

Sobre el Foundations of Physics de Mario Bunge

Gustavo E. Romero ¹

¹ Instituto Argentino de Radioastronomía (IAR), C.C. No. 5, 1894 Villa Elisa, Buenos Aires, Argentina.

Resumen

Mario Bunge, a diferencia de la mayoría de los filósofos profesionales, es también un científico que ha investigado y enseñado en el ámbito de la física teórica. Muchas de sus opiniones e ideas sobre ontología y epistemología se basan directamente en su experiencia como físico. Esto puede verse claramente en su libro *Foundations of Physics*, publicado en 1967. En esta obra Bunge analiza los principios y métodos de la física, sus presupuestos ontológicos, y trata de implementar algo muy similar al programa de axiomatización de Hilbert. El capítulo 2 de este libro contiene una visión sucinta de lo que luego se convertiría en el programa de investigación filosófica que llevaría al *Treatise on Basic Philosophy* (1974-1989), su obra capital. En este artículo ofrezco un análisis del “*Foundations*”, mostrando que el mismo ya contiene muchas de las ideas filosóficas de Bunge, así como una riqueza conceptual que aún hoy no ha sido suficientemente explorada.

Palabras clave: Mario Bunge -- Física -- *Foundations of Physics* -- Epistemología.

En algún lugar de *Otras Inquisiciones*, Jorge Luis Borges evoca una frase de Hudson, donde éste dice que muchas veces en la vida emprendió el estudio de la metafísica, pero siempre le interrumpió la felicidad. Confieso que escasos sucesos han interrumpido mis muchos años de estudio y dedicación a la física. Sin embargo, recuerdo brillantes momentos de felicidad intelectual en una vida a la

que le pueden haber faltado muchas cosas, pero no el pensamiento. Aún hoy me emociono al recordar el deslumbramiento y la dicha que me produjo la lectura de *Foundations of Physics*, de Mario Bunge.

Foundations of Physics, publicado por Springer en 1967 y escrito por Bunge en Friburg, fue un libro pionero y único en muchos sentidos. Pionero por su estilo riguroso tanto desde lo filosófico como desde lo físico. Si bien muchas veces físicos habían escrito sobre filosofía y filósofos sobre física, esta vez el autor estaba en completo dominio de ambos campos de investigación. Único por su alcance (el libro trata de metodología general en filosofía de la ciencia y de todas las teorías principales de la física), profundidad, y rigor (Bunge presentaba en el libro axiomatizaciones rigurosas de todas las teorías que discutía). El libro está lleno de observaciones felices y aclaraciones de toda clase de errores conceptuales que, dado el trasfondo exacto del tratamiento, se vuelven obvios para el lector. Es un libro enormemente generoso en ideas y sugerencias de líneas de investigación. El capítulo segundo incluye un bosquejo de programa de investigación filosófica que Bunge desarrollaría entre 1974 y 1989: un sistema completo de filosofía científica que incluye semántica, ontología, epistemología y ética. En ese capítulo feliz está la semilla de lo que luego sería el monumental *Treatise on Basic Philosophy* (1974-1989), obra de 8 volúmenes y 9 tomos donde Bunge explicita su sistema de filosofía. El *Treatise* acaso sea el proyecto de investigación filosófica más importante del siglo XX y tiene su origen



en el hecho de que al realizar sus investigaciones sobre los fundamentos de la física, Mario Bunge se percató que la filosofía de fondo sobre la cual se debe apoyar la ciencia no estaba adecuadamente desarrollada. Eso engendró un proyecto de filosofía científica completo, que daría extraordinarios frutos.

Luego de *Foundations of Physics*, Bunge continuó desarrollando diferentes aspectos de su filosofía de la física en *Philosophy of Physics* (1973), *Controversias en Física* (1983), en el tomo 7 del *Treatise*, y en *Mind and Matter* (2010). Sus últimos artículos de filosofía de la física, a la fecha de escribir estas líneas (2016), son: “Does the Aharonov–Bohm Effect Occur?” y “Gravitational Waves and Spacetime”, ambos en *Foundations of Science*. Más de 70 años de trabajo en física y filosofía de la física.

