

# SALVAR LAS APARIENCIAS, ANTICIPAR EXPERIENCIAS Y LA META DE LA TEORIZACIÓN CIENTÍFICA

Andrés RIVADULLA, a. H. Prof.

Proyecto FFI2014-52224-P del Ministerio de Economía y Competitividad del Reino de España y Grupo de Investigación Complutense 930174

<https://andresrivadulla.academia.edu>  
[arivadul@ucm.es](mailto:arivadul@ucm.es)

SEMINARIO DEL DEPARTAMENTO DE LÓGICA Y FILOSOFÍA TEÓRICA  
Sesión del 24 de Abril de 2018

## I. MI INTENCIÓN EN ESTA PRESENTACIÓN

- Mi objetivo es presentar la idea de que la ciencia no sólo da cuenta de los hechos de experiencia sino que también persigue la innovación teórica, que es una tarea igualmente importante.
- La filosofía debe reconocer que la ciencia contemporánea, particularmente la física, además de explicar o salvar los fenómenos, también anticipa resultados teóricos innovadores, a veces inesperados y siempre útiles para el desarrollo cultural, científico y humano.

## II. LOS TRES ELEMENTOS PRINCIPALES DE MI ARGUMENTO. O DE QUÉ TRATA MI PRESENTACIÓN

- **1.** La primera tarea encomendada históricamente a la ciencia es dar cuenta de los hechos de la experiencia.

Después de dos milenios y medio, sigue siendo una cuestión de debate filosófico si esta tarea debe consistir en (i) **explicar** las observaciones, es decir, hacer explícitas las razones de las cosas, o (ii) **salvar** las apariencias, es decir, ajustar las observaciones a un teoría.

En el primer caso, todavía está en discusión si la **explicación científica** tiene que ser **causal** o no. **En esta presentación, argumentaré que no lo es.**

- **2.** Pero cuestionar la existencia de explicaciones causales no significa renunciar a explicaciones en absoluto: La alternativa es la **explicación teórica**, es decir, la explicación por referencia a marcos teóricos, que presento como la **tercera vía**, y ayuda a aliviar la tensión entre los partidarios de la explicación causal y los de salvar los fenómenos.

- **3.** Hay además un componente principal de la ciencia al que la filosofía contemporánea no le ha prestado la atención que merece. Lo llamo **innovación teórica** y consiste en idear

propuestas inesperadas, a veces sorprendentes y, en todo caso, útiles para el avance de la ciencia y la cultura.

### III. EXPLICACIÓN CIENTÍFICA Y EXPLICACIÓN CAUSAL. HACIENDO UN POCO DE HISTORIA (I)

- Aristóteles: En *Metafísica*, Libro V, Cap. 2, sostiene que las causas “son aquello de donde provienen las cosas” [“they are that out of which these [things, AR] respectively are made” (*The Complete Works of Aristotle*. Edited by Jonathan Barnes, Vol. II, Princeton Univ. Press, 1985)]
- En *Segundos Analíticos* Aristóteles en 94<sup>a</sup>20 afirma: “creemos tener ciencia cuando sabemos la causa.” (*Tratados de Lógica (Órganon)*, Vol. II. Edición de Miguel Candel, Madrid: Gredos) [“we understand something when we know its explanation.” (Jonathan Barnes, *Posterior Analytics*, Oxford: Clarendon Press, 1975)]
- En 90<sup>a</sup>5-10 dice Aristóteles que cuando preguntamos algo en realidad estamos inquiriendo la causa de ese algo: “¿Se eclipsa? <quiere decir>: ¿hay alguna causa <del eclipse> o no?”. -¿Por qué es el eclipse, o por qué se eclipsa la luna? – Porque falta la luz al interponerse la tierra”
- Y añade (15): “es evidente que es lo mismo *qué es y por qué es*. – ¿Qué es un eclipse? – Una privación de la luz de la luna por la interposición de la tierra. Y en (30): “conocer el *qué es* es lo mismo que conocer *por qué es*.” En 93<sup>a</sup>5 reitera que “es lo mismo saber *qué es* <una cosa> y saber la causa de si es”.
- En esto la filosofía actual de la ciencia discreparía de Aristóteles. En efecto, para Hempel (1965: 245) “To explain the phenomena in the world of our experience, to answer the question ‘why?’ rather than only the question ‘what?’ is one of the foremost objectives of empirical science.”

