

# Prólogo

## a la segunda edición

---

El comienzo de la Física Teórica y el de nuestra época histórica Moderna han ido unidos de la mano: en ambos casos, el desencadenante es la publicación de los “Principia Mechanica” por Newton en 1684, un acontecimiento que revolucionó nuestra cultura. Desde el punto de vista social e intelectual, ha sido Karl Popper el que mejor ha expresado ese impacto histórico en el libro “The Structure of Science” (publicado en español con el título “Conjeturas y Refutaciones”): “En una época como la nuestra...es difícil revivir la sensación de convicción que inspiraba la teoría de Newton, o la sensación de júbilo o liberación. Se había producido un acontecimiento único en la historia del conocimiento, acontecimiento que nunca volvería a repetirse: el descubrimiento primero y último de la verdad absoluta acerca del Universo....La humanidad había obtenido [o así lo creía] un conocimiento real, cierto, indudable y demostrable, una episteme divina, y no meramente una opinión humana”. Este acontecimiento irreplicable iba a poner en marcha, entre muchas otras cosas, la Ilustración y el Siglo de las Luces con todas las implicaciones que ello tendría para el futuro de la humanidad y de nuestra cultura occidental.

Desde un punto de vista más modesto, el científico, los “Principia Mechanica” dieron también el primer paso en la dirección de mostrar una “identidad”, que hoy día llamaríamos ilusoria, entre una estructura matemática (que representa nuestro conocimiento) y una realidad que se presenta depurada ante nosotros a través de la experimentación. Los físicos teóricos revivimos, especialmente en nuestra formación y, en primer lugar, al estudiar los principios de la Mecánica, esa primera experiencia que nos hace “creer” que de alguna forma tocamos la realidad con los modelos, o con las estructuras matemáticas.

## Los significados del campo electromagnético

---

Otro gran acontecimiento social de carácter científico, aun más mediático que el anterior si bien con menos carga histórica, se da al comienzo del siglo XX con la Teoría de la Relatividad de Albert Einstein. En el imaginario colectivo esta teoría aparece como una corrección a la Mecánica de Newton y, sobre todo, como una relativización de los conceptos convencionales de tiempo y espacio. Pero, en gran manera, la teoría de la Relatividad restringida (sin incluir los aspectos gravitatorios) representa la culminación de la descripción de la estructura formal del campo electromagnético (es decir, de la forma covariante de las ecuaciones de Maxwell). En palabras de Enrique Larrea en el capítulo 2º de este libro, con las ecuaciones de Maxwell y después de la formulación relativista de Einstein “se considera al campo electromagnético como una representación del grupo de Poincaré  $SO(1,3)$ ”.

Como en el caso de la Mecánica, volvemos a encontrarnos en el electromagnetismo con esa “identidad” entre una estructura formal matemática, la del grupo de Poincaré  $SO(1,3)$ , y los fenómenos físicos que se encuadran dentro de ese campo. La búsqueda de esas “identidades” es la fascinación que persigue a los físicos teóricos que continuamente tratan de encontrar esas nuevas estructuras formales, o modelos matemáticos, que puedan ofrecernos el sueño de que tocamos, o entendemos mejor, la realidad.

XXII

Enrique Larrea es, sin duda, un caso singular dentro de este grupo de físicos teóricos que sueñan con “interpretar el mundo y entender cómo se comporta”. Lo recuerdo como uno de los mejores estudiantes que he tenido en mis largos años de docencia y, en particular, lo recuerdo cursando brillantemente una asignatura que yo explicaba sobre Electricidad y Magnetismo en el 2º año de Ciencias Físicas en la Universidad Autónoma de Madrid por los años setenta. Enrique Larrea, al terminar la carrera, simultanea, con gran éxito, su trabajo profesional en una conocida compañía eléctrica española con una colaboración de investigación con la Universidad de Santiago y con la Complutense sobre temas de óptica no lineal. Presenta su tesis de doctorado en la Universidad de Santiago (de la que fue el primer doctor en Físicas), se especializa en la propagación de campos electromagnéticos en medios no homogéneos y también sobre difracción en la óptica Fourier no paraxial, trabajos que ha presentado en varios cursos de doctorado que ha dado en la Universidad Autónoma de Madrid. Todo este trabajo de investigación, así como su trabajo en la empresa, lo ha llevado en paralelo con el estudio de las distintas teorías del campo electromagnético desde los múltiples puntos de vista que recoge este libro, siempre dentro de esa perspectiva que persigue al físico teórico: cómo explicar de una manera distinta, y cada vez con más profundidad, lo que subyace detrás de una teoría (aquí la teoría básica electromagnética) para, de esta forma, aproximarse más adecuadamente a la realidad.