Los dos puntos esenciales de la filosofía de la física de Mario Bunge son el realismo epistemológico y el materialismo ontológico. Las teorías científicas representan una realidad que tiene una existencia objetiva e independiente del sujeto. Eso no implica, por supuesto, que en nuestras descripciones de la realidad podamos prescindir de un sistema de referencia. Una descripción de la realidad puede ser perfectamente objetiva y realista, pero relativa a un sistema de referencia. Bunge, en los años 1960, encaró la axiomatización de las teorías mayores de la física, siempre haciendo explícito la existencia de una clase de sistemas de referencia para cada teoría. Estos sistemas no son objetos conceptuales, sino cosas concretas, y ciertamente no deben confundirse con los sistemas de coordenadas que usamos para cuantificar nuestras conceptualizaciones en física. Bunge es muy cuidadoso en señalar que la matemática es un sistema de ficciones formales que utilizamos para representar aspectos de sistemas reales. Nuestras ideas y representaciones de la realidad son las que son matemáticas, no

la realidad misma.

En sus axiomatizaciones, Bunge representa las propiedades de sistemas físicos por medio de funciones, o conjuntos de funciones y a los sistemas como conjuntos. Así, por ejemplo, en relatividad general el espacio-tiempo es representado por una variedad real, 4-dimensional y pseudo-Riemanniana (una clase muy particular de conjunto) y las propiedades del mismo por medio de un conjunto de 10 funciones definidas sobre dicha variedad llamadas métrica. Las propiedades de los sistemas materiales diferentes del espacio-tiempo, se representan por medio de otro conjunto de funciones estructurado en el llamado tensor de energía-impulso. Luego, las leyes de la teoría, son representadas por relaciones entre funciones que determinan restricciones sobre la forma de éstas a través de sistemas de ecuaciones. Como en general las leyes son puramente locales, las ecuaciones son diferenciales. En general, las leyes de la física se representan por ecuaciones integro-diferenciales. De esta forma, la estructura axiomática de las teorías queda caracterizada por tres conjuntos de axiomas: 1) los puramente formales que fijan la forma matemática de la teoría, 2) los semánticos, que relacionan ciertos constructos formales con ítems físicos, y 3) los enunciados de ley, que son los que representan el núcleo de relaciones físicas entre los referentes de la teoría. Bunge fue el primero en señalar la importancia de hacer explícitos los axiomas semánticos a fin de esclarecer las cuestiones de interpretación de las teorías de la física. Para tratar con exactitud los aspectos interpretativos, desarrolló toda una teoría semántica en los dos primeros tomos de su *Treatise*.

El *Foundations of Physics* es el intento más serio que se ha llevado a cabo para implementar algo parecido al programa de Hilbert de axiomatización y exactificación de la física. Las críticas que algunos autores han realizado aduciendo

que el programa es obsoleto debido a los teoremas de incompletitud de Gödel carecen de fundamento. Esas críticas sólo demuestran, en realidad, una incompreensión completa de los teoremas de incompletitud. Los teoremas de incompletitud afirman que 1) ninguna teoría formal capaz de describir la aritmética es a la vez consistente y completa, y 2) la consistencia de una teoría no puede probarse dentro de la misma teoría. En el caso de las teorías de la física, si se las formaliza completa y correctamente, no hay peligro de inconsistencias ya que las teorías no aspiran a la completitud: lo que buscamos en física es la mejor descripción posible de la realidad, no una teoría completa en el sentido formal. Tampoco nos interesa probar la consistencia de nuestras teorías dentro de la propia teoría: todo físico trabaja usando metalenguajes adecuados, aunque no lo sepa...

