

El debate sobre la consistencia de la electrodinámica

EDVATIO PHYSICORVM



ISSN 1870-9095

Rafael Andrés Alemañ Berenguer

Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal, Universidad de Alicante, Ap. de correos 99, 03080-Alicante (España)

E-mail: raalbe.autor@gmail.com

(Recibido el 6 de noviembre de 2024, aceptado el 30 de octubre de 2025)

Resumen

A comienzos del siglo XXI se desarrolló una peculiar discusión sobre la posible existencia de contradicciones sin solución en las bases conceptuales de la electrodinámica clásica. Los argumentos expuestos para señalar tales presuntas inconsistencias, así como las réplicas que recibieron, constituyen un ejemplo excelente de controversia científica de la cual la teoría electromagnética salió indemne. Sin embargo, los detalles del debate demuestran que la física clásica, lejos de hallarse privada de problemas interesantes, aun puede albergar diversas y profundas líneas de investigación de carácter fundamental.

Palabras clave: Electrodinámica clásica, modelo del electrón, inconsistencias teóricas, materia y campo.

Abstract

At the beginning of the 21st century, a peculiar discussion about the possible existence of unresolvable contradictions in the conceptual bases of classical electrodynamics was carried out. The arguments put forward to point out such alleged inconsistencies, as well as the replies they received, constitute an excellent example of scientific controversy from which electromagnetic theory emerged unscathed. However, the details of the debate show that classical physics, far from being devoid of interesting problems, can still accommodate various and profound lines of research of a fundamental nature.

Keywords: Classical electrodynamics, electron model, theoretical inconsistencies, matter and field

I. INTRODUCCIÓN

Frente a la extendida opinión según la cual los únicos problemas físicos dignos de interés surgen en disciplinas nacidas a lo largo del siglo XX, la teoría electromagnética, en su formulación más tradicional, plantea algunos de los más desafiantes retos para los fundamentos de la física. No se trata ya de asuntos relacionados con las fronteras de la investigación, como la física del plasma, los fenómenos magnetohidrodinámicos o la fotónica no lineal, que en todas las disciplinas científicas existen. En este caso hemos de enfrentarnos a cuestiones que alcanzan las raíces conceptuales de la teoría que se discute, acaso debilitando su propia coherencia interna.

Así ocurrió con el debate desarrollado durante la primera década del siglo XXI sobre la inconsistencia fundamental de la electrodinámica clásica. El fuego dialéctico lo abrió M. Frisch, de la Universidad de Hannover, quien poco después recibió una contundente respuesta por parte de F. A. Muller, de la Universidad de Utrecht, seguido en la misma línea por G. Belot, de la Universidad de Michigan.

Por momentos las discrepancias parecían desplazarse hacia la duda de si los contendientes se estaban refiriendo realmente al mismo cuerpo teórico, o cada uno de ellos se remitía a su propia versión de la electrodinámica clásica. Eso condujo a su vez, siquiera subsidiariamente, a la cuestión de

las distintas formulaciones de una misma teoría científica, y si todas ellas son intercambiables, o en qué grado lo son.

La agitación acabó por aquietarse, aunque las alegaciones expuestas durante la pugna fueron de tal calibre que cabría preguntarse si el asunto quedó saldado definitivamente, o sencillamente se halla en estado de letargo hasta reavivarse en cuanto aparezcan mejores argumentos. Por ello, con el fin de obtener una visión de conjunto acerca de esta discusión tan profunda como polifacética, el presente artículo comenzará remontándose, en el segundo y tercer apartado, a los orígenes históricos de esta controversia, situados en la comprensión científica de los fenómenos electromagnéticos elaborada a lo largo del siglo XIX. Después se expondrán en el cuarto epígrafe las tesis principales de la acometida de Frisch contra las bases de la electrodinámica clásica, contrapesadas por las correspondientes respuestas que él mismo recibió. El quinto y último epígrafe se dedicará al intento de trazar un balance de los argumentos vertidos en esta disputa.

II. SURGE LA ELECTRODINÁMICA

La magna obra del escocés James Clerk Maxwell (1831 – 1879) logró la unificación de los fenómenos eléctricos, magnéticos y ópticos al costoso precio de renunciar

simultáneamente a ciertos rasgos de las visiones del mundo de Faraday y de Newton (dos concepciones en muchos aspectos enfrentadas entre sí) sobre las cuales este autor decía sostenerse. Como la inmensa mayoría de sus contemporáneos, Maxwell suponía la existencia de un medio invisible e imponderable que ocupaba todo el espacio —el éter— y actuaba como soporte de la propagación de ondas luminosas, fuerzas electromagnéticas y gravitatorias [1]. La misión principal del éter consistía en satisfacer un requisito fundamentalmente metafísico, cual era el deseo de eludir las acciones a distancia. La idea de campo debida a Faraday resolvía la cuestión a falta de un sustrato material, en apariencia indispensable para justificar la realidad física de las líneas de fuerza de los campos. Ese era el papel que se adjudicaba entonces al éter decimonónico.

