



Editorial de la
Universidad Tecnológica Nacional
U.T.N. - Argentina

De GALILEO a DIRAC: la evolución del método científico en la visión de Paolo Budinich.

Walter J. D. COVA

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Rioja,
Departamento Ingeniería Electrónica.
San Nicolás de Bari 1100 – CP(5300) La Rioja – Argentina.
Junio de 2010.

Resumen. Tras una apretada síntesis de la biografía del Prof. Dr. Paolo Budinich, este trabajo se ocupa de presentar y analizar su pensamiento respecto de la evolución del método científico y la interrelación de la física con la matemática, destacando la particular importancia que reviste la influencia de P.A.M. Dirac en la historia de la física contemporánea.

Palabras clave: método científico, filosofía de la ciencia, matemática, física contemporánea.

Introducción.

Paolo Budinich, nacido en 1916 en Lussingrande, localidad de la isla dalmata de Lussino, del grupo que los antiguos denominaban Absírtides –a las que el poeta D’Annunzio cantó como “las islas de piedra a las que los olivos vuelven de plata”–, en el seno de una familia de navegantes famosos y prestigiados educadores, ha sido el fundador en Trieste (Italia) en 1963 junto con **Abdus Salam** del *International Centre for Theoretical Physics* (ICTP), dependiente de la *International Agency for Atomic Energy* (IAAE) perteneciente a las Naciones Unidas.

P. Budinich cursó física experimental en la Escuela Normal Superior de Pisa (Italia), donde obtuvo su doctorado en 1939 con una tesis sobre espectroscopía, y participó de la II Guerra Mundial tanto en la marina como en la fuerza aérea italianas. Fue prisionero de guerra en Estados Unidos del ‘43 a 1945. Regresó a Italia y se integró al Instituto de Física de la Universidad de Trieste, a partir de lo cual se iniciaron sus actividades en pro de la constitución del ICTP.

Luego de formar el ICTP, Paolo Budinich, contribuyó a crear lo que luego fue conocido internacionalmente como el *Sistema Trieste*, integrado por el ya mencionado ICTP,

el *International Center for Genetic Engineering and Biotechnology* (ICGEB), el área de investigaciones *Area di Ricerca*, la *Third World Academy of Sciences* (TWAS) y la *Scuola Internazionale Superiore di Studi Avanzati* (SISSA), que contribuyen al avance de las ciencias y, paralelamente, a mitigar la marginación que sufren muchas de las comunidades científicas pertenecientes al Tercer Mundo.

Si bien gran parte de la actividad de Paolo Budinich se orientó al progreso científico del Tercer Mundo, no por ello dejó de contribuir con sus investigaciones al avance de la física teórica. Budinich estuvo en Göttingen con Werner Heisenberg y en Zürich con Wolfgang Pauli. Paul Dirac fue su huésped en Trieste. Su producción científica se centra principalmente en trabajos sobre rayos cósmicos, electrodinámica cuántica, el rol de la simetría en la física teórica y la geometría espinorial. Se puede entonces afirmar que el Dr. Budinich es, sin lugar a controversias, uno de los grandes testigos y actores del desarrollo de la Física Teórica en el siglo XX.



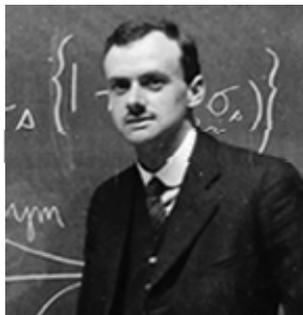
P. Budinich publicó en 2000 su libro autobiográfico *El archipiélago de las maravillas – aventuras de mar y ciencia*¹ de cuyo capítulo final se han extractado y traducido una buena parte de las presentes notas. Posteriormente, en 2005, publicó el artículo *The Role of Mathematics in Physical Sciences and Dirac's Methodological Revolution*², escrito en colaboración con Giovanni Boniolo de la Universidad de Padua y especialmente dedicado a destacar, empleando un enfoque semiótico de la interdependencia de la matemática con la física, la influencia de P.A.M. Dirac sobre la metodología del pensamiento científico.

¹ *L'arcipelago delle meraviglie – avventure di mare e scienza*, © 2000 Di Renzo Editore, serie “Dialoghi – Scienza”. Primera reimpresión 2002, Roma, Italia. ISBN 8883230006-X.

² El artículo mencionado constituye uno de los capítulos del libro *The Role of Mathematics in Physical Sciences – Interdisciplinary and Philosophical Aspects*, G. Boniolo, P. Budinich and M. Trobok (editors), © 2005 Springer, Dordrecht, The Netherlands. ISBN 1-4020-3106-8 (printed), ISBN 1-4020-3107-6 (e-book).

Desarrollo.

