidad entre ambos dominios físicos, sino la estructura de su relación. Entendida así, una señal subrogada no reproduce el proceso bajo investigación sino que lo hace cognoscible, delimitando las condiciones bajo las cuales es legítimo atribuir significado astrofísico a los patrones observados.

Al extenderse esta veta al dominio de las simulaciones computacionales, la noción de subrogación adquiere un estatus diferente. Una simulación astrofísica no es una realización artificial obtenida por el re-ordenamiento estadístico de los datos observacionales, como en la caracterización técnica. Tampoco es una señal empírica que funciona como mediación causal entre fenómenos concretos. Al tratarse de una traducción computacional (modelo numérico) que emplea métodos para discretizar un conjunto de leyes físicas, ecuaciones y condiciones iniciales (modelo del fenómeno), a fin de implementarlas mediante un código (modelo de simulación) y poder correrlas en una computadora (simulación), se genera un comportamiento análogo al del fenómeno físico observado. La simulación puede entenderse como una forma de subrogación modelística, donde el sistema computacional sustituye epistémicamente al sistema físico. A diferencia de la señal lumínica, la cual subroga un proceso en virtud de una conexión

²En el análisis astroestadístico de los datos, una señal subrogada designa una realización artificial generada a partir de una señal observacional original bajo restricciones formales bien definidas. Dichas realizaciones preservan determinadas propiedades estadísticas, mientras se eliminan otras cuya relevancia se desea poner a prueba. La comparación entre la señal empírica y un conjunto de señales subrogadas permite evaluar si ciertos rasgos exceden lo que, eventualmente, se espera. De esta manera, esta clase de señal subrogada es un recurso metodológico destinado a regular la inferencia, delimitando el umbral entre una estructura estadísticamente significativa y la fluctuación compatible con el modelo de referencia.

causal efectiva, la simulación lo hace en función de una relación mediada por una codificación formal sustentada teóricamente. Dicha relación no es una conexión causal directa entre el proceso físico y su señal, sino otra inferencial entre un modelo del fenómeno implementado (ya sea teórico o semi-analítico) y el sistema físico (*target system*) que pretende representar (*model system*). Su legitimidad no se agota en la correlación empírica inmediata, sino en la “robustez” del modelo representado, la estabilidad de sus resultados frente a las variaciones dentro del espacio de parámetros y su capacidad para producir, reproducir y validar múltiples clases de fenómenos observables que pueden ser simulados.

La idea de la subrogación modelística no es nueva y posee cierto desarrollo en la filosofía de la ciencia contemporánea. La pregunta sobre cómo los modelos científicos nos permiten conocer el mundo ha derivado en este concepto. Esta noción, introducida formalmente por Swoyer (1991), describe el proceso mediante el cual un científico manipula un modelo (el objeto subrogado) para extraer conclusiones que luego se transfieren al sistema físico (el objeto *target*). Para Swoyer, esta capacidad de “razonamiento subrogativo” descansa en una relación estructural clave, donde el modelo y el sistema comparten una configuración lógica o matemática similar (isomorfismo u homomorfismo), lo que garantiza que los resultados obtenidos en el modelo sean válidos para el mundo físico.

Por su parte, Giere (1998, 2004) expandió esta visión al proponer un enfoque perspectivista que se enmarca en la concepción semántica de las teorías. Este autor argumenta que los modelos no son copias perfectas de la “realidad”, sino que funcionan de manera análoga a los mapas. La representación no es una propiedad intrínseca del modelo, sino una actividad intencional realizada por un agente epistémico que emplea, con un propósito dado, un modelo (y no otro) para afirmar su similitud en ciertos aspectos y grados específicos respecto del sistema objetivo. Así, la subrogación no es sólo una operación lógica, sino una herramienta pragmática donde el modelo actúa como un sustituto útil desde una perspectiva determinada.

Frente a estas posturas, autores como Suárez (2004) han propuesto una concepción inferencial. Este autor critica que la similitud sea condición necesaria y suficiente para la representación. En su lugar, sostiene que un modelo representa un fenómeno si tiene la capacidad de generar inferencias válidas sobre él. Aquí, la subrogación se convierte en el núcleo mismo de la representación, donde representar es, fundamentalmente, permitir que un usuario informado extraiga conclusiones sobre el mundo a través del modelo. Por otra parte, Knuuttila (2005) aporta una visión más materialista, considerando a los modelos como artefactos epistémicos. Según su enfoque, la subrogación no ocurre por una traducción de datos abstractos, sino a través de la construcción y manipulación física o conceptual del modelo, el cual posee una autonomía que permite explorar posibilidades que la teoría “pura” no alcanzaría a prever.

En esta línea de discusión, Contessa (2007) propone una concepción interpretativa de la representación que busca precisar el papel de la subrogación. Coincidiendo con Giere en que la representación no es una propiedad intrínseca del modelo y con Suárez en rechazar que la similitud constituya su fundamento, esta autora sostiene que un modelo representa un fenómeno físico cuando, bajo una interpretación adecuada, puede ser utilizado como sustituto para formular y evaluar afirmaciones acerca del mismo. De este modo, la representación requiere no solo la posibilidad de inferencia, sino también un marco interpretativo que establezca cómo los elementos del modelo se corresponden con el sistema representado. La subrogación, así entendida, no es meramente pragmática, sino normativamente estructurada por reglas de interpretación que hacen posible el uso representacional del modelo.

5. Caracterizaciones de la causalidad

La noción de causalidad ha sido objeto de profundas problemáticas y reflexiones contemporáneas destinadas a superar las limitaciones de las perspectivas filosóficas clásicas. Algunas propuestas han intentado reconstruir y caracterizar este concepto a partir de fenómenos situados físicamente, identificándolos tanto por la transmisión de magnitudes físicas, como por ciertas interacciones localizadas en el continuo espacio-tiempo. Entre las formulaciones más influyentes, se encuentran los planteos desarrollados por Salmon (1971, 1984) y por Dowe (2000). Según estos enfoques, la explicación científica consiste en ubicar un fenómeno dentro de una red de procesos causales que transmiten información física. Otros filósofos de la ciencia han cuestionado el vínculo entre la explicación científica y la causalidad productiva. Kitcher (1989) ha defendido una concepción “unificacionista” de la explicación, según la cual el valor explicativo de una teoría reside en su capacidad de integrar diversos fenómenos bajo patrones argumentativos comunes. En cambio, Woodward (2003) ha propuesto una teoría “intervencionista” de la causalidad, que define las relaciones causales en términos de dependencias contrafácticas, bajo cierto tipo de manipulaciones. Recientemente, otras propuestas han sugerido ampliar el marco ontológico dentro del cual se comprende la explicación científica. En particular, el análisis de la pseudocausalidad desarrollado por Quezada y Pavez (2011, 2016) apunta a la existencia de formas de determinación que no se reducen a una causalidad productiva, sino que operan mediante restricciones estructurales que condicionan el comportamiento de los sistemas físicos. En lo que sigue, a los fines de este artículo, se hará un panorama general en torno a estas caracterizaciones para luego abordar la distinción entre procesos y pseudoprosos causales.

La propuesta de Salmon surge como respuesta a dos concepciones dominantes de la explicación científica, las cuales se circunscriben a la tradición empirista (clásica y positivista, respectivamente). La primera es el modelo “regularista” asociado a David Hume, según el cual la causalidad consiste simplemente en la observación de conjunciones constantes entre tipos de eventos. Este modelo sostiene que la causalidad es una creencia subjetiva regida por el hábito o la costumbre. Al observar que ciertos eventos suceden consecutivamente, la mente asume una relación causa-efecto, la cual se basa únicamente en impresiones sensoriales pasadas. La segunda es el modelo nomológico-deductivo propuesto por Hempel y Oppenheim (1948), que identifica la explicación científica con la deducción de un fenómeno a partir de leyes generales más condiciones iniciales. Salmon argumenta que ambos enfoques fracasan en capturar un aspecto fundamental de la práctica científica, esto es, su referencia a procesos causales que producen los fenómenos físicos. Según él, una explicación científica adecuada debe revelar la estructura causal del mundo y no limitarse a establecer regularidades o derivaciones lógicas. El desarrollo del pensamiento de este autor puede dividirse en dos etapas. En una primera, la relevancia estadística afirma que explicar un evento consiste en identificar los factores que modifican su probabilidad de ocurrencia. En otras palabras, un factor explica un evento cuando su presencia altera, significativamente, la probabilidad de que ocurra. Sin embargo, este enfoque resultó problemático, ya que una relación estadística no garantiza una relación causal. Por ello, no es posible distinguir adecuadamente entre correlación y causalidad, dado que dos variables pueden estar estadísticamente relacionadas sin que exista entre ellas un vínculo causal genuino. Esta cuestión condujo al autor a abandonar su propuesta.

