

Electrones y huecos: perspectivas en torno al debate sobre el realismo científico

R. Guzmán

Tecnologico de Monterrey

Av. Eugenio Garza Sada Sur 2501, Mty, N.L., México.

e-mail: rguzman@itesm.mx

Received 24 July 2017; accepted 5 September 2017

El par electrón-hueco que surge de la teoría de semiconductores presenta un reto al usarlo como caso histórico para abordar el debate en torno al realismo científico. En este artículo presentamos y defendemos nuestra posición sobre el estatus de ese par de partículas, atendiendo a la paradoja que presentan como entidades similares desde su descripción teórica, pero profundamente diferentes desde su estatus ontológico. Para esto nos aproximamos al problema desde la perspectiva de un realismo moderado sustentado en un realismo estructural y auxiliado por conceptos en torno a la emergencia de propiedades y a la acción y puesta en operación de las entidades teóricas.

Descriptors: Realismo científico; realismo estructural; emergencia; acción tecnológica; par electrón-hueco.

The electron-hole pair that arises from the theory of semiconductors presents a challenge when using it as an historical case to address the debate on scientific realism. In this paper we present and defend our position on the status of that pair of particles, attending the paradox they present as similar entities from its theoretical description, but profoundly different from its ontological status. For this, we approach the problem from the perspective of a moderate realism sustained by a structural realism and aided by concepts about the emergence of properties and the action and operationalization of theoretical entities.

Keywords: Scientific realism; Structural realism; emergence; technological action; electron-hole pair.

PACS: 01.70.+w; 01.65.+g; 72.20.-i

1. Introducción

Los semiconductores conforman la base material de la industria informática y de telecomunicaciones. Los grandes avances tecnológicos en estos campos están directamente relacionados con el éxito en el proceso de miniaturización de la electrónica de estado sólido. Ahora bien, si nos preguntamos por las bases científicas de operación de los dispositivos semiconductores nos enfrentamos con “realidades” cuestionables. Las entidades que, de acuerdo con las teorías correspondientes, son responsables de la operación de dichos artefactos tecnológicos, aquellas partículas físicas que al moverse e interactuar entre sí producen los efectos deseados, son los portadores de carga identificados como electrones y huecos. Éstos aparecen entonces como entidades teóricas centrales de la teoría de semiconductores. Una indagación que examine el asunto de manera crítica y aguda nos conduce a cuestiones sutiles como, por ejemplo, ¿existen los electrones y los huecos, o son meras ficciones teóricas?, ¿las teorías que los describen son verdaderas?, ¿La acción tecnológica que se desprende de la “manipulación” o el “control” de dichas partículas les otorga un estatus de realidad?, entre otras muchas.

En estas últimas preguntas se destaca que nuestro interés por el tema es claramente filosófico. Queremos retomar los debates actuales sobre el realismo científico, pero ateniéndonos a una convergencia o interés por la integración de la historia y la filosofía de la ciencia. Así, el análisis de un caso histórico donde se ha teorizado sobre un grupo de fenómenos naturales, pero poniendo en la mira diversas interrogantes desde la filosofía de la ciencia, puede brindar acercamientos que den luz a cuestionamientos relacionados con la función

de las teorías y los procesos de cambio científico, sin la exigencia de agotar o generalizar lo que se pueda decir sobre problemas de carácter ontológico o epistemológico. Creemos que esta forma más particular y más concreta de abordar las preguntas centrales sobre la ciencia, si bien con menos pretensiones, nos permite indagar de manera más puntual los temas de interés dentro de la filosofía de la ciencia y más particularmente el debate sobre el realismo científico.

Empecemos por revisar algunas nociones centrales en nuestra pesquisa. La expresión realismo científico [1] hace referencia a una posición intelectual que considera razonable considerar a la actividad científica como dirigida a la comprensión del mundo, a conocer la verdadera naturaleza de las cosas, y que por lo tanto también resulta sensato creer en la existencia de las entidades no observables postuladas por las teorías científicas de mayor éxito [2]. Un mínimo de consideración filosófica puede fácilmente mostrar que en su forma radical esta idea es ingenua y que también son razonables posturas anti-realistas e instrumentales que consideran que el fin de la ciencia no es la búsqueda de la verdad, ni siquiera de teorías que se aproximen a la misma. El objetivo de la ciencia, sería, en todo caso, de carácter utilitario, para lo cual bastaría con que las teorías sean empíricamente adecuadas y posean el poder de predicción de eventos observables [3]. Existen, desde luego, posiciones intermedias, como podría ser la defensa de un realismo de las entidades teóricas, pero no de las leyes que las postulan [4] o un realismo estructural que no cree en la realidad de las entidades, pero sí en la existencia de estructuras teóricas que describen el mundo y que se conservan en los procesos de cambio científico [5]. A lo largo del texto iremos haciendo referencias a diferentes posiciones filosófi-

cas de entre las mencionadas previamente y presentaremos algunos de sus argumentos según lo vaya requiriendo nuestro caso de estudio que tendrá la característica de referirse a la teorización y la experimentación en torno a los fenómenos de conducción eléctrica en diversos materiales, entre ellos los semiconductores, donde como veremos, son igualmente importantes la ciencia básica, en un sentido de explicación fundamental de los fenómenos, y la acción tecnológica, en un sentido de necesidad de control y manipulación.

El tema del electrón como entidad teórica por excelencia ha sido desde luego abordado desde múltiples perspectivas. Pero aquí no nos interesa la cadena histórica de teorías del electrón per se, aunque sí revisaremos sucintamente el tema, sino particularmente el lugar que ocupa dicha entidad dentro de una teoría más específica que es la teoría de los semiconductores. Desde este punto de vista el electrón no aparece solo, sino en compañía de su “contrario”, el hueco. En todo caso, ambas entidades teóricas se caracterizan por una serie de propiedades del mismo tipo (masa, carga, movilidad, etc.), pero su estatus ontológico, incluso desde el más superficial de los análisis, pareciera divergir por completo. Nos interesa entonces atender a cuestiones filosóficas como las siguientes: ¿qué nos pueden decir las teorías sobre la representación y sobre el cambio científico sobre esto?, ¿qué podemos aprender con este caso de estudio sobre el realismo/antirrealismo científico, sobre las teorías de causación, etc.?

En esta aventura de reflexión filosófica le daremos una mirada primeramente al caso del electrón, el cual nos resultará útil para presentar las diferentes posiciones filosóficas que queremos contrastar y, por ende, nos servirá como punto de partida y de establecimiento de ciertos compromisos para el posterior estudio de la dupla “electrón-hueco”. En un segundo momento, y siguiendo una exposición histórica de las teorías de conducción eléctrica, presentamos el concepto de hueco, y nos preguntamos por su estatus como ejemplo de causación negativa. Enseguida defendemos nuestra posición sobre el estatus de ese par de partículas, atendiendo a la paradoja que presentan como entidades similares desde su descripción teórica, pero profundamente diferentes desde su estatus ontológico. Para esto nos aproximamos al problema desde la perspectiva de un realismo moderado sustentado en un realismo estructural y auxiliado por conceptos en torno a la emergencia de propiedades y a la acción y puesta en operación de las entidades teóricas.