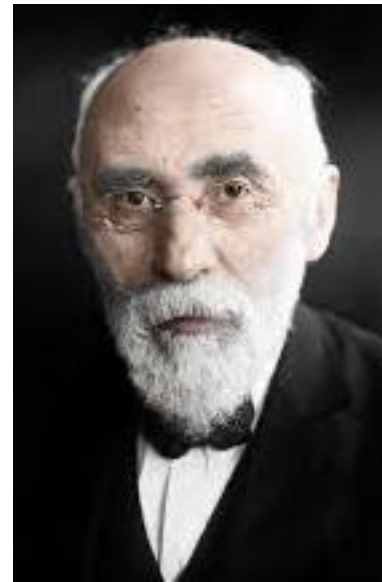
Maxwell, no obstante, construyó su propio modelo de éter asimilándolo a un sistema mecánico de rodillos y cojinetes en el que se prescindía de propiedades que hoy se nos antojan tan básicas como la carga eléctrica. Con todo y ello, obtuvo unas ecuaciones de campo sustancialmente idénticas a las que utilizamos en la actualidad considerándolas plenamente acertadas en el dominio macroscópico [2]. Esto no significa que a finales del siglo XIX faltasen autores dispuestos a retocar la teoría maxwelliana especificando las propiedades del éter, ya fuese como un fluido perfecto o como un sólido elástico. Pese a los esfuerzos de investigadores del calibre de Lord Kelvin, Lodge, Larmor, Heaviside o Fitzgerald, nada definitivo se consiguió al respecto [3].

El siguiente paso fue dado por el holandés Hendrik Antoon Lorentz (1823 – 1958), quien decidió reinterpretar la electrodinámica de Maxwell en 1892 añadiendo dos postulados [4]: (1º) Los campos electromagnéticos tienen su origen en una propiedad —la carga eléctrica— poseída por las partículas que a nivel microscópico constituyen la materia; (2º) El éter permanece perfectamente inmóvil ante el movimiento de la materia y de los campos electromagnéticos a ella asociados. Cuando el británico Joseph John Thomson (1856 – 1940) descubrió experimentalmente la partícula que hoy denominamos “electrón”, las hipótesis de Lorentz adquirieron un atractivo irresistible y las ecuaciones del campo electromagnético pasaron a denominarse “ecuaciones de Maxwell-Lorentz”.

A las cuatro ecuaciones de Maxwell que describen las variaciones recíprocas de los campos eléctricos y magnéticos en el espacio y el tiempo (ecs. 1 – 4), Lorentz añadió una quinta (la “fuerza de Lorentz”), referida a la fuerza electromagnética que actúa sobre una partícula cargada en movimiento (ec. 5). Como de costumbre, \mathbf{E} y \mathbf{B} son, respectivamente los campos eléctrico y magnético, ρ es la densidad de carga eléctrica, \mathbf{J} es la densidad de corriente, \mathbf{v} la velocidad de la partícula cargada y q el valor de su carga eléctrica.

El hecho de que la partícula cargada sobre la que actúan las fuerzas electromagnéticas porte su propio campo, el cual interactúa con los campos externos, anunciaba el advenimiento de serios problemas, como pronto advirtieron investigadores de la talla de Poincaré. Al gran científico francés no se le escaparon las consecuencias de la auto-

inducción electromagnética, en relación con el fenómeno denominado “reacción radiativa” [5].



Hendrik Antoon Lorentz

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi\rho, \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} - (\partial \mathbf{E} / \partial t) = \mathbf{J}, \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} - (\partial \mathbf{B} / \partial t) = 0, \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (4)$$

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}). \quad (5)$$

Una carga eléctrica sometida a un campo electromagnético se acelera y emite radiación, alterando la fuerza de Lorentz sobre ella, lo que a su vez modifica la aceleración de la partícula y su irradiación. De este modo, el campo electromagnético dependerá de las derivadas de la posición con respecto al tiempo en todos los órdenes hasta el infinito. De inmediato Poincaré se percató de que tan peculiar efecto se traducía en una componente añadida al valor total del campo proporcional a la aceleración, lo que a su vez podía interpretarse como una contribución electromagnética a la inercia de la partícula.

Consideraciones como estas animaron el denominado “programa electromagnético”, consistente en el intento de reducir las características puramente mecánicas de la materia, como la masa inercial, a subproductos de sus propiedades electromagnéticas. Desde semejante punto de vista, el genuino sustrato de la realidad física no sería sino el campo electromagnético y, por tanto, la mecánica clásica newtoniana debería subsumirse de algún modo en la electrodinámica de Maxwell-Lorentz convenientemente ampliada. Adalides en esta línea de pensamiento fueron los alemanes Wilhelm Wien (1864 – 1928) y Max Abraham (1875 – 1922).