El resultado de ese impulso y de ese trabajo de décadas es el libro del que ahora puede beneficiarse el lector.

En mi opinión, el lector tiene en sus manos un libro muy completo y bastante extenso sobre la Teoría del Campo Electromagnético, que yo pondría al nivel de una asignatura avanzada de Electrodinámica Clásica (aunque también tiene sus digresiones muy interesantes dentro de la Física Cuántica), con un enfoque muy apropiado para que pueda ser desarrollado en uno o dos cursos dentro de una enseñanza de Maestría o de Doctorado. El libro me ha recordado, parcialmente, en su estructura a mi libro favorito entre todos los libros de Física: "The Classical Theory of Fields" de la colección de libros de Landau y Lifshitz (dentro del Curso sobre Física Teórica de esos autores), con el que el lector encontrará muchos puntos de contacto: la formulación covariante del campo electromagnético a través del desarrollo de la acción, la formulación del eikonal y las teorías escalares del campo, la discusión de la radiación y hasta un capítulo final sobre el campo electromagnético y el campo gravitatorio. Pero, además, este libro tiene otros capítulos de especial interés: en particular quiero referirme a los dedicados a las relaciones estructurales del campo electromagnético (capítulo 6), a las teorías de "gauge" (capítulo 11), a las de la causalidad (capítulo 12) y a las teorías de simetría en relación a los invariantes del campo (capítulo 10); es en estos capítulos "especiales" donde se puede adivinar ese impulso del autor por ir algo "más allá" de las simples ecuaciones formales, profundizando en las propiedades del campo electromagnético a través de los conceptos básicos de simetría. Seguramente, es en estos capítulos donde el lector puede encontrar en su más pleno desarrollo el planteamiento de Enrique Larrea, y donde puede disfrutar más claramente del punto de vista que él nos ofrece después de tantos años de estudiar y analizar desde tantas perspectivas diferentes "los significados del campo electromagnético y sus transformaciones históricas".

Madrid, 8 de mayo de 2012

Fernando Flores Sintas

Premio Nacional de Investigación en Física



# Preámbulo y agradecimientos

---

Éste es un libro que habla sobre las ecuaciones de Maxwell para el campo electromagnético y de las diversas teorías actuales que han tratado de justificarlas teóricamente. No es un libro de electromagnetismo aplicado, de los muchos y excelentes que ya existen. Tampoco es un libro de historia del electromagnetismo, de la que ya existe como referencia el de Whittaker y el más actualizado de Darrigol sobre las distintas teorías y escuelas históricas que han conformado el desarrollo de la electrodinámica clásica.

xxv

---

Este es un libro sobre las teorías y modelos matemáticos actualmente aceptados, que tratan de justificar la estructura de las ecuaciones de Maxwell y el campo electromagnético clásico. Casi todos los libros de electromagnetismo lo desarrollan dentro de una misma estructura formal matemática que adoptan como principio. Es raro que comenten con detalle enfoques distintos de la teoría del campo electromagnético realizados por otros autores.

El electromagnetismo es un buen ejemplo de cómo, a partir de resultados experimentales, se construye una teoría predictiva de forma inductiva. También sirve de ejemplo de los distintos esfuerzos que se han ido haciendo para tratar de entender y de justificar esta teoría a partir de un conjunto mínimo de principios generales y de por qué la naturaleza se comporta de la forma en que la observamos.

Este libro empezó cuando le tuve que explicar a mi hija los fundamentos del campo electromagnético, ya que los estudiantes de primeros cursos de Ingeniería y Licenciatura en Ciencias, se pierden entre la jerga matemática y les cuesta comprender los conceptos físicos que hay detrás de ella.

Las fórmulas matemáticas no son sólo una receta para hacer cálculos, sino que también nos hablan acerca de cómo interpretamos el mundo y de cómo esperamos que se comporte.

## Los significados del campo electromagnético

---

Éste también es el libro que me hubiera gustado leer hace años y que me hubiera ahorrado mucho tiempo invertido en analizar áridas monografías sobre electrodinámica para extraer solo unos cuantos principios fundamentales escondidos entre todo un artificio matemático.