2. El electrón como paradigma de entidad teórica y la pregunta sobre su existencia

Quizás el protagonista más común y paradigmático de los debates filosóficos en torno al realismo ha sido el electrón, por tratarse de una entidad teórica que ha sobrevivido a innumerables cambios en las teorías que lo describen. Su “descubrimiento”, como corpúsculo cargado y con masa que obedecía la dinámica newtoniana suele atribuirse a J.J. Thomson. Posteriormente encontramos toda una pléyade de científi-

cos a quienes se les puede imputar el desarrollo de diferentes teorías del electrón, entre quienes se encuentran Lorentz, Bohr, Pauli, Schrödinger y Dirac. Detengámonos un momento en los orígenes de esta historia y en algunas consideraciones sobre la noción de “descubrimiento” en ciencia que nos permitan ir apuntando hacia la problemática del realismo [6].

El perfil histórico simple e ingenuo que puede encontrarse en los libros de texto científicos en torno al “descubrimiento” del electrón se reduce a atribuir a J.J. Thomson dicha revelación al trabajar con los rayos catódicos. Thomson identificó, según esta historia, que dichos rayos estaban constituidos por corpúsculos cargados y pudo cuantificar la relación entre masa y carga eléctrica (m/e) de dichas partículas. La historia continúa explicando que a partir de ese evento se abrieron las puertas para encontrar la estructura del átomo, por medio del trabajo efectuado por Rutherford y Bohr, en 1911 y 1913 respectivamente.

Dicha develación habría tenido lugar en 1897, año en el que Thomson revela los valores encontrados para la relación m/e en un artículo de la *Philosophical Magazine* [7]. Desde luego que no es posible valorar un suceso de este tipo de forma aislada, sino que es menester observar la trayectoria que sigue la mente del científico y así poder registrar la evolución de los conceptos que elabora. George Smith [8] sugiere que para comprender el trabajo de Thomson hace falta ver en conjunto por lo menos tres de sus trabajos científicos: el que acabamos de mencionar y otros dos de los años 1898 y 1899. En su primera contribución, Thomson comienza con la hipótesis de que los rayos catódicos son partículas cargadas, explica a continuación los experimentos a partir de los cuáles logra calcular la relación m/e bajo el supuesto de la veracidad de dicha hipótesis y concluye con ciertas especulaciones sobre la estructura de los átomos y la relación entre los “corpúsculos” de sus experimentos y la tabla periódica. Por otro lado, según nos explica Smith, otros habían hecho ya cálculos de dicha relación m/e , entre quienes se cuenta Emil Wiechart, que al final resultaron ser más exactos. Sin embargo, en sus posteriores artículos, Thomson elabora más sus deducciones y sus conjeturas comparando primero los resultados de carga eléctrica de sus “corpúsculos” en los rayos catódicos, con la carga eléctrica de los iones de un gas y en segundo término calculando la relación m/e asociada con otros fenómenos, entre ellos el efecto fotoeléctrico y la descarga eléctrica de filamentos incandescentes, la cual resulta ser igual a la de los rayos catódicos según se declaraba en el artículo de 1897. Todo esto lo llevaría a elaborar una hipótesis de trabajo consistente en conferir un carácter fundamental y universal a sus “corpúsculos” cargados negativamente y que serían consecuentemente los constituyentes subatómicos de la materia. De esta manera, resulta razonable hablar, más que del “descubrimiento” puntual de una entidad física, de un complejo trabajo experimental que conduce a la elaboración de una hipótesis de trabajo que tendría que ser, en todo caso, aceptada de común acuerdo por la comunidad científica.

Dicha aceptación será gradual y para que se logre es necesario que toda la comunidad trabaje en torno a dicha hipóte-

sis. No basta con que un científico la presente aportando pruebas a su favor. Así es cómo en el tema que nos ocupa, gradualmente la existencia de los electrones va tomando realidad no solo por el trabajo de Thomson, sino también de otros destacados científicos como es por ejemplo el caso de Zeeman con su experimento de separación magnética de las líneas espectrales [9], u otros trabajos en espectroscopia, radiactividad, conducción de metales, etc.

Es importante enfatizar una idea que a nuestro juicio se desprende de lo dicho hasta ahora. Se trata del papel que juega la experimentación llevada a cabo tanto por Thomson como por los demás científicos involucrados. Podemos percatarnos fácilmente de que no se trata de experimentos que se realicen con la finalidad de validar una teoría (que, en ocasiones, de manera parcial, la filosofía de la ciencia le asigna al experimento), sino que más bien tienen la función de reunir datos que gradualmente conducen hacia una hipótesis de trabajo que a su vez permitirá el surgimiento de una teoría. En cierto sentido se invierte el proceso.

También es fundamental investigar cómo se inserta este trabajo en las diversas posiciones científicas y filosóficas de la época. En el caso que nos concierne, es significativo considerar que a finales del siglo XIX existían claramente dos posiciones opuestas sobre el carácter del trabajo científico. La primera de ellas se identifica con científicos como Ernst Mach y defiende una línea filosófica de base fenomenológica (una forma de positivismo) que se funda en correlaciones de observaciones directas y que evita el uso de cantidades “hipotéticas”. La segunda, representada por científicos como Ludwig Boltzmann, por el contrario, defiende la utilización de entidades ocultas, no accesibles a la observación directa, como recurso para entender la realidad (por ejemplo, los átomos, cuya existencia defendió férreamente Boltzmann). Para ambas concepciones resulta crucial el carácter experimental del método científico, pero la distinción es fundamental dado que a fin de cuentas el éxito de una teoría depende en realidad de muchos experimentos realizados por muchos científicos, y la importancia que se le asigne a cada uno de ellos depende precisamente de las diferentes orientaciones filosóficas, pues un mismo experimento puede tener diversos significados para diferentes tradiciones. En el caso aquí expuesto es evidente que las líneas de trabajo de la filosofía natural que alientan la presentación de entidades que no se ven como hipótesis respetables, dieron fruto con creces en la conformación de la tan exitosa física atómica y que ya estaba presente desde entonces la polémica en torno al uso de entidades teóricas y sobre su realidad.

Resumiendo, tenemos que a los experimentos realizados por J.J. Thomson en 1897 con los rayos catódicos, se les identifica tradicionalmente con el “descubrimiento del electrón”. Sin embargo, hemos hecho patente que la historia es más compleja. En 1897 existían, sin duda, ideas divergentes sobre la constitución de las partículas elementales de electricidad. La identificación precisa de la naturaleza de los rayos catódicos y su relación con la estructura atómica de la materia involucró el trabajo de toda una comunidad científica

a lo largo de un proceso gradual de aceptación y búsqueda de consensos sobre el significado de los diferentes progresos experimentales y teóricos inmerso en una larga serie de controversias.

