

**Física del Siglo XX.**  
Desde la Física Clásica hacia un Estructura Disipativa.  
Sandra Kahan

**Motivación.**

“En resumen, podemos decir que difícilmente habrá un gran problema, de los cuales la física moderna es tan rica, al que Einstein no haya dado una importante contribución. Que él haya algunas veces errado al blanco en sus especulaciones, como por ejemplo en su hipótesis de los quanta de luz, no puede ser realmente usado contra él porque es imposible introducir ideas fundamentales nuevas, aún en ciencias más exactas, sin ocasionalmente correr un riesgo.”  
*Academia Prusiana de Ciencias, en ocasión del nombramiento de Einstein, 1913.*

En 1985, siendo estudiantes de la Licenciatura en Física, no entendíamos por qué Eisberg<sup>1</sup> se empeñaba tanto en explicar que el efecto fotoeléctrico no podía ser interpretado a través de las ecuaciones de Maxwell<sup>2</sup>; entender en qué fallaban esas ecuaciones era mucho más difícil que entender la sencilla explicación que Einstein<sup>3</sup> había propuesto en 1905.

En aquel entonces, la frase que Eisberg se preocupó por transcribir en el texto, nos provocaba una mezcla de hilaridad e indignación por la ceguera de aquellos hombres de principios de siglo que, teniendo las pruebas al alcance de la mano, tardaron 16 años en reconocer la validez de una teoría.

Pero, para nosotros, la “dualidad onda-partícula” era un concepto natural. Habíamos crecido con él dado que, a los 14 años, creíamos haber entendido a Einstein, a través de un libro de divulgación científica que había circulado por toda la clase. Y, sólo muchos años después, trataríamos de entender los complicados procesos mediante los cuales la comunidad científica valida el conocimiento.

En la Sección I, describimos el impacto que las ecuaciones de Maxwell tenían a finales del siglo XIX, impacto que perdura en las teorías que comenzaron a perfilarse en el siglo XX. Asimismo, a través de citas y en forma no exhaustiva, intentamos caracterizar las ideas epistemológicas que impulsaban la investigación científica de esa época.

En la Sección II, se mencionan brevemente algunas evidencias experimentales de finales del siglo XIX, que motivan el trabajo en Física de los años posteriores.

En la Sección III revisamos la teoría del cuanto de luz, desde una perspectiva diferente a la que se encuentra en los textos de física o en los textos de divulgación científica. Con ello, pretendemos (ayudados con el libro de Thomas S. Kuhn: “La teoría del cuerpo negro y la discontinuidad, 1894-1912”<sup>4</sup>) saldar una deuda en dos aspectos: la transposición didáctica de esos temas esconde la riqueza histórica de su determinación, al tiempo que no logran reflejar los cuestionamientos personales y académicos de los científicos que expusieron esas teorías.

En la Sección IV, describimos brevemente algunos datos históricos y personales de los científicos durante la I Guerra Mundial y a posteriori, parámetros que nos parecieron importantes para tratar de entender las motivaciones de la época.

---

<sup>1</sup> R. Eisberg & R. Resnick, “Física Quántica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas”, Ed. Campus (1974).

<sup>2</sup> James Clerk Maxwell (Escocia, 1831-1879).

<sup>3</sup> Albert Einstein (Alemania, 1879-1955) Recibió el Premio Nobel en 1921 por *sus servicios a la física teórica y, especialmente, el descubrimiento del efecto fotoeléctrico.*

<sup>4</sup> Thomas S. Kuhn, “La Teoría del Cuerpo Negro y la Discontinuidad Cuántica, 1894-1912”, Ed. Alianza (1978) = TCND

En la Sección V hacemos un brevísimo recuento de los problemas que motivaron el surgimiento de la Mecánica Cuántica, para describir en la Sección VI los cambios conceptuales que el desarrollo de esa teoría motiva.

En el Apéndice, comentamos el libro de Paul Forman “Cultura en Weimar, causalidad y teoría cuántica, 1918-1927”<sup>5</sup>. Ese libro constituyó nuestra principal referencia en la conexión del mundo académico y el contexto social en el cual evolucionaron las teorías acausales de la época. Pero, dado que la tesis de Forman, nos pareció que estaba demasiado ceñida a la publicación del libro de Oswald Spengler “La decadencia de occidente”<sup>6</sup>, nos atrevimos a hacer algunas críticas.

Vale señalar que todo el trabajo está atravesado por la mención al Segundo Principio de la Termodinámica, mención casi inevitable tomando en cuenta la afinidad de la autora con el tema, tanto en lo que se refiere a su tarea de enseñanza, dentro de la Facultad de Ingeniería, como a sus trabajos de investigación en el área de la física.

### **I. Antecedentes: La Física Clásica.**

En 1873 Maxwell presentaba cuatro ecuaciones que expresaban en forma analítica el comportamiento de los campos electromagnéticos (tema que había sido objeto de estudio y experimentación, a lo largo de todo el siglo XIX). Pero Maxwell iba más allá de aquellos estudios, indicando la presencia de campos electromagnéticos alejados de cargas o dipolos magnéticos en movimiento y para ello daba como ejemplo a la luz, cuya velocidad era la constante que Römer<sup>7</sup> había medido en 1672.

Para determinar esas ecuaciones, Maxwell propuso un complejo modelo mecánico que explicaba cómo se propagaban las ondas en el éter, sustancia que llenaba todo el espacio y cuya existencia había sido propuesta por Lord Kelvin<sup>8</sup> en 1867. En las propias palabras de Lord Kelvin:

*“Uds. pueden imaginar partículas de algo, la cosa cuyo movimiento constituye la luz. Esa cosa es el éter luminífero. Esa es la única sustancia de la cual podemos estar seguros en dinámica”*<sup>9</sup>.

Los físicos discutían con vehemencia las predicciones de Maxwell hasta que, en 1888, Hertz<sup>10</sup> logró generar las primeras ondas electromagnéticas. Las ondas hertzianas eran de mayor frecuencia que la luz visible pero tenían un comportamiento similar a ella. A partir de ese momento, la óptica y el electromagnetismo estarían unidos para siempre, a través de las ecuaciones de Maxwell. Y la conexión con la mecánica, a través del éter, motivaba a Hertz a exclamar:

*“No se puede estudiar la maravillosa teoría electromagnética de Maxwell sin tener por momentos la impresión de que aquellas fórmulas matemáticas tienen vida y una inteligencia propias, como si fueran más inteligentes que nosotros mismos y aún que sus mismos descubridores, como si dieran de sí más de lo que en su tiempo se puso en ellas”*<sup>11</sup>.

---

<sup>5</sup> Paul Forman, “Cultura en Weimar, causalidad y teoría cuántica, 1918-1927”, Ed. Alianza (1984) = CWCT.

<sup>6</sup> Oswald Spengler, “La Decadencia de Occidente”, Ed. Calpe (1925) = OSDO.

<sup>7</sup> Olaf Cristensen Römer (Dinamarca, 1644-1710).

<sup>8</sup> William Thomson (Lord Kelvin) (Gran Grataña, 1824-1907).

<sup>9</sup> Lord Kelvin, “The Wave Theory of Light”, Lecture Delivered at the Academy of Music, Philadelphia, September 29th, 1884. En: <http://www.bartleby.com/30/15.html>

<sup>10</sup> Henrich Rudolf Hertz (Alemania, 1857-1894).

<sup>11</sup> R. Millikan, “A Direct Photoelectric Determination of Planck’s ‘h’”, Physical Review, V7, p.355 (1916). En: <http://focus.aps.org/story/v3/st23>

Es que las ecuaciones de Maxwell confirmaban las bases fundacionales de la ciencia occidental. Por un lado, presentaban una simetría y **elegancia matemática** casi perfecta, cumpliendo con las aspiraciones de Galileo<sup>12</sup> que en 1622 decía:

*“La filosofía está escrita en este gran volumen —me refiero al universo— que se mantiene continuamente abierto a nuestra inspección, pero que no puede comprenderse a menos que uno aprenda primero a entender el idioma y a interpretar los signos en que está escrito. Está escrito en el idioma de las matemáticas...”<sup>13</sup>*

Por otro lado, eran consideradas como **leyes de la naturaleza**, razón por la cual, estando previamente dadas, eran descubiertas por el científico. Planck las definía así:

*“Las ecuaciones de Maxwell dominan todos los fenómenos de la electricidad y el magnetismo, enlazándolos como una cinta uniforme; aceptarlas equivale, por lo menos en ese orden de cosas, a contemplar desde un elevado mirador la unidad de la naturaleza, y a poseer al menos una parte de aquella gran fórmula del mundo que constituye la última gran meta de la ciencia.”<sup>14</sup>*

Asimismo, aunque hoy las ecuaciones de Maxwell ya no están relacionadas con el éter, su planteo inicial se basaba en la existencia de una sustancia a través de la cual las perturbaciones pudieran transportarse. Se trata, entonces, de una perspectiva **mecanicista** de la ciencia, que se sigue de Newton<sup>15</sup> quien, con sus definiciones de espacio-tiempo-punto material, intentaba desterrar a la metafísica de la filosofía natural:

*“Definición I: La cantidad de materia es la medida de lo igual, surgiendo desde su densidad e interior [volumen] conjuntamente...Definición II: La cantidad de movimiento es la medida de lo igual, surgiendo desde su velocidad y la cantidad de materia conjuntamente...Definición IV: Una fuerza impresa es una acción sobre un cuerpo, para cambiar su estado tanto de reposo, o de movimiento uniformemente hacia delante en una línea recta...”<sup>16</sup>*

Aún en los primeros años del siglo XX, muchos físicos persistían en ese propósito. La existencia de un medio material para la transmisión de energía era necesaria como forma de impedir que las especulaciones acerca de la “acción a distancia” entraran al campo de la ciencia. En 1908, cuando el concepto de éter estaba en franco retroceso, Lodge y Rayleigh argumentaban, en su defensa:

*“Algunos filósofos tienen razones para suponer que la mente puede actuar directamente en la mente, sin mecanismo de intervención, y a veces eso fue catalogado como una genuina acción a distancia; pero, en primer lugar, ningún concepto apropiado o modelo físico puede ser hecho en un proceso como ese; tampoco es claro que el espacio y la distancia tengan particular significado en la región de la psicología.”<sup>17</sup>*

---

<sup>12</sup> Galileo Galilei (Pisa, 1564-1642).