En su obra posterior, Salmon desarrolla una concepción más robusta basada en la noción de procesos causales. En este marco, la causalidad se entiende como una red de procesos que se extienden a través del espacio-tiempo y que pueden interactuar entre sí. Para distinguir los

procesos genuinamente causales de los meramente aparentes, introduce el criterio de transmisión de marcas. Un proceso es causal si es capaz de transmitir una modificación física local (una “marca”) a lo largo de su trayectoria temporal. La transmisión de esta modificación indica que el proceso transporta alguna forma de estructura o información física. Ejemplos contundentes incluyen la propagación de una señal luminosa o la transferencia de energía en una colisión entre partículas. En ambos casos, el proceso no consiste simplemente en una sucesión de eventos correlacionados, sino en una cadena continua de transmisión. Esta concepción implica un compromiso ontológico fuerte. De este modo, la causalidad es una característica objetiva del mundo físico y la explicación científica consiste en revelar la trama de los procesos que producen los fenómenos observados.

Aunque la propuesta de Salmon resultó extremadamente influyente, varios filósofos de la ciencia señalaron dificultades importantes en la noción de “marca” utilizada para caracterizar los procesos causales. Una de las principales objeciones consistía en que el criterio de transmisión de una marca podía depender de condiciones contrafácticas, es decir, de lo que ocurriría si el proceso fuese intervenido, y no exclusivamente de propiedades físicas intrínsecas del propio proceso. De este modo, la distinción entre procesos causales genuinos y pseudoprocesos resultaba problemática, ya que no se establecía a partir de criterios ontológicos suficientemente robustos, sino mediante consideraciones hipotéticas acerca de las condiciones bajo las cuales un proceso podría transmitir una marca determinada. Con el propósito de superar estas dificultades, Dowe desarrolló la “teoría de las cantidades conservadas”, la cual puede expresarse según este autor en sólo dos proposiciones (*Conserved Quantity* 1 y 2, respectivamente): “CQ1. Un proceso causal es la línea de mundo de un objeto que posee una cantidad conservada. CQ2. Una interacción causal es una intersección de líneas de mundo que implica intercambio de una cantidad conservada.”³ (Dowe, 2000, p. 90).

A diferencia de Salmon, Dowe rechaza explícitamente las concepciones transmisionistas de la causalidad. Según su propuesta, un proceso causal no debe definirse por la transmisión de una marca o propiedad, sino por ser la línea de mundo (*worldline*) de un objeto que posee una cantidad conservada, es decir, una magnitud física sujeta a leyes de conservación, como la energía, el momento o la carga eléctrica. La noción de transmisión o intercambio de cantidades conservadas queda restringida exclusivamente al caso de las interacciones causales, entendidas como encuentros entre procesos en los que se produce dicho intercambio. Esta reformulación no constituye un mero cambio terminológico, sino el núcleo de la propuesta de Dowe. Precisamente, dado que los procesos causales se definen por la posesión efectiva de cantidades conservadas, es posible distinguirlos rigurosamente de los pseudoprocesos. Estos últimos no constituyen trayectorias espacio-temporales de objetos portadores de tales magnitudes físicas; por lo tanto, no satisfacen las condiciones necesarias para ser considerados procesos causales genuinos. En suma, Dowe reemplaza el enfoque basado en la transmisión de marcas por una concepción “posesionista” basada en cantidades conservadas, ofreciendo una caracterización de la causalidad estrechamente vinculada con las leyes fundamentales de la física.

No obstante, algunas críticas a la reducción causal de la explicación fueron dadas por Kitcher, quien cuestionó la idea de que toda explicación científica debe ser causal. Como se mencionó antes, su enfoque unificacionista de la explicación sostiene que el objetivo principal de la ciencia es reducir el número de patrones independientes, necesarios para describir el mundo. Según este autor, explicar un fenómeno consiste en mostrar cómo puede derivarse utilizando

³Traducción del autor.

patrones argumentativos que también explican muchos otros. De esta manera, la explicación aumenta nuestro entendimiento cuando logra integrar diversos fenómenos dentro de un marco teórico unificado. Desde esta perspectiva, el causalismo fuerte defendido por Salmon resulta demasiado restrictivo. Existen numerosas explicaciones científicas que no apelan a procesos causales productivos, tales como explicaciones matemáticas o geométricas. Además, Kitcher sostiene que no toda descripción causal es necesariamente explicativa. Una cadena causal, extremadamente detallada, puede carecer de relevancia teórica si no contribuye a la integración sistemática del conocimiento científico.

Por su parte, Woodward propone una concepción diferente de la causalidad basada en la noción de intervención. Según esta perspectiva, una variable X causa una variable Y si al intervenir sobre X se producen cambios sistemáticos en Y . De esta forma, la causalidad se define en términos de dependencias contrafácticas bajo manipulaciones que son, al menos en principio, realizables. Este enfoque permite identificar relaciones causales incluso en sistemas en los que no es posible describir procesos físicos bien detallados. Un aspecto importante de esta caracterización es que la causalidad no necesita reducirse a la física fundamental. Así, relaciones causales legítimas pueden darse en diferentes ámbitos de las ciencias sociales, incluso cuando no involucran transmisión de cantidades conservadas en el sentido propuesto por Dowe. El enfoque intervencionista rechaza tanto el reduccionismo fisicalista estricto, como la asociación entre la causalidad y la transmisión física.

Aunque varias líneas filosóficas comparten la suposición de que la causalidad constituye la forma fundamental de determinación en el mundo físico, es decir, la manera en que los eventos o estados de los sistemas se relacionan entre sí, muchas otras no lo hacen. Quezada y Pavez sugieren que esta idea podría ser muy limitante, sobre todo al momento de abordar nociones como las de pseudocausalidad. Como se abordará más adelante, su propuesta parte de una crítica al monismo causal, o sea, a la idea de que toda forma de determinación debe interpretarse únicamente en términos de causalidad productiva. De acuerdo a estos autores, muchas explicaciones presentes en la física actual no describen procesos causales en sentido estricto, sino restricciones estructurales que delimitan el espacio de comportamientos, físicamente posibles, de estos sistemas.

Siguiendo esta propuesta, el mundo físico involucra al menos dos modos de determinación. Por un lado, la causalidad productiva, la cual considera la transferencia de magnitudes entre sistemas; por el otro, una determinación estructural que opera mediante restricciones globales impuestas por la organización del sistema. Las estructuras relevantes pueden incluir configuraciones geométricas o relaciones topológicas que limitan sus posibles dinámicas. Ambas muestran cómo la naturaleza está ordenada para que ciertos eventos ocurran y otros queden excluidos, ya sea a través de procesos causales efectivos o mediante restricciones que definen patrones de comportamientos exhibidos por tales sistemas.

El concepto de pseudocausalidad surge, precisamente, cuando este tipo de dependencias estructurales se describen mediante un lenguaje causal. En tales casos, se recurre a una terminología de la causalidad, aún cuando no exista un proceso productivo subyacente que medie entre los fenómenos observados. El uso de este vocabulario refleja, más bien, una convención metodológica arraigada en las prácticas científicas. Bajo esta interpretación, esta noción puede entenderse como una forma de realismo estructural ampliado. En términos generales, esta postura sostiene que el mundo físico es cognoscible a través de su organización estructural.

A diferencia de las versiones más radicales de realismo estructural⁴, este planteo no elimina las entidades físicas ni reduce su ontología a relaciones; en cambio, sostiene que en el mundo físico coexisten tanto procesos causales productivos como estructuras que los condicionan.