Recordemos que *Paul Adrien Maurice Dirac*³ (1902-1984) compartió en 1933 el premio Nobel de física con Erwin Schrödinger “por el descubrimiento de nuevas formas productivas de la teoría atómica” y es considerado como uno de los más brillantes físicos teóricos del siglo XX.



Reproducimos a continuación parte de un artículo publicado por Dirac en 1931 (Proceedings of the Royal Society of London 133, pág. 60):

“Existen actualmente en la física teórica problemas fundamentales que esperan su resolución, ... cuya solución requerirá presumiblemente de una revisión –más drástica que cualquier otra realizada en el pasado– de nuestros conceptos básicos. Muy probablemente estos cambios serán tan grandes que la inteligencia humana no podrá alcanzar las nuevas ideas mediante el procedimiento de formalizar en términos matemáticos los datos recabados de las experimentaciones. El trabajo de la investigación teórica deberá por lo tanto proceder en forma más indirecta. El método más potente para el progreso que hoy se puede sugerir es el de emplear todos los recursos de la matemática pura, ... y luego de cada suceso en esta dirección, tratar de interpretar los nuevos descubrimientos matemáticos en términos de entidades físicas”. Más tarde agregó: “Pareciera que si se trabaja con el criterio de obtener belleza en las propias ecuaciones, y si se posee verdaderamente un juicio sano, se puede tener la seguridad de transitar el camino correcto”⁴.

³ P.A.M. Dirac nació en Bristol, Inglaterra, hijo de un inmigrante suizo; su madre era originaria de Cornwall.

⁴ Texto original completo: “There are at present fundamental problems in theoretical physics awaiting solution, e.g., the relativistic formulation of quantum mechanics and the nature of atomic nuclei (to be followed by more difficult ones such as the problem of life), the solution of which problems will presumably require a more drastic revision of our fundamental concepts than any that have gone before. Quite likely these changes will be beyond the power of intelligence to get the necessary new ideas by direct attempts to formulate the experimental data in mathematical terms. The theoretical worker in the future will therefore have to proceed in a more indirect way. The most powerful method of advance that can be suggested at present is to employ all resources of pure mathematics in attempts to perfect and generalize the mathematical formalism that forms the existing basis of theoretical physics, and after each success in this direction, to try to interpret the new mathematical features in terms of physical entities”. Más tarde agregó: “It seems that, if one is working from the point of view of getting beauty in one’s equation, and if one has really sound insight, one is on a sure line of progress”.

Estas palabras, escritas hace más de setenta años, tienen hoy el sabor de una profecía pues efectivamente los representantes actuales de la patrulla de avanzada de los físicos teóricos, como E. Witten y A. Connes, son en realidad matemáticos puros: tan es así que ambos han sido distinguidos con la *Field Medal* que es, para los matemáticos, el equivalente al premio Nobel. Estos hechos y otros que se mencionarán luego, inducen a afirmar que las palabras de Dirac citadas, pueden ser consideradas como un manifiesto que señala el inicio de una nueva revolución en el método de la investigación científica, después de la protagonizada hace casi cuatro siglos por Galileo.

Pero lo que por el momento es más interesante de recordar, es que fue el propio Dirac el primero en inaugurar en 1928 el método de emplear directamente el instrumento de la matemática pura para descubrir nuevas leyes del mundo natural, con resultados que tienen ribetes milagrosos y que vale la pena referir.

La predicción de Dirac sobre la existencia de la antimateria.

En aquel tiempo acababan de producirse grandes revoluciones en la física: la de la relatividad de Einstein y la de la mecánica cuántica, descubierta por Bohr, Heisenberg, Pauli y Schrödinger. Este último había formulado su famosa ecuación, fundamento de la mecánica ondulatoria, que describe muy bien el movimiento de los electrones en el interior de los átomos, y que da razón no solamente de las propiedades químicas de los átomos de todos los elementos existentes en la naturaleza, sino también de la luz que emiten o absorben: las así llamadas líneas espectrales. Para explicar algunas peculiaridades de la multiplicidad de estas líneas (la estructura fina) Pauli había hipotetizado que los electrones, constituyentes de los átomos, debieran poseer un pequeño momento angular intrínseco denominado spin (cual si fueran pequeñísimos trompitos).

Llegados a este punto Dirac intentó postular una ecuación para el movimiento de los electrones, que generalizara la ecuación de Schrödinger de modo tal que resultara compatible con la relatividad de Einstein (la de Schrödinger no lo era) y en esta investigación adoptó el criterio de confiar en la matemática pura. Dirac recurrió a la geometría espinorial que acababa de ser descubierta por el gran matemático Elie Cartan, y escribió la ecuación que tomó su nombre⁵.

Era una ecuación extremadamente simple y bella, que no solamente explicaba, con mayor exactitud, todos los fenómenos de la física atómica ya explicados por la ecuación de Schrödinger, pero daba también razón de la estructura fina de las líneas espectrales y por lo tanto de la existencia del spin del electrón, que fuera introducida como artificio ad hoc por Pauli.