El programa electromagnético se agotó en sí mismo, anegado por la marea de avances teóricos y experimentales acaecidos a comienzos del siglo XX, dejando abierto el interrogante sobre la completa reconciliación entre mecánica y electrodinámica. Incluso en un texto clásico como el de Landau y Lifshitz se reconoce la dificultad de tomar rigurosamente en cuenta ciertos efectos de difícil tratamiento. Así ocurre cuando tratamos de explicar la pérdida de energía por radiación en las cargas aceleradas por un campo externo introduciendo las llamadas “fuerzas de rozamiento de Lorentz” y se llega a la conclusión de que una carga que atravesase un campo electromagnético, al salir de él, experimentaría una autoaceleración ilimitada [6]:

«Se nos puede plantear la pregunta de cómo la electrodinámica, que cumple la ley de la conservación de la energía, puede conducir a un resultado absurdo en el cual una partícula libre aumenta indefinidamente su energía. La raíz de esta contradicción estriba en realidad en la presunta “masa” electromagnética “propia”, infinita, de las partículas elementales de que hablamos [...]. Al escribir en las ecuaciones del movimiento la masa infinita de la carga, en realidad le asignamos formalmente una “masa propia” negativa infinita, de origen no electromagnético, que conjuntamente con la masa electromagnética daría por resultado la masa finita de la partícula. Pero la substracción de una magnitud infinita de otra también infinita no es una operación matemática correcta, y esto ocasiona toda una serie de contradicciones entre las que figura la que acabamos de indicar.»

III. LA TEORÍA CLÁSICA DEL ELECTRÓN

No solo existían inquietudes sobre las interacciones entre campos y partículas, sino que el propio concepto de corpúsculo eléctricamente cargado se enfrentaba a muy graves obstáculos. Si suponemos que el electrón es una partícula puntual, una simple mirada a la ley de Coulomb revela que el campo eléctrico tendería a infinito, ya que al aproximarnos a un punto, $r \rightarrow 0$ y, obviamente, $F \propto 1/r^2 \rightarrow \infty$. Parece lógico que así sea, por cuanto estamos asignando una carga eléctrica finita a un volumen nulo con el resultado de una densidad de carga infinita. Esto no parecía muy tolerable, lo que empujó a los teóricos a ocuparse de modelos no puntiformes para los electrones [7, 8, 9, 10].

El hecho de admitir que el electrón podría ser un objeto extenso, una esfera de radio finito, no se hallaba exento de problemas. En ese caso habría de explicarse cómo es que el electrón no se descompone a causa de la repulsión electrostática entre sus partes. Poincaré señaló este escollo y propuso como solución la existencia de fuerzas no electromagnéticas que compensaban tal repulsión, las llamadas “tensiones de Poincaré”. En la electrodinámica cuántica también se necesitan fuerzas no electromagnéticas que equilibren las repulsiones eléctricas entre las diversas partes de un electrón extenso. Es decir, ni en la electrodinámica clásica ni en la cuántica el electrón se revela

como una entidad autosuficiente, puesto que siempre se necesitan campos compensatorios de las fuerzas internas que no pueden ser ellos mismos electromagnéticos.



Jules Henri Poincaré

En esencia, nos encontramos ante el mismo inconveniente mencionado por Landau y Lifshitz al final del apartado anterior. Se supone que la masa del electrón se compone de una parte electromagnética y otra que no lo es —quebrando así el paradigma puramente electromagnético de Abraham— esta última con signo negativo. El recurso a las tensiones de Poincaré para compensar la repulsión interna de una distribución esféricamente uniforme de carga (como suponía el caso pre-relativista), por otro lado, resultaba irrelevante en el análisis del modelo no puntual del electrón [11]:

«The arbitrariness of the Lorentz-Poincaré electron is much greater than the freedom we have in choosing the 00-component of the energy-momentum tensor for the mechanism stabilizing a spherical surface charge distribution. For starters, we can choose a (surface or volume) charge distribution of any shape we like—a box, a doughnut, a banana, etc. As long as this charge distribution is subject to the Lorentz-FitzGerald contraction, we can turn it into a system with the exact same energy-momentum-mass-velocity relations as the Lorentz-Poincaré electron by adding the appropriate non-electromagnetic stabilizing mechanism. Of course, as the analysis in this section, [...], shows, any closed static system will have the same energy-momentum-mass-velocity relations as the Lorentz-Poincaré electron, no matter whether it consists of charges, electromagnetic fields, and Poincaré pressure or of something else altogether. The only thing that matters is that whatever the electron is made of satisfies Lorentz-invariant laws. The restriction to static closed systems, moreover, is completely unnecessary. Any closed system will do. In short, there is nothing we can learn about the nature

and structure of the electron from studying its energy-momentum-mass-velocity relations.»