Es un libro escrito pensando en mi hija y para todos aquellos que deseen conocer las razones últimas que justifican los campos electromagnéticos y de cómo trabaja la ciencia.

Este libro, es una revisión y ampliación de dos otros publicados anteriormente, uno que en su primera edición fue titulado de igual forma, y de otro posterior titulado como "teorías sobre el origen de luz". Se han corregido algunas erratas e incluido nuevas secciones y capítulos, para así tener una visión más completa de la evolución histórica de las distintas teorías que interpretan el campo electromagnético y la luz.

Sigue sin ser un libro completo, ya que no se adentra en la electrodinámica cuántica de la que solo se da un esbozo, y en la teoría cuántica de campos unificada que para algunos sería la justificación final. Según Leibniz, a medida que la ciencia avanza, se condensa y se hace cada vez más compleja.

En este libro se puede ver también el esfuerzo humano para tratar de comprender la naturaleza ya que, cada vez que cree tener una explicación de todo, ve que algo se le vuelve a escapar y tiene que recurrir nuevamente a otra teoría más amplia, y así continuamente, sin saber si hay una teoría última que lo explique todo. Pero tampoco esto sería de mucho interés ya que, como dijo Feynman, al final todo lo podríamos poner como una función de algo igualado a cero, pero luego tendríamos que volver a desandar el camino para explicar esa ecuación o contrastarla con la experiencia.

Es mucho más importante lo que aprendemos por el camino en este proceso de condensación de la ciencia y de esto es de lo que se habla en este libro.

Quizás, este libro puede ser también un ejemplo del orgullo del científico que, cada vez que desarrolla un nuevo formalismo matemático, trata de aplicarlo con mejor o peor fortuna a la comprensión de la naturaleza del campo electromagnético. Pocos de estos formalismos predicen nuevos fenómenos respecto a las viejas ecuaciones de Maxwell, por lo que desde el punto de vista de la ingeniería tal vez no tendrían mucho interés. Sin embargo, con un nuevo enfoque es frecuente que se descubran aspectos y relaciones que estaban ocultos, lo que permite una mayor comprensión sobre la estructura interna del campo electromagnético y de la materia.

Con cada capítulo, se presenta una formulación distinta del campo electromagnético con un lenguaje matemático diferente y, como en una metamorfosis, cada capítulo es una nueva transformación de este campo que, aunque toma una apariencia distinta,

siempre es el mismo en sus efectos, mostrando nuevos aspectos y relaciones que estaban ocultos.

A pesar de la apariencia disuasoria del aspecto matemático de algunos capítulos, en general son accesibles a un lector con un curso de electromagnetismo del primer ciclo de universidad. He tratado de que la notación sea comprensible tanto para los físicos como para los ingenieros, y las fórmulas se han reescrito en el sistema internacional de medidas.

El libro está escrito en forma de ensayo científico, con una amplia introducción en cada capítulo, destacando con comentarios extensos los significados de las fórmulas y sus implicaciones incluso filosóficas, eludiendo su numeración para que la lectura sea más lineal.

Se han evitado las referencias cruzadas, para no tener que saltar a otras páginas e interrumpir la lectura del texto, por lo que se repiten las formulas siempre que se ha considerado necesario. Alguien calificó la obra de Lagrange de poema matemático; con este mismo espíritu se ha redactado este ensayo, sin figuras y con un discurso continuo en el desarrollo de las ideas que forman la historia de las teorías sobre la luz y el campo electromagnético.

En esta segunda edición, se ha tratado con más profundidad los principios unificadores de la física, y la evolución histórica de sus conceptos e hipótesis. El campo electromagnético, se ha tomado como la columna vertebral que guía la historia de la física y de sus métodos matemáticos aplicados. Se ha considerado a la óptica, es decir el campo electromagnético en sus distintas manifestaciones, como la guía de la confirmación experimental de las principales teorías físicas. Este libro se puede considerar también como una ensayo sobre la historia de la física y de sus métodos matemáticos, guiados por el campo electromagnético y la óptica.

Los principios o hipótesis en que se basan las distintas teorías, y sus conclusiones más relevantes se han marcado en cursiva. Para los lectores sin formación matemática, los comentarios deberían ser suficientes para captar el trasfondo de las ideas que se debaten con cada teoría, y que son el objetivo principal del libro.