Esa ecuación predecía para el movimiento del electrón, también soluciones correspondientes a valores negativos de energía, que entonces aparecían como paradójales, y tanto que Pauli, quien estaba entonces preparando un artículo para una

⁵ Un día, en Miramare (Trieste), Budinich preguntó a Dirac cómo había llegado a la formulación de su famosa ecuación y éste le respondió: “Paseando por un bosque, vino a mi mente como la más simple y la más bella: por lo tanto debía ser verdadera”.

obra monumental sobre física: *Handbuch der Physik*, escribió que dicha ecuación era bella pero no verdadera, pues predecía soluciones inexistentes en la naturaleza.

Dirac empero no se dió por vencido y encontró una escapatoria, la llamada *teoría de los huecos* (1929) en base a la cual el espacio vacío debía concebirse como un mar de electrones en estados de energía negativa. La ausencia de uno de estos electrones, pensada como un hueco en ese mar, se habría manifestado como un electrón de energía positiva –ya que la falta de una cantidad negativa da una cantidad positiva– y con carga positiva, opuesta a la de un electrón normal, que notoriamente es negativa. Debido a esta propiedad, dicho hueco fue denominado positrón. Un electrón normal, al encontrarse con un positrón, se precipitaría en el hueco, es decir lo aniquilaría emitiendo la diferencia de energía (igual a $2mc^2$, es decir la energía relativística de las dos partículas) en forma de luz (dos fotones). Debido a estas propiedades, el positrón también ha sido llamado antielectrón.

El artificio imaginativo y pintoresco de la teoría de los huecos fue posteriormente abandonado pues no resultó necesario en la actual teoría cuántica de campos. Lo que sí perduró fue la ecuación de Dirac que, con sus soluciones para valores negativos de energía, preveía la existencia del antielectrón o sea de la antimateria y de su extraordinaria propiedad de aniquilar la materia.

En 1931 la antimateria, es decir el positrón, fue descubierto por G. Occhialini y P.M.S. Blackett en los rayos cósmicos y un año después fue creado por Anderson con un acelerador de partículas de laboratorio; el positrón descubierto poseía exacta y únicamente las propiedades previstas por la ecuación de Dirac (masa idéntica a la del electrón, carga opuesta, etc.). Posteriormente el italiano E. Segré creó en laboratorio el antiprotón⁶.

Es necesario observar que no habían existido con anterioridad indicios en ningún fenómeno terrestre o astronómico, de la posible existencia de la antimateria en la naturaleza. Ninguna otra teoría científica, ninguna especulación filosófica, ninguna fantasía poética, ni ninguna mitología habían hipotetizado su existencia. Se puede por lo tanto afirmar que la intuición, operando en el ámbito de la matemática pura y guiada por la estética, había llevado a Dirac a postular su ecuación, la que había posibilitado alcanzar el conocimiento de una forma totalmente nueva de la realidad: la antimateria.

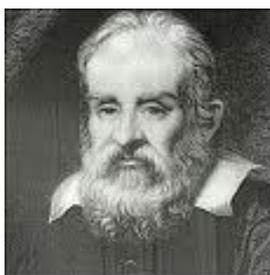
⁶ Un antiprotón y un positrón pueden constituir un átomo de antihidrógeno y así sucesivamente; se puede entonces imaginar un mundo totalmente constituido por antimateria y que, tal como predice la ecuación de Dirac, poseyera exactamente las mismas propiedades electromagnéticas que el mundo material en que vivimos. Ello significa que alguna de las galaxias lejanas que vemos, con sus estrellas y quizás con sus planetas habitados, podría estar constituida por antimateria, hecho que no podemos deducir de su espectro óptico porque emiten la misma luz (líneas espectrales) que emitirían si estuvieran constituidas por materia. El único modo de confirmar su existencia sería observando la enorme cantidad de energía que podrían generar cuando entraran en contacto con la materia aniquilándola. Los rayos cósmicos provenientes del espacio exterior a la galaxia podrían contener eventualmente rastros de mundos de antimateria. La investigación correspondiente se está llevando a cabo. Es sabido que la antimateria puede ser pensada como materia que va hacia el pasado y por lo tanto su existencia se encuentra relacionada con el misterioso problema del flujo del tiempo (el problema de la así llamada flecha del tiempo). Uno de los mayores misterios no resueltos del universo tal como lo conocemos es porqué se encuentra constituido prevalentemente de materia y no de antimateria.