El modelo clásico del electrón, en todo caso, resultaba energéticamente inestable a falta de una ligadura que contrapesara la repulsión electrostática, aun cuando Weisskopf mostrase que su carga parecía hallarse dispersa sobre una región en la escala de la longitud de onda de Compton [12]. Como cabía suponer, el significado físico de la introducción de masas negativas despertó un reluctant escepticismo [13]. Sin embargo, parecía justificado esperar que la energía responsable de mantener la integridad del electrón fuese negativa si tenemos en cuenta que la energía del campo electromagnético se define como el trabajo necesario para reunir una carga elemental a partir de sus porciones infinitesimales separadas infinitamente entre sí. De hecho, la búsqueda de modelos clásicos para el electrón que se demuestren energéticamente estables sigue siendo una cuestión abierta en la actualidad, pese a las diversas respuestas ofrecidas hasta la fecha [14, 15].

El hecho es que la ontología de la electrodinámica clásica establece una distinción taxativa entre partículas y campos, lo que a su vez divide las leyes de la teoría en dos mitades: por un lado las ecuaciones de Maxwell, destinadas a explicar cómo las partículas cargadas crean los campos, y por otro la fuerza de Lorentz, concerniente al efecto de los campos sobre las cargas. De las ecuaciones maxwellianas poco cabe discutir porque el problema se halla en la fuerza de Lorentz, en principio compuesta por dos términos, una componente externa y otra interna. Los campos electromagnéticos externos a la partícula cargada, obviamente, son los responsables de la componente externa de la fuerza de Lorentz total, mientras que la componente interna, o “propia”, tiene su origen en la acción del campo sobre la propia partícula que lo genera. Es decir, $\mathbf{F}_{tot} = \mathbf{F}_{ext} + \mathbf{F}_{int}$.

Difícilmente podremos caracterizar esa fuerza de Lorentz interna sin disponer de un modelo sobre la estructura de la partícula cargada que nos indique cómo los campos afectan el comportamiento de su propia fuente. La que podríamos llamar “auto-acción” se debe al hecho de que el campo coulombiano de diferentes partes de un electrón –supongámoslo así– afecta otras partes de ese mismo electrón como campos externos, creando unas fuerzas que no se equilibran cuando el electrón acelera. Por ello, solo cuando tengamos una aproximación a la estructura de la partícula podremos calcular la fuerza interna de Lorentz porque solo entonces podremos sumar los efectos sobre cada una de las diferentes partes del electrón de los campos producidos por el resto de la partícula (y aun así deberíamos plantearnos si existe alguna auto-acción de cada parte sobre sí misma).

La alternativa a tan abstrusa situación pasaría por tomar la energía irradiada por el electrón acelerado y calcular la fuerza sobre la partícula mediante la conservación de la energía. Esta estrategia conduce a la ecuación de Abraham-Lorentz, cuya deducción, desafortunadamente, arrastra un importante abanico de problemas debido a su carácter no newtoniano, ya que es una ecuación de tercer orden en la derivada de la posición con respecto al tiempo [16]. El principal obstáculo nace de la existencia de soluciones no

físicas que infringen la conservación de la energía, como es el caso de las autoaceleraciones que la ecuación predice incluso cuando la fuerza externa sobre la partícula se anula por completo.

Una generación más tarde los requisitos de la relatividad especial se incorporaron explícitamente en la llamada ecuación de Lorentz-Dirac. A pesar de su denominación, el británico Paul Dirac (1902 – 1984) no obtuvo esta ecuación como el límite puntual de un electrón extenso, sino que asumió el carácter puntiforme del electrón desde el inicio, suponiendo la validez de las ecuaciones de Maxwell en todas las escalas de distancia (excepto en el punto mismo ocupado por el electrón). No obstante, el gran físico inglés siempre insistió en que esta ecuación tenía un alcance puramente fenomenológico y aun así con restricciones, pues deben imponerse ciertas condiciones sobre las fuerzas externas presentes si queremos eludir la aparición de soluciones sin significado físico [17].

IV. ¿ES LA ELECTRODINÁMICA CLÁSICA INCONSISTENTE?

Las acusaciones de inconsistencias que Frisch iba a formular contra la electrodinámica clásica en la primera década del siglo XXI, así pues, contaban con venerables precedentes y un dilatado historial de discusiones al respecto. Ahora bien, la vertiente más novedosa de sus objeciones provino del carácter irrefutable con el que las revistió, –negando la posibilidad de que futuras ampliaciones teóricas las superasen– y de las consecuencias epistemológicas que pretendió extraer de ellas. De las presuntas incoherencias que detectaba en los fundamentos de la teoría electromagnética, Frisch coligió que cierto grado de inconsistencia debía ser inherente al conocimiento científico, por lo cual más que combatirlo tendríamos que aprender a adaptarnos a él.

