

Fósiles en la enseñanza de las ciencias y objetivos de la investigación en la enseñanza de las ciencias

*F. Herrmann, Abteilung für Didaktik der Physik, Universität, 76128 Karlsruhe, Alemania**

1. Introducción

¿Porqué necesitamos investigación en la enseñanza de las ciencias? ¿Cuáles son sus objetivos?

Estos son las preguntas a las cuales vamos a buscar respuestas en el presente artículo.

En la primera parte estudiaremos los objetivos de la investigación didáctica en términos generales. Después, en la segunda parte, constataremos que hay un problema muy específico para esta clase de investigación: la ciencia tiene una tendencia muy pronunciada de producir algo que se puede llamar “fósiles”, – ideas que en cierta época eran justificadas y útiles, pero que han dejado de serlo en tiempos posteriores. En la tercera parte, la más larga, discutiremos algunos ejemplos de estos fósiles científicos.

2. La necesidad de la investigación en la enseñanza

Empezamos con una constatación que hoy día es un lugar común: Los científicos producen continuamente más conocimientos: hacen observaciones, acumulan resultados de mediciones, imaginan nuevas teorías. Entonces, el saber científico aumenta inconteniblemente. Esto es inquietante para la enseñanza. Sin embargo, es aún más inquietante que el número de publicaciones científicas aumenta en forma exponencial. En la actualidad viven más científicos que en el total del pasado. Cada pocos años se forman nuevas asignaturas o subdivisiones de asignaturas, campos de investigación que antes no existían, – vinculado con la fundación de nuevas revistas especializadas. Hasta comienzos del siglo había una física que hoy llamamos física clásica. Después vino la física atómica, cuántica, nuclear, la física de las partículas, la física de los plasmas, la astrofísica, la física de los sistemas complejos, la informática. Una de las subdivisiones más recientes de la física es la nanotecnología. De esto emerge una pregunta muy natural: ¿Cómo podemos transferir todos estos conocimientos a las generaciones a venir?

Simplificando un poco, se puede resumir la estrategia tradicional para la solución del problema en un dibujo, fig. 1a. Cada vez que aparece un campo nuevo de las ciencias se lo agrega a la enseñanza y, al mismo tiempo, se comprime el todo.

Este procedimiento no es muy ventajoso. El aprendizaje se vuelve, por una parte, cada vez más difícil y, por otra parte, más superficial. Además, es muy cuestionable si la materia comprimida aún corresponde a lo que puede pretender de llamarse una cultura científica general.

Mucha gente piensa que no hay otro remedio. Sin embargo, no es así.

Las teorías modernas tienen la reputación de ser difíciles y abstractas. Pero aquí se exagera a menudo. Ocurre frecuentemente que gracias a nuevas descubiertas se simplifican conceptos antiguos. Veremos ejemplos para este fenómeno en la tercera parte del artículo.

Además, las nuevas descubiertas, las nuevas teorías, los nuevos conocimientos son a menudo de tal índole que permiten una nueva organización de los conocimientos más antiguos, de describir lo antiguo y lo nuevo bajo puntos de vista comunes.

Esto es un fenómeno común y nada limitado a la enseñanza. Cualquier teoría de la física permite

*Conferencia dictada en la Academia de Ciencias de Córdoba

resumir un gran número de observaciones experimentales. En la teoría de la comunicación esto se llama “reducción de datos” o “compresión de datos”. De la misma manera podemos comprimir el contenido de la enseñanza: aprovechando de estructuras dentro del saber científico. Esquemáticamente, esta manera de proceder puede representarse como lo muestra la figura 1a. Mientras en el procedimiento representado por la figura 1a las estructuras son inmóviles, en el de la figura 1b hay un cambio permanente de estas estructuras.

Este método de organizar los conocimientos científicos se ha practicado muy poco en la física. Sin embargo, según nuestro parecer, es una de las tareas más importantes de la investigación en la didáctica. Además, este trabajo debería ser un trabajo permanente que tiene que acompañar la investigación científica propiamente dicho.

La razón por la cual tan poco trabajo se realiza en este sentido es debido, en gran parte por lo menos, a que a los grandes físicos les gusta más trabajar en las fronteras “exteriores” de su ciencia: buscando la última partícula elemental, elaborando el supraconductor con mayor temperatura de transición o buscando la materia oscura en el universo.