<sup>13</sup> Galileo, “El ensayador”, Ed. Sarpe (1984).

<sup>14</sup> Citado en Ernst Zimmer, “Una revolución en el concepto físico del mundo”, Ed. Gustavo Gill (1945), pag. 66.

<sup>15</sup> Isaac Newton (Gran Bretaña, 1642-1727).

<sup>16</sup> Isaac Newton, “Principia” (1687) En: <http://members.tripod.com/~gravitee/definitions.htm>

<sup>17</sup> Lord Rayleigh & Sir Olver Lodge, “The Ether (Aether) of Space and Auxiliary Files” (1908). En: <http://keelynet.com/osborn/re7.htm>

En 1772, Hume escribía: “*Todo razonamiento que involucre hechos, parece estar fundado en la relación causa y efecto*”<sup>18</sup>. Mientras Hume defendía que esa relación se conocería sólo a través de la experiencia, Kant escribía una crítica a Hume indicando que la relación existía siempre “a priori” y podía ser determinada:

*“...a través del entendimiento puro, en relación con aquello que puede convertirse en un objeto de experiencia, o, a través de la razón pura, en relación con aquellas propiedades de cosas, o de la existencia de las cosas, que nunca pueden estar presentes en la experiencia”*.<sup>19</sup>

En 1878, Helmholtz<sup>20</sup> retomaba las ideas de Kant en su libro “Los hechos de la percepción” y, aunque a través de sus estudios sobre las reacciones nerviosas, demostraba que el espacio y el tiempo no eran intuitivos (como había argumentado Kant), reafirmaba que el principio de **causalidad** era una ley trascendental dada “a priori”, base del método científico:

*“...si nosotros creemos que es posible discernir algo fundamental e incambiable que sea la causa de los cambios que observamos, entonces aceptamos un principio regulativo en nuestro pensamiento. Eso es llamado la ley de la causalidad, y ella expresa nuestra creencia en la completa comprensión del mundo”*<sup>21</sup>.

Finalmente, las leyes de Maxwell satisfacían el carácter **determinista** de la ciencia, expresado por Laplace<sup>22</sup> en el siglo XVIII:

*“Un espíritu que por un momento pudiera conocer todas las fuerzas que actúan en la naturaleza y la situación relativa de todos los seres que la componen, podría, si fuera capaz de llegar a un grado de generalización lo bastante amplio, para someter todos sus datos a un análisis matemático, comprender en una misma fórmula los movimientos del mayor de los cuerpos celestes y del más pequeño de los átomos; nada, ni futuro ni pasado, le sería desconocido, y todo se aclararía ante sus ojos”*.<sup>23</sup>

---

<sup>18</sup> David Hume, “An Enquiry Concerning Human Understanding” (1772). En: <http://www.marxists.org/reference/subject/philosophy/works/en/hume.htm>

<sup>19</sup> Immanuel Kant, “Critique of Pure Reason” (1787). En <http://www.marxists.org/reference/subject/philosophy/works/ge/kant3.htm>

<sup>20</sup> Hermann von Helmholtz (Alemania, 1821-1894).

<sup>21</sup> Helmholtz, “The Fact of Perception” (1878). En.: <http://www.marxists.org/reference/subject/philosophy/works/ge/helmholt.htm>

<sup>22</sup> Pierre Simon Laplace (Francia, 1749-1827).

<sup>23</sup> P.Laplace, “Traité du Mécanique Céleste” (1799) Citado en <http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/Mathematicians/Laplace.html>

## II. Evidencia experimental, sin explicación teórica.

La influencia de la teoría de Maxwell era tan fuerte que, durante los últimos veinticinco años del siglo XIX se había acumulado evidencia experimental que los físicos, sin éxito, habían intentado explicar a través de las ecuaciones de Maxwell.

Desde la perspectiva actual, se puede advertir que todas estas experiencias corresponden a diferentes ramas de la física. Pero, situándonos al principio del siglo XX, cuando esas ramas aún no estaban delimitadas, se advierte que todas ellas tienen una pregunta en común: ¿cómo interactúan las ondas electromagnéticas con la materia?

En 1877, dos años antes del nacimiento de Einstein, Hertz había descubierto el efecto fotoeléctrico: la capacidad de la luz ultravioleta de facilitar la descarga eléctrica entre dos electrodos.

En 1887, Michelson<sup>24</sup> y Morley medían la velocidad de la luz, desde el referencial terrestre y el éter parecía no tener ninguna influencia en esa medida. FitzGerald<sup>25</sup> hablaba por primera vez de la contracción de los cuerpos en la dirección del movimiento e indicaba que el calor específico del éter era extremadamente pequeño. Pero sus colegas no estaban dispuestos a renunciar a su existencia<sup>26</sup>.

En 1897, Thomson<sup>27</sup>, trabajando con una cámara ideada por Crookes en 1886, determinó que los rayos catódicos tenían carga y masa (los llamó “corpúsculos”), resolviendo la controversia, iniciada en 1892 por Hertz y Lenard<sup>28</sup>, acerca de la naturaleza del fenómeno: materia o algún tipo de luz<sup>29</sup>. Dos años después Thomson proponía el primer modelo atómico diferente al modelo de Demócrito (s.III AC)<sup>30</sup>. Ese modelo hoy en día lleva el simpático apodo de “torta de pasas”: el átomo era un enjambre de cargas negativas (los corpúsculos) adentro de una nube de cargas positivas sin masa. Thomson concebía a los electrones como el bloque fundamental que constituía a los átomos.

En 1879 Stefan<sup>31</sup> había determinado empíricamente que la energía irradiada por un cuerpo a temperatura dada, dependía de la cuarta potencia de la temperatura. Y esa ley sería deducida teóricamente, por Boltzmann<sup>32</sup>, cinco años después, usando argumentos termodinámicos. En 1899, Wien<sup>33</sup> demostraba, experimentalmente, que la máxima frecuencia de emisión de radiación normal era directamente proporcional a la temperatura.

---

<sup>24</sup> Abraham Albert Michelson (Polonia, con residencia en EEUU, 1852-1931) Recibió el Premio Nobel en 1907 *por sus trabajos en metrología y espectrografía*.

<sup>25</sup> George Francis FitzGerald. (Irlanda, 1851-1901).

<sup>26</sup> El círculo maxwelliano (apodo debido al historiador Bruce Hunt) estaba conformado por Oliver Lodge, Oliver Heaviside, Heinrich Hertz, Joseph Larmor y el propio FitzGerald. En: <http://www.tcd.ie/Physics/History/GFFG-JMDC/science.html>

<sup>27</sup> Joseph John Thomson (Gran Bretaña, 1856-1940) Recibió el Premio Nobel en 1906 *por sus trabajo de conducción de la electricidad en gases*.

<sup>28</sup> Philipp Eduard Anton von Lenard (Alemania, actual Hungría, 1862-1947) Recibió el Premio Nobel en 1905 *por sus trabajos en Rayos Catódicos*.

<sup>29</sup> El nombre “electrón” se debe al físico británico George Johnstone Stoney que entendía la existencia del éter como una manifestación del pensamiento de Dios. Los electrones para él eran singularidades del éter.

<sup>30</sup> El modelo de Demócrito consistía en pensar al átomo como indivisible y había sido adoptado explícitamente por Dalton al principio del siglo XIX, con el nacimiento de la Química Moderna.

<sup>31</sup> Josef Stefan (Austria, 1835-1893).

<sup>32</sup> Ludwig Eduard Boltzmann (Austria, 1844-1906).

<sup>33</sup> Wilhelm Wien (Alemania, 1864-1928). Recibió el premio Nobel en 1911 *por sus descubrimientos referidos a las leyes que gobiernan la radiación del calor*.

### III. La teoría de Planck y la cuántica antigua.

El 14 de diciembre de 1900, en la fiesta de fin de año de la Academia Prusiana de Física, Planck<sup>34</sup> anunciaba su explicación al problema de la distribución de energía del espectro normal de calor irradiado, problema que actualmente se identifica con el nombre de “cuerpo negro”. Nos proponemos describir brevemente, sin entrar en detalles técnicos muy sofisticados, la motivación, el proceso de elaboración y el proceso de validación de la teoría, en la comunidad científica de la época.