Por otra parte, es mucho lo que se gana en claridad axiomatizando una teoría, como Bunge explica en detalle en su *Philosophy of Physics* (1973). Por ejemplo, la axiomatización de la mecánica cuántica pone en evidencia que el bendito “observador” de los libros de texto no está en ningún lado. La mecánica cuántica no es “subjetiva”: el mundo no existe, como pensaba Berkeley, porque lo observamos. Es al revés: podemos observarlo porque existe. El observador no desempeña ningún papel en la mecánica cuántica. Bunge ha señalado esto incontables veces, y aún hoy seguimos oyendo sobre la supuesta relación entre la conciencia del observador y la “función de onda” o peor aún, sobre su colapso. Lo siento magufos, divulgadores de medio pelo y fisicastro: la función de onda no “colapsa”. ¿Cómo va a colapsar si es un objeto matemático, esto es, un objeto conceptual? Colapsan los países como el mío, los nervios, y los edificios, pero ¿la función de onda? ¡la función de onda es una función compleja en espacio infinito-dimensional! Bunge mostró con su axiomática que lo que

puede evolucionar, en todo caso, es el sistema cuántico por interacción con su entorno, pero no la función de onda. La ecuación dinámica de la mecánica cuántica se refiere a sistemas físicos, cosas como electrones o fotones. La función de onda, como postuló Born, simplemente da la probabilidad de que el sistema esté en tal o cual estado, cuando la ecuación se resuelve para tal o cual conjunto de condiciones de contorno. La relación con el entorno, Bunge señala correctamente, debe ser no lineal, y no puede por tanto ser descrita por la función de onda que satisface una ecuación lineal. Para estudiar la relación entre el sistema cuántico y el entorno hace falta una teoría cuántica de la medición. Mucho después de que Bunge escribiera el *Foundations*, se desarrolló la teoría de la decoherencia, que muestra como las propiedades cuánticas se pierden rápidamente cuando sistemas de muchas partículas interactúan con sistemas complejos.

En sus libros y artículos, Mario ha demolido muchos mitos populares sobre la mecánica cuántica y sus interpretaciones. Ha señalado, por ejemplo, que las desigualdades de Heisenberg son un teorema, no un principio, y que de incertidumbre (una propiedad de ciertos cerebros), no tienen nada, como nada tiene que ver la observación con ellas, ya que se deducen de la no conmutatividad de los operadores cuánticos y la desigualdad (puramente matemática) de Schwarz. Ha señalado como la función de onda del famoso gato de Schrödinger no existe: lo que existe es un garabato que algunos extraviados escriben en su lugar y a la que atribuyen propiedades cuánticas. Es lo mismo que escriban $\langle \Psi |_{\text{gato}}$ que $\langle \Psi |_{\text{Júpiter}}$ o $\langle \Psi |_{\text{salchicha}}$. $\langle \Psi |$ debe ser una expresión matemática que satisfaga la correspondiente ecuación. En un sistema tan complejo como un gato, las propiedades cuánticas han desaparecido a un nivel de composición apenas por arriba del de una molécula. De allí que



los gatos no estén en superposiciones de estados cuánticos. Aunque su dueño sea Schrödinger.

En obras posteriores (por ejemplo, *Controversias en Física y Mind and Matter*) Bunge se ocupa de la paradoja EPR, las desigualdades de Bell, la supuesta violación del realismo por los experimentos de Aspect y similares, y el llamado entanglement o entrelazamiento cuántico. Bunge siempre nos ofrece lo mismo: la respuesta más sensata que se corresponde al formalismo real de la teoría. Señala, por ejemplo, que la refutación de las desigualdades de Bell no implica que no es válido el realismo, sino que las teorías deterministas con variables ocultas son incompatibles con la suposición de localidad. La mecánica cuántica es claramente no local. Pero eso no implica problema para una interpretación realista, a menos que se tenga una concepción clasicista del realismo, algo que ciertamente no es el caso de la interpretación de Bunge.