Metafóricamente se puede decir: El edificio de la física es un gran hangar. Los físicos están afanados de llenar este hangar cada vez con más objetos sin nunca preocuparse a hacer orden en el hangar o tirar las cosas a la basurera que ya no sirven.

Esta actitud es distinta de la de los matemáticos. Siempre ha sido una tarea noble y digna de los mayores espíritus de ordenar el edificio matemático.

3. La formación de fósiles en el edificio científico

Estudiando nuestros libros de texto, tanto los libros de la escuela como los de la universidad, se constata que, efectivamente, tienen la estructura sugerida por la figura 1. Reproducen esencialmente el recorrido histórico de la física. Y esto tanto en las grandes líneas como en los detalles.

¿Porqué todos los libros de física son tan similares entre ellos y tan parecidos a la evolución histórica de esta ciencia? ¿Es tan difícil una reestructuración del saber? Sí, es difícil. La ciencia es un sistema complejo apto para la evolución. Como tal tiene una propiedad que cualquier otro sistema complejo y evolutivo tiene: la disposición a la formación de fósiles. La formación de

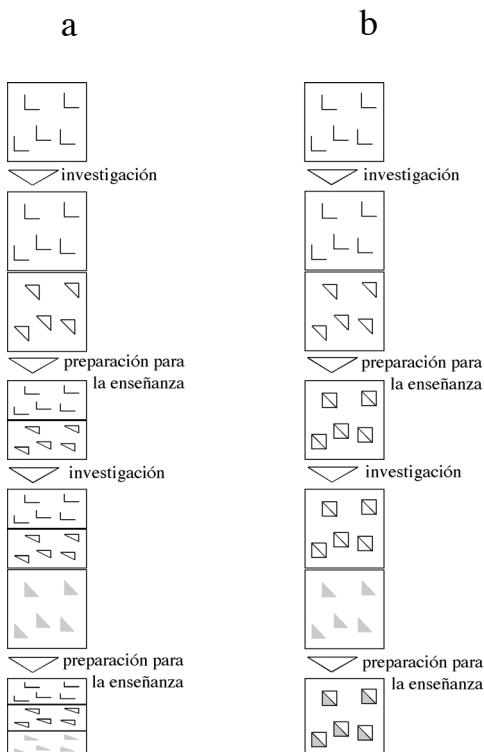


Figura 1

fósiles es un fenómeno que se produce automáticamente debido al hecho que el sistema evoluciona de tal manera que un estado nuevo o reciente esté compatible con el estado anterior. La evolución de un estado a otro debe de ser casi continuo. Consideremos un ejemplo: la televisión.

En los comienzos había la televisión en negro y blanco. Después vino el color. El sistema de televisión de color tenía que ser compatible con los receptores antiguos previsto sólo para emisiones en negro y blanco. Ahora, casi ya no hay receptores de negro y blanco pero seguimos con un sistema de transmisión que tiene propiedades que se explican sólo si se conoce la historia: Es un fósil. Podríamos imaginar un sistema televisivo más eficaz que sólo funciona con colores, pero ya es tarde.

Otros ejemplos son el sistema de teléfonos, de los ferrocarriles etc. Un ejemplo más actual representan los programas para computadoras: un procesador de textos por ejemplo. Casi todos los años sale una nueva versión, un “up-date”, del procesador y cada nueva versión tiene que ser compatible con los archivos producidos con cualquier versión anterior del procesador de texto. Una consecuencia de esta exigencia es que las nuevas versiones son cada vez más complicadas que deberían ser al no exigir que queden capaces de manejar los archivos antiguos. Un resultado de tal evolución es que las nuevas versiones de los programas son más lentas y requieren más memoria que un programa que no tiene en cuenta la exigencia de compatibilidad. Finalmente, el programa termina a ser compatible con archivos que ya nadie utiliza: El programa contiene fósiles.

En efecto, el término “fósil” es adecuado: Lo utilizamos aquí en el mismo sentido como se lo utiliza en la biología. Un fósil es un elemento dentro de un sistema que en otros tiempos tenía una función vital y que ahora ya no sirve.

Volvamos a los contenidos de la física. Se han formado fósiles por medio de los mismos mecanismos como en los otros sistemas evolutivos ya mencionados. Hay conceptos en el currículo que en tiempos anteriores desempeñaban un papel importante y que en la actualidad son superfluos.

Para la investigación en la didáctica, es decir la reestructuración de la física, es imprescindible identificar estos fósiles y después eliminarlos.