Prácticamente toda mi vida profesional ha transcurrido entre ingenieros nucleares, de telecomunicaciones, eléctricos y de medio ambiente..., y he visto que, aunque siempre los campos electromagnéticos juegan un papel importante en todas estas disciplinas, no se profundiza generalmente en su conocimiento más allá de las aplicaciones estrictamente técnicas o de medida. También para ellos va dirigido este libro, y espero que sea de utilidad para aquellos ingenieros con curiosidad de espíritu.

En la actualidad, me parece que también muchos de los físicos industriales adolecen de falta de espíritu crítico y aplican la ciencia como un formulario. Igualmente para

## Los significados del campo electromagnético

---

ellos va dirigido este libro, con la esperanza de que recuperen ese espíritu y completen el libro donde yo lo dejo inacabado.

Para los investigadores universitarios, tal vez éste sea un libro elemental, pero también es una invitación a que lo mejoren y recuerden que la divulgación y difusión del conocimiento científico en un lenguaje accesible es también un trabajo importante. Nunca se sabe de dónde proceden las nuevas ideas, y un ejemplo en esta historia fue Faraday.

Es un libro inacabado, pero es casi seguro que nunca tendrá un capítulo final, pues conocer la esencia del electromagnetismo es tanto como conocer el secreto último de la naturaleza. Según el Génesis, “en un principio se creó la Luz”, que es lo mismo que decir el campo electromagnético. Desde entonces, los hombres han pasado su historia científica, haciendo modelos matemáticos y filosóficos para tratar de comprender su esencia. La “Luz” fue la “gran obra”, y su interpretación científica es el trabajo sin fin de los hombres.

Quiero agradecer en primer lugar a Ángel Guerra Llamas, quien prologa este libro, y a Antonio Regueiro, el haberme animado a escribirlo. Ángel es un magnífico ejemplo de ingeniero industrial, que se ha preocupado de desarrollar la I+D+i, desde el punto de vista tecnológico, a la vez que sus fundamentos teóricos.

xxviii

Quiero también agradecer a Ricardo Castella, que fue director de calidad corporativa en Unión Fenosa y a Gabriel Barceló, sus sugerencias, comentarios y ayuda en la revisión y corrección del texto; al profesor Manuel Fernández Armada, cuyas observaciones y sugerencias han contribuido a mejorar la estructura y contenido de esta segunda edición, con discusiones entre paellas y arroz abunda por las playas de Alicante; y al catedrático Antonio Fernández-Rañada, cuya esclarecedora reseña en la revista de la RSFE a la primera edición, la he tenido en cuenta para completar aquellos aspectos que quedaron esquemáticos en el primer libro.

Por último quiero agradecer a Blanca Losada Martín y a José Antonio Couso, el regalo en tiempo que me han dado, para completar esta segunda edición del libro.

Siempre estaré en deuda con los profesores de Investigación y catedráticos Federico García Moliner, Fernando Flores Sintas y Carlos Gómez-Reino Carnota, de quienes tengo un grato recuerdo, pues fueron ellos quienes, con su rigor, me enseñaron a mantener en todo momento la curiosidad científica y a analizar las cosas desde distintos puntos de vista. Soy el único responsable de las limitaciones de este libro, en el que he tratado de muchas de las cosas que aprendí con ellos.

Quiero también agradecer al profesor de Investigación del CSIC, Víctor Ramón Velasco Rodríguez, su continuada amistad, que se ha mantenido durante más de cuarenta años desde que estudiábamos y discutíamos juntos problemas de electromagnetismo



en la Facultad de Físicas de la Universidad Autónoma de Madrid. Mucho tiempo ha pasado, y mi hija Natalia, de la que es su padrino, ha hecho resurgir esas discusiones, que han dado lugar a este libro.

He tratado de recopilar las principales teorías y modelos que tratan de justificar el origen de la luz y el campo electromagnético, respetando en lo posible la notación original de los distintos autores. En ocasiones he tenido que reformular esas teorías, para dotar al conjunto del libro de uniformidad, con el fin de que se aprecie mejor en su conjunto la belleza y estética de las teorías que se describen, que se pueden considerar como obras de arte del pensamiento de nuestra frágil cultura occidental, que es la de la Luz..

Con esta segunda edición, se cierra el camino que inicie hace cuatro años, que ha sido más largo de lo previsto. En esta última etapa de mi vida he tratado de recopilar mis reflexiones de cuarenta años, y sin un punto final, la doy para mí por definitivamente cerrada.