Acaso podríamos decir que la interpretación de Bunge es la más directa y simple de todas las propuestas. Podríamos decir que es una interpretación realista no local con una ontología sui generis, sus famosos “cuantones”. Bunge interpreta a los operadores de la mecánica cuántica como objetos matemáticos que representan propiedades físicas de los referentes de la teoría: sistemas cuánticos sui generis. Estos objetos no tienen por qué compartir las propiedades de los sistemas clásicos. Bajo ciertas circunstancias pueden comportarse como si fueran partículas y bajo otras como si fueran ondas, pero no son ni ondas ni partículas, que son objetos clásicos. Mucho menos son ambas cosas a la vez. Los cuantones son objetos cuánticos, singulares, con propiedades cuánticas diferentes de las clásicas. El spin, por ejemplo, no es momento angular intrínseco del sistema cuántico: los sistemas cuánticos no rotan. El spin se parece en algunos

aspectos al momento angular intrínseco de un objeto clásico, pero es una propiedad cuántica. Lo mismo sucede con las demás propiedades, excepto la energía, que sigue siendo la capacidad de cambiar del sistema. La energía, para Bunge, es la única propiedad realmente universal. Es la que comparten todos los existentes. En el dominio cuántico es una propiedad discreta y, consecuentemente, los “cuantones” cambian discretamente.

¿Cómo es posible que un sistema cuántico compuesto, preparado en un cierto estado, permanezca de alguna manera ligado, aún largo tiempo después de haber sido separado, incluso si la separación es tal que hace imposible cualquier interacción directa o causal? ¿Cuál es el origen del entanglement cuántico? Antes de ver cómo responde Bunge, debo remarcar ciertos hechos que suelen soslayarse. 1) El entanglement no es universal (como la acción gravitacional, digamos); ocurre sólo entre sistemas cuánticos que fueron preparados de cierta manera. 2) No implica propagación de energía a una velocidad mayor que la de la luz. 3) No implica un cambio de estado del sistema ni una acción a distancia. 4) No puede usarse para transmitir información.

Veamos un ejemplo de entanglement sencillo. Consideremos una fuente de luz no polarizada que emite fotones en todas direcciones. Supongamos que dos fotones salen en direcciones opuestas. Su polarización total, por la forma que fueron producidos, es nula. Cada uno de los fotones, sin embargo, tiene una polarización igual y opuesta. La mecánica cuántica implica que uno de ellos tiene una probabilidad $\frac{1}{2}$ de tener una polarización (+) y una probabilidad también $\frac{1}{2}$ de tener la polarización opuesta (-) – los fotones tienen sólo dos modos de polarización -. Supongamos que determinamos que la polarización es (-). Entonces, concluimos con probabilidad 1 que el otro fotón tiene polarización (+). Sin embargo, la misma teoría de la mecánica

cuántica predice que si el otro fotón es un sistema independiente, su probabilidad de estar en el modo (+) no es 1 sino $\frac{1}{2}$. Los experimentos muestran que el segundo fotón está siempre en el estado que corresponde a la preparación inicial, independientemente de cuál sea la determinación del estado del primer fotón. El sistema sigue “conectado” de alguna manera.

En realidad, no hay conexión, sino correlación no local: una vez que se ha formado un estado entrelazado, el sistema permanece entrelazado independientemente de la separación espacial de las componentes. ¿Contradice el sentido común? Pues sí. Y no es lo único que lo contradice en el mundo cuántico, lo cual no debería sorprendernos, ya que el sentido común se ha forjado con la experiencia en un mundo diferente, el macroscópico, al que llamamos “clásico”. Cuando especificamos el estado del primer fotón, se especifica el estado del segundo, de acuerdo al sistema inicial. Una vez que una interacción ha destruido el entrelazamiento, las componentes se separan y deja de haber correlaciones. Hago notar que si queremos usar el entrelazamiento para transmitir información más rápido que la luz fracasaremos: no hay forma de que en el momento que se mide la segunda polarización se sepa el valor de la primera. Esa información sólo puede transmitirse a la velocidad de la luz, como siempre. Tampoco hay “trabajo” instantáneo sobre el segundo fotón realizado por el primero. No hay cambio de estado, sino especificación del estado en la segunda determinación. Si hay trabajo sobre el fotón, lo hace el segundo detector, localmente.

Bunge, pues, nos invita a aceptar el mundo real como es: no local, legal (se obedecen las leyes representadas por la mecánica cuántica), e independiente de los sujetos cognoscentes: da lo mismo que el segundo fotón sea registrado por un instrumento o interactúe naturalmente.