6. La medición, la explicación y la pseudocausalidad

Quezada y Pavez (2011) abordan de manera crítica el concepto de medición en física, cuestionando la idea de que el mismo pueda entenderse, exclusivamente, en términos de la causalidad eficiente tradicional. Según estos autores, en los procesos de medición intervienen relaciones que, aunque operan metodológicamente como si fueran causales, no siempre se corresponden a una producción causal en sentido estricto. En este contexto introducen la noción de pseudocausalidad, retomando discusiones clásicas sobre la distinción entre procesos causales y pseudoprocesos en la filosofía de la ciencia actual. A partir de ello examinan cuestiones vinculadas con la objetividad y la robustez de la medición, la relación entre la teoría y la experiencia y el papel que desempeña la interacción entre los sistemas físicos y los instrumentos de observación. Ellos señalan que varias caracterizaciones de la medición, presuponen una relación causal simple entre el objeto físico bajo investigación y el instrumento empleado. Dado que la situación es aún más sofisticada, estos autores realizan una crítica contundente al realismo causal ingenuo, o sea, afirmar que “el objeto causa el registro en el aparato o detector” es insuficiente. La medición está mediada por modelos teóricos, idealizaciones y dependencias estructurales, propias del marco conceptual. Ello debilita una concepción puramente mecanicista del proceso en cuestión.

En esta dirección, Quezada y Pavez integran distintos matices correspondientes a los niveles de análisis planteados anteriormente, no limitándose sólo a cuestiones estrictamente metodológicas. Sugieren así que las prácticas de medición revelan rasgos estructurales de los sistemas físicos bajo investigación. Según este planteo, no toda explicación física es sólo causalmente productiva. Ello conduce a repensar la noción de pseudocausalidad, en términos de descripciones del mundo físico o de formas de representarlo a través de modelos. Esta distinción

⁴A los fines de este artículo, solo se mencionarán algunos aspectos relevantes de estas variantes. En su formulación original, Worrall (1989) defendía cierto tipo de realismo estructural epistémico. Esta posición intentaba explicar cómo es posible el progreso científico a pesar de los cambios teóricos. Según este autor, lo que se conserva a lo largo de la historia de la ciencia no son las entidades postuladas por las teorías, sino su estructura matemática o relacional. Aunque las teorías cambien, las relaciones que describen pueden mantenerse. A partir de esta propuesta inicial, otros autores desarrollaron esta línea en el plano ontológico. En particular, Ladyman y Ross (2007, 2013) defendieron lo que denominaron realismo estructural óntico. Según ellos, la estructura relacional no es simplemente aquello que las teorías logran captar del mundo, sino lo que existe en el nivel más fundamental. De este manera, los objetos físicos con propiedades intrínsecas dejan de ocupar un lugar central en la ontología y pasan a ser considerados dependientes de dichas relaciones. En este sentido, la estructura de la naturaleza (entendida como el conjunto de relaciones y patrones) no se limita a describir objetos y propiedades subyacentes, sino que constituye la base misma de la realidad. Desde este enfoque, los objetos y sus atributos físicos quedan desplazados, o incluso eliminados, en favor de relaciones estructurales básicas. Sin embargo, dentro de esta línea de investigación existen diferentes interpretaciones. Las versiones más extremas sostienen que las relaciones estructurales pueden existir sin objetos asociados, eliminando así las entidades individuales de la ontología fundamental. Otras en cambio, adoptan una postura más moderada, admitiendo la existencia de objetos, aunque consideran que éstos se encuentran subordinados a la estructura relacional en la cual están insertos. Para un análisis más exhaustivo, y su relevancia en la física actual, se recomienda el siguiente material de lectura: Ladyman (2021); Borge (2018, 2020).

es filosóficamente relevante, pues si se tratara solo de un recurso metodológico/epistemológico, su alcance ontológico sería limitado. Los autores desafían concepciones simplistas del proceso de medición y muestran que las prácticas observacionales/experimentales no se ajustan a los esquemas causalistas rígidos. Por esta razón, ellos profundizan la noción de pseudocausalidad, aplicándola a casos concretos.

Tradicionalmente, medir consiste en comparar (cuantitativa o cualitativamente) e involucra distintas interacciones físicas entre un sistema y un instrumento dado. Esto último genera un efecto observable que, una vez registrado, representa alguna magnitud del propio sistema. Esta cadena causal lineal es un modelo simple donde la producción física directa determina cierto resultado. Quezada y Pavez señalan que la medición es más compleja, ya que requiere de un modelo teórico previo que defina qué es observable y medible, modelos ideales del instrumento, supuestos sobre condiciones iniciales y ciertas convenciones sobre estándares, escalas y unidades aceptadas. Por ejemplo, un termómetro no registra la temperatura de manera independiente de un marco teórico (como la teoría cinética), del mismo modo que un voltímetro supone los principios de la teoría electromagnética. Así, el hecho medido no se reduce a un mero efecto físico, sino que remite a un proceso mediado por modelos representacionales. En este sentido, la pseudocausalidad aparece cuando se interpreta la medición como si el sistema físico causara la lectura del instrumento. Siguiendo el caso anterior, la temperatura de un objeto no produce inmediatamente el valor numérico indicado en un termómetro, ni la diferencia de potencial en un circuito eléctrico genera, sin mediación alguna, la lectura de un voltímetro. En otras palabras, si un detector revela una marca numérica expresada en grados centígrados, amperios, voltios, o cualquier otra magnitud, no significa que una propiedad física del sistema (*target*) la causó directamente. Este valor solo tiene sentido porque existe una escala, un marco teórico que conecta magnitud y lectura y un instrumento calibrado bajo ciertas condiciones. Lo que explica el resultado es una estructura unificada, no solo la cadena causal física.

Más allá de su posterior interpretación, a la luz del modelo del fenómeno investigado, la adquisición de datos instrumentales o “puros” depende de variados modelos y de convenciones preestablecidas. Precisamente, los resultados obedecen a una red estructural que articula sistema, teoría e instrumento, cuyo significado sólo se comprende en el contexto de dicha totalidad. La clave radica en distinguir entre causalidad estricta y pseudocausalidad. La primera se corresponde a la producción física directa, como la transferencia de energía o de impulso; mientras que la segunda está asociada a las prácticas de medición, las cuales dependen de la red mencionada antes. De acuerdo con Quezada y Pavez, los fenómenos del mundo físico pueden ser caracterizados y medidos de esta manera. Al ampliar la noción de pseudocausalidad, estos modelos actúan como mediadores, proporcionando explicaciones, no estrictamente productivas, que no se reducen a simples cadenas causales.

Siguiendo esta línea, Quezada y Pavez (2016) sostienen que la causalidad no es la única manera de explicar. Según ellos, junto a las explicaciones estrictamente causales existen formas de explicación pseudocausales, las cuales también cumplen capacidades epistémicas legítimas. Como se mencionó antes, estas últimas no se ajusten al modelo clásico de causalidad. Históricamente, las ciencias físicas han privilegiado un modelo explicativo basado en relaciones causales lineales, determinación eficiente (una causa dada produce un cierto efecto) y regularidades nomológicas. Sin embargo, estos autores aseveran que muchas explicaciones científicas contemporáneas no encajan completamente dentro de este esquema, especialmente en contextos de justificaciones matemáticas, funcionales o en modelos teóricos que no representan mecanismos causales directos.

La metodología pseudocausal utiliza cierto tipo de explicación que, aunque presenta una apariencia causal, no representa relaciones directas en un sentido ontológico fuerte. No obstante, estas explicaciones satisfacen funciones explicativas genuinas, lo que evidencia que pueden emplearse explicaciones legítimas, más allá de una causalidad estricta. Desde este nivel epistemológico, los autores analizan cómo se justifican y construyen las explicaciones. A partir de ello, proponen que el mundo físico no sólo está conformado por relaciones causales eficientes. Además, se encuentran estructuras, leyes, relaciones formales y condiciones de posibilidad que poseen relevancia explicativa. Reducir toda explicación a la causalidad empobrece la comprensión de la naturaleza, mientras que reconocer distintas determinaciones amplía de manera sustancial su ontología. De esta manera, las ciencias físicas no se valen únicamente de explicaciones causales. Con frecuencia, se usan modelos ideales, abstracciones y estructuras formales que no remiten a mecanismos causales estrictos. La metodología pseudocausal permite comprender cómo se articulan estas explicaciones, mediante prácticas científicas integradoras, sin reducirlas al esquema clásico.