Enrique Larrea Bellod

Majadahonda, a 15 de Febrero de 2012



# Introducción

## a la primera edición



Vivimos en un mundo donde los campos y fuerzas electromagnéticas, junto con la gravedad, dominan casi todos los procesos de nuestra vida diaria. La bioquímica de los organismos vivos, la química inorgánica de nuestra vida doméstica (suciedad, polvo, cocina, etc.), todos nuestros sistemas de comunicación se rigen por las leyes del electromagnetismo.

XXXI

---

Descubrir cuáles son las leyes fundamentales que rigen estos procesos fue una de las mayores creaciones intelectuales, que se inició con el Siglo de la Luz. Partiendo de la observación y la experiencia y, a través de un proceso inductivo, se condensó el electromagnetismo en un conjunto de ecuaciones, que generalizadas, sirvieron a su vez, por un proceso deductivo, para predecir nuevos fenómenos comprobables por la experimentación.

En cada ciclo de este proceso iterativo, inductivo-deductivo, las ecuaciones o leyes básicas del electromagnetismo fueron objeto de nuevas reinterpretaciones que, al final, han dado lugar a un cúmulo de teorías y modelos que muchas veces han oscurecido su significado a pesar del éxito de sus aplicaciones prácticas en la Ingeniería.

Las ecuaciones de Maxwell para el electromagnetismo clásico están reconocidas universalmente por ser comprobables experimentalmente. Sin embargo, su simplicidad matemática es engañosa, ya que no existe una solución general, y siempre han de ser resueltas para distintos modelos de aproximación.

## Los significados del campo electromagnético

---

Esto da origen a las distintas disciplinas que se puede distinguir en las escuelas de ingeniería y facultades de ciencias físicas (baja frecuencia, microondas, circuitos eléctricos, microelectrónica, óptica, etc.).

Su aplicación práctica a la ingeniería ha sido todo un éxito, como podemos comprobar en todos los aparatos que nos rodean y facilitan nuestra vida actualmente.

Hay muchos que con esto quedan satisfechos. Sin embargo, pocos se preguntan cuál es la realidad que subyace en estas ecuaciones, cuestión que todavía dos siglos después es objeto de debate.

La pregunta de, por qué motivos las ecuaciones de Maxwell adoptan la forma expresada y no otras distintas, nos lleva a reflexionar sobre lo diferente que sería nuestro mundo si se expresasen de otra manera.

Habitualmente, se olvida que las ecuaciones del electromagnetismo tienen un origen estrictamente experimental (leyes de Coulomb, Ampère, Faraday) y que su formulación matemática viene condicionada por nuestra percepción del espacio y del tiempo. El concepto del espacio y del tiempo newtoniano nos permite expresarlas mediante el cálculo diferencial en dos formulaciones distintas aunque equivalentes: en ecuaciones en derivadas parciales o en ecuaciones integrales.

xxxii

La teoría de la relatividad, que integró el espacio y el tiempo en una única relación continua, permitió demostrar que el campo eléctrico y el magnético están relacionados y son manifestaciones de un mismo fenómeno dual.

Sabemos que, hasta ahora, no se ha observado que existan fuentes magnéticas, lo que en la vida diaria se traduce en que es muy difícil apantallar el campo magnético, debido a que sus líneas de campo siempre se cierran.

Además, en el supuesto de que existiesen monopolos magnéticos, según algunas modernas teorías, los fotones de luz tendrían masa y la ley de Coulomb de atracción de las cargas eléctricas sería de corto alcance con un decaimiento exponencial, lo que provocaría que la materia se colapsara y el mundo tal como lo conocemos no existiría.

Podemos decir que, casi los únicos campos que dominan nuestro mundo macroscópico, son los campos electromagnéticos. Las propiedades físicas de los materiales de nuestro alrededor, las reacciones químicas, y hasta nuestros procesos psíquicos, están dominados por las interacciones electromagnéticas. Cualquier variación de sus parámetros, o de la forma que constituyen las ecuaciones de Maxwell, alteraría radicalmente el aspecto de nuestro mundo e incluso modificaría nuestra posibilidad de existencia.

Por ello, un espíritu crítico no se debería contentar tan sólo con aceptar las ecuaciones que hemos determinado por la experiencia. Es necesario tratar de entender los

porqués del electromagnetismo desde una fundamentación teórica de primeros principios, y esto nos lleva a hacer modelos sobre la naturaleza, que en algunos casos originan interpretaciones más o menos complejas acerca de qué es la realidad.