Este relato emblemático demuestra claramente de qué manera el pensamiento humano, mediante la intuición aplicada al mundo abstracto, en este caso el de la matemática, pueda alcanzar el conocimiento directo de nuevas leyes que gobiernan el mundo de los fenómenos naturales conocidos y también de aquéllos no vistos ni imaginados con anterioridad. Es importante notar que este nuevo conocimiento se refiere a una ley – posteriormente confirmada por la experiencia– que compendia el advenimiento de innumerables nuevos fenómenos posibles y resulta por tanto más general y menos efímera que ellos, lo cual confiere a este nuevo conocimiento una evidente característica ontológica. Y es justamente este contenido ontológico de la realidad al que se puede llegar, como ha demostrado Dirac, a través de la pura abstracción del pensamiento matemático, lo que confiere su fascinación más profunda a la investigación científica en el campo de la física teórica, que actualmente avanza por el camino proféticamente indicado por Dirac.

El camino de Dirac como nueva revolución del método científico.

Este nuevo modo de proceder empleado actualmente por buena parte de los investigadores en física teórica es también innovador con respecto de la revolución galileana. En efecto **Galileo**, el fundador del método científico de nuestra era, escribía de la siguiente manera en *Il Saggiatore*⁷:

“La filosofía está escrita en este grandísimo libro, que permanentemente está abierto ante nuestros ojos (digo el universo), pero que no se puede comprender si antes no se aprende a comprender el lenguaje, y conocer los caracteres, mediante los cuales está escrito. Se encuentra escrito en lenguaje matemático, y los caracteres son triángulos, círculos y otras figuras geométricas, sin cuyos medios resulta humanamente imposible comprender palabra alguna”⁸.



⁷ *Il Saggiatore* fué publicado en Roma en 1623. Con su título Galileo quiso dar a entender que las observaciones empíricas deben ser medidas cuidadosamente y empleando instrumentos de precisión; en particular «*saggiatore*» es el nombre que en italiano antiguo designaba a una balanza de precisión destinada a pesar oro en polvo.

⁸ Texto completo original: “La filosofía é scritta in questo grandissimo libro, che continuamente ci sta aperto inanzi agli occhi (io dico l’universo), ma non si può intendere se prima non s’impara a intender la lingua, e conoscer i caratteri, ne’ quali è scritto. Egli é scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi é impossibile intenderne umanamente parola”.

Para Galileo entonces, las leyes que gobiernan los fenómenos naturales que nosotros observamos, deben ser escritas en forma matemática para ser entendidas. Se sobreentendía que la observación del fenómeno como asimismo la correspondiente experimentación –cuando era posible– debían preceder a la formulación de la ley. Y de hecho así procedieron luego de él, Newton, Kepler, Coulomb, Maxwell y muchos otros hasta inicios del siglo XX cuando Bohr, Heisenberg y Schrödinger descubrieron, aplicando este mismo método, la nueva mecánica cuántica⁹.

Las palabras de Heisenberg “... en Física primeramente se debe comprender bien el fenómeno, concibiendo un modelo razonable para describirlo y explicarlo; la matemática viene después”¹⁰ concuerdan perfectamente con el método galileano. Pero con Dirac se inicia un nuevo método: el de proceder a la formulación de las leyes de los fenómenos, sirviéndose sobre todo de la matemática, y no solamente para los fenómenos ya observados, sino también para aquéllos que aún quedan por descubrir.

Respecto de la revolución galileana la novedad consiste entonces en ésto: mientras que con el método galileano de síntesis aplicada a la observación de numerosos fenómenos se llega a la formulación matemática de la única ley que los representa y describe, con Dirac a través de la intuición matemática se llega directamente a la formulación de la ley que gobierna también a fenómenos aún por descubrir. De tal manera, en el descubrimiento de la realidad, la intuición del pensamiento abstracto es privilegiada con respecto de la observación del efímero devenir fenoménico, que mantiene a su vez su rol en la posterior verificación de la validez de la ley.

Este método de Dirac podría también ser denominado “metafísica verificable” (con la anuencia de algunos filósofos) en cuanto consiste en alcanzar, a través de la intuición matemática, la formulación de una o más leyes del mundo natural, posteriormente verificables en el mundo empírico.

La validez epistemológica del método de Dirac puede ser más apreciada recordando que tradicionalmente a menudo se alcanzaba el descubrimiento de nuevos fenómenos amplificando el alcance limitado de nuestros sentidos –por ejemplo la vista– mediante instrumentos como el telescopio, el microscopio y los aceleradores de partículas, logrando así el descubrimiento de galaxias, quasars, pulsars o de elementos de la estructura íntima de la materia. A partir de la observación de estos nuevos fenómenos se buscaba luego descubrir las leyes, formuladas matemáticamente, que gobernaban su evolución. Luego de ello, tanto los nuevos fenómenos como las leyes pertinentes, y