El primer movimiento en esta dirección tuvo lugar por medio de un artículo publicado en 2004 con el sugerente título *Inconsistency in Classical Electrodynamics* [18]. El tema de este trabajo se amplió un año después dando paso a un libro completo titulado *Inconsistency, Asymmetry, and Non-Locality: A Philosophical Investigation of Classical Electrodynamics* [19]. Ya en 2009, un lustro tras el inicio de la polémica, Frisch publicó otro artículo [20] donde compendia las ideas principales recogidas en su libro de 2005 sin añadir contenidos sustancialmente nuevos.

El subtítulo del libro de Frisch (“Una investigación filosófica de la electrodinámica clásica”) manifiesta con toda claridad que la intención del autor es la de extraer todas las conclusiones físicas y metafísicas que se obtuviesen de las premisas por él defendidas en el texto. Quizás por ello su contenido se divide en dos grandes secciones: la primera parte se ocupa de las partículas y la segunda de los campos.

Los capítulos dedicados a los campos tratan la ausencia de ondas electromagnéticas adelantadas en el tiempo (cronoretrógradas), pese a estar permitidas por las ecuaciones de Maxwell, así como las conexiones de este problema con la entropía y la termodinámica. Hacia el final de la obra también se mencionan los efectos no locales auspiciados por el efecto Aharonov-Bohm en relación con la descripción

cuántica de los potenciales electromagnéticos. Estos asuntos raramente podrían calificarse de inconsistencias, sino que más bien se trataría de cuestiones abiertas en curso de investigación, que conectan a su vez con interrogantes físicos mucho más amplios, cuyo desenlace no tiene visos de amenazar la coherencia de la teoría.

En realidad, es en los capítulos referidos a las partículas en el seno de la electrodinámica donde se encuentran las objeciones centrales contra el edificio teórico de la electrodinámica clásica. Frisch comienza asegurando que las contradicciones objeto de sus críticas se derivan directamente del que –en su opinión– es el esquema teórico universalmente empleado por los especialistas en electrodinámica. Esa formulación se sintetiza en cuatro suposiciones básicas: (1°) Existen partículas eléctricamente cargadas susceptibles de experimentar aceleraciones; (2°) las ecuaciones de Maxwell describen correctamente los campos electromagnéticos; (3°) la expresión de la fuerza de Lorentz sobre las partículas cargadas es válida; y (4°) la energía se conserva en las interacciones entre cargas y campos.

La conservación de la energía, más que como un postulado inicial, suele deducirse de las propias simetrías de la teoría, cuyas ecuaciones dinámicas pueden escribirse en forma lagrangiana o hamiltoniana para obtener de inmediato –mediante los teoremas de Noether– las correspondientes leyes de conservación.

Así pues, no parece justificado situar la conservación de la energía entre las premisas teóricas de la electrodinámica clásica; hacerlo así supone colocarnos en la misma posición de los científicos decimonónicos que carecían de la visión de conjunto que hoy tenemos de la teoría y de su evolución posterior. En ese mismo sentido, actualmente sabemos que el comportamiento microscópico de los electrones no pertenece en rigor al régimen clásico sino al cuántico, donde no es sorprendente que la física clásica ofrezca pobres resultados.

El nudo de la contradicción que Frisch señala se halla en el hecho de que, a su juicio, la ley de fuerzas electromagnéticas de Lorentz estipula que la variación de energía de una carga se debe tan solo al efecto de la componente externa de la fuerza, \mathbf{F}_{ext} ; es decir, $\mathbf{F}_{int} = 0$. Bajo esta condición, Frisch llega a una contradicción al deducir que una carga acelerada emite y no emite, al mismo tiempo, energía en forma de radiación [19].

Una réplica que de inmediato puede surgir entre quienes no respalden estas objeciones subrayaría que, precisamente esas inconsistencias, o el quebrantamiento de la conservación de la energía, revelan que la posición de Frisch es insostenible [21]. La autoconsistencia como requisito lógico y la conservación de la energía como principio regulativo sirven para cribar aquellas propuestas que aspiren a ser aceptadas en calidad de teorías científicas de pleno derecho. Los planteamientos que no cumplan con tales precondiciones se verán descartados desde el principio. De adoptarse semejante punto de vista la pregunta pertinente sería entonces por qué Frisch llega a las conclusiones que dice obtener de su versión de la electrodinámica clásica. Averiguar las raíces de esas aparentes inconsistencias también parece interesante como ejercicio de aclaración de las bases sobre las que descansa la teoría electromagnética [22].