Leer en “el libro de la naturaleza” de Galileo es complicado, pero mucho más difícil es leer “la mente de Dios” del idealismo platónico (o del Logos) y tratar de comprender por qué las cosas son como son y no son de otra forma, o si era posible otra alternativa para crear las cosas de forma diferente, según el sueño de Einstein.

Como herederos de la cultura griega, confiamos en el idealismo platónico según el cual existe una realidad exterior lógica y coherente y que, por medio de las matemáticas, podremos lograr una intuición real de su esencia. De acuerdo con nuestra cultura judeo-cristiana, creemos que existen desde la creación (o del BigBang) unas leyes universales y una justificación de éstas.

Pero debemos ser prudentes. Veremos que también hemos creado una maraña de artificios matemáticos que, a veces, nos dificulta discernir cuál es el concepto último de la realidad. Además, nuestras interpretaciones evolucionan según las percepciones o conocimientos del momento.

Por esta razón, el libro se denomina “Teorías sobre el origen de la luz y el campo electromagnético”. Cada nuevo desarrollo matemático se ha tratado de aplicar al electromagnetismo, mostrándose siempre bajos nuevos aspectos o desvelando otros que permanecían ocultos con diferentes formulaciones. Estas mutaciones conceptuales muestran que la realidad, con independencia de nuestras percepciones físicas o psíquicas, es un tanto evasiva y se nos escapa cuando creemos que ya la hemos atrapado formalmente.

Actualmente, se considera que cualquier formulación de los campos electromagnéticos debe partir del postulado de la invarianza covariante de las ecuaciones de Maxwell ante las transformaciones espacio temporales de Lorentz, lo que es equivalente a decir que la velocidad de la luz es constante respecto de cualquier sistema de referencia inercial, como postula la teoría de la relatividad.

Si bien con este modelo se justifica la electrodinámica de los cuerpos en movimiento y se unifican los campos eléctrico y magnético, no se muestra cual es su origen, aunque explica muchas más cosas que las ecuaciones de Maxwell.

Prescindiendo de las controversias filosóficas que siempre han suscitado los principios variacionales, con sólo la variación de la función de la acción del campo electromagnético se deduce el conjunto de las ecuaciones de Maxwell.

Además, esta formulación permite determinar, por consistencia matemática, qué ecuaciones son estructurales, cuáles son derivadas de las otras y cómo pueden estar enlazadas con teorías más generales ya que, en el trasfondo, el campo

## Los significados del campo electromagnético

---

electromagnético no deja de ser un campo de intercambio de energía regulado por la mecánica cuántica. Los principios variacionales, aunque suponen economía matemática en la deducción de las ecuaciones y permiten profundizar en sus aspectos teóricos, no justifican desde primeros principios qué fórmula de la acción del campo electromagnético debe ser tomada como punto de partida para la variación.

La teoría de invarianza de la fase de la función cuántica de ondas permite deducir la forma de la interacción de las cargas con el campo electromagnético y, por tanto, cómo debe ser la forma de la acción del campo electromagnético, que es lo que determina la estructura de las ecuaciones de Maxwell y su interacción con la materia.

Nuestra propia estructura del espacio, como un espacio de tres dimensiones, condiciona la forma de las ecuaciones de Maxwell y la estructura de las fuerzas de interacción permisibles. Todo esto también nos permitirá entender de forma natural los sistemas de unidades, que tanta confusión han introducido. Un tema que ha sido históricamente objeto de intensos debates es conocer qué magnitudes del campo electromagnético son primarias, con una realidad física, y cuáles son derivadas por consistencia matemática. Desgraciadamente, estos debates continúan muchas veces por una incompleta comprensión de los fundamentos del electromagnetismo.

Las teorías de la causalidad tratan de entender cuales son los principios y fuentes originarias del campo electromagnético, ya que, las interpretaciones basadas solo en sus manifestaciones experimentales, a veces pueden hacernos ver correlaciones e interpretaciones engañosas.

Las teorías de invariantes tratan de determinar qué es lo que permanece constante tras el cambio de la aparente sucesión de los fenómenos físicos. Los principios generales de conservación son una consecuencia de la invarianza y simetrías ante transformaciones que dejan inalterado un sistema físico. Las simetrías internas que corresponden a operaciones matemáticas a veces abstractas, aunque menos intuitivas, son la justificación teórica y la unificación de muchas leyes experimentales en apariencia independientes. Simetrías más complejas, entre las que se incluye el principio de causalidad, conducen a leyes generales como la ley de la relatividad que obedecen todos los sistemas físicos, incluido el campo electromagnético.