Sea dicho de paso que los fósiles tienen también algo positivo, igual como los fósiles biológicos: Nos enseñan mucho sobre la historia. Los fósiles en la física nos dicen mucho sobre como nuestros antepasados interpretaron la naturaleza.

Entonces, hay que buscar y descubrir fósiles. Esto no es tarea fácil. Ya que hemos aprendido la física de cierta manera estamos tan acostumbrado a esta forma de ver la ciencia que resulta difícil creer que hay otras posibilidades de presentarla.

Para descubrir fósiles se necesita algo que se podría llamar “falta de respeto”. Y efectivamente, es falta de respeto. Sin embargo, no es falta de respeto ante los logros de los grandes cerebros de la ciencia si no falta de respeto ante la ciega reproducción de lo que nosotros hemos aprendido.

4. Ejemplos de fósiles en la física

Se puede desarrollar toda una “fosilogía”: Buscando fósiles uno se da cuenta de que hay varios tipos de fósiles y que se puede clasificarlos. Los más importantes son los fósiles relacionados con las ideas fundamentales de la física, ideas que reflejan las convicciones básicas de los científicos.

Hay otros fósiles que están vinculados con la enseñanza: métodos de enseñanza fosilizados.

Hay fósiles muy pequeños, por ejemplo el uso de una palabra puede ser un fósil.

Finalmente, hay conceptos que se han fosilizado porque la técnica experimental ha progresado.

Consideramos algunos ejemplos para cada una de estas clases. Quisiera advertir al lector que tal vez no siempre estará de acuerdo con nosotros y que a su juicio alguno o otro de nuestros ejemplos no merece ser clasificado como fósil. Es normal que puede haber desacuerdo en este sentido. Sin embargo, hay también el lado psicológico: Es siempre desagradable admitir que algo en que hemos tomado cariño sea superfluo.

El concepto de campo

Nuestro primer ejemplo es un fósil de carácter fundamental: La mayoría de los currículos de física empieza con la mecánica Newtoniana. En esta se aprende, entre otras cosas, que los cuerpos se atraen gracias a tener masa. Así se dice que la tierra atrae la luna. En otros términos: un cuerpo A ejerce una fuerza sobre un cuerpo B y B sobre A. Esta manera de describir la situación es típicamente Newtoniana: Es una descripción mediante una acción a distancia. Un cuerpo en un lugar se pone en movimiento debido al hecho que hay otro cuerpo en otro lugar. Según este modo de ver no hay conexión entre los cuerpos. El espacio entre los cuerpos está vacío y no hay nada que podría mediar la atracción. Este concepto de interacción sin mediar parecía inaceptable a muchos físicos. Incluso ofende al sentido común. El mismo Newton estaba convencido de que esto no era la última palabra. Sin embargo, en su época no había otra elección. Pasaron 150 años hasta que apareció una teoría y los experimentos correspondientes que mostraron que no hay necesidad de admitir acciones a distancia – por lo menos en el caso de la atracción entre polos magnéticos y entre cargas eléctricas. Según Faraday entre los polos y las cargas había un mediano. Le llamó a este medio un campo. La descripción teórica de los campos electromagnéticos se debe a Maxwell. Desde esta época, es decir desde hace más de cien años nadie ya acepta la idea de acciones a distancia. Sin embargo, nuestros textos siguen promulgando las acciones a distancia. Reproducen la mecánica tal como fue imaginado por Newton – como si la física de los doscientos años pasados no hubiera existido.

He aquí un ejemplo muy claro y sencillo de fosilización. La historia del concepto de campo después de Maxwell en cambio es más intrincada y muestra que la identificación de fósiles no es siempre fácil. Vamos a esbozar esta evolución.

Ya se ha dicho que debemos el concepto de campo a Faraday. Para entender su pensamiento tenemos que saber que en su tiempo los científicos estaban convencidos de que todo el espacio fuera lleno de una sustancia a la que se había dado el nombre de éter. El éter era entre otras cosas el medio en el cual se propagan las ondas de la luz, que ya eran conocidas. Con este éter era posible dar una explicación de la interacción entre cuerpos con carga eléctrica sin recorrer a acciones a distancia: Hay éter en todas partes. En la región alrededor de los cuerpos cargados el éter es, según Faraday, en un estado de tensión o presión mecánica. Entonces, la atracción está transmitida por el mismo éter. Esta interpretación de la interacción electrostática era mucho más satisfactoria que una con acciones a distancia y no ofendía al sentido común.