Al escribir la palabra “descubrimiento” en este ensayo, la hemos puesto entre comillas. Esto se debe a que el significado de la palabra puede resultar muy ambiguo y su interpretación puede ser muy diversa. Lo cierto es que el concepto que encierra esa palabra es complejo y por lo tanto requiere un mínimo de atención filosófica. Ante la pregunta ¿quién descubrió X?, es indudable que parte de la respuesta estriba en determinar quién sabía qué, cuándo y cómo, situación que en el caso del electrón resulta un tanto complicado. Existen diferentes enfoques o puntos de vista. Uno que fue tomado fuerza hace algunos años concierne a la posibilidad de manipulación y medición. En este sentido cuando se empiezan a encontrar métodos para aislar, medir y manipular los electrones, éstos se empiezan a hacer “reales” y se puede hablar de que han sido descubiertos [10]. Por otro lado, la visión de un constructivista social se orientaría hacia la idea de que una entidad ha sido descubierta solamente cuando se ha llegado a un consenso entre los científicos en relación con la realidad de esa entidad. Esto significa que sólo cuando la comunidad así lo acepta, se puede decir que hay un descubrimiento. En un sentido aún más fuerte del constructivismo social, los electrones son “socialmente construidos” y no tienen una realidad independiente.

Peter Achinstein [11] sugiere de manera interesante que para identificar un “descubrimiento”, se tienen que tomar en cuenta 3 factores: ontológico, epistémico y de prioridad. El primero de ellos se refiere a que para poder decir que hay un descubrimiento de “algo”, ese “algo” tiene que existir. Puede parecer trivial, pero no lo es, de hecho, como indicamos arriba, para un constructivista social este factor es irrelevante. El segundo factor, el epistémico, se refiere al hecho de que la persona a la que se atribuye el descubrimiento debe encontrarse en un cierto estado de conocimiento en relación a lo descubierto. Y por último el factor de prioridad apunta a que el supuesto descubridor debe, por supuesto, ser el primero en haberse encontrado en ese estado de conocimiento.

El problema es, tal vez, que la noción de descubrimiento sea inapropiada en ciencia. Evidentemente no es lo mismo descubrir el electrón que descubrir, por ejemplo, una isla en el Pacífico. La historia del electrón es un tanto enmarañada y de hecho, no hay una teoría del electrón sin más, sino muchas que se van sucediendo en el tiempo por lo cual no resulta ocioso preguntarse si el electrón realmente existe o si es simplemente una entidad ficticia a la cual se le atribuyen propiedades que cambian de teoría en teoría. El electrón de Thomson es corpuscular, tiene propiedades de carga y masa y obedece la dinámica newtoniana, el de Pauli tiene spin y obedece un “principio de exclusión”, después será descrito en función de una dualidad onda-corpúsculo, etc. Entonces, ¿cuál es el “verdadero”?

Introduzcamos ahora sí las posiciones más relevantes en la discusión filosófica reciente sobre nuestro tema de interés.

Los argumentos más utilizados en contra del realismo son el de subdeterminación, el de la metainducción pesimista y los del empirismo constructivo. El primero de ellos se desarrolla en el sentido de que pueden existir varias teorías que expliquen un conjunto de resultados empíricos y, si tal es el caso, resulta imposible decidir cuál es la teoría correcta que da razón de las observaciones experimentales. El segundo argumento dice, en síntesis, que si muchas de nuestras teorías pasadas que en su momento fueron exitosas ahora son consideradas falsas [12], no hay razón para creer que nuestras teorías actuales no correrán la misma suerte. La tercera, que creemos que tiene más relevancia en la discusión que aquí nos interesa se mueve en el terreno de lo que debería de ser la finalidad de la ciencia. El empirismo constructivo iniciado por van Fraassen considera que la actividad científica no está dirigida a describir fielmente el mundo a través de teorías que puedan por la tanto ser calificadas de falsas o verdaderas, sino que está destinada a la elaboración de teorías que sean empíricamente adecuadas. Esto último implica que, si nuestras teorías nos hablan de electrones, neutrinos y quarks, debemos suspender el juicio y tomar una posición agnóstica sobre la existencia real de dichas entidades no observables y preocuparnos solamente de que puedan describir, y sobre todo predecir, lo que sí sea observable.

Regresando a nuestro tema más específico del caso del electrón, y rescatando algunas propuestas que buscan rebatir los puntos de vista antirrealistas, podemos empezar con Arabatzis [13] quien propone, a través de lo que llama un *enfoque biográfico de las entidades teóricas*, que efectivamente el descubrimiento de una entidad no consiste propiamente en revelar un orden natural preexistente, sino más bien en el proceso de formación de consensos dentro de la comunidad científica en torno a un concepto científico, pero guiado por buenas razones epistémicas y no meramente de construcción social. Arabatzis desarrolla esta tesis para el caso del electrón siguiendo los cambios que las diferentes teorías han ido imprimiendo en la representación científica del mismo, es decir, en lo que se entiende por esa entidad teórica identificando un núcleo de propiedades de los electrones que se van desvelando y en donde las deficiencias de las primeras teorías se van superando en concepciones que van siendo más cercanas a la realidad experimental. Este autor intenta defender así una visión congruente con la idea de proceso acumulativo del conocimiento científico compatible con una posición realista. Desde luego, dicha posición puede resultar controversial o difícil de aceptar pues como expresa Michela Massimi [14], la versión realista que defiende Arabatzis, lo es en el sentido de la identidad de las entidades teóricas en el proceso de cambio científico, pero sin comprometerse en la existencia per se de las mismas en la naturaleza.

Dada esta dificultad para defender una posición realista fuerte, en el sentido de que las entidades teóricas realmente refieran (tengan un correlato o referente a un objeto real), Worrall [15] propone la existencia de una tercera vía, la del realismo estructural que ya comentábamos en la introducción de este trabajo. Aunque los continuadores de la idea de

Worrall han discurrido por caminos diferentes haciendo distinciones más sutiles, tomemos por el momento el común denominador en el sentido de que lo que reclama dicha posición filosófica es que la estructura de teorías científicas exitosas sobrevive al proceso de cambio de teoría en virtud del hecho de que reflejan correctamente aspectos estructurales del mundo [16]. En este sentido, para el caso del electrón se podría decir que el conjunto de propiedades del mismo que se van acumulando en el proceso de cambio científico, lo hacen sobre la base de lo que se podría llamar la estructura de la teoría del electrón. Se podría sugerir por lo tanto que lo que nos muestra la historia del electrón no es una secuencia de teorías falsas, sino una en la que “se va discerniendo un núcleo estable de propiedades del electrón” en el que “se van identificando y corrigiendo las deficiencias de las teorías previas para dirigir nuestra comprensión teórica del electrón hacia una mayor concordancia con las minucias del trabajo experimental” [17].