En la inmensa mayoría de los casos reales la electrodinámica clásica se muestra capaz de proporcionar respuestas de extrema precisión prescindiendo de las autoacciones ($\mathbf{F}_{int} \approx 0$), circunstancia que no impide reconocer su carácter de mera aproximación [23]. En el caso más general –como sabemos– el movimiento acelerado del electrón provoca variaciones en los campos que afectan el propio movimiento del electrón, lo que a su vez modifica los campos y así sucesivamente. En otras palabras, tanto los campos como sus fuentes resultan desconocidos, aun cuando sepamos que sus variaciones se hallan acopladas, lo que nos permite comprender la complejidad del problema. Las formas de abordarlo son muy numerosas, si bien todas ellas se basan en una variada gama de idealizaciones y simplificaciones adaptadas a una gran diversidad de casos [24].

En [20] Frisch realiza unas apreciaciones a primera vista sorprendentes:

«The problem is that any theory with self-interactions has to posit a model for charged particles and arguably there is no physically ‘well-behaved’ model of a discrete finitely charged particle that does not involve what *by the theory’s own lights* are idealizations.»

La pregunta que queda flotando en la mente del lector cuestionaría dónde está el problema que sugiere el párrafo precedente. Naturalmente que todas las teorías científicas, como construcciones que son del intelecto humano, involucran idealizaciones en mayor o menor grado y en cualquiera de sus niveles de sofisticación. Por ejemplo, la ecuación de los gases ideales –como su mismo nombre indica– es una idealización de alto nivel que se puede reemplazar en ciertas condiciones por la ecuación de Van der Waals, pretendidamente más cercana al comportamiento de los gases reales. Pero nunca criticaríamos la física de fluidos por ofrecernos teorías que nunca encajan a la perfección con la naturaleza real de los objetos que estudia.

Frisch entra en detalles un poco más adelante y puntualiza que las idealizaciones sometidas a su crítica resultan callejones sin salida que abocan a contradicciones insalvables. Por ejemplo, al tratar al electrón como una partícula puntual, chocamos con los valores infinitos del campo en la propia localización de la partícula. Y cuando consideramos modelos de partículas extensas evitamos las cantidades infinitas al precio de infringir las restricciones relativistas que prohíben la propagación de señales superlumínicas. No obstante, debemos acoger estas afirmaciones con suma cautela, pues hay motivos para desconfiar de las mismas.

En la electrodinámica clásica –y presumiblemente también en la cuántica– solemos encontrarnos con dos clases de problemas: aquellos en los que conociendo los campos y su variación con el tiempo hemos de calcular el efecto por ellos producido sobre cargas y corrientes, y aquellos otros en los que dada la distribución de cargas y corrientes debemos determinar los campos electromagnéticos engendrados. Sin embargo, existe un tercer tipo de problemas, mucho más complicado, en el cual tendríamos que resolver un conjunto

de ecuaciones acopladas en derivadas parciales en las que se tomen en cuenta ambas componentes, externa e interna, de los campos electromagnéticos utilizando la fuerza de Lorentz.

Frisch reconoce que de optar por esta vía las inconsistencias que él denuncia quedarían muy debilitadas, aunque señala que se trata de un camino inviable, minado por multitud de enredos conceptuales como las autoaceleraciones o el valor infinito para el potencial eléctrico de una carga puntual. Pero no hay tal, pues la energía electrostática de una carga puntual en reposo puede obtenerse mediante una integral sobre todo el espacio salvo una diminuta esfera de radio $d > 0$ tan pequeño como se quiera [25]. Esto es, exceptuando una esfera de radio d arbitrariamente minúsculo, la integral que define la energía electrostática de una carga puntual no diverge. ¿Qué ocurre en $d = 0$? En tal caso la divergencia de los cálculos nos dice que la teoría electromagnética no tiene cabida para partículas cargadas de tamaño nulo. Sencillamente constatamos que las cargas puntuales no son entidades propias de la electrodinámica clásica.

La alternativa a este planteamiento pasa por las técnicas de renormalización, que obtienen la masa experimental medida del electrón m_{exp} a partir de dos cantidades: la masa equivalente a la energía de su propio campo (incluyendo, en el caso cuántico, toda clase de partículas virtuales), m_f , y la masa que quedaría si tales campos desapareciesen, m_d . Para lograr la conclusión deseada m_d debe ser negativa y ajustarse con mucho cuidado, por cuanto los cálculos indican que tanto m_f como m_d tienden a infinito cuando se toman en cuenta todos los órdenes de corrección.

Frisch juzga esto como un problema insalvable cuando, en principio, no lo es. Puede resultar engorros –y a menudo lo es– calcular $m_{exp} = m_f - m_d$, pero lo cierto es que la diferencia de dos series divergentes puede muy bien converger por sí misma [26]. Por fortuna, así ocurre con la suficiente asiduidad para que las técnicas de renormalización constituyan una herramienta útil y versátil en la física teórica, pese a su discutible trasfondo interpretativo.