### IV. ¿Es causal la explicación Newtoniana de las Leyes de Kepler? ALTERNANDO POSICIONES OPTIMISTAS Y ESCÉPTICAS EN LA HISTORIA DE LA FILOSOFÍA (II)

- Newton (1729, *Rules of Reasoning in Philosophy*, Rule I): “*We are to admit no more causes of natural things than such as are both true and sufficient to explain their appearances.*”
- Berkeley, Thesis number 35 of *De Motu* (1992: 89): “it is the concern of the physicist or mechanic to consider only the rules, not the efficient causes, of impulse or attraction, and, in a word, to set out the laws of motion: and from the established laws to assign the solution of a particular phenomenon, but not an efficient cause.”
- Herschel (1830), p. 302: “In this great work [*Principia*, A.R.], Newton shows all the celestial motions known in his time to be consequences of the simple law, that every particle of matter attracts every other particle in the universe with a force proportional to the product of their masses directly, and the square of their mutual distance inversely, and is itself attracted with an equal force.”
- Comte (1998), pp. 25-26: “Before Newton’s admirable discovery, the celestial phenomena were connected to one another, to a certain degree, by Kepler’s three great laws. But this

connection, though infinitely precious, was necessarily very imperfect; for it left entirely independent of each other the phenomena connected with two different laws.” [Comte (1998), p. 393]

•¿Qué es lo que, en opinión de Comte, *explica* los movimientos planetarios? La respuesta es contundente : “we say that the general phenomena of the universe are explained, as far as they can be, by the law of Newtonian gravitation.”

#### V. ¿Es causal la explicación Newtoniana de las Leyes de Kepler? ALTERNANDO POSICIONES OPTIMISTAS Y ESCÉPTICAS EN LA HISTORIA DE LA FILOSOFÍA (III)

•Whewell (1847), p. 98: “physical astronomy may well be taken as a standard in estimating the value and magnitude of the advance from the knowledge of phenomena to the knowledge of causes.”

•Clifford (1955), p. 243: “We do not know *why* the presence of one body tends to change the velocity of another; *to say that it arises from the force resident in the first body acting upon the matter of the moving body is only to slur over our ignorance.* All that we do know is that the presence of one body may tend to change the velocity of another, and that, if it does, the change can be ascertained from experiment, and obeys the above laws.”

•Mach (1959), pp. 335-336: “when Newton gives a ‘causal explanation’ of the planetary motions,..., he is only pointing out or describing facts, which, although by a roundabout path, yet have been reached by observation.” En conclusión: “explanation is nothing more than a description in terms of elements. Every particular case can then be put together out of spatial and temporal elements, the relations between which are described by equations.”

•Pearson (1911), pp.116-117 y 118: “If force be looked upon as the cause of change,..., then we have no means of dealing with force. (...) Force will not, therefore, aid us in our search for a scientific conception of *cause*.”

#### VI. ¿Es causal la explicación Newtoniana de las Leyes de Kepler? MILL, EINSTEIN Y HEMPEL AL RESPECTO (IV)

•Mill (1970), pp. 303-304: “it was very reasonable deemed an essential requisite of any true theory of the **causes** of the celestial motions that it should lead by deduction to Kepler’s laws; which, accordingly, the Newtonian theory did.”

•Einstein (1973), p. 254: “Kepler’s empirical laws of planetary movement,...,confronted him [Newton, A.R.], and demanded explanation. These laws gave, it is true, a complete answer to the question of how the planets move round the sun ... But these rules do not satisfy the demand for **causal** explanation.”