En la conferencia que dió en ocasión de recibir el Premio Nobel (1918)<sup>35</sup>, Planck indicaba qué meta motivó su trabajo: En 1859 Kirchhoff<sup>36</sup> había propuesto que el estado de emisión de calor desde una cavidad encerrada por una sustancia era independiente de la naturaleza de esa sustancia. Este resultado, entonces, le permitiría sacar conclusiones generales acerca de la conexión entre la energía y la temperatura.

Kuhn<sup>37</sup> explica con más detalle ese objetivo. Ya, en 1882, a diferencia de la mayoría de los científicos, Planck entendía que el Primer y Segundo Principio de la Termodinámica<sup>38</sup> eran leyes universales que se deducían de la aplicación “a priori” del principio de causalidad, aplicado a las observaciones experimentales, tal como Newton había deducido las leyes de la mecánica. En “Verdampfen, Schmelzen und Sublimieren” de 1881, Planck expone que la irreversibilidad ( $dS > 0$ ) era una “*ley natural*”, mientras que consideraba los procesos de equilibrio ( $dS = 0$ ) como “*neutros... que hay que considerar como idealizaciones*”.<sup>39</sup>

El propio Planck reconoce en esta concepción la influencia de Mach<sup>40</sup>, aunque no menosprecia los resultados de la “Teoría Cinética de los Gases” de Maxwell y Boltzmann, como lo hiciera el padre del positivismo lógico:

*“...el mundo no consiste en misteriosas entidades que interaccionan con otras, igualmente misteriosas; el ego, produce sensaciones, las cuales son lo único accesible. Para nosotros, color, sonido, espacio, tiempo, ... son provisoriamente los últimos elementos y nuestro negocio es investigar sus conexiones dadas.”*<sup>41</sup>.

En 1871 y por los siguientes veinte años, los físicos ingleses entendían que el “demonio de Maxwell”<sup>42</sup>, había saldado el problema del Segundo Principio. Su validez

---

<sup>34</sup> Max Karl Ernst Ludwig Planck (Alemania, 1858-1947). Recibió el Premio Nobel en 1918 *por su descubrimiento de los “cuanta de energía”*.

<sup>35</sup> En: <http://www.nobel.se/physics/laureates/1918/planck-lecture.html>

<sup>36</sup> Gustav Kirchhoff (Alemania, 1824-1887).

<sup>37</sup> Kuhn, TCND, pag.42 a 46.

<sup>38</sup> Rudolf Julius Emmanuel Clausius (Alemania, 1822-1888) en 1865 expresaba estos principios tal como se conocen actualmente: 1) La energía del universo es constante. 2) La entropía del universo tiende a un máximo. A él se debe el término de “entropía” que en trabajos previos era nombrado como el “concepto de medida de equivalencia de las transformaciones”.

<sup>39</sup> Citado en: TCND, pag. 45.

<sup>40</sup> Ernst Mach Verein (Moravia, actual República Checa, 1838-1916).

<sup>41</sup> E. Mach, “The Analysis of Sensation” (1897).

En: <http://www.marxists.org/reference/subject/philosophy/works/ge/mach.htm>

<sup>42</sup> En “Theory of Heat” de 1871, Maxwell indicaba: “... si imaginamos un ser cuyas facultades estén tan avezadas que pueda seguir el curso de cada molécula, .... sería capaz de hacer lo que hoy por hoy nos resulta imposible.... Supongamos que se tiene un recipiente dividido en dos porciones A y B mediante una pared en la que se hay un pequeño orificio, y que un ser ... abre y cierra la compuerta, permitiendo que sólo las moléculas más rápidas pasen de A a B y las más lentas de B a A. De esa manera y sin gasto de trabajo, aumentará la temperatura en B y disminuirá la de A, en contradicción con el segundo principio de la termodinámica”.

era una “verdad estadística” y no una “verdad matemática” y por lo tanto, las moléculas de un gas lo violaban permanentemente.

En Alemania, el tema era ampliamente debatido. Las teorías de Boltzmann generaban gran controversia entre sus colegas porque él defendía con vehemencia la explicación estadística del Segundo Principio como reflejo de la realidad externa:

*“Debo pedir disculpas por decir con vanidad que el bosque esconde los árboles para aquellos que piensan que se apartan de los atomistas a través de la consideración de ecuaciones diferenciales”.*<sup>43</sup>

Pero, como nunca logró demostrar la irreversibilidad de los procesos microscópicos, era ofendido por el energista Ostwald<sup>44</sup> que se oponía tanto al atomismo como al mecanicismo, además de negar la independencia del Segundo Principio del Principio de Conservación de la Energía:

*“La actual irreversibilidad de los fenómenos naturales prueba así la existencia de procesos que no pueden ser descritos por ecuaciones mecánicas, y con eso el veredicto sobre el materialismo científico está establecido”*<sup>45</sup>.

En referencia a la Teoría Cinética, Planck simplemente entendía que esa no era la estrategia adecuada para abordar el problema de la interpretación mecánica de la termodinámica, por su carácter probabilístico. Entonces, su meta en relación al cuerpo negro, era encontrar dicha conexión en un medio continuo (como el éter), que se describiera a través de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales (como las ecuaciones de Maxwell).

En 1918, Planck califica esa meta como de *“ingenuo encanto y agradable expectativa”*. Y, en efecto, un programa de esas características no vería sus primeros resultados hasta los años 50 del siglo XX, a través de un abordaje muy diferente al que los científicos de la época de Planck conocían<sup>46</sup>.

Pero, sin abandonar su concepción del Segundo Principio, en 1894 plantea un modelo claramente electrodinámico para las ondas electromagnéticas de la cavidad radiante. Las ondas eran modeladas a través de resonadores que en forma microscópica tenían un comportamiento similar al de los resonadores que Hertz había estudiando en forma macroscópica. Los resonadores absorbían y emitían energía y, para modelar este intercambio de energía, Planck agrega un amortiguamiento, pensando que de esa forma los resonadores iban a tener un comportamiento irreversible.

En 1897 Boltzmann le indica que sus resonadores no tienen un comportamiento irreversible, después de lo cual, Planck agrega la idea de “desorden molecular” que Boltzmann había propuesto en el libro Teoría de los Gases Vol.1, publicado en 1896.

Finalmente, en los primeros meses del año 1900, se presentaba una relación entre la entropía y la energía que verificaba la ley de Stefan – Boltzmann y la ley de Wien. Además, la relación de Wien-Planck (como se la conocía en aquel momento, dado que Wien era el mentor del joven Planck) se verificaba experimentalmente para

---

<sup>43</sup> L.Boltzmann, “Populäre Schriften” (1905) Citado en:

<http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/Mathematicians/Boltzmann.html>

<sup>44</sup> Wilhelm Ostwald (Rusia, 1853-1932) Recibió el Premio Nobel de Química en 1909 *por sus trabajos en catálisis y por sus investigaciones en los principios fundamentales que gobiernan el equilibrio químico y las velocidades de reacción.*

<sup>45</sup> W.Ostwald Citado en: <http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/Mathematicians/Boltzmann.html>

<sup>46</sup> Ilya Prigogine, “¿Tan Solo una Ilusión?”, Tusquest Editores, 1983 (TSI, pag. 33).

longitudes de onda pequeñas, que eran los datos experimentales que se tenían hasta entonces.

Pero Planck comete un error: demuestra que la solución de la ecuación que había determinado<sup>47</sup> era única, y pocas semanas después, Thiesen<sup>48</sup> encuentra todo un conjunto de soluciones para esa ecuación.

El error no dura mucho tiempo porque en octubre de 1900, (y a la luz de las medidas que realizaron Lummer<sup>49</sup> y Pringsheim<sup>50</sup> en el espectro infrarrojo), la ecuación que había que resolver era otra<sup>51</sup>. De esta segunda ecuación (que es la definitiva) surge la necesidad de definir una nueva constante universal, problema obsesiona al joven investigador.

Por eso, en diciembre de ese año expone una segunda interpretación física de la ecuación. Siguiendo un razonamiento similar al usado por Boltzmann en la distribución de estados moleculares de un gas, Planck hace un conteo de los estados de los resonadores. El conteo de Boltzmann era independiente del intervalo en el cual se separara la energía, el conteo de Planck exigía que esos intervalos fueran discretos: los “cuantos de acción” y dependían de la definición de una nueva constante universal. En 1918, Planck describe su sentimiento de 1900:

*“O el cuanta de acción era una cantidad ficticia y entonces, toda la deducción de la ley de la radiación era en el fondo ilusoria y no representaba más que una representación de fórmulas carentes de significado o la deducción de la ley de radiación estaba basada en coherentes conceptos físicos. En ese caso el cuanta de acción debía jugar un rol fundamental en la física, y era algo enteramente nuevo, nunca antes escuchado que parecía llamar a una revisión básica de todos nuestros pensamientos físicos...”*

También, en 1900 (previo a la presentación de Planck del mes de diciembre) Rayleigh<sup>52</sup> indica que la ley de Wien –Planck no cumpliría la ley de desplazamiento para grandes longitudes de onda. Por lo tanto propone una relación semiempírica que, en 1905 se convertiría en ley, al ser deducida mediante un modelo completamente mecánico de curdas oscilantes en la cavidad emisora. En ese mismo año, 1905, Jeans<sup>53</sup> utiliza el principio de equipartición, trabajando con una “caja de ondas” de energía estacionaria a temperatura T, por analogía al gas ideal tridimensional de Boltzmann. Así, con un modelo electrodinámico confirma la ley de Rayleigh<sup>54</sup>. Ambos modelos

---

<sup>47</sup>  $d^2S/dU^2 = -a/U$  La constante “a” de esta ecuación estaba relacionada con la constante de Boltzmann, constante que el propio Boltzmann no había concebido en su momento, dado que jamás hubiera imaginado que la misma se pudiera determinar experimentalmente, según palabras del propio Planck en la conferencia que pronunciara al recibir el Premio Nobel (1918).