Las simetrías gauge de fase llevan a la conservación local de la carga, y determinan la forma cómo interacciona el campo electromagnético con la materia. Que este tipo de simetría se mantenga tanto en la teoría cuántica relativista como en la no relativista y en la mecánica clásica, subyace en la formulación variacional y hamiltoniana de todas ellas, y explica por qué en determinadas condiciones son válidos los modelos macroscópicos mecanicistas de interacción y propagación del campo electromagnético y de la luz.

La interrelación relativista entre masa, momento y energía es lo que permite en determinadas circunstancias aproximar el campo electromagnético con modelos mecanicistas más intuitivos y de fácil resolución y aplicación práctica, olvidándose muchas veces de que su esencia es mucho más compleja y que yace en el corazón de la teoría cuántica de la materia y de la relatividad.

La teoría cuántica de la luz trata de explicar los fenómenos de radiación e interacción del campo electromagnético con la materia. Sin embargo la cuantización del campo electromagnético en fotones de luz, conduce a que las ecuaciones de Maxwell solo son un promedio estadístico cuando la densidad de energía del campo es suficientemente grande, y establece incluso un principio de incertidumbre en la medida del campo electromagnético. A pesar del éxito para explicar el efecto fotoeléctrico y el espectro de radiación de los cuerpos calientes, la teoría cuántica de la radiación disuelve la continuidad del campo electromagnético en una atomización de fotones en que son únicamente agentes de intercambio de energía y momento.

El sueño de la geometrización de la naturaleza culmina con la teoría general de la relatividad, donde el concepto de fuerza desaparece y es sustituido por una deformación del espacio-tiempo en el que los cuerpos siguen como trayectorias sus líneas geodésicas. El querer eliminar de forma similar la fuerza de interacción del campo electromagnético con la materia ha llevado a diversas teorías complejas sobre el espacio, el tiempo y la materia. Además, la insuficiencia de las ecuaciones de Maxwell para justificar la energía de autointeracción y la masa electromagnética de las partículas, ha conducido a diferentes formulaciones para modificarlas. Pero incluso con la actual electrodinámica cuántica, hay aspectos sobre la naturaleza del campo electromagnético cuyo origen todavía es desconocido.

Según vamos avanzando, las formulaciones son más simples en sus enunciados generales, con una mayor profundidad teórica de justificación y predicción, pero también son mucho más complejas matemáticamente. La economía y simplicidad de la formulación está directamente relacionada con la complejidad de los conceptos matemáticos involucrados.

Evidentemente, no se obtiene ninguna ventaja si lo que se pretende es la aplicación práctica inmediata a la ingeniería. Sin embargo, lo que aquí buscamos es tratar de entender el por qué, y es posible que por el camino encontremos también algo nuevo.

En este libro, trataremos de los aspectos clásicos del campo electromagnético (antes de las teorías de la electrodinámica cuántica) y de las distintas teorías matemáticas que procuran justificarlas e interpretarlas. Es una descripción justificativa de los distintos modelos teóricos que formulan las ecuaciones de Maxwell, de por qué son como son y no pueden ser de otra forma, de cuál es su consistencia y coherencia lógica, y de los primeros principios en que se fundamentan.

## Los significados del campo electromagnético

---

Se puede decir que la mayor parte la historia de la física moderna se ha ocupado principalmente en resolver el problema de cómo interacciona el campo electromagnético con la materia y de la propagación de la luz.

Veremos que son muchas las teorías y formulaciones desarrolladas, todas ellas con un mayor o menor valor ingenieril para su aplicación en artilugios técnicos.

Pero en el fondo, lo que nos preocupa en este libro es el aspecto básico de la necesidad lógica de la existencia de la "Luz" (o lo que es lo mismo, el campo electromagnético) y como veremos éste es un concepto muy evanescente.

Se dice que el objetivo del científico, y aún más del ingeniero, es describir cómo se comportan las cosas de este mundo, y no tratar de explicar el porqué. No todos están de acuerdo con ello, y no faltan quienes intentan incluso hacer una metafísica (o metamatemática) de los campos electromagnéticos.

Tal vez vivamos en el mejor de los mundos posibles creados, pero también algunos quieren convencerse de ello, aunque haya que comer de la fruta prohibida del conocimiento especulativo.

Según Leibniz, al ampliarse la ciencia ella misma se condensa. En un principio, todo fue "Luz", es decir, campo electromagnético, y todavía estamos tratando de entender por qué fue así.