•Hempel (1965), pp. 173-174: “the principles of Newtonian mechanics...explain certain ‘general facts’, i.e., empirical uniformities such as Kepler’s laws of planetary motion; for the latter can be deduced from the former.”

#### VII. DERIVACIÓN DE LA 3ª LEY DE KEPLER EN EL CONTEXTO DE MN

•Para su deducción, simplemente se trata de imaginar un sistema binario que consiste en un cuerpo de masa  $M$  y otro de masa  $m$  separados por una distancia  $r$  ( $a$  en la fórmula final) entre los cuales existe un equilibrio entre la atracción gravitacional  $F = G_N \frac{Mm}{r^2}$

y la fuerza centrífuga  $F = m \times a_n = m \times \omega^2 r = m \times \left(\frac{2\pi}{P}\right)^2 r$

Expresamos este balance como  $G_N \frac{M}{r^2} = \frac{4\pi^2}{P^2} r$

del que deriva la fórmula de Kepler:  $P^2 = \left(\frac{4\pi^2}{G_N M}\right) a^3$

## VIII. LA GRAN CUESTIÓN

¿Ofrece esta *explicación teórica* de la Tercera Ley de Kepler en el contexto de la Mecánica Celeste Newtoniana una explicación causal de los movimientos planetarios? ¿Tiene razón Stuart Mill cuando afirma que esta explicación es causal?

•**La respuesta es: ¡decididamente no!** Dos razones:

•**Primera:** La tercera ley de Kepler también es derivable en el contexto de la teoría general de la relatividad (GRT) y, parafraseando a Mill, debería admitirse como muy razonable considerar un *requisito esencial* de cualquier teoría verdadera de las causas de los movimientos celestes que condujera *por deducción* a las leyes de Kepler; que, es lo que la teoría de Einstein también hace.

•En consecuencia: GRT también sería una verdadera teoría de las causas de los movimientos celestes, y tendríamos dos explicaciones causales diferentes, la Newtoniana y la Einsteiniana sobre este fenómeno.

•**Segunda:** ¡NM y GRT son incompatibles entre sí!, **tanto** a nivel de sus respectivos postulados fundamentales: “la imagen [relativista] del Universo pseudo-euclidiano tetradimensional contradice la del Universo euclidiano tridimensional newtoniano” (Rivadulla 2016: 529) **como** a nivel de las entidades teóricas que se niegan mutuamente: según GRT, la gravedad no es el resultado de fuerzas reales, sino de la curvatura del espacio-tiempo; no hay fuerzas gravitatorias y los objetos “flotan” libremente, siguiendo la geometría del espacio-tiempo.

•**¡Dos explicaciones causales incompatibles entre sí es algo insoportable para la racionalidad científica!**

•Parece pues razonable renunciar a *explicaciones causales* en física teórica.

## IX. *Apparentias salvare*: ¿HA DE SER ÉSTA LA TAREA ALTERNATIVA DE LA CIENCIA TEÓRICA?

•Para Platón, desde luego.

.De hecho, según Duhem (1969: 5), citando el *Comentario* de Simplicio, Platón planteó la siguiente cuestión: “Qué movimientos circulares, uniformes y perfectamente regulares, hay que admitir como hipótesis para que sea posible *salvar las apariencias* que presentan los planetas?”

.Según Duhem (op.cit 5-6): “El objeto de la astronomía se define aquí con la mayor claridad: la astronomía es la ciencia que combina movimientos circulares y uniformes para producir un movimiento resultante como el de las estrellas. Cuando sus construcciones geométricas le asignan a cada planeta un camino que se ajusta a su trayectoria visible, la astronomía ha alcanzado su objetivo, porque *sus hipótesis han salvado las apariencias*.”