Hasta aquí hemos presentado algunos elementos de la controversia en torno al realismo científico en forma muy general, a manera de exponer simplemente el debate a partir del caso del electrón per se. Sin embargo, lo que más nos interesa en este ensayo es discutir las nuevas problemáticas que, desde el punto de vista filosófico, se presentan cuando pasamos a considerar situaciones distintas en las que sigue involucrada la misma entidad teórica, pero en su relación con otras, lo que nos llevará a mostrar que ciertas interrogantes pueden tomar otros matices al cambiar de contexto y requerir por lo tanto de nuevas interpretaciones y de nuevas respuestas. Particularmente nos referiremos al par electrón-hueco como concepto que surge al interior de la teoría de los semiconductores.

3. El hueco: ¿un ejemplo de causación negativa?

En el apartado anterior nos referimos a las teorías sobre el electrón, entidad teórica que la ciencia actual considera como una entre muchas otras partículas elementales estudiadas por la física de altas energías o física de partículas. Esta última disciplina es paradigma de reduccionismo físico y por lo mismo algunos científicos puristas que la ejercen llegan a considerarse practicantes de la física más fundamental y árbitros de la verdad última. Dentro de la misma física esta noción es confrontada por la física del estado sólido encargada de estudiar el comportamiento, no de las entidades mínimas de materia, sino de la misma en estado macroscópico [18] y cuyos exponentes también suelen defender el carácter fundamental de su disciplina. La física del estado sólido sería entonces, según esa perspectiva, más básica y funcionaría como escenario del surgimiento de fenómenos típicos de la física de partículas [19]. Mencionamos esto porque es un asunto profundamente epistemológico, que tiene que ver con lo que la física pretende ser y resulta central en el tema que queremos tratar aquí [20].

Los sistemas complejos estudiados por la física del estado sólido serían entonces irreductibles y responderían, según esta última perspectiva, a principios más altos de organización. Particularmente darían lugar a la existencia de cuasipartículas, como fenómenos emergentes en sólidos, que se comportarían e interaccionarían entre sí como partículas en el espacio libre. El fenómeno específico que queremos tratar aquí sería el del par electrón-hueco en un semiconductor, partículas que actuarían como portadores de carga y formadores de corrientes eléctricas. El electrón “original” que interactúa en forma compleja en la red cristalina se comporta como un electrón de diferente masa viajando en el espacio libre. Además, el movimiento conjunto de electrones en la banda de valencia de un semiconductor resulta equivalente al movimiento de cuasipartículas cargadas positivamente llamadas huecos que son como “ausencias” de un electrón, como un vacío dejado por el desplazamiento de un electrón. Esto último resulta particularmente interesante desde el punto de vista filosófico pues nos conduce a la consideración de lo que podríamos llamar una no-partícula, la ausencia de algo con poder causal, es decir, fuente de otros fenómenos.

Atendiendo a nuestra propuesta de que la integración de historia y filosofía resulta en una mayor riqueza para la comprensión de la ciencia, revisaremos algunos detalles históricos de la teoría del estado sólido, pero más específicamente sobre las teorías de conducción eléctrica con la intención de poder hilar más fino y estar aptos para proponer el tipo de realismo científico al que en todo caso nos podemos apegar en el estudio de estos fenómenos, y poder ver cómo se aplicarían, a nuestro estudio de caso, conceptos como el de emergencia y causalidad.

Edwin Hall [21] identificó el efecto que lleva su nombre, consistente en la generación de una diferencia de potencial eléctrico en un conductor que transporta corriente eléctrica [22] a ángulo recto con respecto a la dirección de la corriente. Dicho efecto iba a tener un papel crucial en la identificación del tipo de portadores que producen la corriente en metales, convirtiéndose en una herramienta experimental central para la investigación del fenómeno de la conducción eléctrica en sólidos y para expresar la conductividad como función de la densidad de portadores, sus cargas y sus movilidades.

Poco después del “descubrimiento” del electrón por Thomson en 1897 aparecieron las primeras teorías que pretendían explicar el fenómeno de la conducción eléctrica en función de esas nuevas entidades teóricas. Si hacemos un seguimiento a esas y posteriores teorías de conducción eléctrica podremos sacar conclusiones para este fenómeno en particular respecto a los cuestionamientos e interpretaciones filosóficos en torno al cambio científico.

Eduard Riecke, Paul Drude y Hendrik Lorentz propusieron [23], en 1898, 1900 y 1905 respectivamente, las primeras teorías sobre la conducción eléctrica en función de un “gas de electrones”, las cuales “a semejanza de la cinética clásica de gases permitían calcular a partir de los choques de las

partículas de gas propiedades como el transporte de calor y de corriente por medio de electrones libres” [24]. La propuesta de Riecke es particularmente interesante porque él asume la presencia tanto de portadores de carga negativa como positiva con diferentes concentraciones y movilidades para poder acomodar correctamente los resultados experimentales del coeficiente de Hall [25], anticipando así futuras investigaciones en semiconductores ya con un tratamiento cuántico, lo que nos habla de que si bien tenemos un cambio de paradigma de la física clásica a la física cuántica, se preservan ciertas estructuras matemáticas en la descripción. Lo mismo se puede decir del trabajo de Johann Koenigsberger quien en 1908, contrario a las propuestas de Riecke y Drude postuló que los portadores de carga que conducían la electricidad eran resultado de una disociación o separación de una fracción de los átomos del material en electrones y los iones positivos residuales que dependía de la temperatura T y de un factor Q llamado coeficiente de disociación (la cantidad de átomos disociados tenía una dependencia exponencial con Q/T , más concretamente $N = N_0 e^{-Q/T}$). Esto le permitió clasificar los materiales en metales, aislantes y “conductores variables” en función de dicho factor [26]. La hipótesis de Koenigsberger resultó falsa pero las matemáticas implicadas reflejan la noción posterior de una energía de activación de la cual depende la conducción en los semiconductores reflejada en el trabajo de Alan Wilson en 1931 que reconoce una energía necesaria para excitar a los electrones desde la banda de valencia a la banda de conducción; encontramos así en este caso una estructura matemática que se conserva, aunque el mecanismo implícito difiera.