<sup>48</sup> M.F.Thiesen (Prusia, 1849-1936).

<sup>49</sup> Otto Lummer (Alemania, 1860-1925).

<sup>50</sup> Alfred Pringsheim (Baja Silesia, actual Polonia, 1850-1941).

<sup>51</sup>  $d^2S/dU^2 = -a/U(U+b)$

<sup>52</sup> John William Strutt (Lord Rayleigh) (Gran Bretaña, 1842 – 1919) Recibió el Premio Nobel en 1904 por sus investigación en la densidad de los más importantes gases y el descubrimiento del argón conectado con esos estudios.

<sup>53</sup> James Hopwood Jeans (Gran Bretaña, 1877 -1946). Vale señalar que Jeans, entre otros, fue duramente criticado por John Desmond Bernal (Gran Bretaña, 1901-1971), autor de “La función Social de la Ciencia” (1939). Bernal indicaba que Jeans formaba parte de un grupo que quería introducir irracionalidades en la física, usando como excusa la destrucción del viejo materialismo por el surgimiento la Mecánica Cuántica. En: <http://www.comms.dcu.ie/sheehan/bernal.htm>

<sup>54</sup> En la transposición didáctica del tema (ver Eisberg) persiste la impresión de que la teoría de Rayleigh y Jeans es anterior al surgimiento del “cuanto de acción”.

conducen a la “Catástrofe Ultravioleta” o paradoja del panadero, dado que en caso en que se verifique la ley Rayleigh-Jeans, un panadero que tuviera que sacar el pan con el horno prendido, se incineraría.

En 1908, Lorentz<sup>55</sup>, ante el IV Congreso Anual de Matemáticos en Roma presenta los mismos resultados que la teoría de Jeans, pero usando las distribuciones de Gibbs<sup>56</sup> para su teoría de los electrones:

*“La [teoría] de Planck es la única que concuerda con los datos experimentales, pero sólo podemos adoptarla a cambio de alterar profundamente nuestras concepciones fundamentales. La teoría de Jeans [que no verificaba los datos experimentales], por otra parte, nos obliga a atribuir a la causalidad el acuerdo, hoy por hoy inexplicable, entre las observaciones y la teoría de Boltzmann y Wien. Por fortuna cabe esperar que nuevas determinaciones experimentales de la ley [de distribución] nos permitan decidir cuál de las dos es correcta.”<sup>57</sup>*

Vale notar, además, que las palabras de Lorentz criticando el principio de causalidad, hacen referencia a la versión de Hume: las teorías de Boltzmann y Wien se determinaron a partir de datos experimentales. Pero, al creer que la teoría clásica era una ley “a priori”, Lorentz reafirma el principio de causalidad planteado por Kant, lo cual no puede extrañar dado que la deducción de Lorentz es de una belleza matemática brillante. Pero sus comentarios ofenden a los experimentalistas (Wien, Lummer y Pringsheim) y necesariamente tiene que dar marcha atrás, convirtiéndose en uno de los impulsores de la teoría de Planck, a partir de 1910.

Pero el rol del “cuanto de acción” al que Planck hace referencia, es muy distinto al que nosotros conocemos actualmente. En 1900 y por muchos años más, Planck no reconocería la discontinuidad que había introducido en la física. Los primeros reconocimientos de la idea de discontinuidad en la luz tuvieron lugar en 1906 cuando Einstein publica “Teoría de emisión y absorción de la luz”. En el artículo que Einstein había publicado en 1905, sobre el efecto fotoeléctrico, el autor indicaba que las partículas luminosas que había usado para su ley no coincidían con la teoría de Planck de la radiación. Pero en el artículo de 1906, al observar que la distribución de Planck necesita de intervalos de energía  $h\nu$ , reconoce que se trata de la misma idea, surgiendo de esta forma la denominación de “cuanto de luz”. Aún así, en el debate posterior a la conferencia de Salzburgo de 1909, Planck rechaza de plano el “cuanto de luz” que Einstein propuso en la misma conferencia, aunque en el marco de la Teoría de la Radiación (y sólo en ese marco) comenzaba a aceptar la discontinuidad indicando:

*“...la mecánica y la electrodinámica no poseen ningún cuanto de acción por lo tanto no podemos construir ningún modelo mecánico ni electrodinámico. Mecánicamente, parece imposible y habrá que acostumbrarse a ello.”<sup>58</sup>*

Hasta 1918, la medida más exacta del “cuanta de acción” había sido obtenida por Millikan<sup>59</sup> en 1914. Ese experimento (además de determinar el valor de la constante

<sup>55</sup> Hendry Antoon Lorentz (Holanda, 1853-1928) Recibió el Premio Nobel en 1902 (junto con Pieter Zeeman (Holanda, 1865-1943) por sus investigaciones acerca de la influencia del magnetismo en los fenómenos de radiación.

<sup>56</sup> John Willard Gibbs (EEUU, 1839-1903).

<sup>57</sup> Khun, TCND, pag. 225

<sup>58</sup> Citado en Kuhn, TCND, pag.233.

<sup>59</sup> Robert Andrew Millikan (EEUU, 1868- 1953) Recibió el Premio Nobel en 1923 por el electrón y los cuantos de luz, desde el punto de vista experimental.

de Planck) probaba que la teoría que Einstein había propuesto para el Efecto Fotoeléctrico en 1905<sup>60</sup> era correcta. Sin embargo, en un artículo de 1916, Millikan expresa:

*“La ecuación de Einstein para el efecto fotoeléctrico... no puede a mi juicio ser tomada como base de ningún fundamento teórico satisfactorio”.*

En otro párrafo del artículo califica a la teoría corpuscular como *“atrevida, por no decir descuidada hipótesis”*.<sup>61</sup> Actualmente, es inconcebible ignorar la evidente conexión temática entre la Teoría de la Radiación de Planck y la explicación de Einstein al efecto fotoeléctrico. La experiencia de Millikan de 1914 fue tomada como prueba experimental por el Comité de Estocolmo para otorgar el Premio Nobel a Einstein en 1921. Sin embargo, durante quince años la teoría de “cuantos de luz” de Einstein, fue catalogada como de “gran valor heurístico” aunque rechazada por ser incompatible con los fenómenos que explicaban la óptica física y la óptica geométrica<sup>62</sup>.

Aunque Planck siempre se mantuvo en una posición crítica respecto de la discontinuidad que él mismo había introducido en la física, su siguiente programa “Teoría de los Calores Específicos” (desarrollado a partir del año 1911 y que contó con la participación activa de Lorentz y Einstein, entre otros) *“identificó el foco de los efectos cuánticos con una especificidad que el problema del cuerpo negro no consiguió”*<sup>63</sup>. Pero, en 1918 el propio Planck señala:

*“...con el transcurso de los años aumentarán las dificultades para encontrar la forma de introducir el “cuanta de acción” en la bien probada física clásica... aunque la investigación cuántica se impulsara hacia delante, el hueco dejado atrás estaría esperando un posterior llenado, reaccionando aún más fuerte a favor de una concienzuda sistematización”.*

---

<sup>60</sup> Ese mismo año (1905), Einstein publica su Teoría de la Relatividad Especial la cual, al decir del propio Planck “coronaba a la Física Clásica”. Si bien los años que siguieron, Einstein intervino en la discusión de la teoría cuántica, sus principales trabajos se orientaban a encontrar una teoría unificadora de los campos, intención que se ve reflejada en su trabajo sobre la Teoría de la Relatividad General, publicado en 1916.

<sup>61</sup> R. Millikan, *Physics Review* 7, 355 (1916). Citado en:

<sup>62</sup> Einstein había basado su teoría en un artículo de Lenard de 1902 donde se demostraba que la velocidad máxima de los fotoelectrones era independiente de la intensidad de la radiación y dependía de la naturaleza de la misma. (Kuhn, TCND, p.258)

<sup>63</sup> Kuhn, TCND, pag.254.

#### IV: La Gran Guerra y sus consecuencias.

En 1914 estalla la I Guerra Mundial entre las potencias centrales (Imperio Austro-Húngaro y Alemania, entre otros) y la Entente (Inglaterra, Francia y Rusia)<sup>64</sup>. En ese contexto, es inapropiado seguir describiendo la labor científica de la época sólo a través del desarrollo académico de las diferentes teorías, ignorando la influencia que la guerra tenía sobre las sociedades y sobre la comunidad científica que trabajaba en ella.

Durante el anterior y presente siglo, el trabajo de los científicos había demostrado ser muy útil en el desarrollo económico y político de las naciones. Forman<sup>65</sup> indica que durante la Gran Guerra se vieron incrementadas las partidas presupuestales para la física, química y matemática. Sin embargo, las necesidades bélicas imponían una modalidad de trabajo muy diferente y un evidente retraso en las investigaciones básicas. Madame Curie<sup>66</sup> cuenta, en las notas autobiográficas que complementarían su libro “Pierre Curie”, haber prestado su equipo de investigación a diferentes hospitales de Francia que no tenían equipos de Rayos X:

*“En 1915... no teniendo tiempo para investigaciones científicas regulares, decidí usar [el radio] para curar heridas...”*<sup>67</sup>.