Y PARA MUCHOS OTROS, TAMBIÉN:

.Ptolemeo (*Almagesto*, Book XIII, p. 429) afirma: “it is proper to try and fit as far as possible the simpler hypotheses to the movements in the heavens; and if this does not succeed, then any hypotheses possible.” Ya en Book III, p. 80-81, Ptolemeo consideraba “it entirely proper to explain the appearances by the simplest hypotheses possible, so long as nothing perceptible appears contrary to this deduction.”

.Incluso Rheticus (1959: 136) atribuye a su ‘maestro’ Copérnico “that the motion of the earth could produce most of the appearances in the heavens, or at any rate save them satisfactorily.”

.El cardenal Bellarmino aconsejó prudentemente a Foscarini and Galileo “contentarse con hablar *ex suppositione* y no absolutamente, como siempre he creído que ha hablado Copérnico. Porque decir que, suponiendo que la Tierra se mueva y el Sol esté quieto, se *salvan todas las apariencias* mejor que con poner las excéntricas y epiciclos está muy bien dicho y no hay peligro ninguno, y esto basta al matemático.” (Cortés Pla (1952: 109)

.El español Sebastián Izquierdo en su *Pharus Scientiarum*, 1659, afirma: “Como esto es así, depende de los astrónomos ver cómo están constituidos los orbes celestiales, de modo que estos fenómenos puedan salvarse.”

.Para Duhem (1969: 117) “the hypotheses of physics are mere mathematical contrivances devised for the purpose of saving the phenomena.”

.Y Bas van Fraassen (1980: 4) afirma categóricamente que “the belief involved in accepting a scientific theory is only that it ‘saves the phenomena’, that is, correctly describes what is observable”.

## X. SALVAR LOS FENÓMENOS Y ANTICIPAR NOVEDADES, EXPLICACIÓN E INNOVACIÓN

Pero, a mi entender, la metodología científica no puede contentarse exclusivamente con salvar los fenómenos. Si lo hiciera, dejaría de dar cuenta **completa** de la práctica científica

•Si la ciencia estuviese meramente preocupada por lo observable, tendríamos que suponer que carece de la capacidad creativa, anticipadora de desarrollos teóricos novedosos, a veces sorprendentes, generalmente insospechados, y siempre útiles para el progreso científico.

•¿Podemos aceptar esta visión de la ciencia? Definitivamente no.

•**La innovación teórica es, junto con la capacidad de dar cuenta de las observaciones, la tarea más importante de la ciencia.**

**Cada anticipación debe cumplir los requisitos de novedad y utilidad teórica.**

- La forma más frecuente de canalizar la creatividad científica es a nivel interteórico.
- Es por eso que en adelante me centro en la **preducción** teórica.

## XI. PREDUCCIÓN TEÓRICA

• La **preducción** es la forma de razonamiento en virtud de la cual, por deducción matemática compatible con el análisis dimensional, la combinación de resultados previamente aceptados – pero no necesariamente como verdaderos – de diferentes teorías y/o disciplinas de la física, permite la **anticipación** de nuevos productos teóricos, que deberán someterse al juicio de la experiencia.

• El razonamiento productivo sirve tanto para la **innovación** como para la **explicación** en la metodología de la física.

• Y para ilustrar este punto de vista presento a continuación dos ejemplos, uno de cada caso: el descubrimiento innovador del comportamiento ondulatorio-corpúscular de la materia por De Broglie en microfísica, y la explicación teórica de las supernovas en astrofísica.

## XII. LA PREDUCCIÓN AL SERVICIO DE LA INNOVACIÓN TEÓRICA

Para llegar a su propuesta De Broglie tiene que combinar tres teorías: teoría de ondas, teoría de la relatividad especial y física cuántica.

El primer concepto importante es el de *velocidad de fase*. Para llegar a él necesitamos suponer una onda sinusoidal monocromática  $y(x,t) = A(\sin kx - \omega t)$  con frecuencia angular  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  y  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ . Pues bien, la velocidad a la que valles y crestas se

propagan se denomina precisamente *velocidad de fase* u que se define como:  $u = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k}$ .