El desarrollo de la física cuántica dio un nuevo giro a las teorías sobre la conducción eléctrica. Con la introducción de la estadística de Fermi-Dirac en 1926 y el principio de exclusión de Pauli en 1925, Sommerfeld aventuró lo que podemos identificar como una teoría semiclassical del fenómeno [27]. La nueva teoría reconocía al electrón, según palabras del mismo Sommerfeld, no “como individuo [sino] como un estado” [28]. El principio de Pauli conducía a que cada electrón asume un estado cuántico distinto y la estadística de Fermi-Dirac implica que los números cuánticos mínimos, correspondientes a las energías más bajas, están ocupados, lo que conlleva que el hipotético “gas de electrones” se encuentra limitado en sus posibilidades de movimiento. Sommerfeld reconoce su trabajo no como revolucionario, sino continuista:

Hemos tomado de las viejas teorías las imágenes más primitivas, y las hemos reelaborado en una forma nueva mediante los procedimientos prescritos por la estadística de Fermi. Esta estadística recibe así por concordancia con el material experimental sobre conducción de metales una sólida base empírica [29].

Es claro cómo el sentir de Sommerfeld abona a la idea de conservación de estructura en el proceso de cambio científico, en tanto que la prueba experimental efectivamente termina justificando las nuevas teorías. Para una explicación to-

talmente cuántica habría que esperar el trabajo en 1929 de Felix Bloch quien mostró la forma general para la solución de la ecuación de onda de Schrödinger para un electrón sujeto a un potencial eléctrico periódico que es lo que ocurre en una estructura cristalina [30]. Kronig y Penney construyeron en 1931 un modelo simplificado que mostraba las restricciones para la ecuación de onda que se traducen en regiones de energía válidas para el electrón [31]. Peierls a su vez mostró en 1929 la explicación teórica de la existencia de coeficientes positivos de Hall que habían sido hasta entonces una anomalía experimental [32]. Con estos resultados a la mano, Alan Wilson, a quien ya mencionamos unos párrafos arriba, pudo explicar en 1931 la diferencia entre metales y dieléctricos basándose en la idea de bandas de energía llenas y vacías en las que se pueden producir electrones libres en una banda casi vacía y huecos en una banda casi llena, lo cual, entre otras cosas, explicaba las observaciones experimentales de incremento de la concentración de portadores con la temperatura [33]. Finalmente, Heisenberg mostró, también en 1931, que los estados libres en la banda casi llena, es decir los huecos, son equivalentes a portadores de carga positivos [34]. La existencia de ambos, electrones y huecos explica la existencia de coeficientes de Hall de ambos signos que se observan, sobre todo, en los materiales semiconductores.

Además, respecto a los materiales semiconductores, siempre se había sospechado que su comportamiento se debía principalmente a las impurezas del material. Los trabajos de Wilson, Pearson y Bardeen ofrecieron una explicación del papel de las impurezas y cómo éstas podían mejorar la conductividad ya sea proveyendo electrones (material donante) o huecos (material aceptor). Un material donante contiene niveles de energía para los electrones cercanos a la banda de conducción del material base, de manera que dichos electrones pueden fácilmente adquirir la energía necesaria para pasar a esa banda aumentando así la concentración de electrones libre. Por el contrario, un material aceptor contiene niveles de energía para los electrones cercanos a la banda de valencia del material base, de manera que los electrones de valencia pueden fácilmente adquirir la energía necesaria para pasar a ocupar esos niveles de energía dejando tras de sí huecos, aumentando así la concentración de los mismos.

Uno de los aspectos esenciales en nuestra breve descripción sobre el cambio de teorías en la explicación del fenómeno de conducción eléctrica es la paradoja que presenta una de las herramientas experimentales más importantes para el tema: el efecto Hall. Varias teorías fueron propuestas en el camino para explicar la existencia de coeficientes de Hall tanto positivos como negativos. Desde Riecke hasta Wilson se consensó la necesidad de postular dos tipos de portadores de carga. No hay duda que podemos medir cantidades físicas asociadas con dichas entidades, pero, ¿son éstas sólo entidades que requiere la teoría o tenemos que aceptar su existencia? ¿Qué contribución al respecto podemos encontrar en diferentes perspectivas filosóficas? En la siguiente sección desarrollamos algunas ideas.

4. El par electrón-hueco: ¿una paradoja?

¿Hasta dónde se puede defender una posición realista respecto a las entidades teóricas del par electrón-hueco que hemos tratado en los apartados anteriores? Queremos más específicamente abordar esta interrogante a partir de dos situaciones: la primera consistente en que el electrón al que hacemos referencia se encuentra sujeto a los campos al interior de un material sólido, no uno que se encuentra en el espacio libre y por lo tanto tiene otras propiedades, y segundo la disyuntiva de imaginar el hueco como una ausencia y la correspondiente causación negativa que habría que considerar. Nuestras reflexiones las haremos en tres vertientes: acomodo a algún tipo de realismo estructural; emergencia de propiedades; y acción y puesta en operación de las entidades teóricas.

A partir de nuestro caso de estudio, la identificación del hueco como ausencia imposibilita una defensa del realismo científico en sus formas más directas que consideran que las teorías científicas apuntan a la descripción de una realidad concreta y que las entidades teóricas refieren a objetos existentes en la naturaleza. Aun cuando podamos defender la existencia de procesos de causación genuina con entidades que son negaciones como lo es el caso del hueco, y que se puedan admitir los correspondientes mecanismos causales [35], resulta inviable la defensa siquiera de un realismo de entidades. Sin embargo, por lo expuesto anteriormente parece razonable establecer una defensa de algún tipo de realismo estructural. Dicha forma de realismo recae en la “distinción entre la naturaleza de una entidad o proceso, y su estructura” [36], siendo esta última captada por las formas matemáticas que describen el comportamiento de una entidad sin compromiso por la verdadera naturaleza de las entidades. Según esta forma de realismo, desde el punto de vista epistémico el contenido cognitivo de una teoría científica se restringe a su estructura matemática y a sus consecuencias empíricas y desde el punto de vista ontológico debería de mantenerse una posición agnóstica, pues versiones diferentes de las entidades pueden satisfacer la misma estructura matemática. Esto justamente es lo que ocurre en el caso de nuestros portadores de corriente eléctrica, desde los postulados por Riecke y Drude, hasta la interpretación de electrones y huecos por Peierls y Wilson. En los fenómenos a los que hacemos referencia, entre teorías se conserva la idea de corriente y el efecto Hall como cantidades mensurables (contenido empírico) y se conservan formas matemáticas que registran el efecto causal de propiedades, como es el caso de la masa efectiva y la carga, que incluso nos conducen a esa nueva entidad teórica de carácter negativo, pero a la cual no se le identifica en un lugar físico, sino dentro de un constructo abstracto (bandas de energía). Así, las partículas referidas parecen jugar sólo un papel heurístico en tanto que la introducción de la estructura conlleva el peso ontológico.