Tras un análisis cuidadoso, también es posible contemplar la pre-aceleración y a la auto-aceleración como artefactos de cálculo causados por las complejidades inherentes a los problemas en los que consideramos las interacciones mutuas entre cargas y campos. Esta clase de aceleraciones no físicas desaparecen cuando reformulamos la ecuación de Abraham-Lorentz en forma integro-diferencial e imponemos las adecuadas condiciones de contorno [27, 28, 29]. Y no es el único ejemplo; tampoco sufren estos problemas la ecuación de Abraham modificada [15] y la ecuación de Yaghjian [30].

V. CONCLUSIONES

La electrodinámica clásica introdujo por primera vez una duplicidad irreducible en su base ontológica, formada por partículas y campos. Las partículas idealizaban las porciones discretas de materia como puntos sin volumen, perfectamente localizables en el espacio físico, mientras los campos constituían una nueva clase de entidad física

continua y extensa –presente en todo el espacio, en principio– cuya fuente era la propia materia que también se veía afectada por su influencia. Las propiedades de partículas y campos se mostraban tan dispares que casi deberíamos sorprendernos de la belleza y potencia de la unificación llevada a cabo por Maxwell con los posteriores retoques de Lorentz.

Sin embargo, el doble papel de la materia como sujeto activo (los crea) y como objeto pasivo (los sufre) de los campos no podía dejar de traer complicaciones en algún momento. Y de hecho el desarrollo de la teoría electromagnética constató la existencia de problemas sin solución cerrada, especialmente en los casos en los que se deseaba tener en cuenta simultáneamente ese doble papel mencionado más arriba infiriendo de él una descripción dinámica completa de campos, cargas y corrientes.

La sutileza de los caminos abiertos para rebasar tales obstáculos llegó a ser de tal calibre que se fue confundida con la existencia de paradojas, contradicciones e inconsistencia por autores como Frisch. Un análisis más profundo, no obstante, revela que la electrodinámica cuenta con problemas sin resolver, como todas las ciencias dignas de tal nombre, pero carece de verdaderas inconsistencias en un nivel fundamental. Las dificultades conceptuales que sin duda posee se trasladan en su modalidad específica al mundo cuántico, hasta tal punto de que la electrodinámica cuántica, más que una teoría fundamental de la que se deriva la versión clásica, podría tomarse como una extensión de la electrodinámica clásica a un dominio en el que sus conceptos y estrategias pierden validez [31].

Pese a todo, el debate mantenido por Frisch con el resto de la comunidad científica a cuenta de las supuestas inconsistencias de la electrodinámica clásica también ha servido para reavivar la vieja controversia sobre la fidelidad con que nuestras teorías científicas representan las propiedades y evolución del mundo natural. El significado de una teoría, las hipótesis semánticas que permiten interpretar su formalismo, no queda al margen de los debates de la comunidad profesional involucrada. Otorgar nuestra confianza a la veracidad, más o menos aproximada, de unas determinadas premisas siempre resulta una cuestión de grado. Y con frecuencia es discutible si una inferencia merece la misma confianza –siempre provisional– que sus premisas, las cuales, a su vez, pueden presentar un nivel de confirmación muy variable y dependiente del momento histórico.

De ahí que una imagen estrictamente lakatosiana de las teorías científicas, con un núcleo duro y un cinturón protector de hipótesis auxiliares, no parezca muy representativa de las investigaciones reales. Precisamente a través de esas fisuras entre las suposiciones fundamentales y las accesorias penetran equívocos como el de Frisch. Es en esas fronteras borrosas donde pueden anidar los postulados implícitos que tácitamente se aceptan (como $\mathbf{F}_{int} = 0$, la condición de frontera de Sommerfeld para la radiación o la variación lenta de los campos en el llamado límite adiabático) dando por descontada su validez o aplicándolos en un rango de fenómenos al que no corresponden.

Actualmente sabemos que la electrodinámica clásica ha de ser sustituida en ciertos ámbitos por su versión cuántica,

de la cual la teoría clásica se comporta, en cierto modo, como una aproximación excelente. Ciertamente es que diferentes aproximaciones a una misma teoría subyacente pueden resultar mutuamente incompatibles dependiendo de las suposiciones adoptadas en la simplificación. Pero más allá de la inconsistencia mutua entre aproximaciones parciales, lo que nunca puede darse es la aparición de contradicciones flagrantes dentro de un mismo armazón teórico, como Frisch pretendió haber establecido en el marco de la electrodinámica clásica.

En definitiva, la descalificación radical que Frisch lanzó contra la electrodinámica clásica no se puede sostener como una objeción insalvable contra cualquier forma de teoría electromagnética. Tiene mérito como recordatorio de los problemas formales que aún encierran construcciones teóricas generalmente consideradas libres de dificultades, pero no constituye una prueba irrefutable de la inconsistencia de uno de los legados más importantes de la física del siglo XIX cuyos beneficios aun hoy disfrutamos.