Blodgett<sup>68</sup> señala que los químicos alemanes seguían trabajando en su laboratorios con el fin de perfeccionar el uso de gases venenosos en los campos de batalla. El trabajo se desarrollaba en permanente contacto con los mandos militares, cuya rigidez era difícil de aceptar al tiempo que sentían la presión de obtener resultados prácticos y concretos a muy corto plazo, trabajando aislados (asistidos tan sólo por estudiantes, técnicos o simples operarios), por razones de Seguridad Nacional<sup>69</sup>

Aún después de finalizada la guerra, Forman señala que los científicos de habla alemana, a pesar de la gran crisis económica en la cual estaban inmersas las naciones del bloque central, gozaban de independencia del poder político a la hora de administrar sus presupuestos, elegir los temas de investigación y a sus colaboradores. Pero se habían producido algunos cambios significativos:

En el plano académico, los científicos franceses, especialmente, pero también ingleses y estadounidenses, discriminaron a los científicos de las potencias centrales, al punto de ser excluidos oficialmente del International Research Council de 1918 y no se les permitió el ingreso hasta 1926, momento en el cual Alemania fue aceptada en la Sociedad de las Naciones<sup>70</sup>. En el mismo sentido, fueron excluidos del Solvay<sup>71</sup> Institut International de Physics de 1921 y 1924 al cual se volvieron a integrar en 1927, en ocasión de la famosa conferencia dedicada a los “Electrones y Fotones”.

---

<sup>64</sup> En particular, Alemania se había constituido en nación en 1871 y se autodenominaba como una nación joven. Por esa razón, a diferencia de Francia e Inglaterra, no tenía colonias dispersas por el mundo y si bien su poder político crecía en Europa (con el consecuente temor de las otras naciones) la guerra era el modo de acelerar el proceso.

<sup>65</sup> P. Forman, CWCT, pag. 44

<sup>66</sup> Marie Curie (Polonia, 1867-1934) Recibió el Premio Nobel de Física en 1903 (junto a su esposo Pierre) por sus investigaciones en radiación, descubierta por H. Bequerel.

<sup>67</sup> M. Curie, “Pierre Curie”, Dover (1963), pag. 107.

<sup>68</sup> Brian Blodgett, “Germany’s Use of Chemical Warfare in the I War World”. En: [http://members.tripod.com/Brian\\_Blodgett/Chemical.htm](http://members.tripod.com/Brian_Blodgett/Chemical.htm)

<sup>69</sup> Con posterioridad a esas investigaciones, Haber (1918) y Nernst (1920) recibieron el Premio Nobel.

<sup>70</sup> B. Schroeder-Gudenus, “Les scientifiques et la paix”, Les Presses de l’Université de Montreal (1978) citado en la Introducción al libro de Forman, escrita por J.M. Sánchez Ron. (P. Forman, CWCT, pag. 28)

<sup>71</sup> Ernest Solvay (Bélgica, 1838-1922).

Bensaude-Vincent<sup>72</sup> explica la determinación francesa de no publicar en revistas alemanas, ni comprar publicaciones en alemán, ni recibir científicos alemanes ni austríacos, entre 1919 y 1928.

En un plano más personal, Heisenberg<sup>73</sup> relata una larga conversación con Niels Bohr durante su primer visita a Copenhague, en 1924. De los temas tratados durante la conversación (cuáles eran la posición de Heisenberg durante la guerra, qué alcance tenía el grupo de jóvenes del cual Heisenberg era miembro, etc) puede percibirse un tono inquisidor que pone de manifiesto las dudas de Bohr, respecto de aceptarlo como estudiante<sup>74</sup>.

En el plano social, los ciudadanos de ambos bandos, advirtieron directamente que más allá de la cantidad de efectivos que tuvieran uno u otro frente de batalla, los avances científicos habían determinado las posibilidades de ganar la guerra. Después del año 1915, el desarrollo tecnológico exigía que todos los ciudadanos fueran combatientes, bien desde las trincheras, bien desde las fábricas de armamento, al tiempo que todos los ciudadanos eran blanco de ataques porque los avances aeronáuticos llevaban la guerra a las principales ciudades de Europa. Era el comienzo del imperio de las armas de destrucción masiva<sup>75</sup>.

Sumado a ello, los ecos de la Revolución Rusa, indicaban al ciudadano común que podía y debía intervenir directamente en las decisiones políticas, en su educación y en las actividades culturales<sup>76</sup>. En los pueblos de ambos bandos surgieron movimientos anti-científicos de diferente intensidad, pero muy especialmente en los países que protagonizaban la derrota.

Sin desconocer el proceso interno que sufrió la física como disciplina (pero tampoco sin incorporarlo a su análisis) Forman expone que esos movimientos irracionales (representados en el libro “La Decadencia de Occidente” de Oswald Spengler, de 1918-1922<sup>77</sup>) tuvieron un peso decisivo en la actividad científica posterior y en particular, en el surgimiento de la Mecánica Cuántica. Algunas observaciones al respecto del libro de Forman se presentarán en el Apéndice.

---

<sup>72</sup> Bernadette Bensaude-Vincent, “France: un accueil difficile” en “Le monde quantique”, Sciences & Avenir, (1984), pag.70.

<sup>73</sup> Werner Karl Heisenberg (1901-1976) Físico alemán que ganó el Premio Nobel en 1932 por la creación de la Mecánica Cuántica cuyas aplicaciones, entre otras, condujeron a descubrir las formas alotrópicas del hidrógeno.

<sup>74</sup> “Physics and Beyond, Encounters and Conversations”, W.Heisenberg, Harper-Torchbook, 1972. (WH-PB, pag. 43-57).

<sup>75</sup> Jay Winter, Cambridge University en :<http://www.pbs.org/greatwar/interviews/winter4.html>

<sup>76</sup> En Alemania, el 5 de noviembre de 1918, apenas cuatro días antes de firmado el armisticio, estalla una Revolución Popular (que se venía engendrando desde la huelga general declarada en enero) con la consecuente abdicación del Kaiser Wilhelm II, proclamándose la República que queda en manos de la socialdemocracia, los cuales quería instituir una Asamblea Constituyente contra la voluntad de los Espartaquistas de proclamar la República Soviética. La cruenta guerra civil continúa durante 1919 y la debilidad del gobierno se pone de manifiesto, en junio de ese año cuando los ministros Bell y Müller firman el Tratado de Versalles, con el fin de recibir una ayuda económica que llegó cinco años después (plan Dawes). En 1923 Hitler organizaba en Múnich una “Marcha Triunfal”, generando una revuelta popular.

<sup>77</sup> Oswald Spengler, “La Decadencia de Occidente”. Traducción de Ortega y Gasset, Ed XXX, 1925

## V: La Mecánica Cuántica.

En 1913 surgía otra aplicación de la discontinuidad. Dos años antes, Rutherford<sup>78</sup> había demostrado la existencia del núcleo atómico y, para que el átomo fuera estable, Bohr<sup>79</sup> proponía un modelo atómico que incluía la existencia de órbitas circulares, de energía cuantizada, para el electrón girando alrededor del átomo. Pero además, en 1915 esa teoría era llevada a su máxima expresión por Sommerfeld<sup>80</sup> con la aparición de otros números cuánticos para órbitas elípticas. Las palabras de Sommerfeld son bastante significativas, en relación a la belleza del modelo y su correspondencia con las órbitas de los planetas:

*“¡Si al menos Kepler<sup>81</sup> hubiese conocido la teoría cuántica actual! Habría visto realizados los sueños más atrevidos de su juventud...”<sup>82</sup>*

El modelo daba resultados extraordinarios en la interpretación de las líneas espectroscópicas determinadas por Balmer, Ritz y Rydberg<sup>83</sup>, entre otros, gracias a la aplicación de una serie de postulados que estaban a la espera de demostración teórica. Por eso, en 1918, así hablaba Planck de la teoría de Bohr, en 1918:

*“El hecho de que la casi aguda frecuencia de un fotón emitido pueda ser diferente de la frecuencia del electrón emisor debe parecer a un físico teórico, educado en la teoría clásica, a primera vista monstruosa y, como propósito de una representación mental, una demanda prácticamente intolerable.”*

La solución del problema mencionado por Planck fue dada (aunque como veremos, sólo en parte) por el propio Bohr a través del Principio de Correspondencia<sup>84</sup>. En 1922, en la conferencia que dio en ocasión de recibir el Premio Nobel<sup>85</sup>, Bohr indica:

---

<sup>78</sup> Ernest Rutherford (Neozelandia, 1871-1937) Recibió el Premio Nobel de Química en 1908 por sus investigaciones en la desintegración de los elementos y la química de las sustancias radiactivas.

<sup>79</sup> Niels Henrik David Bohr (Dinamarca, 1882-1962) Recibió el Premio Nobel en 1922 por sus investigaciones de la estructura del átomo y de la radiación emanada de él.

<sup>80</sup> Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld (Alemania, 1868-1951).

<sup>81</sup> Johannes Kepler (1571-1630) En “Mysterium cosmographicum” (1596) conectó las órbitas de los seis planetas conocidos en la época con los cinco poliedros regulares que Platón en “Timaeus” entendía como elementos de conformación de la naturaleza.