Pero si interfieren ondas monocromáticas de  $\lambda$  distinta que se propagan en la misma dirección, la onda resultante envolvente deja de ser sinusoidal, y se propaga con una velocidad  $v = \frac{d\omega}{dk}$ , que se denomina *velocidad de grupo*.

Pues bien, supongamos una partícula relativista cuya energía total, tal como la da la teoría especial de la relatividad, es  $E = \gamma mc^2$ . Pero, si asumimos hipotéticamente que el comportamiento ondulatorio-corpúscular de la radiación postulado por Einstein es también extensible a las partículas materiales, la física cuántica de Planck proporciona la fórmula correspondiente de la energía:  $E = h\nu$ . Igualando ambas expresiones tenemos que  $\nu = \frac{\gamma mc^2}{h}$ . Ahora ya es cuestión de operar matemáticamente.

Obviamente, a partir de la definición de velocidad de fase, obtenemos que  $\lambda = uT = \frac{u}{\nu} = \frac{uh}{\gamma mc^2}$ . Ahora bien, De Broglie deduce que  $u = \frac{c^2}{v}$ . Luego, sustituyendo en la

expresión anterior el valor de u tendremos  $\lambda = \frac{c^2 h}{\gamma mc^2 v} = \frac{h}{\gamma mv} = \frac{h}{p}$ , expresión que pone de

manifiesto el comportamiento ondulatorio de la materia, e. d. la existencia de las llamadas ondas de materia u *ondículas*.

### XIII. EXPLICACIONES TEÓRICAS

Antes hablé de la *explicación* de la 3ª Ley de Kepler, por deducción en el contexto de la mecánica celeste Newtoniana, como una *explicación teórica* de los movimientos planetarios.

En física damos una *explicación teórica* de un evento cuando y sólo cuando la expresión matemática del hecho en cuestión se recupera deductivamente en un marco teórico dado.

Susceptibles de explicación teórica también son las leyes teóricas e incluso las teorías propiamente dichas.

Ejemplos de explicación teórica serían la deducción en el contexto del modelo atómico de Bohr de la fórmula empírica de Balmer, o la explicación de la ley de radiación de Planck en el marco de la mecánica estadística cuántica de Bose-Einstein (Rivadulla 2005: 170-172 y 175-177), entre muchos otros.

En concreto, estas explicaciones son *intrateóricas*, es decir, ocurren en el marco de una única teoría. La explicación científica coincide así con la derivación del explanandum en un contexto teórico dado, siguiendo el modelo deductivo-nomológico de Popper-Hempel.

Por lo tanto, podríamos considerarla asociada con la metodología de salvar los fenómenos.

### XIV. LA PREDUCCIÓN TEÓRICA AL SERVICIO DE LA EXPLICACIÓN CIENTÍFICA

•La astrofísica contemporánea cuestiona seriamente la idea de que la ciencia solo trata con observables:

Objetos y fenómenos celestes tales como atmósferas e interiores estelares, novas y supernovas, enanas blancas, estrellas de neutrones, agujeros negros, etc. cuyos procesos internos, naturalmente, no son observables, quedarían sin explicación.

•Para tratar con ellos, los astrofísicos construyen **modelos teóricos**. Sin embargo, dado que no existe una teoría astrofísica, estos modelos provienen de la combinación de resultados aceptados de la mayoría de las teorías y disciplinas de la física, por aplicación del razonamiento *preductivo*.

•Las *explicaciones* que estos modelos proporcionan son, por lo tanto, *interteóricas*.

### XV. UN MODELO TEÓRICO DE SUPERNOVA CONSTRUIDO PREDUCTIVAMENTE PARA DAR CUENTA DE LAS OBSERVACIONES (I)

•Una supernova debió aparecer en época de Hiparco alrededor del 125 a.C. Tycho Brahe la menciona.