Ya dijimos que las ideas de Faraday han sido puesto en formulación matemática por Maxwell. Para Maxwell, como para Faraday, el mundo entero era lleno de éter. Maxwell consideraba su teoría como una teoría que describe las propiedades de este éter. Lo dice explícitamente [1]. Miramos su definición del concepto de campo, porque es importante por lo que intentamos a mostrar. Según Maxwell, el campo eléctrico es "...la parte del espacio alrededor de cuerpos electrificados..."[2]. No olvidemos que, para él, la palabra "espacio" era sinónimo con "éter".

Algunas décadas más tarde se hizo un experimento para detectar el movimiento de la tierra respecto al éter, el famoso experimento de Michelson y Morley: El experimento mostró que el éter debe poseer unas propiedades muy extrañas – tan extrañas que algunos físicos concluyeron que no existe del todo. Por una vez, los libros reaccionaron rápidamente: El éter desapareció de la mayoría de ellos. No de todos, sea dicho de paso, y el mismo Einstein no ha negado la existencia del éter.

Sin embargo, la negación de la existencia del éter por la mayor parte de los libros tenía consecuencias graves. Emergió algo que ya a los filósofos de la antigüedad ha parecido impensable: que haya espacio completamente vacío. ¿Entonces, la nada? No en absoluto. La nada no tiene extensión. Las consecuencias de esta manera de pensar eran particularmente grave para el concepto de campo: Los libros seguían definiendo el campo como Maxwell, es decir como "el espacio" alrededor de cuerpos cargados y atribuían a este espacio propiedades. Pero, ¿cómo puede el espacio que no contiene nada tener propiedades? Este estado lamentable hubiera debido durar sólo pocas décadas, porque poco después vinieron nuevas teorías que mostraron que el éter sí existe y que el llamado espacio vacío no está nada vacío. El éter ha resucitado, bajo otro nombre. Su nombre moderno es, desafortunadamente, "vacío". Decimos desafortunadamente, porque la palabra "vacío" en el lenguaje común expresa la ausencia de una cosa y no la presencia.

Lo malo es que el estado de breve duración de espacio vacío se ha fossilizado. Los libros presentan al principiante un espacio vacío – y el campo como una propiedad de esta ausencia. Una consecuencia es que para los estudiantes el campo aparece como concepto muy abstracto y incluso contradictorio. Teniendo en cuenta los resultados de la física moderna se podría ver que el campo es un sistema tan fácil y accesible a la intuición y al sentido común como los conceptos de cuerpo, de gas perfecto etc y tal como lo era en la época de su invención por Faraday.

La escala de la temperatura

Nuestro segundo ejemplo de fósil se refiere a un método de enseñanza. Es un ejemplo de como seguimos enseñando un tema recorriendo el camino tortuoso de la historia. Se sabe que el agua se congela a la temperatura de 0°C y hierve a 100°C . Esto no es por casualidad si no se ha definido la escala de la temperatura de esta manera. Más exactamente: Se sabe que los líquidos se dilatan cuando se les calienta (con pocas excepciones). Para definir la temperatura se escogió como líquido el mercurio, encerrado en un recipiente como lo muestra la figura 3. El nivel del mercurio sube o baja según hace más frío o más caliente. Se marca la posición del nivel del mercurio cuando este termómetro está en contacto con una mezcla de agua líquida y hielo (de esta manera se consigue una temperatura fácil a reproducir) y después se marca el nivel cuando el termómetro está en contacto con agua hirviendo. Ahora, se divide la distancia entre los dos niveles en 100 intervalos iguales. Cada uno de estos intervalos representa un grado centígrado. Este fue la primera definición de la escala de la temperatura. Sin embargo, había un inconveniente: La definición era basada en la propiedad de una sustancia particular, el mercurio. Con otro líquido se hubiera obtenido una escala un poco diferente: Dos intervalos iguales en esta otra escala no hubieran sido iguales en la escala del mercurio. Una tal propiedad de la escala de una magnitud física no gusta a los científicos. Prefieren escalas que no están basadas en propiedades particulares de una sustancia. Por esta razón más tarde se definió una nueva temperatura basada en la dilatación de los gases. En efecto, todos los gases se comportan de la misma manera, por lo menos en buena aproximación. Sin embargo, aún más tarde se encontró un método de definir la escala de la temperatura que es completamente independiente de cualquier sustancia: el cociente diferencial $\partial E(S, V, n)/\partial S$, en palabras, la energía por entropía. Esta es la escala que se utiliza desde más de cien años. Pero, ¿Cómo estamos enseñando la temperatura en la escuela y en la universidad? Empezamos con la temperatura de mercurio, pasamos por la temperatura del gas y si los estudiantes tienen mucha suerte se les enseña después la única temperatura válida según las convenciones internacionales. A muchos estudiantes de ciencia la única escala autorizada les parece como un tema muy difícil. Sin embargo, en una enseñanza bien estructurada esta temperatura podría ser la más fácil a aprender. Y se podría ahorrar tiempo si no se sigue el recorrido histórico.