<sup>82</sup> Citado en P. Forman, CWCT, pag 88.

<sup>83</sup> Forman indica que estos físicos experimentales eran místicos declarados. El dato serviría para establecer una conexión entre las convicciones personales de los científicos y sus investigaciones, conexión que parece poner en tela de juicio la objetividad del observador, objetividad que no ha sido desmentida por medidas posteriores. Aunque no tenemos información de cómo fue el proceso de filiación al misticismo de estos investigadores, no puede extrañar que un modelo que tiene muchos puntos en común con el planetario, genere una expectativa en aquellos que entienden que existe una realidad exterior. Bohr, en su conferencia de 1922, expone esa analogía, pero se preocupa por marcar las diferencias: “Debido a las circunstancias, las órbitas se alejarán grandemente de un movimiento kepleriano, ya que consistirían en una serie de sucesivas vueltas exteriores que tienen el mismo tamaño y forma, pero cada una de las cuales se aparta un ángulo apreciable en relación a la precedente”.

<sup>84</sup> La versión definitiva del Principio de Correspondencia es de 1923 y establece: 1) Que las previsiones de la física cuántica deben corresponder a las previsiones de la física clásica, cuando el número cuántico es muy grande. 2) Que las reglas de selección de las transiciones son válidas para todos los números cuánticos y por lo tanto, lo que se prevé para la física clásica (números cuánticos grandes), puede aplicarse para la física cuántica (números cuánticos pequeños).

<sup>85</sup> <http://www.nobel.se/physics/laureates/1922/bohr-lecture.pdf>

*“En conexión con el importante trabajo de Ehrenfest<sup>86</sup> y Einstein esos esfuerzos conducen a la formulación del principio de correspondencia para el cual la ocurrencia de transiciones entre estados estacionarios acompañada por la emisión de radiación es rastreada hacia atrás en las componentes armónicas en las cuales el movimiento del átomo puede ser resuelto y las cuales, de acuerdo a la teoría clásica, determina las propiedades de la radiación que es generada por el movimiento de las partículas.”*

Sin embargo, en 1949, en un artículo que escribiera sobre la posición de Einstein, respecto de Mecánica Cuántica, el propio Bohr, citando a Einstein, nos recuerda que el camino de la mecánica cuántica antigua no estaba tan bien cimentado:

*“La debilidad de la teoría radica en el hecho de que, por un lado, no se obtiene una conexión cerrada con el concepto de onda y, por otro lado, se deja librado a la improvisación el tiempo y la dirección de los procesos elementales;...”<sup>87</sup>*

Y, en lugar de levantar esas “debilidades” en un sentido clásico, la física aprendió a convivir con ellas. En su libro “Physics and Philosophy” de 1958, Heisenberg se preocupa por indicar que la Mecánica Cuántica surge de cambiar las preguntas, para obtener nuevas respuestas:

*“Fue en ese tiempo que los físicos aprendieron a hacer las preguntas correctas, y haciendo las preguntas correctas es con frecuencia haber recorrido la mitad del camino hacia la solución del problema.”<sup>88</sup>*

Sin embargo, estas son las palabras de quien ve esos problemas con una perspectiva muy diferente a la que tenía cuando los había estudiado. De todas formas, a través del libro “Physics and Beyond...” puede advertirse que el tema de cómo se debía encarar la actividad de investigación estaba en tela de juicio: Una nueva constante universal, la introducción de modelos tan detallados a nivel microscópico, como los modelos atómicos, el uso de abordajes estadísticos, necesariamente tuvieron que generar controversias en el ambiente académico.

En 1925, Heisenberg propone una aproximación diferente al problema del átomo, basada en la aplicación del álgebra matricial a magnitudes que se observaban en los experimentos: la intensidad y la frecuencia de la radiación emitida por los átomos. Creemos que, al principio, Heisenberg no pudo intuir que ese nuevo abordaje introduciría grandes modificaciones epistemológicas en la física. Coincidimos con Chevalley<sup>89</sup> en indicar que el reconocimiento de las teorías de Mach en la elección de las magnitudes físicas involucradas, o sea los observables, responde a “un método heurístico impuesto por las circunstancias” y la necesidad inicial de defender la conexión entre el mundo abstracto de la matemática y el mundo concreto de la física. En los documentos que pudimos estudiar, Mach es nombrado solamente en las conversaciones con Einstein que siguieron a la primera presentación de su trabajo.

---

<sup>86</sup> Paul Erhenfest (Austria, 1880 - 1933).

<sup>87</sup> Citado desde A.Einstein, *Phys. Zs.*, 18, 121, (1917), en N.Bohr, “Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics”, publicado en “Albert Einstein: Philosopher-Scientist” P.A: Schilpp; ed., pp 200-241. En: <http://www.emr.hibu.no/lars/eng/schilpp>

<sup>88</sup> En: <http://www.marxists.org/reference/subject/philosophy/works/ge/heisenb5.htm>

<sup>89</sup> Catherine Chevalley, “Une nouvelle science” en “Le monde quantique”, Sciences & Avenir, 1984 (pag.40).

Pero ninguna de estas interrogantes se planteaba de Broglie<sup>90</sup>, en 1924, cuando extiende la dualidad onda-partícula que Einstein había propuesto para la luz, a las partículas materiales. Pese al aislamiento que los físicos franceses se habían auto-impuesto después de la Gran Guerra, Schrödinger<sup>91</sup>, en 1926, retoma esta idea para plantear una ecuación de onda que resolvía el problema de la cuantización de energía del átomo de hidrógeno, sin la necesidad de hipótesis cuánticas adicionales y planteando una forma concreta de modelar los “saltos cuánticos”, tema que la teoría matricial parecía no poder justificar. En las palabras que Born<sup>92</sup> pronunciara en ocasión de que le entregaran el Premio Nobel en 1954, la teoría de Schrödinger es calificada como “*sorpresa dramática*”. Y, en efecto, la ecuación diferencial en las variables “tiempo” y “espacio” para las ondas de materia, aparentaba ser (para muchos físicos como Einstein), la ley universal que describiría el comportamiento del átomo.

Sin embargo, la teoría matricial de Heisenberg había tenido eco entre físicos jóvenes como Dirac<sup>93</sup>, que en 1925 la había re-formulado, por el propio Schrödinger que demostró la equivalencia entre ambas formulaciones, por Born que daba una interpretación probabilística al módulo de la función de onda, por el propio Heisenberg que en abril de 1927, planteaba el Principio de Incertidumbre<sup>94</sup> y por Bohr que en setiembre de 1927, en el Congreso Internazionale dei Fisici, en Como, en honor a Volta, presentó una primer versión del concepto de Complementariedad.

Un mes después, en el V Institut International de Physique Solvay, en Bruxelles, dedicado a “Electrones y Fotones”, se instalaba una sesión de debate bajo el título “Causalidad, determinismo y probabilidad” donde se discutían los principios fundamentales de la Mecánica Cuántica.

## VI: Complementariedad.

La interpretación de Copenhague de la Mecánica Cuántica, debida principalmente a Bohr, puede resumirse en el marco conceptual de la Complementariedad. Si bien la idea inicial fue presentada en 1927, el concepto se consolidó después de muchos años de elaboración, discusión y reflexión. La siguiente cita da una idea general del marco, pero estaríamos siendo irrespetuosos para con quienes lo elaboraron, si vemos a la cita como una definición. El propio Bohr, en una entrevista realizada por Kuhn<sup>95</sup>, indica que Einstein, desde su referencial causal, exigió muchas veces una definición concreta y éste nunca dio respuesta a esa exigencia.

*“...el fundamental postulado de indivisibilidad del cuanto de acción es en sí mismo, desde el punto de vista clásico, un elemento irracional el cual inevitablemente requiere que abandonemos el modo causal de descripción y el cual, debido al acoplamiento entre los fenómenos y las observaciones,*

<sup>90</sup> Louise Victor Pierre Raymond duc de Broglie (Francia, 1892-1987) Recibió el Premio Nobel en 1929 por la naturaleza ondulatoria de los electrones.

<sup>91</sup> Erwin Schrödinger (Austria, 1887-1961) Recibió el Premio Nobel de 1933, compartiéndolo con Dirac por el descubrimiento de una nueva productiva forma de la teoría atómica.

<sup>92</sup> Max Born (Alemania, 1882-1870) Recibió el Premio Nobel en 1954 por sus fundamentales investigaciones en mecánica cuántica, en especial por su interpretación estática de la función de onda.

<sup>93</sup> Paul Adrien Maurice Dirac (Gran Bretaña, 1902-1984) Recibió el Premio Nobel de 1933 compartiéndolo con Schrödinger por el descubrimiento de una nueva productiva forma de la teoría atómica

<sup>94</sup> El Principio de Incertidumbre:  $\Delta x \Delta p \geq h$ , o sea que, existe una limitación intrínseca al querer determinar la posición y el momento de una partícula atómica.

<sup>95</sup> Thomas S. Kuhn, Léon Rosenfeld, Erik Rüdinger, and Aage Petersen, “Archives for the History of Quantum Physics”, OH50 (1962) Citado en: [http://www.olist.com/essays/text/register/bohr\\_complementarity.html](http://www.olist.com/essays/text/register/bohr_complementarity.html)

*nos fuerza a adoptar nuevos modos de descripción designados como complementarios en el sentido de que cualquier aplicación dada de los conceptos clásicos implica el simultáneo uso de otros conceptos clásicos los cuales en una conexión diferente son igualmente necesarios para la elucidación de los fenómenos.*”<sup>96</sup>.