⁹ Ya la revolución relativista de Einstein adopta más bien el método sugerido (posteriormente) por Dirac y no el galileano. En efecto, tanto Einstein como Poincaré han basado el descubrimiento de la relatividad restringida más sobre el estudio de las propiedades matemáticas de simetría de las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo (covarianza respecto de las transformaciones de Lorentz), que sobre el famoso experimento de Michelson y Morley acerca de la constancia de la velocidad de la luz proveniente de las estrellas. También al descubrimiento de la relatividad general arribó Einstein prevalentemente por vía matemática. También en estos casos los fenómenos consiguientes, tales como la dilatación del tiempo propio, la equivalencia entre masa y energía ($E=mc^2$) o bien aquéllos debidos a la curvatura del espacio generada por una masa, fuente de gravedad, fueron en primer lugar previstos por la teoría matemática, y solo posteriormente observados, por ejemplo, en el incremento de la vida media de partículas inestables en movimiento o en la curvatura de la luz proveniente de las estrellas observadas durante una eclipse total de sol.

¹⁰ Conversación de 1951, citada por P. Budinich.

asimismo los instrumentos necesarios para descubrirlos, debían ser insertados en nuestra concepción de la realidad, enriqueciéndola de esta manera.

Ahora en cambio, el objeto del descubrimiento es una nueva ley (ecuación de Dirac) a la que se llega directamente empleando la matemática como instrumento. Si luego se descubren los nuevos fenómenos previstos por dicha nueva ley (el positrón), es razonable ampliar nuestro concepto de la realidad incluyendo tanto la nueva ley, con sus fenómenos consiguientes, como asimismo el instrumento matemático que –cual si fuera un telescopio mental– nos ha permitido alcanzar el descubrimiento. Todo lo cual puede contribuir a aclarar el añoso y nunca resuelto dilema acerca de si la matemática es un descubrimiento o una invención; es decir aportar una contribución a la concepción platónica de la matemática, configurada como un elemento de la realidad en el mundo platónico de las ideas.

Luego de Dirac, este método ha sido aplicado empleando por ejemplo la matemática de grupos de Sophomor Lie y de Elie Cartan para el estudio de las simetrías en el mundo atómico y subatómico de las partículas elementales, que ha sido utilizado por Salam y Weinberg (premio Nobel compartido en 1979) para el descubrimiento de la simetría electrodébil y ha conducido a la predicción de la existencia de las partículas W^+ W^- y Z^0 posteriormente descubiertas por Rubbia (1982-83).

Precisiones técnicas¹¹.

Retomemos la última parte de las palabras de Dirac referidas en pág. 3:

“El método más potente para el progreso que hoy se puede sugerir es el de emplear todos los recursos de la matemática pura, en intentos de perfeccionar y generalizar el formalismo matemático que conforma las bases actuales de la física teórica, y luego de cada suceso en esta dirección, tratar de interpretar los nuevos descubrimientos matemáticos en términos de entidades físicas”

Con estas palabras, Dirac enfatizaba que la relación entre matemáticas, los signos físico-matemáticos y el mundo natural han de ser consideradas bajo una luz diferente. Veamos entonces cómo.

Recordemos que las matemáticas comenzaron a interactuar con la física a partir de que los números, obtenidos de las mediciones instrumentales, fueron tenidos en cuenta por los filósofos de la naturaleza. De esta manera se inició el camino que condujo a la física contemporánea, una disciplina en la cual distinguir entre componentes matemáticos y físicos carece de sentido, y en la que aparecen signos físico-matemáticos construidos mediante matemáticas y dotados de un triple valor semiótico en cuanto íconos representativos, en cuanto símbolos sometidos a restricciones históricas e instrumentales, y en tercer lugar en cuanto índices o indicadores apuntando al mundo

¹¹ El presente punto se ha desarrollado como síntesis del artículo de Boniolo y Budinich *The Role of Mathematics in Physical Sciences and Dirac's Methodological Revolution*, referenciado en la nota ⁽²⁾. Se recomienda su lectura completa.

físico, lo que permite luego verificar si lo que el signo físico-matemático indica existe y es realmente correcto.

Por la historia de la física sabemos que este largo camino ha tenido un momento definitorio cuando las leyes que describen los fenómenos terrestres comenzaron a ser escritas en lenguaje matemático, dejando de lado el lenguaje natural. Galileo constituye un ejemplo paradigmático cuando se formula a sí mismo la pregunta acerca de cuál sería la ley que daría significación al fenómeno de la caída de los cuerpos. Se respondió en términos matemáticos, con una ley fenomenológica que hizo posible no solamente describir sino asimismo predecir la evolución de tales fenómenos.

A partir de entonces, y a lo largo de un prolongado período de tiempo, éste era el procedimiento: reflexionando sobre los fenómenos físicos observados y medidos, se indaga una ley fenomenológica que, escrita en forma matemática, sirva conjeturalmente para representarlos. En otras palabras, comenzando con la reflexión sobre lo que ocurre en el mundo empírico, uno intenta encontrar conjeturalmente el signo físico-matemático correcto que lo represente, simbolice e indique.