Al cuestionar la reducción de toda explicación científica a una causalidad eficiente, Quezada y Pavez proponen la pseudocausalidad como una estrategia metodológica, la cual además amplía el compromiso ontológico. Según ellos, aunque la causalidad sigue siendo fundamental, no es exclusiva; las ciencias deben considerar otros modos auténticos de explicación. Por ello, una filosofía de la física adecuada debería integrar tanto explicaciones causales como pseudocausales. En otras palabras, la noción de pseudocausalidad constituye un aporte relevante porque no niega la importancia de la causalidad en sí. Al proporcionar explicaciones que emplean lenguaje causal sin asumir un compromiso ontológico fuerte, tampoco se recurre a un antirrealismo radical. De esta manera, estos autores sostienen que el mundo físico incluye relaciones estructurales, restricciones formales y dependencias no generativas, lo que enriquece este marco conceptual. Al desafiar la equiparación entre explicación y causalidad tradicional, invitan a repensar el significado de lo que constituye una explicación en las ciencias físicas.

La noción de causalidad clásica implica causación efectiva, prioridad temporal, conexión necesaria o regular y una relación física eficiente. Por ejemplo, el impacto de un martillo produce directamente la rotura de un vidrio. Sin embargo, las prácticas científicas contemporáneas incluyen explicaciones en las que no interviene una producción causal directa, como en el caso mencionado del planeta que orbita una estrella en virtud de la curvatura del espacio-tiempo circundante. Tales explicaciones son de carácter inferencial y dependen de restricciones estructurales o formales, así como de relaciones de dependencia sistémica. La pseudocausalidad puede caracterizarse como un tipo de relación que emplea lenguaje causal y cumple una función explicativa, pero no constituye una producción causal eficiente. En cambio, se basa en la organización del sistema y, por ello, no es una ilusión ni un error, sino una forma válida de explicar fenómenos. Quezada y Pavez identifican al menos tres tipos de pseudocausalidad. El primero, de dependencia estructural, ocurre cuando un fenómeno se explica por la configuración global del sistema físico, sin que un evento produzca directamente otro. El segundo, de restricción formal, sucede cuando el fenómeno se da porque así lo exige una ecuación o estructura matemática. El tercero, de condiciones de posibilidad, se presenta cuando ciertas condiciones estructurales permiten o hacen posible el fenómeno, actuando de manera habilitadora, más que productiva. A diferencia de la causación clásica, la determinación pseudocausal no involucra transferencia de energía ni interacción física directa, sino que se basa en la organización, la forma y la estructura del sistema. Ontológicamente, esto significa que el mundo físico no se reduce a una red de mecanismos causales; las estructuras y relaciones formales también son relevantes para

la explicación científica. En suma, la noción de pseudocausalidad no suple la de causalidad sino que la complementa, ofreciendo un marco explicativo más comprensivo y robusto.

7. Estudios de casos

La distinción entre un proceso causal concreto y el efecto específico o la “estructura derivada” que se produce, resulta particularmente curiosa al analizar fenómenos cotidianos como el arcoíris, los espejismos o ciertas ilusiones ópticas. En astrofísica se presentan diversos casos interesantes, aunque más sofisticados, como sistemas de lentes gravitacionales, la formación de la imagen de la sombra de un agujero negro o la manera en la cual son representados los vacíos cósmicos como partes de la estructura del universo a gran escala. En todos estos ejemplos conviene diferenciar con mucho cuidado el plano ontológico (de lo que se considera que “existe” y de lo que ocurre físicamente) del fenomenológico (de cómo se manifiesta lo que ocurre en tanto es observado) y del plano epistemológico (de cómo se emplean estas manifestaciones para ordenar el conocimiento obtenido acerca del mundo físico).

Desde el nivel de análisis ontológico, siguiendo un enfoque clásico Salmon-Dowe, lo fundamental son los procesos causales y las interacciones físicas que involucran la transmisión de cantidades conservadas (como energía y momento). Sin entrar en detalles técnicos, en el caso del arcoíris, se trata de fotones que se refractan, reflejan y dispersan en gotas de agua; en las lentes gravitacionales, de los fotones cuya trayectoria es desviada por la curvatura del espacio-tiempo; en la sombra de un agujero negro, de trayectorias lumínicas fuertemente afectadas por una métrica extrema; y en los vacíos cósmicos, de la redistribución dinámica de materia bajo la acción conjunta de la gravedad y la expansión del universo. En todos estos ejemplos, los procesos físicos subyacentes constituyen un compromiso ontológico fuerte: son entidades temporales, localizadas y causalmente eficaces.

Sin embargo, esos procesos individuales no son accesibles como tales a la observación, sino que lo que se observa son configuraciones estructurales que emergen de su interacción colectiva. El arco multicolor en el cielo, los anillos y arcos producidos por una lente gravitacional, el contorno luminoso que delimita la sombra de un agujero negro o las extensas regiones de baja densidad que caracterizan los vacíos cósmicos, no constituyen por sí mismos unidades de transmisión de cantidades conservadas, en el sentido técnico de la propuesta Salmon-Dowe. Más bien, son patrones dependientes, estructuralmente organizados, que resultan de la convergencia de múltiples procesos causales. Ontológicamente, estas configuraciones no constituyen procesos autónomos, sino estructuras derivadas.

No obstante, en el plano fenomenológico, tales estructuras poseen plena “realidad” física como manifestaciones observables. Se presentan como patrones perceptibles o detectables a través de instrumentos, y su forma depende de la relación entre el propio sistema físico y la posición del observador. Son fenómenos fuertemente dependientes de la perspectiva de este último: el arcoíris varía con su ubicación respecto del sol y las gotas; la imagen de una lente gravitacional depende de la alineación del sistema, es decir, entre la fuente, la lente y el observador; la apariencia de la sombra de un agujero negro cambia con el ángulo de observación; la identificación de un vacío cósmico depende de cómo se cartografía la distribución de los grupos y cúmulos de galaxias (filamentos y nodos). En este nivel, lo estructural no es ilusorio ni secundario, sino más bien se trata de la forma en que estos procesos se representan, haciéndose visibles.

El plano epistemológico introduce un aspecto adicional. Precisamente, dichos patrones codifican regularidades producidas por diversos procesos causales e interacciones involucradas, como señales astronómicas cuya naturaleza física (electromagnética, entre otras) puede contener información sobre otro proceso determinado (gravitatorio, por ejemplo). De esta manera, estas capacidades epistémicas permiten establecer distintos tipos de inferencias basadas en esquemas diferentes (inductivos, abductivos, etc). En otras palabras: a partir de la geometría de un arcoíris se pueden inferir propiedades ópticas del agua como el índice de refracción; de una lente gravitacional, la distribución de masa (incluida la materia oscura) en galaxias, grupos y cúmulos de éstas; de la sombra arrojada de un agujero negro, su masa y momento angular; de los vacíos cósmicos identificados, características observables de la estructura a gran escala y la determinación de ciertos parámetros cosmológicos. La relevancia en este nivel de análisis no radica en el estatus de estos fenómenos como procesos autónomos, sino en su capacidad para condensar información causal en configuraciones observables definidas por el hecho o la situación de observación.