Como segunda vertiente de análisis, el concepto filosófico de “emergencia” se utiliza para referirse a procesos donde surgen nuevos patrones por la interacción de elementos más simples que por sí mismos no los presentan y por lo tanto

atiende a una irreductibilidad ya sea epistémica u ontológica. Esto tiene mucha relevancia en la visión de la naturaleza como formada por capas. Desde el punto de vista epistemológico, a cada nivel organizativo le correspondería una ciencia especial. De esta manera, “el mundo está dividido en estratos discretos, con la física fundamental como nivel base, seguida de la química, la biología y la psicología (y probablemente la sociología)” [37]. Sin embargo, nuestro caso de estudio devela ya, dentro de la misma física como la ciencia más básica, esta distinción, en el sentido de que por un lado tenemos las entidades fundamentales o partículas elementales y por el otro tenemos otras entidades fundamentales pero que solo aparecen en el sustrato macroscópico de una sustancia material constituida por muchos átomos.

Nuestro análisis del par electrón-hueco nos enseña que desde la más elemental física es necesaria la aceptación de entidades y propiedades emergentes y la pregunta que nos queda es si dicha emergencia se restringe al plano epistemológico o trasciende a un nivel ontológico. No tenemos los elementos para aventurar una respuesta contundente, pero sí podemos dejar algunas reflexiones al respecto usando nuestro caso de estudio. Los elementos de la dupla electrón-hueco al interior de un material parecen adquirir propiedades diferenciadas, por ejemplo, sus masas efectivas que comportan nueva potencialidad causal que se refleja en nuevas leyes asociadas al sistema complejo. ¿Pero es esto real o solo una apariencia? El mismo Shockley, uno de los inventores del transistor cuyo comportamiento se explica en función del comportamiento de electrones y huecos, nos advierte sobre el peligro de considerar la existencia de los huecos de manera demasiado literal. Vale la pena extraer de las explicaciones prácticas de Shockley algunas consecuencias relacionadas con el par electrón-hueco. La masa efectiva del electrón difiere de la masa del electrón libre en el sentido de que en esa propiedad (masa) se refleja el efecto del potencial periódico al que está expuesto y que hace que bajo la influencia de alguna fuerza externa el electrón tenga una aceleración diferente a la que tendría en el espacio libre, lo cual resulta de las leyes de la mecánica ondulatoria [38]. El hueco, por su parte, actúa como un electrón, pero con su propia masa efectiva y con una carga positiva, pero nos señala que esto es “simplemente una manera conveniente de describir el comportamiento de una (...) colección de electrones”. Para ciertos fines, se puede considerar como si fuera una partícula real, pero otras consideraciones no nos permiten llevar esa idea demasiado lejos. Por ejemplo,

“agregar un hueco a una muestra [de material] no aumentará su masa y su peso [en una cantidad equivalente a] la masa efectiva del hueco, [pues] agregar un hueco es en realidad remover un electrón y la masa de la muestra decrecerá [en una cantidad equivalente] a la verdadera masa (no la masa efectiva) del electrón”

y por otro lado

“el momento lineal de una corriente de huecos (...) estará en dirección opuesta a la del movimiento de los

huecos ya que el momento realmente corresponde al movimiento del conjunto de electrones y este movimiento se encuentra en dirección opuesta a la del movimiento de los huecos” [39].

Poniendo todo esto en perspectiva con nuestra exposición sobre el tipo de realismo estructural que convendría acoger en casos como éstos, nos parece que resulta apropiado expresar que entidades como los huecos atienden a pura estructura y se explican en términos de emergencia de propiedades, pero cuyo comportamiento se puede verificar experimentalmente, es decir, revelan un contenido empírico. Así pues, aunque las razones de dichos comportamientos son más complejas, se pueden tratar dichas estructuras como reales con la confianza que un ingeniero o tecnólogo requiere para transformar la realidad, lo cual nos da pie a la última reflexión.

Nuestra última consideración o vía de análisis tiene que ver precisamente con esa posibilidad de manipulación, lo que nos lleva a pensar en la posibilidad de defender un realismo orientado por la experimentación, es decir, basado en la posibilidad de operar experimentalmente las entidades postuladas por las teorías. Hacking, por ejemplo, como uno de los representantes de un realismo de entidades y a quien ya nos hemos referido, confiere mayor significancia cognitiva a la experimentación científica que a la teorización. Su adscripción al realismo la manifestó con aquella famosa expresión donde hacía alusión a la manipulación que aparentemente se puede hacer de electrones y positrones en el laboratorio: “*Hasta donde a mi concierne, si se puede rociar algo con ellos, entonces son reales*” [40]. Sin embargo, no han faltado críticas a esta posición. Elsamahi despliega 4 problemas que presentan el argumento experimental y el criterio de manipulación que deriva de él, de los cuáles se desprende que la supuesta “manipulación” solo puede entenderse metafóricamente [41]. Gelfert lo destaca así también calificando al realismo de entidades de Hacking como incoherente [42]. Arabatzis por su parte, explica cómo para un antirrealista no es solo que la posibilidad de manipulación no sea justificación para creer en las entidades teóricas, sino que incluso habría que interpretarlo al revés: “es la creencia en la existencia de electrones, previa al acto de manipulación, la que nos permite interpretar dicho acto como una manipulación de electrones” [43]. Estas críticas deberían de tomarse todavía más en serio en el caso de entidades descritas como ausencias como sucede con los huecos. Sin embargo, la fuerza del argumento experimental es seductora y no podemos simplemente soslayarla. De hecho, en terminología empleada sobre todo en el ámbito ingenieril, se enfatiza el carácter causal de los huecos, al expresar por ejemplo que se pueden crear por adición de impurezas y alterar así la conductividad de una muestra semiconductor, o que se pueden inyectar a través de una junta [44], o refiriéndose a su fuerza tecnológica, como lo expresa uno de los inventores del dispositivo que sustituiría a la válvula termoiónica: “el anuncio del transistor en 1948 le ha dado a los huecos y a los electrones nueva significancia tecnológica” [45].

Y esto nos remite por supuesto a considerar también la forma en que estos nuevos conocimientos fueron confrontados por la industria eléctrica y electrónica que empezaba a mostrar sus potencialidades, en torno a la cual debemos tomar en cuenta el comportamiento de otra comunidad diferente a la de los científicos; nos referimos por supuesto a los ingenieros. Para acercarse a este aspecto de la historia del electrón, Graeme Gooday rastrea las publicaciones de una revista británica llamada “The Electrician” que se enfocaba en las relaciones entre la tecnología y la ciencia eléctrica. Gooday propone que los trabajos de Thomson que indagaban la relación m/e realmente no fueron significativos para los “scientists-engineers”, como él los llama, y que por lo tanto las investigaciones de Thomson no fueron realmente importantes en los incipientes desarrollos de la electrónica, sobre todo en lo que se refiere a la válvula electrónica y el osciloscopio de rayos catódicos, los cuales habrían tenido un desarrollo de manera relativamente independiente de la teoría [46].