Todos estos procesos ocurrían antes de que el ser humano sugiera sobre la tierra, y seguirán ocurriendo mucho después de que haya desaparecido.

La posición de Bunge se ha comparado a veces con la de Sir Karl Popper. Si bien es cierto que Popper, como Bunge, era realista en su interpretación de la mecánica cuántica, pensaba que la función de onda se correspondía a una colección de partículas y no a objetos cuánticos individuales. En ese sentido, la posición de Popper era similar a la del físico americano Leslie E. Ballentine, en su libro *Quantum Mechanics: A Modern Development* (World Scientific, Singapore, 1998). Popper, por otra parte, estaba dispuesto a aceptar que ciertos fenómenos cuánticos tengan una relevancia para explicar la naturaleza de la conciencia, algo por demás inaceptable para Bunge.

La mayor parte de *Foundations of Physics* está dedicado a teorías clásicas de la física, como la mecánica, la electrodinámica, y la teoría general de la relatividad. En el análisis que Bunge realiza de estas teorías pueden vislumbrarse las ideas generales subyacentes a lo que luego conformaría el núcleo de su ontología, expresada en los volúmenes 3 y 4 del *Treatise*. Bunge considera que los componentes del mundo son corpúsculos y campos. La forma de composición de los mismos es diferente: los campos se superponen, mientras que las partículas se yuxtaponen (las clásicas al menos). El análisis que Bunge ofrece de las teorías de campo es particularmente iluminante. Separa claramente el concepto matemático de campos del concepto físico. Un campo matemático es un objeto conceptual que satisface una teoría que incorpora un principio de mínima acción y una densidad lagrangiana. Un campo físico, en cambio, es un objeto real. Bunge distingue tres tipos de teorías de campos en física: teorías de campos puras, materiales y mixtas. Las primeras tienen como referentes objetos físicos que no pueden



ser eliminados por meros cambios en el sistema de referencia adoptado en la formulación de un modelo de la teoría. Los segundos campos, los materiales, representan propiedades de sistemas materiales extendidos. Ejemplos de campos puros son el electromagnético y el gravitacional. Ejemplos de campos materiales, el campo de velocidad de un fluido y el campo de temperaturas de un cuerpo. No es posible eliminar el campo electromagnético o el gravitacional en forma global mediante un cambio de nuestra descripción de la naturaleza. En cambio, todo lo que decimos de los campos materiales podemos decirlo en términos de partículas, al menos en principio. Las teorías de campos mixtas son aquéllas que combinan campos puros con materiales, como por ejemplo el macro-electromagnetismo.

El análisis que hace Bunge del campo electromagnético es notablemente lúcido. Entre otros puntos, señala que teoría no contiene propiamente la hipótesis de que las cargas son fuentes del campo. Estrictamente, la teoría electromagnética es una teoría de las interacciones entre los campos y las partículas cargadas. La hipótesis de que las cargas son fuentes del campo se debe agregar a las ecuaciones de Maxwell a fin de poder descartar las contribuciones avanzadas (determinadas por sucesos futuros) a las soluciones de la ecuación Dalambertiana inhomogénea de campo por medio de la aplicación del principio de causalidad. Esta hipótesis es lógica, ontológica y epistemológicamente independiente del resto de la teoría. Algo similar sucede con la teoría general de la relatividad: la hipótesis de que la materia es la causa de la curvatura del espacio-tiempo (campo gravitacional) es a posteriori. Bunge señala otros puntos escasamente comprendidos en conexión con la relatividad general. Por ejemplo, que la diferenciación entre masa gravitacional e inercial es una mera conjetura, refutada por la experiencia, y de allí que

la identidad de “ambas” masas no es una ley. De hecho, no hay tales masas. Bunge señala además el carácter meramente heurístico del principio de equivalencia (que puede ser derivado como teorema en su axiomática), clarifica que el principio de covariancia general es un enunciado meta-nomológico (o sea un enunciado prescriptivo para la formulación de leyes básicas), la incompletitud de la teoría, el hecho de que no es sólo la materia la que determina la geometría del espacio-tiempo sino la materia más las condiciones iniciales y de contorno¹, y finalmente que la existencia de ondas gravitacionales es compatible con la teoría, pero no es un teorema directo de la misma. Con el descubrimiento de las ondas gravitacionales en 2016, Bunge modificó su visión de la ontología de la relatividad general, admitiendo la identidad del espacio-tiempo y el campo gravitacional (Bunge 2016). Sin embargo, ha mantenido su posición “presentista”, en el sentido de que piensa que sólo los eventos presentes existen, y no así los futuros y pasados (contrariamente a los sostenido por los “substantialistas” y la mayoría de los realistas respecto al espacio-tiempo).