El marco conceptual dado por la Complementariedad, toca diferentes aspectos de la física, demostrando la completitud de la Mecánica Cuántica. En ese sentido, son complementarias, mutuamente excluyentes pero igualmente necesarias, para completar la descripción de un fenómeno, la representación onda y partícula en la teoría de la luz o las ondas de materia y la formulación matricial, o la medida de la posición y momento de una partícula.

Por otro lado, el marco destruye la idea de objetividad, tal como se planteaba en la física clásica, abandonando la idea de “realidad dogmática”, a favor de una “realidad práctica”. El observador, entonces, se reconoce como parte del sistema, interaccionando con las otras partes del sistema. La objetiva descripción del fenómeno se logra separándolo, sin ambigüedades, de la experiencia. Pero ésta no puede prescindir de aquel.

Por último, señalaremos que el marco conceptual no prescinde totalmente de la ley de causalidad; su aplicación es necesaria en la descripción de los eventos que permiten la realización de una medida.

No pretendemos con esta incompleta enumeración, describir completamente el marco conceptual que inaugura la Interpretación de Copenhague en la física. Pero sí queremos señalar que nuevas teorías podrán confirmar o cambiar este marco conceptual, que más allá de haber sido propuesto por una persona en particular, responde a la necesidad de un colectivo de cambiar su relación con el conocimiento. No podemos pensar que ese cambio sea unánime. Popper, por ejemplo, indica que la tradición científica se basa en el ideal de encontrar la verdadera solución a un problema:

*“...no hay razón para dudar del carácter realista y objetivo de toda la física. El rol jugado por el sujeto observante en la física moderna no es de ninguna forma diferente al rol que jugó en la dinámica de Newton o en la teoría de campo eléctrico de Maxwell: el observador es, esencialmente, el hombre que prueba la teoría. Para eso, él necesita una cantidad de otras teorías, teorías que compiten y teoría auxiliares. Todo eso muestra que no somos tanto observadores como pensadores.”*<sup>97</sup>

Sin embargo, Thomas Kuhn indica que se puede prescindir de la existencia de una realidad externa, sin perder el verdadero valor de la ciencia: el saber resolver rompecabezas (puzzle-solver), valor que se impone a todos los otros valores, a la hora de elegir una teoría:

*“...no puedo dudar, por ejemplo, que la mecánica de Newton mejora la de Aristóteles y que la de Einstein mejora respecto de la de Newton como instrumento para resolver el rompecabezas. Pero no puedo ver en su sucesión una dirección coherente de desarrollo ontológico”*<sup>98</sup>

---

<sup>96</sup> Niels Bohr, “Atomic Physics and Description of Nature”, 1934. Citado en: [http://members.tripod.com/~Glove\\_r/Folse5.html](http://members.tripod.com/~Glove_r/Folse5.html)

<sup>97</sup> Karl Popper, “Objective Knowledge. A Realist View of Logic, Physics and History” (1966). En: <http://www.marxists.org/reference/subject/philosophy/works/at/popper.htm>

<sup>98</sup> Thomas s. Kuhn, “The Structure of Scientific Revolutions” (1962). En: <http://www.marxists.org/reference/subject/philosophy/works/us/kuhn.htm>

## VII: Y después...

Este trabajo, lejos de pretender ser completo, intentó dar una visión general del proceso seguido por la física en los primeros años del siglo XX. Al realizarlo teníamos como objetivo demostrar que el conocimiento científico, que hasta principios de siglo parecía instituido una vez y para siempre, evoluciona irreversiblemente en un proceso donde se conjugan una serie de elementos que no pueden consolidarse en una única teoría del método científico.

Más allá de la importancia del proceso en la interna de la disciplina, me interesa destacar que esos cambios lograron la desvinculación de las ciencias naturales de un origen que no dejaba de tener algo de religioso: En sus albores, la investigación científica moderna se plantea como una forma alternativa de búsqueda de una verdad absoluta, en oposición a las doctrinas eclesásticas. Aceptamos la importancia de ese hecho, como primer paso hacia el abandono de una visión estática y constreñida del desarrollo del conocimiento humano. Pero, el abandono de la idea de realidad externa y del principio de causalidad, modifica las bases fundacionales del método científico y abre el camino para que las ciencias sociales se incorporen al espectro, en igualdad de condiciones.

Este cambio de carácter no puede ser interpretado como una vulnerabilidad de la ciencia. Muy por el contrario, el método científico se ha fortalecido al perder su definición uniforme e incorporar lo que diferentes científicos (Popper, Kuhn, Lakatos, etc.) han marcado sobre él y aún lo que se ha manifestado en contra de él<sup>99</sup>.

Tomando en cuenta la interacción de la ciencia con la sociedad, a lo largo del siglo XX, se han incrementado las tendencias irracionalistas, a las que se suman las visiones economicistas, que no siempre son conciliables con el trabajo de la ciencia. Eso ha motivado diferentes trabajos que defienden a la ciencia. Algunas de esas defensas parecen querer “evangelizar”<sup>100</sup> a favor de una forma superior de conocimiento. En contraposición y desde la ciencia misma, Feyerabem indica “Cómo defender a la Sociedad contra la Ciencia”<sup>101</sup> Otros trabajos como el de Bernal en “La Función Social de la Ciencia”<sup>102</sup>, el de Bunge en “Ciencia y Desarrollo”,<sup>103</sup> o el de Ziman en “Prometeo Encadenado”<sup>104</sup> describen el desarrollo de la ciencia, en un contexto social e histórico determinado.

A modo de disculpas por el atrevimiento de querer desentrañar algo de ese sistema fuera del equilibrio, tomo las palabras de Spengler para decir que mirar hacia atrás, siempre será *“imprimir en un alma extraña a la nuestra un concepto derivado de nuestros propios hábitos anímicos”*<sup>105</sup>

---

<sup>99</sup> Paul Feyerabem, “Against Method” (1975).

En: <http://www.marxists.org/reference/subject/philosophy/works/ge/feyerabe.htm>

<sup>100</sup> Por ejemplo, Mario Bunge en “Ética y Ciencia” Ed. Siglo Veinte (1976) escribe un código de ética científica pretendiendo que los científicos, como sacerdotes, lo llevemos al resto de la humanidad.

<sup>101</sup> Paul Feyerabem, “Cómo defender a la Sociedad contra la Ciencia”, Radical Philosophy, V2, p.4 (1975) En: “Revoluciones Científicas” de Ian Hacking, (Cap. VIII).

<sup>102</sup> John D. Bernal, “The Social Function of Science”. (1939); “Dialectic Materialism and Modern Science” (1937). En: <http://www.marxists.org/archive/bernal/works/1930s/dsams.htm>

Bernal, en épocas donde el abandono del Principio de Causalidad hacían crecer tendencias irracionales, sintió la necesidad de establecer un método científico basado en el materialismo dialéctico. Defendía que el trabajo científico debía ser arbitrado por la sociedad al tiempo que era la forma de que ésta se desarrollase.

<sup>103</sup> Mario Bunge, “Ciencia y Desarrollo” (1980). Bunge defiende la financiación de la investigación básica y aplicada (en libre elección de sus temas), frente a la investigación tecnológica (para la cual reclama el arbitrio social), estableciendo la necesidad de conjugar cuatro aspectos del desarrollo humano: el biológico, el económico, el cultural y el político.

<sup>104</sup> John Ziman, “Prometheus Bound”, Ed. Cambridge University Press (1994). Ziman describe el carácter colectivo de una empresa que emplea mucho tiempo en la justificación y competencia por los recursos económicos que necesita para subsistir.

<sup>105</sup> Spengler, OS-DO, pag.18.

## Apéndice : La Tesis de Forman.

En el capítulo I, Forman describe las tendencias filosóficas del mundo académico de la Alemania derrotada como: *“lebensphilosophie” (filosofía de vida) neoromántica, existencialista, manifestada en la crisis y caracterizada por un antagonismo hacia la racionalidad analítica en general y hacia las ciencias exactas y sus aplicaciones técnicas, en particular.*”<sup>106</sup>

En el capítulo II, Forman investiga *“la respuesta de esos científicos en un nivel ideológico...principalmente en las conferencias de dichos científicos exactos ante audiencias generales pero con educación académica...”*<sup>107</sup>

Por último, en el capítulo III, Forman *“trata de demostrar que el movimiento para prescindir de la causalidad en la física...fue un esfuerzo de los físicos alemanes para adaptar el contenido de la ciencia a los valores de su medio ambiente intelectual”*<sup>108</sup>

En la introducción del libro de Forman, el traductor José Manuel Sánchez Ron señala que existen dos trabajos que critican fuertemente la tesis de Forman.