Este mismo planteo se mantiene en el ámbito de las simulaciones computacionales (Bozzoli y Huvelle, 2025). Al tratarse de eventuales señales subrogadas⁵, no se manipularían fotones ni galaxias en sentido físico, sino representaciones formales de ecuaciones y sistemas dinámicos. Estos modelos generan patrones estructurales análogos a los observables empíricos. Aunque los procesos simulados no sean físicamente naturales, preservan la arquitectura causal del sistema modelado. Así, los patrones resultantes pueden compararse con los datos observacionales. De este modo, la relación entre proceso subyacente, estructura emergente y función inferencial se reproduce en un ámbito representacional. En suma, estos casos muestran que la ontología de procesos, aunque indispensable para explicar la base física de los fenómenos, no agota el análisis filosófico. Las prácticas científicas operan constantemente con estructuras que, sin ser procesos autónomos, poseen un papel cognoscitivo central al describir, explicar y predecir el mundo de los fenómenos. Lejos de constituir una debilidad conceptual, esta dependencia estructural posee un rol clave. Ello revela que el conocimiento astronómico se articula en el tránsito desde una dinámica causal subyacente hacia las configuraciones de la perspectiva, la escala y el punto de vista del observador. Este desarrollo permite hacer inteligible dicha dinámica. La astronomía no estudia sólo lo que ocurre, sino también las formas en las cuales se organiza y se manifiesta lo que acontece en el universo observable. En lo que sigue se analizarán algunos ejemplos astrofísicos relevantes y se presentará un cuadro comparativo que muestra cada caso, según los distintos niveles de análisis planteados.

⁵En un sentido técnico y metodológico se corresponde a señales generadas artificialmente (simuladas) que se emplean para reproducir propiedades estadísticas de una señal concreta (física). Al compararlas, es posible chequear ciertas hipótesis planteadas. Estas señales sirven como una versión “de prueba” producidas a partir de los datos observacionales tradicionales y así comprobar si una señal contiene información física o no, explorando el umbral señal-ruido. Tal es el caso de la no linealidad en las series temporales astronómicas, al validar descubrimientos (por ejemplo, en estudios de variabilidad estelar, señales de exoplanetas o análisis del fondo cósmico). Si la señal física muestra estructuras que no aparecen en las subrogadas, entonces probablemente hay un fenómeno físico (por ejemplo, actividad magnética o tránsito planetario). Si no hay diferencias significativas, podría tratarse solo de ruido. En definitiva, podría considerarse que una señal subrogada es una versión artificial de una señal astronómica “real” que se usa como referencia para comprobar si los patrones observados tienen origen físico o son producto del azar y ruido estadístico. En astrofísica, una señal subrogada es una versión artificial o modelo simplificado de una señal física que se utiliza para análisis y validación de datos generados por diferentes mecanismos de producción.

Una lente gravitacional⁶ se produce cuando la radiación electromagnética emitida por uno o varios objetos lejanos, como galaxias brillantes o cuásares, recorre el espacio y en su camino, entre la fuente emisora y el receptor, se antepone otro objeto masivo (visible o invisible). Este último perturba la señal original curvando los rayos de luz provenientes de dicha fuente. Sin entrar en detalles técnicos, las galaxias masivas, los agujeros negros o la materia oscura son ejemplos concretos de objetos que pueden provocar la deflexión de los rayos de luz. Si la lente coincide y se halla en la línea de la visual, entonces el observador notará una distorsión en forma de anillo o halo correspondiente a uno o más objetos de fondo; pero si ésta se encuentra desplazada de dicha línea, el observador se percatará de imágenes múltiples de la fuente emisora, apareciendo en dos o más direcciones rodeando al objeto perturbador. En ambos casos, las lentes no sólo distorsionan las imágenes de los objetos en cuestión, sino que además permiten su magnificación, aun cuando la energía de la señal original disminuye. Así, un sistema de lente gravitacional se halla conformado por un observador o receptor, una o varias fuentes emisoras, un objeto masivo que perturba e intermedia entre ambos y ciertas condiciones (iniciales y de contorno) que configuran el hecho observacional.

En el universo se observan diferentes tipos de lentes: fuertes, débiles o micro-lentes. Las mismas son identificables y comúnmente observadas con los instrumentos vigentes. Por un lado, las propiedades de lentes fuertes y débiles proveen una valiosa información que les permite a los astrónomos investigar la distribución de masas de las galaxias, de grupos y cúmulos de éstas, y evaluar parámetros cosmológicos fundamentales como la tasa de expansión del universo (constante de Hubble), entre otros. De esta manera, dichas lentes posibilitan la indagación sobre el faltante de masa en el universo observable; sin embargo, ellas pueden poblarlo de “artefactos naturales”. Estos sistemas, al exhibir múltiples imágenes de un objeto específico, conducen a un ámbito estrictamente observacional que depende, como se mencionó antes, de la misma situación de observación. Lo que se quiere remarcar aquí es la necesidad, por parte de los astrónomos, de desarrollar prácticas que permitan utilizar los sistemas de lentes como auxiliares para poder observar los objetos que conforman dicho sistema. Al calcular la probabilidad de su ocurrencia, los efectos fuertes y débiles de lentes gravitacionales comenzaron a cobrar interés, contrariamente a la hipótesis que los consideraba meros espejismos (Barnothy & Barnothy, 1968). Por otro lado, las micro-lentes son actualmente tomadas como “telescopios cósmicos” por su poder de magnificación en el descubrimiento de planetas extrasolares, principalmente. Estos fenómenos son más difíciles de identificar. Ello se debe a que los objetos intermediarios que componen dichos sistemas se hallan a grandes distancias y suelen ser opacos, es decir, que no emiten luz propia y sólo la reflejan, o bien, si emiten luz, son muy difusos. De este modo, estrellas de baja masa, enanas marrones (sub-estelares), planetas u objetos astrofísicos compactos (conocidos como MACHOs, por sus siglas en inglés) pueden conformar un sistema de micro-lentes que no producen imágenes múltiples, pero sí “lentean” los objetos de fondo del sistema al aumentar considerablemente su brillo, entre otras características observables.

⁶Curiosamente, este ejemplo generó una problemática filosófica en torno a la posibilidad de sostener una posición realista, o bien otra antirrealista en la astronomía. La misma surgió de la necesidad de examinar los criterios de observabilidad subyacentes y de explorar aquéllos que intentaron zanjar el mismo debate. Al considerar los sistemas de lentes gravitacionales, Hacking (1989) declaró su postura antirrealista (moderada) en la astrofísica, la cual generó por cierto controversias por parte de aquellos filósofos de la ciencia que intentaron rebatir su posición, en particular Shapere (1993). Esta controversia se centró en una noción de observabilidad basada sólo en los objetos, pero no en sus propiedades o cualidades, ni tampoco en las relaciones entre sus atributos observables.

Con respecto a las lentes fuertes y a las débiles, ambas son empleadas en el modelado de cúmulos de galaxias en interacción que admiten halos de materia oscura, tales como el *Bullet Cluster*. Sin embargo, por una parte, al llevar a cabo simulaciones computacionales que involucran lentes fuertes, no se intenta chequear la naturaleza de las mismas, dado que se dispone de toda la información a priori respecto a las condiciones iniciales, campo de densidades observado, etc. Este tipo de simulaciones son usadas sólo para validar tanto las observaciones como ellas mismas, reproduciendo fenómenos similares (Bozzoli y Stasyszyn, 2020). Por otra parte, las simulaciones que consideran lentes débiles, emplean herramientas estadísticas sobre catálogos sintéticos, o sea, sobre observaciones simuladas que permiten reconstruir el fenómeno “lenteado”. Así, al fijar los parámetros libres de la técnica estadística, a través de las simulaciones, la misma es usada, de forma paralela, en las observaciones al momento de inferir nuevas propiedades sobre el campo de gravedad, es decir, sobre la distorsión del fenómeno en cuestión. De este modo, las lentes fuertes y las débiles son utilizadas actualmente en cosmología observacional para obtener información relevante que sólo, a través de sus propiedades, puede alcanzarse.