A lo largo de más de 70 años Mario Bunge ha investigado los fundamentos de la física. A diferencia de otros filósofos dedicados a la filosofía de esta ciencia, Bunge ha investigado en física y ha sido profesor universitario de física. Esto le ha dado una visión y una profundidad únicas en este campo. También, en cierta forma, le ha aislado de sus pares, más proclives a las discusiones semánticas. A 50 años de su publicación, *Foundations of Physics* sigue siendo un libro de enorme profundidad y generosidad. Nadie que se acerque a él saldrá con las manos vacías.

¹ Notar que aunque el tensor de energía impulso T_{ab} sea nulo, las ecuaciones de Einstein $R_{ab} - 1/2 R g_{ab} = 0$ admiten soluciones con $g_{ab} \neq 0$. De hecho, ni siquiera cuando el propio tensor de Riemann (formado con derivadas segundas de la métrica) es nulo, el campo desaparece, ya que hay soluciones con $g_{ab} = \text{constante}$.

Referencias del texto y Bibliografía básica de Mario Bunge en física y filosofía de la física¹

1 Se incluyen los artículos y libros citados y otros relevantes al tema discutido en este artículo. La lista es incompleta.

- Bunge, Mario (1939). «Introducción al estudio de los grandes pensadores», Conferencias, III, págs. 105-109 y 124-126.
- (1943). Significado físico e histórico de las ecuaciones de Maxwell, Buenos Aires, Universidad Obrera Argentina.
- (1944a). «Una nueva representación de los tipos de fuerzas nucleares», Revista de la Facultad de Ciencias Físicomatemáticas, págs. 221-239.
- (1944b). «A new representation of types of nuclear forces», Physical Review, 65, pág. 249.
- (1945). «Neutron-proton scattering at 8.8 and 13 MeV», Nature, 156, pág. 301.
- (1951a). «What is chance?», Science and Society, 15, págs. 209-231.
- (1955a). «A picture of the electron», Nuovo Cimento, ser, X, 1, págs. 977-985.
- (1955b). «Strife about complementarity», British Journal for the Philosophy of Science, 6, págs. 1-12 y 141-154.
- (1955c). La edad del universo, La Paz, Laboratorio de Física Cósmica.
- (1955d). «Exposición y crítica del principio de complementaridad», Notas del Curso Interamericano de Física Moderna, págs. 27-36, La Paz, Laboratorio de Física Cósmica.
- (1956b). «A survey of the interpretations of quantum mechanics», American Journal of Physics, 24, págs. 272-286.
- (1957). «Lagrangian formulation and mechanical interpretation», American Journal of Physics, 25, págs. 211-218.
- (1959b). Causality: The Place of the causal Principles in Modern Science, Cambridge (Mass.), Harvard University Press.
- (1960a). «Levels: A semantical preliminary», Review of Metaphysics, 13, págs. 396-406.
- (1960b). «The place of induction in science», Philosophy of Science, 27, págs. 262-270.
- (1960c). Cinemática del electrón relativista, Tucumán, Universidad Nacional de Tucumán
- (1961). «Laws of physical laws», American Journal of Physics, 29, págs. 518-529.
- (1962a). «Cosmology and magic», The Monist, 44, págs. 116-141.