Kraft y Kroes<sup>109</sup> indican que Forman usó como referencia exclusivamente documentos que estaban dirigidos a un público no especializado. A favor de Forman, indicaremos que si los científicos se sentían obligados a remarcar las palabras “causalidad” y “lógica”, en la explicación pública de su labor, era porque se sentían de alguna forma presionados por el medio ambiente a abandonarlas. Del mismo modo, el reconocimiento de una crisis de la ciencia frente a actores sociales externos a la física, refleja que la crisis interna que estaban viviendo, era tan importante que apenas podían simularla. Pero es posible que estos autores tuvieran razón cuando indican que Forman supone que “cuantos” y acausalidad son lo mismo. Citando a Forman: *“una mecánica acausal fue particularmente bienvenida por los físicos alemanes debido a la irresistible oportunidad que ofrecía para mejorar su imagen pública”*.<sup>110</sup>

Como ya se indicara en la sección V, recién en 1927, Bohr propone el referencial de “Complementariedad” que necesitará varios años de elaboración y aceptación por parte del medio académico. Mientras tanto, por un lado, la física había signado sus esperanzas en la descripción espacio-temporal de la ecuación de onda, que en opinión de Einstein y del propio Schrödinger (por lo menos, hasta 1928) iba a ser quien satisficiera la necesidad de una ley natural. En ese sentido, es notable que se le haya otorgado a Born el Premio Nobel recién en 1954, por su interpretación probabilística de la función de onda. Por otro lado, como se ha mencionado en relación con el reconocimiento de otras teorías, los científicos se dieron tiempo para pensar experimentos virtuales que refutaran la Mecánica Cuántica y fueron esas refutaciones las que fortalecieron el cambio ontológico.

Hendry<sup>111</sup> indica que el concepto de causalidad estaba en tela de juicio dentro de la física desde tiempo atrás. Siguiendo a Forman, cuando indica que: *“...toda sugerencia de una relajación del determinismo completo fue enunciada y tomada como fallo o abandono de la causalidad”*<sup>112</sup>, no podemos olvidar las diferentes controversias

---

<sup>106</sup> P.Forman, CWCT, pag.39

<sup>107</sup> P.Forman, CWCT, pag.40

<sup>108</sup> <sup>108</sup> P.Forman, CWCT, pag.41

<sup>109</sup> P.Kraft & P.Kroes, “Adaptation of Scientific Knowledge to an Intellectual Environment. Paul Forman’s Weimar Culture, Causality and Quantum Theory, 1918-1927: Analysis and Criticism”, Centaurus, 76-99.

<sup>110</sup> PF-CWC, pag. 148.

<sup>111</sup> J.Hendry, “Weimar Culture and Quantum Causality”, History of Science, 18, 155 –180.

<sup>112</sup> P.Forman, CWCT, pag. 108.

en torno a la interpretación probabilística del Segundo Principio. Forman<sup>113</sup> nos indica que la interpretación energética de la Naturaleza, debida a Ostwald no puede considerarse como antecedente del abandono del Principio de Causalidad y le haremos caso. También nos advierte que entre 1890 y 1918, positivistas y neokantianos estaban haciendo una campaña contra la causalidad que era de diferentes características a las que finalmente la derrocaron. Pero, no podemos dejar de indicar que Cassirer<sup>114</sup> vió el tema desde otro punto de vista: “*Mirando la ley de entropía como una ley de probabilidad se había introducido en el fuerte concepto de ley un dualismo completamente foráneo a su significado original*”. Como las leyes de probabilidad no parecían tener “*la misma calidad epistemológica y dignidad*” de las leyes dinámicas las cuales eran miradas como leyes absolutas de la naturaleza, “*esa propiedad debía ser derrotada*”. Entonces, el trabajo de Forman se debilita cuando excluye casi toda referencia al desarrollo de la Mecánica Estadística, antes de 1918 (excepto cuando se citan refutaciones a estos programas)<sup>115</sup> y se vale de ellos en los casos de Weyl y Nernst, posteriores a 1918.

Otros autores, han citado el trabajo de Forman, como apoyo a su trabajo. En particular, Register<sup>116</sup>, lo comenta como respuesta a la pregunta de “¿Por qué la complementariedad fue aceptada?”, mientras Bensaude-Vicent<sup>117</sup> lo menciona como antecedente para exponer un análisis equivalente del contexto francés.

En nuestra opinión, el trabajo de Forman es una formulación necesaria y complementaria de los muchos análisis que describen el desarrollo de la física, desde su proceso interno o de los trabajos que consideran las motivaciones personales de los científicos. En la bibliografía consultada hemos encontrado poco material que, como la tesis de Forman, relacione el surgimiento de esas teoría con el contexto social. Es aún más escaso el material que establece esa conexión con el contexto económico y político o con las filiaciones político-ideológicas de los científicos que la protagonizaron (análisis que es mucho más completo en los años posteriores, a partir del surgimiento del nazismo).

En ese sentido, el trabajo de Forman es muy valioso, porque describe un aspecto que aún hoy es muy difícil de ser asumido por el demos intelectual, especialmente por los investigadores en Matemática o Física teórica: la influencia ideológica mutua entre los científicos exactos y naturales y el medio social en el cual se desarrollan las teorías.

Pero la tesis de Forman, por momentos, parece ingenua al querer atribuir a cambios ideológicos casi todas las concesiones que los científicos hacían al medio, sin observar si esos cambios se vieron realmente reflejados en su trabajo habitual o responden simplemente a intereses económicos o personales. Como contraparte, el medio social y, particularmente, el medio académico, pudo haber adoptado una ideología por los mismos intereses económicos.

Si, según las propias palabras de Forman, los físicos experimentales “*tenían menos de qué retractarse*”<sup>118</sup> (porque, seguramente, habían sido más útiles a los intereses nacionales), vale preguntarse si el ataque a los físicos y matemáticos teóricos

---

<sup>113</sup> P.Forman, CWCT, pag.107.

<sup>114</sup> Ernest Cassirer, “Determinism and Indeterminism in Modern Physics”, (1956), pag. 77.

<sup>115</sup> En P.Forman, CWCT, pag.106, se cita a Max Planck y a Marian Smoluchowski (Austria, 1872-1917) refutando los trabajos de esa área. Lamentablemente, no tenemos acceso a esos documentos. Pero esas citas pueden tener otra lectura, en función del concepto que tenía Planck, respecto del 2do Principio y del trabajo de Smoluchowski & Einstein, en relación al movimiento Browniano.

<sup>116</sup> En: [http://www.olist.com/essays/text/register/bohr\\_complimentarity.html](http://www.olist.com/essays/text/register/bohr_complimentarity.html)

<sup>117</sup> Bernadette Bensaude-Vicent, en “France: un accueil difficile” (publicado en “Le monde quantique”, Sciences & Avenir, 1984), pag. 67

<sup>118</sup> P.Forman, CWCT, pag. 86.

es un ataque a las raíces causales u ontológicas de sus teorías o, simplemente es un ataque a una tarea de poca utilidad inmediata en la Alemania devastada por la guerra. En ese sentido, Spengler advierte que el gran público juzga a la matemática occidental de “*juego ingenioso y algo abstruso*” como a “*todas las grandes obras*”<sup>119</sup>.

Le concedemos a Forman el cambio ideológico y la influencia spengleriana que atribuye a los matemáticos von Mises<sup>120</sup> y Doetch. Pero se trata de científicos que están tratando de abrir camino a la Matemática Aplicada y, siendo atacados por sus pares, necesitan una aprobación externa de su tarea. Por un lado, una nueva matemática justifica de antemano la inexistencia de una respuesta única y exacta a todas las preguntas, respuesta que probablemente estaban esperando los que financiaban esas investigaciones. Por otro lado, su propia elección parece reafirmar la ecuación matemática=materialismo, después del enorme esfuerzo que, según Spengler, la matemática occidental hizo por “*emanciparse del concepto de magnitud*”<sup>121</sup>. Años después, von Mises encontraba estas respuestas en el positivismo:

*“Positivismo no clama que todas las preguntas puedan ser respondidas racionalmente, justo como la medicina no se basa en la premisa de que todas las enfermedades son curables, o la física no se basa en el postulado de que todo fenómeno es explicable. Pero la mera posibilidad de que puede no haber respuestas para algunas preguntas no es suficiente razón para no buscarlas o para no usar todo lo que esté a nuestro alcance.”*<sup>122</sup>

El carácter causal de la tesis, está especialmente dado por titulares tales como “*Capitulaciones al spenglerismo*” o “*Conversiones a la causalidad, 1919-1925*”<sup>123</sup>, que parecen querer reconocer en la lectura de un libro o en la adopción de una ideología un antes y un después, en relación causal y determinista, ignorando el proceso necesariamente sometido a fluctuaciones. Reconocemos que esas fluctuaciones no pueden determinarse de los datos experimentales (o sea de los documentos que el autor usa en la exposición de sus ideas) dado que la propia experiencia fija un estado estacionario para la información. Pero, en el mismo sentido, las ingenuidades de Forman, nos inducen a pensar que quizás no se haya logrado separar, sin ambigüedades, el fenómeno a ser descrito del sujeto que lo observa. Como esa condición no es sencilla en ciencias sociales, Forman reconoce, aunque a nuestro entender, un poco tardíamente, que “*el modelo “sociológico” empleado en este ensayo no puede ser la verdad única.*”<sup>124</sup>

---

<sup>119</sup> Spengler, OS-DO, pag.137.

<sup>120</sup> Richard von Mises (Austria, 1883-1953).

<sup>121</sup> Spengler, OS-DO, pag.122.

<sup>122</sup> R.von Mises, “Positivism: A Study in Human Understanding” (1951). Citado en: <http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/Mathematicians/Mises.html>

<sup>123</sup> P.Forman, CWCT, pag.86 y 113, resp.

<sup>124</sup> P.Forman, CWCT, pag.154.