Para mostrar lo inadecuado que es la introducción tradicional de la temperatura quisiéramos hacer una comparación. Consideremos una historia hipotética de la evolución del concepto de otra magnitud intensiva: de la tensión eléctrica. Imaginemos que este concepto hubiera padecido el mismo destino como la temperatura. Primero se hubiera definido la tensión eléctrica por medio de un efecto muy débil y dependiente de una sustancia particular: por medio de la electrostricción, es decir de la contracción de un cuerpo cuando se aplica una tensión eléctrica. Más tarde se hubiera encontrado un efecto que es independiente de los materiales: se hubiera inventado el electroscópio y se hubiera basado la escala de la tensión eléctrica en este instrumento. Y aún más tarde se hubiera encontrado un proceso aún más general, independiente de cualquier sustancia o instrumento y se hubiera definido finalmente la tensión como $\partial E/\partial Q$, es decir como energía por carga eléctrica. Afortunadamente, la historia no fue así, sino se utilizaba siempre la definición que todavía sigue válida hoy.

El embrollo con la temperatura aún tiene otras consecuencias. Todos los cursos elementales de termodinámica empiezan con el estudio detallado de la dilatación térmica de cuerpos sólidos y líquidos. Este es un efecto sumamente pequeño. Es del orden de 10^{-4} para variaciones razonables de la temperatura. Efectos tan pequeños hay muchísimos en la naturaleza y en una introducción elemental a la física no se puede permitir estudiar tales fenómenos. Hay efectos mucho más grandes y más importantes para la comprensión de la naturaleza y de la técnica que no podemos discutir en nuestros cursos de física por falta de tiempo. Entonces, ¿Porqué gastar tanto tiempo con la dilatación térmica? En general se dan justificaciones como esta: es importante por-

que los rieles de los ferrocarriles o los puentes se dilatan. Estos argumentos no son convincentes. Hoy día los rieles ya no se dilatan, son soldados. Y si explicamos a los alumnos que los puentes se dilatan deberíamos explicarlos también porque ciertos puentes no se dilatan, y porque las carreteras y las casas no se dilatan. Nos parece que el argumento en favor de la importancia de la dilatación térmica no es sincero. Pensamos que la verdadera razón de que la dilatación térmica juega un papel tan importante en el currículo es mera inercia mental. En tiempos remotos, la definición de la temperatura era basado en este efecto. En aquel entonces era un efecto fundamental para comprender la física. Pero hoy ya no lo es.

Las palabras “potencia” y “trabajo”

El tercer ejemplo de fósil es una mera palabra. Se caracteriza un aparato eléctrico por un número de Watios, la llamada potencia del aparato. Consideremos una lámpara de 60 W. Esta indicación nos dice que la lámpara, cuando está conectada correctamente, recibe de la central eléctrica por segundo 60 Joules y que al mismo tiempo entrega 60 Joules por segundo al los alrededores con la luz y el calor. En otros términos: la indicación 60 W mide una corriente de energía que atraviesa la lámpara. La misma corriente atraviesa también el cable de conexión de la lámpara. Se la puede medir en cualquier corte a través del cable. Sin embargo, en vez de llamar la magnitud P corriente de energía la llamamos potencia de la lámpara como si fuera una magnitud que sólo se puede medir en la lámpara. Este nombre data de una época cuando aún no sabíamos localizar los flujos de energía.

Otro nombre anticuado y fosilizado es el de “trabajo”. Se llama trabajo a una cierta manera de transportar energía. En otros términos: es una de las varias formas de energía, tal como energía eléctrica o energía química. ¿Porqué no se la llama energía mecánica? Porque el nombre de trabajo fue acuñado antes de la descubierta del concepto de energía. Se olvidó a dar a esta magnitud un nombre adecuado y la palabra trabajo ha sobrevivido como fósil.