- (1966). «Mach's critique of Newtonian mechanics», *American Journal of Physics* 34, págs. 585-596.
- (1967a). *Foundations of Physics*, Berlín/Heidelberg/Nueva York, Springer-Verlag.
- (1967b). *Scientific Research*, Berlín/Heidelberg/Nueva York, Springer-Verlag.
- (1967c). «Physical axiomatic», *Reviews of Modern Physics*, 39, págs. 463-474.
- (1967d). «Analogy in quantum mechanics: From insight to nonsense», *British Journal for the Philosophy of Science*, 18, págs. 265-286.
- (1967e). *Delaware Seminar in the Philosophy of Science*, Berlín/Heidelberg/Nueva York, Springer-Verlag.
- (1967f). «The structure and content of a physical theory». In M. Bunge, Ed., *Delaware Seminar in the Foundations of Physics*, pp. 15-27. Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag, 1967.
- (1967g). «Quanta y filosofía», *Crítica*, 1 (3), págs. 41-64.
- (1968a). «Physical time: The objective and relational theory», *Philosophy of Science*, 35, págs. 355-388.
- (1969a). «Corrections to Foundations of Physics: Correct and incorrect», *Synthese*, 19, págs. 443-452.
- (1970). «Problems concerning inter-theory relations», en P. Weingartner y G. Zecha (comps.), *Induction, Physics and Ethics*, Dordrecht, Reidel, págs. 285-315.
- (1973a). *Philosophy of Physics*. Dordrecht, Reidel.
- (1973b). *Method, Matter and Model*. Dordrecht, Reidel.
- (1974c). *Treatise on Basic Philosophy*, vol. 1, *Sense and Reference*, Dordrecht/Boston, Reidel.
- (1974d). *Treatise on Basic Philosophy*, vol. 2, *Interpretation and Truth*, Dordrecht/Boston, Reidel.
- (1977c). *Treatise on Basic Philosophy*, vol. 3, *The Furniture of the World*, Dordrecht/Boston, Reidel.
- (1979c). *Treatise on Basic Philosophy*, vol. 4, *A World of Systems*, Dordrecht/Boston, Reidel.
- (1983c). *Treatise on Basic Philosophy*, vol. 5, *Exploring the World*, Dordrecht, Reidel.
- (1983d). *Treatise on Basic Philosophy*, vol. 6, *Understanding the World*, Dordrecht, Reidel.
- (1985a). *Treatise on Basic Philosophy*, vol. 7, parte I, *Formal and Physical Sciences*, Dordrecht, Reidel.
- (1985b). *Treatise on Basic Philosophy*, vol. 7, parte II, *Life Science, Social Science, and*

- Technology,
Dordrecht, Reidel.
- (1989e). *Treatise on Basic Philosophy*, vol. 8, *The Good and the Right*, Dordrecht/Boston, Reidel.
 - (2002a). «Twenty-five centuries of quantum physics: From Pythagoras to us, and from subjectivism to realism», *Science and Education* 12, págs. 445-466.
 - (2002b). «Quantons are quaint but basic and real», *Science and Education*, 12, págs. 587-597.
 - (2003b). «Velocity operators and time energy relations in relativistic quantum mechanics», *International Journal of Theoretical Physics*, 42, págs. 135-142.
 - (2006). *Chasing Reality: Strife over Realism*, Toronto, Toronto University Press.
 - (2010). *Matter and Mind*, Boston Library in the Philosophy of Science, n° 287.
 - (2015). «Does the Aharonov–Bohm Effect Occur?», *Foundations of Science*, 20, Issue 2, págs. 129–133.
 - (2016). «Gravitational Waves and Spacetime», *Foundations of Science*, en prensa.
 - y Kálnay, Andrés J. (1969). «A covariant position operator for the relativistic electron», *Progress of Theoretical Physics*, 42, págs. 1.445-1.459.
 - y— (1983a). «Solution to two paradoxes in the quantum theory of unstable systems», *Nuovo Cimento*, B77, págs. 1-9.
 - y— (1983b). «Real successive measurements on unstable quantum systems take non-vanishing time intervals and do not prevent them from decaying», *Nuovo Cimento*, B77, págs. 10-18.
 - y Garcia Maynez , A. (1977). «A relational theory of physical space», *International Journal Theoretical Physics*, 15, págs. 961-972.