Si por su parte Galileo procedía partiendo de la reflexión sobre la evolución del fenómeno observado para alcanzar las leyes fenomenológicas tentativas, Newton hizo algo más abstracto: partiendo de la reflexión tanto sobre los fenómenos como sobre las leyes fenomenológicas que él conocía, –pasaba siempre en forma conjetural– a determinar las leyes a partir de las cuales se podían deducir las previamente conocidas. Éste es precisamente el método Galileo-Newtoniano. Consiste en dos pasos, etapas o fases: a) la etapa galileana, dedicada a la formulación de las leyes fenomenológicas que describen la evolución de los fenómenos observados en el mundo empírico; b) la más abstracta etapa newtoniana, orientada a la formulación de leyes generales en base a las cuales se podrían derivar los resultados de la primer etapa.

Llegados a este punto, se considera útil introducir una tripartición de los signos físico-matemáticos. En particular, se pueden distinguir:

1. Las *leyes evolutivas* (que incluyen también a las leyes fenomenológicas de la fase galileana), que son las leyes más cercanas al mundo empírico, dado que describen la evolución temporal de los fenómenos y por lo tanto nos permiten representar lo que ocurre en un lugar y en un tiempo dados (por ejemplo, la ley

de caída de los cuerpos). Por supuesto, estas leyes de primer nivel pueden ser verificadas por experimentación directa¹².

2. Las *leyes estructurales* (generalmente descubiertas en la fase newtoniana), que permiten la deducción de las *leyes evolutivas* como soluciones particulares (pertenecen a este tipo p.ej. las ecuaciones de la dinámica clásica que permiten la inferencia de la ley de caída de los cuerpos y, en general, las leyes clásicas de movimiento; las ecuaciones de Maxwell; etc.). En este caso, su control empírico se realiza a través de un proceso de *modus tollens* teórico basado en los resultados obtenidos a nivel de las *leyes evolutivas*.
3. Los *principios* que, en un cierto sentido, acotan los límites de los dominios de aplicabilidad de las *leyes estructurales*, y algunas veces, auxilian en su formulación. En este punto estamos pensando acerca de principios como el de causalidad que a menudo poseen una contraparte *metafísica*, y también acerca de principios *formales* tales como los de simetría, a partir de los cuales y por aplicación del teorema de Noether, pueden ser deducidas las *leyes estructurales* de conservación.

El rol del tiempo es altamente relevante en la caracterización de las tres clases de leyes. Mientras que en la primera categoría el tiempo posee un rol explícito e importante, ello no ocurre para las dos restantes categorías: las leyes estructurales y los principios se refieren a hechos invariantes en el tiempo. En un cierto sentido, se refieren a cosas que no devienen, sino que son, es decir a cosas atemporales. Y sin embargo, partiendo de las representaciones atemporales brindadas por tales leyes estructurales y principios, podemos obtener por vía deductiva, leyes evolutivas que proporcionan la representación temporal del mundo fenomenológico.

Resulta interesante notar que el producto final del método Galileo-Newtoniano que acaba de ser concisamente ilustrado, fue también destacado por Albert Einstein en una célebre carta a Solovine fechada en mayo de 1952¹³.

Pero en un cierto momento, algo cambia, como escribió Dirac en el pasaje mencionado: “se encuentra más allá del poder de la inteligencia humana el alcanzar nuevas ideas mediante intentos directos de formular los datos experimentales en términos matemáticos”¹⁴. En consecuencia, al trabajar en el marco de ciertas matemáticas, en un determinado momento se puede percibir la presencia de un signo físico-matemático. En otras palabras, uno puede percibir que las matemáticas con las que trabaja poseen también un aspecto indicial que apunta a algo que existe en el mundo. Ésto es lo que Dirac intentaba expresar. En este caso, mediante la reflexión sobre matemáticas puras, tenemos acceso directo al nivel de las leyes estructurales. Es así que el pensamiento matemático asume el rol potente de creador de nuevos signos físico-matemáticos

¹² Se podría objetar que también hay leyes como las denominadas de co-existencia (por ejemplo la ley de Ohm), que aparentan ser independientes del tiempo. En realidad, su dependencia temporal puede ser siempre envidenciada mediante una profundización del análisis.

¹³ Para una discusión de esta carta, véase a Miller, A. I., 1981, *Albert Einstein's Special Theory of Relativity*, Addison Wesley, Reading, Massachusetts.

¹⁴ Texto original: “...it will be beyond the power of human intelligence to get the necessary new ideas by direct attempts to formulate the experiment data in mathematical terms”.

concebibles y en consecuencia promueve el descubrimiento de nuevos aspectos fenomenológicos del mundo, deducibles de tales leyes estructurales.