Otro claro ejemplo en la astronomía actual es la observación del núcleo de la galaxia elíptica M87, realizada por el proyecto *Event Horizon Telescope* (EHT). Este caso resulta relevante porque permite analizar cómo se articulan procesos causales astrofísicos con sofisticados procedimientos inferenciales que, en este sentido, también constituyen pseudoprocesos. A comienzos del siglo XX, las observaciones de Heber Curtis revelaron la existencia de un chorro de materia emergente de tal núcleo galáctico. Este fenómeno puede entenderse como un proceso causal genuino, en tanto que genera la transmisión de “marca” a través de interacciones físicas concretas. De esta modo, se conjeturó la presencia de un agujero negro supermasivo en el centro de esta galaxia, cuya influencia gravitacional explicaría tanto la formación del chorro emergente (*jet*) como la dinámica del material circundante. Sin embargo, la observación directa de este objeto plantea una dificultad específica: el supuesto agujero negro posee un tamaño angular extremadamente pequeño, lo que exige un poder resolvente extremo del sistema instrumental empleado. Aquí comienza a desplegarse una red de representaciones en la que los datos observacionales no son el resultado de un acceso directo al fenómeno en cuestión, sino de una serie de transformaciones mediadas por modelos altamente sofisticados.

El EHT es un sistema instrumental (interferómetro) que combina múltiples radiotelescopios distribuidos en la superficie de la Tierra. La señal electromagnética que llega desde M87 integra un proceso causal físico bien definido, el cual transporta cierta información a través de interacciones electromagnéticas. No obstante, la detección y el registro de dicha señal en diferentes antenas, su sincronización mediante relojes atómicos y su posterior digitalización introducen una cadena de operaciones que no preservan directamente la estructura causal original del fenómeno observado. En particular, la técnica de interferometría de muy larga base (VLBI, por sus siglas en inglés) permite obtener lo que se denomina “visibilidad”, un patrón matemático que representa solo una porción de las frecuencias espaciales de la imagen del objeto. Este patrón no es una imagen en sentido estricto, sino una reconstrucción parcial que requiere procedimientos adicionales. En este punto, el paso de la señal física a la visibilidad puede interpretarse como una transición desde un proceso causal hacia un pseudoproceso. Este último es entendido aquí de manera ampliada, incluyendo transformaciones inferenciales y representacionales. Así, la relación entre el objeto y su representación deja de ser una transmisión directa de marcas, pasando a depender de modelos altamente inferenciales. La reconstrucción de la imagen introduce aún más mediación respecto del proceso causal original. Debido a que el

muestreo de frecuencias es incompleto, el problema de la reconstrucción es matemáticamente indeterminado: múltiples imágenes posibles pueden corresponder a la misma visibilidad. Las técnicas de deconvolución iterativa usadas no recuperan una imagen “contenida” en los datos, sino que seleccionan una solución plausible mediante supuestos adicionales. Este modelado conforma eventualmente un pseudoproceso, ya que no involucra una transmisión causal desde el objeto, sino que introduce estructuras teóricas y variados criterios de optimización.

De esta manera, las simulaciones computacionales juegan un rol central en este esquema. Mediante modelos basados en la relatividad general y en la magnetohidrodinámica (GRMHD), se generan múltiples escenarios posibles del entorno del agujero negro. Estas simulaciones no son extensiones causales del fenómeno, sino representaciones confiables que exploran un espacio de posibilidades. Su función epistémica permite establecer analogías estructurales entre los datos observados y aquellos simulados. El procedimiento completo puede describirse como un ciclo de validación cruzada. Las simulaciones generan imágenes ideales, que luego son sometidas a observaciones virtuales para producir visibilidades simuladas. Estas últimas se comparan con las visibilidades efectivas; los parámetros que mejor reproducen la correspondencia se utilizan para reconstruir la imagen final. Este proceso no consiste en seguir una cadena causal continua desde el objeto hasta la imagen, sino en articular una variedad de inferencias que permiten seleccionar, entre muchas alternativas, aquella que resulta más verosímil (Bozzoli y Paz, 2023).

El caso del núcleo de M87 muestra que la observación astronómica contemporánea no puede entenderse simplemente como la captación de información a través de procesos causales directos. Si bien existen componentes claramente causales, como la propagación de la luz, el resultado final depende de una sofisticada red de transformaciones, reconstrucciones y simulaciones, las cuales pueden entenderse como pseudoprocesos. Éstos forman parte de las prácticas observacionales más recientes, generando condiciones de posibilidad en contextos donde el acceso epistémico al objeto y sus propiedades es restringido o incluso imposible. En este sentido, la caracterización del fenómeno en cuestión evidencia una combinación de transmisión causal e inferencia modelizada. La validación no descansa únicamente en la continuidad causal, sino en la coherencia entre distintos modelos, esto es, en la estabilidad de los resultados frente a las variaciones paramétricas y a la convergencia entre resultados de observaciones y de simulaciones. El ejemplo revela cómo tales prácticas incorporan tanto procesos causales como pseudoprocesos; los cuales son estratégicos al momento de interpretar la información disponible y de validar el conocimiento astronómico.

Por último, un caso interesante para el análisis propuesto es el de los vacíos cosmológicos. Este otro ejemplo permite examinar con claridad la relación entre procesos causales subyacentes, configuraciones estructurales emergentes y estrategias epistémicas de validación. A gran escala, el universo presenta una organización jerárquica en la que cúmulos de galaxias actúan como nodos interconectados por filamentos, configurando una red cósmica que delimita extensas regiones de baja densidad. Estas últimas, denominadas vacíos cósmicos (*voids*), constituyen la mayor parte del volumen del universo observable, aunque contienen solo una fracción menor de su materia. Lejos de estar completamente desprovistos de contenido, albergan subestructuras tenues, como galaxias de bajo brillo superficial o pequeños grupos, cuya detección presenta desafíos observacionales.

Los vacíos no constituyen procesos causales autónomos ni son entidades sustanciales en sentido estricto, sino estructuras derivadas que emergen de la evolución dinámica de la materia bajo la acción conjunta de la gravedad y de la expansión cosmológica. Los procesos fundamentales, la formación de estructuras, la evolución de los campos de densidad y las

interacciones gravitatorias, conforman el ámbito causal subyacente. En cambio, tales vacíos pueden describirse en términos de pseudoprocesos, al definirse “negativamente” como regiones identificadas por una baja densidad de materia luminosa, cuya delimitación depende de la distribución de las galaxias que los rodean. En este sentido, su estatus ontológico es análogo al de los otros casos considerados. No son portadores de cantidades conservadas, ni constituyen unidades causales independientes. Dependen de configuraciones espaciales particulares que resultan de la convergencia de procesos causales muy variados.

Estos fenómenos adquieren su estatus como objetos de investigación astronómica. Sin embargo, no se presentan como entidades directamente observables, sino que se representan como patrones inferidos a partir de diversos trazadores, tales como: la distribución de las galaxias que delinean sus bordes, los flujos de materia que revelan gradientes de densidad o las propiedades observables de las galaxias que residen dentro de tales entornos subdensos. Su identificación y clasificación depende de la situación observacional. Así, la escala considerada, la resolución de los relevamientos, los criterios de selección de objetos y la perspectiva del observador influyen en su delimitación. Además, estos vacíos se manifiestan como estructuras dependientes del punto de vista, cuyas formas, tamaños y abundancia en el universo no son independientes de las condiciones bajo las cuales se los observa y, de hecho, se los modela. En esta dirección, los vacíos cósmicos pueden caracterizarse como configuraciones que condensan información relevante sobre los procesos cosmológicos que los generan. Sus propiedades geométricas y estadísticas permiten inferir aspectos fundamentales del universo, tales como la distribución de la materia (incluida la materia oscura), la dinámica de su expansión y la evolución de las fluctuaciones del fondo cósmico de microondas. En este sentido, al igual que en los casos de las lentes gravitacionales o la sombra de un agujero negro, lo importante no es su estatus como proceso autónomo, sino su capacidad para codificar información causal en patrones observables. Estos últimos permiten realizar inferencias ampliativas mediante distintos esquemas empleados en cada modelo involucrado.