•Otra fue observada por astrónomos chinos en el año 1054; su remanente es la nebulosa Cangrejo en la constelación de Tauro, que aún se expande con una velocidad decreciente de alrededor de  $1400 \text{ kms}^{-1}$ .

•Y, naturalmente, la supernova de 1572, que fue observada por Landgrave Wilhelm IV, Michael Maestlin, Thomas Digges, Jerónimo Monosius en España y muchos otros. Varios trabajos fueron dedicados a ella. El más importante, *De Nova Stella* de Tycho Brahe, 1573.

•El proceso que da lugar a una supernova es el siguiente: 1. Colapso del núcleo de hierro de una estrella masiva; 2. Generación de una onda de choque y 3. Eyección del material de la estrella.

•La columna vertebral de este proceso la constituyen cadenas de reacciones nucleares, que comienzan con la conversión de hidrógeno en helio-4 a través de cadenas protón-protón o, en estrellas masivas, a través del ciclo CNO.

•Mediante el llamado proceso triple alfa (tres núcleos de helio-4), el helio se convierte en carbono y el carbono en oxígeno, y si la estrella es lo suficientemente masiva, temperaturas cercanas a  $10^8$  y  $10^9$  K producen elementos aún más pesados. La producción de un núcleo de hierro es el resultado final de las reacciones nucleares que tienen lugar dentro de las estrellas masivas.

•La imagen del interior estelar es la de una estructura de capas similar a la de una cebolla en la que, a partir de la capa externa, formada por H, otras capas internas se suceden entre sí: He, C, O, Si, Fe.

## **XVI. UN MODELO TEÓRICO DE SUPERNOVA CONSTRUIDO PREDUCTIVAMENTE PARA DAR CUENTA DE LAS OBSERVACIONES (II)**

•Los pasos que culminan el proceso son los siguientes:

•1. Temperaturas del orden de  $10^9$  K y densidades de  $8 \times 10^{14} \text{ gcm}^{-3}$  producen la *fotodesintegración* del Fe y He con producción de neutrones y neutrinos que escapan de la estrella y el núcleo colapsa rápidamente.

•2. El núcleo interno rebota, enviando ondas de presión en forma de ondas de choque.

•3. Las ondas de choque se propagan hacia la superficie de la estrella arrastrando a las otras capas de la cebolla.

•4. El espectáculo final es una luminosidad de aproximadamente  $10^9$  veces la luminosidad solar, visible a plena luz del día.

•5. Dependiendo de la masa inicial de la estrella, los remanentes de una supernova pueden ser una estrella de neutrones o un agujero negro. (Cf. Ostlie & Carroll 1996, 513-514)

## **XVII. EXPLICACIONES TEÓRICAS vs EXPLICACIONES CAUSALES**

•Intentar descubrir la causa de una explosión de supernova es un ejercicio de ingenuidad en física teórica.

•Porque no podemos pretender que un modelo teórico nos dé la verdad, toda la verdad y nada más que la verdad de lo que sucede en todas y cada una de las explosiones de supernova.

•De hecho, la causa de una explosión de supernova se disemina en una multitud de procesos diferentes, de los cuales el *modelo teórico de supernova* solo incluye aquellos que



parecen estar sucediendo sucesivamente o al mismo tiempo, para tratar de entender el fenómeno tentativamente.

•De nuevo la misma recomendación anterior (En LA GRAN CUESTIÓN, pero por razones diferentes): En física, parece razonable *abandonar la búsqueda de explicaciones causales en favor de la de explicaciones teóricas.*

## **XVIII. CONCLUSIÓN: EXPLICACIÓN CIENTÍFICA E INNOVACIÓN TEÓRICA VAN DE LA MANO**

•La explicación teórica es un proceso complejo en el que, generalmente, a través de la participación de diferentes teorías, el fenómeno estudiado se considera razonablemente 'comprendido'.