Dirac mismo utilizó este método cuando, en 1928, adoptó la geometría espinorial para formular su ecuación relativística del movimiento de los electrones. Esta ecuación produjo la previsión de la existencia del positrón, o en otros términos, de la antimateria, que no había sido vista ni concebida con anterioridad y que fue descubierta experimentalmente por Anderson pocos años después.

El rol del pensamiento matemático como una maquinaria para construir signos físico-matemáticos y consecuentemente como inductor del descubrimiento de nuevos aspectos fenoménicos que incrementan y desarrollan nuestro conocimiento del mundo, es ciertamente el punto más relevante de la *revolución metodológica de Dirac*. En este caso los signos físico-matemáticos son entes mental e hipotéticamente construidos a nivel de las leyes estructurales y principios, siguiendo simplemente criterios tanto de coherencia interna (entre las proposiciones que los conforman) como de coherencia externa (con los otros signos físico-matemáticos).

Resulta evidente que las leyes estructurales poseen un contenido cognitivo más rico que las leyes evolutivas. De hecho cada una de las primeras implica el conocimiento potencial de innumerables leyes evolutivas de fenómenos posibles. Se concluye que el descubrimiento de leyes estructurales significa un aumento de nuestra capacidad de conocimiento del mundo en que vivimos.

Esta manera de alcanzar nuevos conocimientos a través del pensamiento exclusivamente abstracto, recuerda a la formulación de proposiciones hipotéticas metafísicas en la antigua filosofía, con la diferencia de que mientras esta última recibía el consenso general mediante un acto de fé, las leyes estructurales hipotéticas, formuladas mediante el pensamiento matemático, pueden ser verificadas empíricamente en el mundo.

Aproximación entre ciencia y filosofía.

Desde que los hombres comenzaron a pensar ha surgido espontáneamente la pregunta acerca de qué puede existir detrás de lo efímero de los fenómenos que se nos muestran en el decurso del tiempo. Pregunta que sustenta la esperanza de que exista una realidad menos efímera, que nos ayude a comprender el porqué de nuestro vivir, inexorablemente destinados a la muerte, en este mundo.

El camino indicado por Dirac permite que el pensamiento acceda directamente a las leyes de los fenómenos, leyes que son por lo menos parte de esa realidad menos efímera o de esa “filosofía” como la llama Galileo. Naturalmente de este modo se obtienen respuestas tan sólo parciales acerca de la naturaleza de la realidad que se encuentra por detrás de lo efímero aparente. Las únicas respuestas exhaustivas a tales preguntas han sido proporcionadas hasta el presente sólo por las religiones, las que empero exigen actos incondicionales de fé. Las respuestas proporcionadas por la ciencia, aunque limitadas y muy alejadas de develar los significados más profundos, tienen el mérito, que no poseen las respuestas dadas por las religiones, de no obligar al abandono del sustento de la razón de la que estamos dotados, en cuanto las leyes son verificables en el

mundo de los fenómenos, que es a pesar de todo el único que nos puede brindar algunas certezas –si bien sólo parciales y provisionarias¹⁵– pero a pesar de ello certezas al fin.

El hecho que en la investigación de la realidad más allá de lo aparente, un criterio confiable, como lo sugiere Dirac, sea el estético, representa un indicio importante acerca de lo uniforme de dicha realidad, indicio al que por consiguiente se debería poder acceder también a través de otras vías del pensamiento creativo y de la imaginación. Es sobre este convencimiento que se han basado los repetidos y difíciles intentos de aproximación entre la ciencia, el arte y la literatura.

En este avanzar hacia lo abstracto, se asiste a la reaparición de antiguas problemáticas afrontadas por la filosofía, aun desde la era presocrática cuando la ciencia era parte integrante de la filosofía: las del origen del universo, las de su destino, las del flujo del tiempo. Y no queda excluido que mediante el empleo del pensamiento abstracto como instrumento para la investigación de la realidad, se puedan descubrir nuevas e inesperadas formas de la realidad, tal como ocurrió con el descubrimiento de la antimateria, anticipado por la ecuación de Dirac.

Al acercamiento entre ciencia y filosofía han contribuido también los nuevos descubrimientos de las ciencias de la vida, y es así que recientemente en este campo se manifiesta un florecer de investigaciones, documentadas por innumerables artículos acerca del problema de la naturaleza de la conciencia, de la mente y del Yo.

La biología molecular –a la que recientemente están aportando contribuciones determinantes tanto la física experimental (rayos X, PET¹⁶, resonancia magnética) como la física teórica (mecánica cuántica, sistemas complejos)– el estudio de las redes neuronales y del funcionamiento del cerebro, están abriendo uno de los capítulos más vivos y prometedores de la ciencia actual, en el que el connubio entre ciencia y filosofía aparece más íntimamente enlazado.