Ya hacíamos referencia anteriormente a una posición filosófica que considera que los electrones en algún sentido se hacen más “reales” en la medida que sea posible aislarlos, medirlos, manipularlos. Extendiendo esta idea podemos también decir que el electrón adquiere mayor realidad gracias a su servicio a la industria operando en dispositivos pensados para uso comercial. Esta es la idea defendida por Hoddeson y Riordan quienes nos dicen que el electrón se “cosificó”, o que, en otras palabras, ganó “realidad operacional” trabajando en dispositivos electrónicos como por ejemplo el amplificador a base de bulbos (tubos al vacío) [47]. De hecho, el término “electrónica” surgió hasta la década de los 20’s, es decir, más de 20 años después de los trabajos de J.J. Thomson, y con el cuál se describía un desarrollo tecnológico en el cual ya era necesario aceptar la existencia de aquellas partículas (electrones) para el desarrollo de circuitos, dispositivos y sistemas.

Pero si resulta difícil comprender cómo el electrón alcanzó su status de entidad con realidad operacional, más aún lo es el caso de esa aparente ausencia de un electrón, que identificamos como un “huevo”. ¿Es posible pensar en la ausencia de “algo” como real? Todo indica que sí. El huevo y los pasos a través de los cuales adquiere realidad operativa están intrínsecamente asociados al invento del transistor, que se posicionó como dispositivo fundamental en el origen de la “sociedad de la información”.

Hoddeson y Riordan nos relatan en su artículo que durante la Segunda Guerra Mundial se intensificó la investigación relacionada con el desarrollo de dispositivos de estado sólido

y explican cómo se creó una red de instituciones en los Estados Unidos que alcanzó un clímax de comunicación y cooperación, que se atenuarían al finalizar la guerra, dando lugar a un proceso de fuerte competencia. La red incluía, entre otras instituciones, a los laboratorios Bell, a los laboratorios de radiación del MIT y a General Electric. Mervin J. Kelly de Bell Labs estaba consciente de esto y trabajó arduamente durante 1945 para conservar el liderato en la investigación fundamental sobre física del estado sólido. Esa preocupación por la investigación básica iba muy de la mano con la percepción de Vannevar Bush en su reporte al presidente de los Estados Unidos sobre el valor de la ciencia [48]. Así fue como quedó pavimentado el camino para que Bardeen, Brattain y Shockley consiguieran la fabricación del transistor en 1947; aquel deseado dispositivo de estado sólido, cuya operación depende de electrones y huecos, con capacidad de amplificación de señales que sustituyera al voluminoso tubo al vacío. De esa manera fue como el “huevo” finalmente adquirió realidad operacional, al ser la entidad que permitió el funcionamiento de dicho artefacto. El huevo pareciera ser una ilusión, pero al final le otorga realidad a toda una industria.

5. Conclusiones

Hemos propuesto que en filosofía de la ciencia difícilmente se pueden defender tesis realistas o antirrealistas de manera general, que las perspectivas son muy dependientes no solo de la disciplina, sino del fenómeno en cuestión, y que, en definitiva, encontramos mayor riqueza en el análisis de casos que integren una perspectiva histórica. Nos propusimos contribuir con un caso de estudio relacionado con las teorías de conducción eléctrica en materiales sólidos y las diferentes propuestas, a manera de entidades no observables, de partículas portadoras de carga eléctrica causantes del fenómeno. Particularmente en el caso de semiconductores, el par de entidades electrón-huevo, donde una es una especie de negación de la otra, es de relevancia mayor.

A través de elementos históricos y filosóficos encontramos qué es lo que podemos aprender sobre realismo, antirrealismo y conceptos relacionados como causalidad, emergencia y acción a través de nuestro caso de estudio. El análisis del par electrón-huevo no se presta de entrada a la defensa de una visión realista, sobre todo por el carácter de ausencia del huevo. Sin embargo, se puede admitir un realismo moderado, basado en un realismo estructural aderezado de conceptos surgidos de las teorías sobre emergencia y de la acción tecnológica, permitiéndonos sopesar así diferentes perspectivas.

1. Como referencia básica de divulgación y defensa del realismo científico se puede consultar S. Psillos, *Scientific Realism: How science tracks truth* (London and New York, Routledge, 1999) y J. Leplin, *A Novel Defense of Scientific Realism* (New York and Oxford, Oxford University Press, 1997).

2. J. Ladyman, Structural Realism, en Edward N. Zalta (ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (2014). URL = <<http://plato.stanford.edu/archives/spr2014/entries/structural-realism/>>.