•La *explicación científica* no es concebible sin la *innovación teórica* que implica la construcción *more productivo* de *modelos* adecuados al fenómeno a explicar. Y viceversa:

•1. La *innovación revolucionaria* de De Broglie ofrece una *explicación teórica* de la difracción de las partículas materiales: Según De Broglie (1941: 27-28) "Mr. Davisson and Germer,..., were honoured to have discovered in 1927 the existence of the diffraction of electrons by crystals. ...Thus was established the existence of this beautiful phenomenon whose simple announcement, a few years before, would have provoked the incredulity of the physicists. And so was provided a magnificent direct confirmation [y por tanto explicación, A.R.] of the existence of a double corpuscular and undulatory aspect of the electron and of the accuracy of the quantitative formulas proposed by wave mechanics to express the link between the two faces of this double aspect."

•2. *La explicación teórica es innovadora*: la explicación de las explosiones de supernova pone 'al descubierto' la estructura interna de las estrellas supermasivas.

**Explicación e innovación son la meta de la teorización científica. Son las dos caras de la actividad teórica.**

### **Bibliografía**

Aristotle (1975). *Posterior Analytics*. Translated by J. Barnes. Oxford: Clarendon Press.

Berkeley, G. (1992), *De Motu*. Edited and translated by Douglas M. Jesseph. Dordrecht: Kluwer. First edition, 1721.

De Broglie, L. (1941), *Continu et Discontinu en Physique Moderne*. Paris: Albin Michel

Clifford, W. K. (1955). *The Common Sense of the Exact Sciences*. New York: Dover Publications. First published in 1885

Comte, A. (1998), *Cours de Philosophie Positive*. Presentation et notes par Michel Serres, François Dagognet, Allal Sinaceur. Paris: Hermann.

Duhem, P. (1969), *To Save the Phenomena. An Essay on the Idea of Physical Theory from Plato to Galileo*. Chicago: University Press.

Einstein, A. (1973): "The Mechanics of Newton and their Influence on the Development of Theoretical Physics". In A. Einstein, *Ideas and Opinions*. London: Souvenir Press Ltd., pp.253-261.

- Hempel, C. G. (1965). *Aspects of Scientific Explanation and Other Essays in the Philosophy of Science*. New York: Free Press, 2. print.
- Herschel, J. (1830). *A Preliminary Discourse on the Study of Natural Philosophy*. Chicago: Univ. Press, 1987. (Facsimile edition)
- Mach, E. (1959). *The Analysis of Sensations and the Relation of the Physical to the Psychical*. New York: Dover. Originally published in 1886
- Mill, J. S. (1970). *A System of Logic Ratiocinative and Inductive*. London: Longman
- Newton, I. (1729), *Principia*. Vol. II: *The System of the World*. Translated into English by Andrew Motte in 1729. Translation revised by Florian Cajori. Berkeley: Univ. of California Press, 1934
- Ostlie, D. & Carroll, B. (1996). *Modern Stellar Astrophysics*. Reading, MA: Addison-Wesley Publ. Co., Inc.
- Pearson, K. (1911). *The Grammar of Science*. First Edition 1892. New York: Meridian Library edition, second printing 1960.
- Rheticus (1959), *Narratio Prima*. In Edward Rosen (ed.), *Three Copernican Treatises*. New York: Dover Publications.
- Rivadulla, A. (2005): "Theoretical Explanations in Mathematical Physics". In G. Boniolo *et al.* (eds.), *The Role of Mathematics in Physical Sciences*, 161-178. Dordrecht: Springer.
- Rivadulla, A. (2016): "Models, Representation and Incompatibility. A Contribution to the Epistemological Debate on the Philosophy of Physics". In J. Redmond *et al.* (eds.), *Epistemology, Logic and the Impact of Interaction*. Switzerland: Springer, 521-532.
- Van Fraassen, B. (1980), *The Scientific Image*. Oxford: Clarendon Press.
- Whewell, W. (1847). *The Philosophy of the Inductive Sciences*. Part One and Part Two. London: Frank Cass and Co. Ltd, Second Edition.