REFERENCIAS

- [1] Whittaker, E. T., *A History of the Theories of Aether and Electricity. From the Age of Descartes to the Close of the Nineteenth Century* (Longmans, Green, & Co., London, 1910).
- [2] Maxwell, J.C., *A Treatise on Electricity and Magnetism*, vol. I & II (Clarendon Press, Oxford, 1873).
- [3] Berkson, W., *Las teorías de los campos de fuerza* (Alianza Universidad, Madrid, 1995).
- [4] Lorentz, H. A., *La théorie électromagnétique de Maxwell et son application aux corps mouvants*, Arch. Néerl. Sci. **25**, 363–552 (1892).
- [5] Poincaré, H., *Sur la Dynamique de l'Électron*, Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo **21**, 129–175 (1906).
- [6] Landau, L. y Lifshitz, E., *Curso abreviado de física teórica* (Editorial MIR, 2ª Edición, Moscú, 1979).
- [7] Lorentz, H. A., *Theory of Electrons* (Teubner, Leipzig/Stechert, New York, 1909).
- [8] Feynman R.P., *The Feynman lectures on Physics*, vol. II (Addison & Wesley, Reading, 1964).
- [9] Rohrlich, F., *Classical Charged Particles* (World Scientific, Singapore, 2007).
- [10] Pearle, P., *Classical Electron Models*, in Teplitz, D. (ed.), *Electromagnetism. Paths to research*, Ch. 7 (Plenum Press, New York – London, 1982).
- [11] Janssen, M. and Mecklenburg, M., *From classical to relativistic mechanics: Electromagnetic models of the electron*, in Hendricks, V.F. et al. (eds.), *Interactions: Mathematics, Physics and Philosophy*, 65–134 (Springer, Dordrecht, 2007).
- [12] Weisskopf, V.F., *On the Self-Energy and the Electromagnetic Field of the Electron*, Phys. Rev. **56**, 72 (1939).
- [13] Dirac, P. A. M., *Classical theory of radiating electrons*, Proc. R. Soc. London, Ser. A **167**, 148–169 (1938).
- [14] Rohrlich, F., *Dynamics of a charged particle*, Phys. Rev. E **77**, 046609 (2008).
- [15] Rohrlich, F., *The dynamics of a charged sphere and the electron*, Am. J. Phys. **65**, 1051–1056 (1997).
- [16] Muller, F., *Inconsistency in Classical Electrodynamics?*, Philosophy of Science **74**, 253–277 (2007).
- [17] Ribarič, M., L. Šušteršič, L., *Conservation Laws and Open Questions of Classical Electrodynamics* (World Scientific, Singapore 1990).
- [18] Frisch, M., *Inconsistency in Classical Electrodynamics*, Philosophy of Science **71**, 525–549 (2004).
- [19] Frisch, M., *Inconsistency, Asymmetry, and Non-Locality: A Philosophical Investigation of Classical Electrodynamics* (Oxford university Press, Oxford – New York, 2005).
- [20] Frisch, M., *Philosophical Issues in Electromagnetism*, Philosophy Compass **4**, 255 – 279 (2009).
- [21] Belot, G., *Is Classical Electrodynamics an Inconsistent Theory?*, Canadian Journal of Philosophy **37**, 263–82 (2007).
- [22] Vickers, P., *Frisch, Muller, and Belot on an Inconsistency in Classical Electrodynamics*, The British Journal for the Philosophy of Science **59**, 767–792 (2008).
- [23] Smorenburg, P. W., Kamp, L. P. J., Luiten, O. J., *Classical formulations of the electromagnetic self-force of extended charged bodies*, The European Physical Journal H **39**, 283–302 (2014).
- [24] Gralla, S., Harte, A., Wald, R., *A Rigorous Derivation of Electromagnetic Self-force*, Physical review D: Particles and fields **80**, 52 (2009).
- [25] Rohrlich, F., *Classical Self-Force*, Physical Review D **60**, 84017–84022 (1999).
- [26] Griffiths, D., *Introduction to Electrodynamics* (Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1999).
- [27] Jackson, J.D., *Classical Electrodynamics* (Wiley & Sons, New York, 1975).
- [28] Cook, R. J., *Radiation Reaction Revisited*, American Journal of Physics **52**, 894–895 (1984).
- [29] Cook, R. J., *Radiation Reaction Revisited — One More Time*, American Journal of Physics **54**, 569–570 (1986).
- [30] Yaghjian, A. D., *Relativistic Dynamics of a Charged Sphere: Updating the Lorentz-Abraham Model* (Springer-Verlag, Berlin & New York, 1992).
- [31] Bacelar, M., *The relation between classical and quantum electrodynamics*, THEORIA **26**, 51–68 (2011).