La histeresis

Nuestro último ejemplo es un concepto que se ha transformado en fósil porque la técnica experimental ha progresado. En los cursos de física discutimos el ferromagnetismo. A pesar de que se trata de un fenómeno bastante sencillo el primer encuentro del estudiante con el es más bien frustrante. Se le enfrenta con una explicación muy complicada del magnetismo por medio del llamado diagrama de histeresis, figura 2a. El diagrama representa la magnetización en función de la intensidad del campo magnético. Nos dice que podemos modificar la magnetización del imán por medio de un campo “exterior”, el campo de otro imán por ejemplo. En particular se puede destruir el magnetismo de nuestro imán si se acerca otro imán. Esto era un fenómeno muy interesante ha-

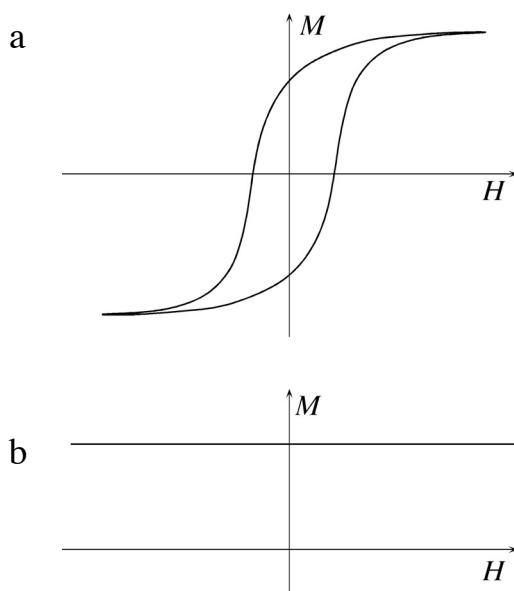


Figura 2

sta hace como 50 años aproximadamente, es decir en la época cuando todavía no se sabía fabricar buenos imanes. En efecto, en estos tiempos los imanes eran objetos muy capriciosos y frágiles. La menor influencia exterior estropeó su magnetismo. Pero estos tiempos han pasado.

Los imanes que se fabrican hoy conservan su magnetismo muy bien. El diagrama M sobre H de un imán moderno es sencillamente como lo muestra la figura 2b: La magnetización tiene cierto valor y lo conserva, cualquier sea el campo exterior. Si alguien nos vende un imán que no es así nos quejamos. Los diagramas complicados de los imanes imperfectos se han conservado como fósiles en los textos. Los expertos en magnetismo van talvez objetar que aún los materiales magnéticos modernos tienen histeresis. Esto es cierto. Sin embargo, se manifiesta solamente si se hace algo con el imán para que no está hecho. Consideremos un ejemplo análogo: un resorte. Decimos en el curso de física que obedece a la ley de Hooke. Pero aquí también se puede observar una histeresis, si se aplica una fuerza más grande que la fuerza máxima prevista. Es razonable de empezar la discusión del resorte limitandonos al intervalo de validez de la ley de Hooke. ¿Porqué, entonces, no limitamos el tratar del imán al intervalo donde la magnetización queda constante?

5. Conclusión

Era nuestra intención de llamar la atención al hecho de que la física tal como la enseñamos contiene arbitrariedad y convención. Antes de construir un currículo nuevo es necesario de darse cuenta de este hecho. Es necesario de identificar los temas que quedan en el currículo sólo por razones históricas. Hay que identificar los fósiles. Aún si el lector no es de acuerdo de que los ejemplos dados son fósiles esperamos que hemos conseguido de alentarlos de partir a la busca de otros. También esperamos de haberlo quitado un poco de su respeto de los textos de física.

[1] J. C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism* (Dover, New York, 1954), Vol. 2, article 866, p. 493. “Entonces, todas estas teorías conducen a la concepción de un medio en el cual la propagación tiene lugar y, si admitimos este medio como hipótesis, pienso que debería ocupar un sitio prominente en nuestras investigaciones y que deberíamos esforzarnos a construir una representación mental de todos los detalles de su acción y esto ha sido mi objetivo constante en este tratado.”

[2] J. C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism* (Dover, New York, 1954), Vol. 1, article 44, p. 47.