La identificación y clasificación de los vacíos dependen de una pluralidad de modelos de observación que combinan datos empíricos y datos de simulaciones computacionales. Por un lado, los relevamientos de galaxias permiten reconstruir la red cósmica a partir de la distribución de la materia observada. Por el otro, ciertas simulaciones de observaciones generan catálogos sintéticos que reproducen la formación de tales estructuras bajo condiciones controladas. Estas simulaciones no constituyen procesos causales en un sentido físico, sino que son representaciones que preservan la arquitectura dinámica del sistema (*target*) modelado. De esta manera, es posible establecer analogías estructurales entre los patrones simulados y los observados, reproduciendo en el plano representacional la relación entre proceso subyacente, estructura emergente y estrategia inferencial. En este contexto, la validación del conocimiento no se reduce a la comparación directa entre datos observacionales y datos simulados, sino que involucra un contraste entre distintos modelos de observación. Cada uno de ellos articula de manera diferente los procesos físicos, las condiciones observacionales y ciertas capacidades epistémicas consideradas. Esto permite implementar formas de validación más robustas, como la convergencia entre resultados independientes o la validación por reversibilidad, en las que diferentes procedimientos conducen a reconstrucciones compatibles y alternativas del fenómeno (Bozzoli y Huvelle, 2025). De este modo, la confiabilidad epistémica no depende exclusivamente de la continuidad de una cadena causal, sino de la coherencia entre múltiples modos de acceso al mismo sistema físico.

Los vacíos cobran interés en el debate actual sobre la “tensión de Hubble”. Este problema

se centra en la discrepancia al determinar la tasa de expansión del universo. Así, las estimaciones basadas en las observaciones del universo temprano difieren de aquéllas obtenidas a partir de ciertos patrones o indicadores del universo tardío. En este marco, algunos modelos proponen reinterpretar los datos disponibles considerando que el grupo local, incluida la Vía Láctea, podría encontrarse inmerso en una gran región subdensa (Banik & Kalaitzidis, 2025). Esta hipótesis, indudablemente especulativa, no altera las teorías físicas fundamentales; aun así, reconfigura el modo en el que se articulan las observaciones realizadas a partir de diferentes modelos de observación. Al contrastar métodos de medición y técnicas asociadas, como las oscilaciones acústicas de bariones (regla estándar), las supernovas de tipo Ia (candela estándar), entre otros, puede reconstruirse de manera independiente la historia de la expansión cósmica. Estos enfoques alternativos ofrecen interpretaciones complementarias para la caracterización de ciertos fenómenos observados, sin necesidad de modificar el marco físico de base. Ello refuerza el planteo clásico, según el cual la ontología de los procesos causales resulta indispensable para explicar tales fenómenos. Sin embargo, la introducción o eliminación de entidades raras no agota el alcance del análisis filosófico.

Cuadro comparativo de los casos según niveles de análisis

7

Caso	Plano ontológico (procesos causales)	Plano fenomenológico (manifestación observable)	Plano epistemológico (función epistémica: inferencial, representacional y de validación)
Arcoíris	Interacciones ópticas de fotones: refracción, reflexión interna y dispersión de la luz en las gotas de agua; transmisión de energía y momento.	Se observa un arco multicolor vinculado a la posición relativa entre el Sol, las gotas y el observador; patrón geométrico dependiente de la escala y de la perspectiva.	Se infieren propiedades ópticas (índice de refracción, dispersión de la luz, etc) y ciertos aspectos de la situación de observación. Se emplean simulaciones para reproducir el fenómeno (<i>ray tracing</i>), explorar variaciones y visualizar la formación del arco.
Lentes gravitacionales	Desviación de trayectorias de fotones por la curvatura del espacio-tiempo generada por las distribuciones de masa (galaxias, cúmulos, materia oscura, etc).	Se observan arcos, anillos o imágenes múltiples de fuentes de fondo; configuraciones dependientes de la alineación entre la fuente, la lente y el observador.	Se infieren la distribución de la materia (visible y oscura), las propiedades de objetos lejanos y ciertos parámetros cosmológicos; su análisis articula reconstrucciones del sistema "lenteado" mediante modelos relativistas y se valida comparando resultados de simulaciones y observaciones.
Sombra de agujero negro (EHT)	Propagación de la radiación electromagnética en una métrica fuertemente curvada, junto con la dinámica del plasma y los procesos de acreción en un régimen gravitacional extremo.	Imagen reconstruida a partir de visibilidades (interferometría VLBI), consistente en un patrón luminoso que delimita la "sombra" del agujero negro; fuertemente mediado por modelos.	Se infiere la masa, el espín y la geometría del entorno del agujero negro; se requiere de simulaciones (GRMHD) y de procedimientos inferenciales mediados que validan los resultados obtenidos, dada la indeterminación en la reconstrucción de la imagen.
Vacíos cósmicos	Evolución de campos de densidad bajo la acción de la gravedad y de la expansión cosmológica; redistribución de la materia en la red cósmica (<i>cosmic web</i>).	Regiones subdensas delimitadas por filamentos y cúmulos; identificadas mediante trazadores (galaxias, flujos externos y galaxias internas, cuya detección depende de la resolución de las observaciones).	Se infieren propiedades de la estructura a gran escala del universo, su dinámica de expansión y su distribución de materia; la identificación y la clasificación de los <i>voids</i> depende de modelos de observación que involucran simulaciones y observaciones que se validan mutuamente.

Este cuadro muestra que la astronomía y la cosmología contemporánea operan simultáneamente con procesos causales, estructuras derivadas y pseudoprocesos inferenciales. Los cuatro

⁷Claves de lectura del cuadro: ■ Ontológico: lo fundamental son procesos causales físicos subyacentes, localizados en el tiempo y el espacio, que implican la transmisión de cantidades conservadas. ■ Fenomenológico: estructuras derivadas observables que "emergen" de la interacción de esos procesos; no se accede a los mismos directamente, sino a patrones, imágenes o configuraciones que dependen de la escala, la perspectiva y el punto de vista (sesgos) del observador. ■ Epistemológico: estas estructuras funcionan como esquemas inferenciales y soportes de validación, los cuales condensan la información causal y permiten reconstruir propiedades del sistema físico mediante observaciones, simulaciones y contraste de modelos.

casos tomados en consideración (el arcoíris, las lentes gravitacionales, la sombra de agujero negro y los vacíos cósmicos) evidencian que la comprensión científica no solo exige identificar lo que ocurre astrofísicamente, sino también interpretar cómo se hacen observables y cómo dichas observaciones permiten inferencias fiables sobre las respectivas dinámicas y procesos subyacentes.

8. Conclusiones

El debate contemporáneo sobre el concepto de causalidad científica revela una profunda diversidad de enfoques filosóficos. Mientras que las teorías propuestas por Salmon y Dowe defienden una concepción productiva y físicamente fundamentada de la causalidad, otras caracterizaciones plantean los límites de toda reducción de la explicación científica a procesos causales. En este contexto, la introducción del concepto de pseudocausalidad indica que el esquema ontológico dominante resulta insuficiente. En particular, según Quezada y Pavez, el análisis de los pseudoprocesos permite afirmar su carácter irreducible dentro de las prácticas científicas. Así, lejos de ser meras ficciones o recursos auxiliares, constituyen mediaciones epistémicas indispensables en la producción, detección e interpretación de datos, especialmente en contextos observacionales altamente mediados por instrumentación y simulaciones computacionales.

Asimismo, reconsiderar criterios clásicos de observabilidad, adoptando un enfoque centrado en propiedades, al estilo de Humphreys, obliga a abandonar toda demarcación rígida entre lo observable y lo inobservable. Ello resulta en una concepción extendida de la observación, en la que los fenómenos astronómicos son accesibles a través de modelos de observación que articulan observaciones y simulaciones, y en los que las configuraciones estructurales, como patrones relacionales de propiedades, codifican información causal relevante. En este sentido, la distinción entre producción causal y restricción estructural no solo ofrece una vía prometedora, sino necesaria para dar cuenta de la pluralidad de capacidades epistémicas presentes en la ciencia astronómica. Este enfoque permite integrar de manera sistemática procesos causales y pseudoprocesos dentro de un mismo marco conceptual, ampliando el concepto de observabilidad e incorporando dimensiones como la escala, la perspectiva y el punto de vista del observador, sin las cuales resulta imposible comprender adecuadamente las prácticas actuales de la astronomía y la astrofísica contemporánea.