Todo ello hace pensar que en el futuro, mediante la investigación científica, estaremos en condiciones tanto de responder siempre de una mejor manera a algunos de los porqués del devenir de los fenómenos naturales conocidos al presente, como asimismo de predecir nuevos fenómenos y anticipar de esta manera el descubrimiento de formas de realidad hoy inconcebibles, de manera tal de poder quizás algún día hacer más tenue, aunque más no sea parcialmente, el velo de misterio que acompaña nuestro vivir en este mundo.

¹⁵ La palabra “provisionarias” no significa, como a veces erróneamente se interpreta, que posteriormente vayan a ser desmentidas, sino que puedan ser incluidas en una teoría más general, de la cual representen casos particulares.

¹⁶ PET es el acrónimo de *Positron Emission Tomography*.

Palabras finales.

Toda labor humana reconoce múltiples motivaciones concurrentes: estas pocas páginas han sido escritas respondiendo a tres intenciones, la primera de las cuales fue presentar una reseña de la personalidad y el pensamiento del Prof. Dr. Paolo Budinich en el ámbito de la filosofía de la ciencia.

La segunda intención ha sido destacar la importancia de la libertad y pluralidad de pensamiento en la evolución y desarrollo de las ciencias, cuyo portaestandarte es Galileo Galilei, y la manera por la cual ese libre desarrollo condujo a nuevos paradigmas metodológicos en las ciencias físicas, reflejados en los trabajos de Paul Dirac.

Debo manifestar que la tercera (y última) intención perseguida, ha sido la de dar cumplimiento a un deber localista y recordar los orígenes comunes que ligan a Paolo Budinich y a quien ésto escribe con la pequeña, pedregosa y no por ello menos hermosa isla de Lussino, joya de las Absirtides, torturada por la historia¹⁷, cuya pequeñez y avaro suelo condujeron e impulsaron a sus hijos hacia las labores marítimas, forjando una fuerte raza de capitanes de ultramar, entre los que se cuentan a Simone Budinich, Pietro Vincenzo Petrina y Marco Antonio Budinich entre los antepasados de Paolo Budinich y, entre mis propios familiares, a mi padre Mario Cova, su hermano Giuseppe y mis tíos maternos Domenico y Gabriele Haglich quienes, unidamente a otros muchos capitanes, contribuyeron a hacer de Lussino un nombre reconocido y respetado en todos los puertos del mundo, desde Istanbul a Vancouver y de Murmansk a Singapur.



¹⁷ En 1913, cuando nació mi padre en la localidad de Lussinpiccolo, la isla pertenecía al imperio austrohúngaro; en 1919 al nacer mi madre Lussino era Italia y, luego de haber estado desde 1945 bajo dominación yugoeslava, al concluir la Guerra de los Balcanes, pasó a ser territorio croata. Pero eso no es todo, porque antes de ser austríaca la isla estuvo sometida a la dominación francesa durante el período bonapartista, aunque la mayor influencia fue la debida a 800 años de pertenencia a la Serenísima República de Venecia, que dejó una indeleble impronta lingüística y cultural en la isla de Lussino y en las tierras hermanas de la Dalmacia.

Enlaces de interés.

ICTP – Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics: www.ictp.it

ICGEB – International Center for Genetic Engineering and Biotechnology: www.icgeb.org

TWAS – Third World Academy of Sciences: www.twas.org

SISSA – Scuola Internazionale Superiore di Studi Avanzati: www.sissa.it

Sobre el Sistema Trieste, véase www.triestecittadellascienza.com

Acerca de Galileo Galilei y Paul Dirac: School of Mathematics and Statistics, University of St Andrews, Scotland: www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Indexes/

Para acceder al libro *The Role of Mathematics in Physical Sciences* de la editorial Springer: www.springer.com/physics/book/978-1-4020-3106-9

Acerca del Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (Italia) www.infn.it

Créditos.

La imagen de P. Budinich (pág. 2) fué tomada de ICTP Photo Archives, Marie Curie Library, ICTP Trieste.

La fotografía de P.A.M. Dirac (pág. 3) y los retratos de Galileo Galilei (pág. 6) y de I. Newton (pág. 9) fueron tomados del archivo histórico de la Universidad de St-Andrews, Escocia.

El mapa de la isla de Lussino (pág. 13) ha sido escaneado a partir de una hoja desprendida de un antiguo texto escolar, publicado en Viena a principios del siglo pasado por la editora Hartleben.

Agradecimientos.

Se agradece muy especialmente el estímulo y la motivación para la publicación de este trabajo, proporcionadas por el Prof. Dr. Paolo Budinich por intermedio de su hijo, el Prof. Dr. Marco Budinich del Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (Sezione Trieste).

Párrafo aparte merecen la colaboración y sugerencias del Dr. Eduardo Jiménez en la revisión final del manuscrito.

Anche mi parlo dialeto.