3. Tal es el caso por ejemplo del empirismo constructivo iniciado por Bas van Fraassen y de la posición antirrealista de Larry Laudan que suele defenderse con el argumento de la metainducción pesimista. Véanse respectivamente: B. van Fraassen, *The scientific image* (Oxford, Clarendon Press, 1980) y L. Laudan, *Philosophy of science* **48** (1981) 19-49.
4. En este caso se encuentra el realismo experimental de Ian Hacking. Véase: I. Hacking, *Representar e intervenir* (México, Paidós, 1996).
5. El iniciador de esta corriente es John Worrall quien encuentra los orígenes de esta posición filosófica en Henry Poincaré. Véase: J. Worrall, *Dialectica* **43** (1989) 99-124. Para una exposición más amplia que incluye una historia del realismo estructural, véase: S. French, *The Structure of the World: Metaphysics and Representation* (Oxford, Oxford University Press, 2017). También es recomendable ver E. Landry y D. Rickles, *Structural Realism: Structure, Object and Causality* (London y New York, Springer, 2012). En este último libro, se abre además el abanico de denominaciones dentro del realismo estructural, entre ellas el realismo estructural óntico y el realismo estructural epistémico.
6. Este tema lo hemos tratado en otro lugar, sin embargo, consideramos pertinente presentar algunos elementos de dicha historia en esta sección, pero agregando consideraciones nuevas, como referencia fundamental para lo que sigue. Véase R. Guzmán, *Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia* **VI**, 12-13 (2005), pp. 143-154.
7. J.J. Thomson, *Cathode Rays*, *Philosophical Magazine* **44** (1897) 293-316.
8. G. Smith, *J.J. Thomson and the Electron 1897-1899*, en Jed Z. Buchwald (ed.), *Histories of the Electron* (Cambridge, The MIT Press, 2001), pp. 21-76.
9. Theodore Arabatzis defiende la idea de que Zeeman también debe ser considerado como descubridor del electrón. Véase: T. Arabatzis, *The Zeeman Effect and the Discovery of the Electron*, en Jed Z. Buchwald (ed.), *Histories of the Electron* (Cambridge, The MIT Press, 2001), pp. 171-194.
10. Véase I. Hacking (1996), op. cit., especialmente el capítulo 16 que habla sobre la experimentación y el realismo científico.
11. P. Achinstein, *Who Really Discovered the Electron?*, en Jed Z. Buchwald (ed.), *Histories of the Electron* (Cambridge, The MIT Press, 2001) pp. 403-424. Para una ampliación sobre el concepto y los diversos usos de la palabra descubrimiento en ciencia, desde una perspectiva filosófica, se recomienda ver: J. Schickore, *Scientific Discovery*, en Edward N. Zalta (ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (2014), URL = < <https://plato.stanford.edu/archives/spr2014/entries/scientific-discovery/> >.
12. Algunas de las más mencionadas son la teoría del flogisto, la del calórico y la del éter.
13. T. Arabatzis, *Representing Electrons: A Biographical Approach to Theoretical Entities* (Chicago and London, The University of Chicago Press, 2006).
14. M. Massimi, *Metascience* **16** (2007) 87-91.
15. J. Worrall (1989), op. cit.
16. J. Ladyman (2014), op. cit., p. 7.
17. J. Bain y J. D. Norton, *What Should Philosophers of Science Learn from the History of the Electron*, en Jed Z. Buchwald (ed.), *Histories of the Electron* (Cambridge, The MIT Press, 2001), p. 453.
18. Vale la pena anotar que estrictamente hablando la física del estado sólido sería una sub-disciplina de la física de la materia condensada, siendo esta última la encargada de estudiar las propiedades físicas macroscópicas de la materia en general y la primera más específicamente de la materia rígida o semi-rígida. La física de semiconductores, a su vez, es una sub-disciplina de la física del estado sólido.
19. Véase por ejemplo E. Prati, *Journal of Physics: Conference Series*, *IOP Publishing* **306** (2011) 12012-12017.
20. No desplegaremos aquí dicho debate por falta de espacio. Sin embargo, a manera de referencia diremos que tiene sus inicios con Anderson (1972) y que para una discusión más reciente se pueden encontrar interesantes referencias; en particular Martin (2015) presenta la controversia por medio de 3 episodios históricos, uno de ellos siendo el mismo caso Anderson, y Morrison (2015) nos ofrece una discusión sobre las dimensiones epistemológicas y ontológicas que surgen en dicho debate. Las referencias son: P. Anderson, *More is different: Broken symmetry and the nature of the hierarchical structure of science* **177** (1972) 393-396; J. Martin, *Fundamental Disputations: The Philosophical Debates that Governed American Physics 1939-1993, Historical Studies in the Natural Sciences* **45** (2015) 703-757; M. Morrison, *Why is More Different*, en Brigitte Falkenburg y Margaret Morrison (eds.), *Why More is Different: Philosophical Issues in Condensed Matter Physics and Complex Systems* (Berlin, Springer Verlag, 2015) pp. 91-114.
21. E. Hall, *American Journal of Mathematics* **2** (1879) 287-292.
22. En ese momento histórico se hablaba de corriente galvánica que podía producirse con una pila voltaica.
23. Véanse: E. Riecke, *Annalen der Physik* **302** (1898) 353-389; P. Drude, *Annalen der Physik* **306** (1900) 566-613; H. Lorentz, *The motion of electrons in metallic bodies*, *KNAW, Proceedings* **7** (1905) 438-453.
24. M. Eckert y H. Schubert, *Del gabinete del sabio a la investigación industrial* (Madrid, Alianza Editorial, 1991), p. 126.
25. L. Lukasiak y A. Jakubowski, *Journal of Telecommunications and Information Technology* **1** (2010) 3.
26. G. Busch, *European Journal of Physics* **10** (1989) 258-259.
27. L. Hoddeson y G. Baym, *Proceedings of the Royal Society A* **371** (1980) 11-13.
28. Citado en M. Eckert y H. Schubert (1991), op. cit., p. 133.
29. Citado en M. Eckert y H. Schubert (1991), op. cit., p. 135.
30. F. Bloch, *Zeitschrift für Physik* **52** (1929) 555-600.
31. R. Kronig y W. Penney, *Proceedings of the Royal Society A* **130** (1931) 499-513.
32. R. Peierls, *Zeitschrift für Physik* **30** (1929) 555-600.
33. A. Wilson, *Proceedings of the Royal Society A* **133** (1931) 458-491.
34. W. Heisenberg, *Annalen der Physik* **402** (1931) 888-904.

35. J. Schaffer, Causes need not be Physically Connected to their Effect. The Case for Negative Causation en Christopher Hitchcock (ed.) *Contemporary Debates in Philosophy of Science* (Oxford, Blackwell Publishing, 2004). pp. 197 y 211.
36. S. Psillos (1999), op. cit., p. 146.
37. T. O'Connor y H. Y. Wong, Emergent Properties, en Edward N. Zalta (ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (2015) p. 7. URL = <http://plato.stanford.edu/archives/sum2015/entries/properties-emergent/>. Para una ampliación sobre el concepto de Emergencia también es recomendable consultar: M. Bedau y P. Humphreys, *Emergence: Contemporary Readings in Philosophy and Science* (Cambridge, MIT Press, 2008).
38. W. Shockley, *Proceedings of the IRE* **40** (1952) 1291-1292.
39. W. Shockley (1952), op. cit., p. 1297.
40. I. Hacking (1996), op. cit., p. 41.
41. M. Elsamahi, *Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association* **1** (1994) 175-180.
42. A. Gelfert, *Manipulative success and the unreal, International Studies in the Philosophy of Science* **17** (2003) 245.
43. T. Arabatzis, Can a Historian of Science be a Scientific Realist?, *Proceedings of the Philosophy of Science Association* **68** (2001) 535.
44. Otro ejemplo que destaca ese carácter es la siguiente expresión: These positively charged holes can cause a catastrophic negative shift in the threshold voltage of the device. J. Wall y A. Macdonald, *The NASA ASIC Guide: Assuring ASICs for Space* (Pasadena, CA, California Institute of Technology Jet Propulsion Laboratory, 1993).
45. W. Shockley, *Electrons and Holes in Semiconductors with Applications to Transistor Electronics*, (Princeton, New Jersey, D. van Nostrand Company, 1950), p. ix.
46. G. Gooday, The Questionable Matter of Electricity: The Reception of J.J. Thomson's Corpuscle among Electrical Theorists and Technologists, en Jed Z. Buchwald (ed.), *Histories of the Electron* (Cambridge, The MIT Press, 2001), pp.101-134.
47. L. Hoddeson y M. Riordan, *The Electron, the Hole and the Transistor*, en Jed Z. Buchwald (ed.), *Histories of the Electron* (Cambridge, The MIT Press, 2001), pp. 327-338.
48. Vannevar Bush había sido el director de la Oficina de Investigación y Desarrollo Científico durante la guerra y en el informe referido, llamado *Ciencia, la frontera sin fin*, propone diseñar un nuevo sistema de apoyo federal vigoroso para la investigación científica en los sectores público y privado.