A través de los estudios de casos considerados, las estructuras y aspectos procesuales derivados, aun sin constituir procesos autónomos, desempeñan un papel central en dichas prácticas científicas al organizar la información observable y permitir inferencias sobre las dinámicas subyacentes. En este sentido, los vacíos cósmicos, los agujeros negros y las lentes gravitacionales, entre otros ejemplos contundentes, no son meras ausencias, ilusiones o espejismos, sino situaciones y hechos observacionales, epistémicamente fértiles, los cuales vuelven inteligibles los fenómenos y pseudoprocesos involucrados en las variadas representaciones y modelos del universo observable.

Agradecimientos

A los/as evaluadores/as por sus revisiones y sugerencias. Además, a los/as integrantes del grupo de investigación “ModelAR” (CIFYH), del cual formo parte, por sus valiosos aportes y comentarios.

Financiamiento

Obtenido a través del proyecto de investigación “Construcción de modelos científicos: aspectos metodológicos, epistemológicos e históricos” (2023– 2027) (línea CONSOLIDAR), financiado por la Secretaría de Ciencia y Tecnología (SeCyT) de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC).

Referencias

- Azzouni, J. (1997). “Thick Epistemic Access: Distinguishing the Mathematical from the Empirical”. *The Journal of Philosophy*. Vol. 94, No. 9, pp. 472-484.
- Azzouni, J. (2004). “Theory, Observation and Scientific Realism”. *The British Journal for the Philosophy of Science*. Vol. 55, pp. 371-392.
- Banik, I.; Kalaitzidis, V. (2025). “Testing the local void hypothesis using baryon acoustic oscillation measurements over the last 20 yr”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. Vol. 540, No.1, pp. 545-561.
- Barnothy, J.; Barnothy M. F. (1968). “Galaxies as gravitational lenses”. *Science*. Vol. 162, Issue 3851, pp. 348-352.
- Borge, B. J. (2018). “Realismo estructural epistémico, modalidad y leyes de la naturaleza”. *Theoria*. Vol. 33, No. 3, pp. 447-468.
- Borge, B. J. (2020). “Realismo estructural óntico y modalidad”. *Ideas y Valores*. Vol. 69, No. 173, pp. 37-56.
- Bozzoli, M.; Huvelle, X. (2025). “Observaciones y simulaciones en las prácticas astronómicas”. En *Epistemología e Historia de la Astronomía*. Maximiliano Bozzoli, David Merlo y Santiago Paolantonio (eds.), Vol. 2, pp. 17-42.
- Bozzoli, M.; Domínguez, M. (2023). “Aspectos epistemológicos sobre la validación de modelos computacionales en cosmología”. *Revista Argumentos de Razón Técnica*. Vol. 26, pp. 249-273.
- Bozzoli, M.; Paz, D. (2023). “Validación de observaciones y de simulaciones astrofísicas: un enfoque epistemológico”. *Revista Disertaciones*. Vol. 12, No. 1, pp 43-68.
- Bozzoli, M.; Stasyszyn, F. (2020). “Cambios de representaciones visuales en cosmología observacional”. En *Filosofía e Historia de la Ciencia en el Cono Sur: Selección de Trabajos del XI Encuentro*. María de las Mercedes O’Lery; Lucía Federico; Yefrin Ariza (eds.), pp. 123-139.
- Chang, H. (2004). *Inventing Temperature: Measurement and Scientific Progress*. Oxford: Oxford University Press.

- Contessa, G. (2006). "Constructive empiricism, observability and three kinds of ontological commitment". *Studies in History and Philosophy of Science*. Vol. 37, pp. 454-468.
- Contessa, G. (2007). "Scientific Representation, Interpretation, and Surrogate Reasoning". *Philosophy of Science*. Vol. 74, No. 1, pp. 48-68.
- Dowe, P. (2000). *Physical Causation*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Giere, R. N. (1988). *Explaining Science: A Cognitive Approach*. Chicago: University of Chicago Press.
- Giere, R. N. (2004). "How Models Are Used to Represent Reality". *Philosophy of Science*. Vol. 71, No. 5, pp. 742-752.
- Hacking, I. (1989). "Extragalactic Reality: The Case of Gravitational Lensing". *Philosophy of Science*. Vol. 56, No. 4, pp. 555-581.
- Hempel, C.; Oppenheim, P. (1948). "Studies in the logic of explanation". *Philosophy of Science*. Vol. 15.
- Humphreys, P. (2004). *Extending Ourselves: Computational Science, Empiricism, and Scientific Method*. Oxford: Oxford University Press.
- Humphreys, P. (2013). "What are Data About", in *Computer Simulations and the Changing Face of Experimentation*, E. Arnold and J. Durán (eds). Cambridge: Cambridge Scholars Publishing.
- Kitcher, P. (1989). "Explanatory unification and the causal structure of the world". In P. Kitcher & W. Salmon (eds.), *Scientific Explanation*. Minnesota: University of Minnesota Press.
- Knuuttila, T. (2005). *Models as Epistemic Artefacts: Toward a Non-Representationalist Account of Scientific Modeling*. Helsinki: University of Helsinki.
- Kosso, P. (1988). "Dimensions of Observability". *The British Journal for the Philosophy of Science*. Vol. 39, No. 4, pp. 449-467.
- Kosso, P. (2006). "Detecting Extrasolar Planets". *Studies in History and Philosophy of Science*. Vol. 37, pp. 224-236.
- Ladyman, J. (2021). "Ontic Structural Realism and Quantum Mechanics". *Perimeter Institute for Theoretical Physics*. <https://pirsa.org/21050024>
- Ladyman, J.; Ross, D. (2013). "The world in the data". En D. Ross, J. Ladyman & H. Kincaid (Eds.), *Scientific Metaphysics*. pp. 108-150. Oxford University Press.
- Ladyman, J.; Ross, D. (2007). *Every thing must go: Metaphysics naturalized*. Oxford University Press.
- Maxwell, G. (1962). "El Estatus Ontológico de las Entidades Teóricas". *Filosofía de la Ciencia: Teoría y Observación*. L. Olivé y A. R. Pérez Ransanz (trad. y eds.) (1989). México: Siglo XXI Editores – UNAM.
- Psillos, S. (2004). "Tracking the Real: Through Thick and Thin". *The British Journal for the Philosophy of Science*. Vol. 55, pp. 393-409.
- Quezada, P. W, Pavez, F. L. (2011). "Causalidad, pseudocausalidad y medición en física". *Revista de Filosofía de la Universidad de Chile*. Vol. 67, pp. 251-268.
- Quezada, P. W, Pavez, F. L. (2016). "No solo causalidad en el mundo físico: ontología y

- metodología pseudocausal". *Revista de Humanidades de Valparaíso*. Vol. 8, pp. 163-204.
- Salmon, W. C. (1971). "Statistical explanation". In *Statistical Explanation and Statistical Relevance*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press.
- Salmon, W. C. (1984). *Scientific Explanation and the Causal Structure of the World*. Princeton: Princeton University Press.
- Shapere, D. (1993). "Astronomy and Antirealism". *Philosophy of Science*. Vol. 60, No. 1, pp. 134-150.
- Shapere, D. (1982). "El Concepto de Observación en Ciencia y en Filosofía". *Filosofía de la Ciencia: Teoría y Observación*. L. Olivé y A. R. Pérez Ransanz (trad. y eds.) (1989). México: Siglo XXI Editores – UNAM.
- Suárez, M. (2004). "An Inferential Conception of Scientific Representation". *Philosophy of Science*. Vol. 71, No. 5, pp. 767-779.
- Swoyer, C. (1991). "Structural Representation". *Synthese*. Vol. 87, No. 3, pp. 449-508.
- van Fraassen, C. B. (1980). *The Scientific Image*. Oxford: Oxford University Press.
- van Fraassen, C. B. (2002). *The Empirical Stance*. New Haven: Yale University Press.
- Vollmer, S. (2000). "Two Kinds of Observation: Why van Fraassen Was Right to Make a Distinction, but Made the Wrong One". *Philosophy of Science*. Vol. 67, No. 3, pp. 355-365.
- Worrall, J. (1989). "Structural Realism: The Best of Both Worlds?" *Dialectica*. Vol. 43, pp. 99-124.
- Woodward, J. (2003). *Making Things Happen: A Theory of Causal Explanation*. Oxford: Oxford University Press.