# Introducción

## a la segunda edición

---

La luz, o lo que lo mismo, el campo electromagnético, contiene la historia de la física. Durante mucho tiempo, la mecánica, la óptica, y la termodinámica eran campos independientes. Siempre fue un deseo de los científicos, unificarlos en una sola teoría. Con los éxitos de la mecánica de Newton, algunos investigadores, trataron de reducir los otros dos campos a la mecánica. Sin embargo, algunos fenómenos, como la naturaleza ondulatoria de la luz, las interferencias, y la difracción, indicaban que los fenómenos físicos eran mucho más complejos, y que las teorías mecanicistas eran un punto de vista reduccionista parcial y simplificado.

La luz, que es el campo electromagnético para longitudes de onda muy pequeñas, tiene un comportamiento análogo a la mecánica como en la óptica geométrica. Aprovechando esta similitud, la propia óptica, ha desarrollado técnicas matemáticas, que han permitido a su vez, el avance de la mecánica, como es la teoría de Hamilton.

La termodinámica, que en un principio tuvo un desarrollo independiente, era fundamentalmente una teoría fenomenológica, aunque coherente y consistente. Para tratar de reducirla a una teoría mecanicista, al principio, se asoció su origen a un fluido calórico. Sin embargo, esto no resolvía la explicación de las dos leyes fundamentales de la termodinámica. Fue la mecánica estadística fundada por Helmholtz, la que logró con éxito reducir la termodinámica a la mecánica, y justificar las leyes de la termodinámica de la conservación de la energía y del crecimiento de la entropía.

Sin embargo, las teorías de la física clásica, no eran capaces de explicar la forma del espectro de radiación de la luz de un cuerpo caliente (cuerpo negro) para altas frecuencias, medidas experimentalmente. Para su explicación, hubo que esperar al

## Los significados del campo electromagnético

---

desarrollo de la mecánica cuántica. La teoría cuántica de la radiación, justificó como interactúa el campo electromagnético con los átomos de la materia por medio de los fotones de luz.

Antes fue Maxwell, con su teoría del campo electromagnético, fue quién primero demostró que la luz era un fenómeno puramente electromagnético. Su teoría, también fue también una forma de separar el problema de la propagación del campo electromagnético, del de su interacción con las cargas eléctricas de la materia. La propagación del campo electromagnético y de la luz, es una teoría de campos continuos y ondulatorios. La teoría de Maxwell, sin embargo, no resolvía, como interactúa el campo electromagnético con la materia.

Fue Lorentz, con su teoría del electrón, quién dio un modelo clásico dinámico de cómo actúa el campo electromagnético con las cargas en los átomos. Sin embargo, su concepto de fuerza electrodinámica es newtoniana, y aunque es capaz de justificar la radiación producida por cargas aceleradas, y la propagación del campo electromagnético y de la luz en medios materiales, no puede explicar la radiación producida por un cuerpo caliente.

La teoría cuántica de la radiación electromagnética, introdujo un cambio radical en la forma de interpretar la naturaleza, y redujo la radiación a una teoría corpuscular de fotones, en que el campo electromagnético es un promedio de variables observables, cuando la densidad de fotones y de energía alcanza valores suficientemente grandes.

Otro aspecto que preserva la teoría de campos de Maxwell, es la relación de causa efecto, por la propagación finita de los campos. Los campos obedecen a la teoría de la relatividad restringida en sistemas inerciales, y a las conocidas transformaciones de Lorentz entre ellos, que se han mostrado también de validez universal para toda la física.

La teoría general de la relatividad, en su principio fuerte, dice que el movimiento en sistemas no inerciales bajo fuerzas inerciales, es equivalente al movimiento geodésico en un espacio tiempo de geometría riemanniana en ausencia de fuerzas. Esto establece una distinción entre las formulaciones covariante y contravariante en las ecuaciones de Maxwell, que tiene su comprobación en los efectos sobre la permitividad y la susceptibilidad en materiales sometidos a movimientos no inerciales, como es el efecto Wilson-Wilson en las rotaciones.

Sin embargo, el concepto de fuerza electromagnética en electrodinámica se mantiene todavía, aunque se haya generalizado en una formulación covariante. Aunque se han propuesto diversas teorías para eliminar el concepto de fuerza electromagnética, de forma similar a las fuerzas no inerciales en relatividad general, no ha sido hasta la electrodinámica cuántica cuando la fuerza electrodinámica, se ha sustituido por un intercambio de momento transportado por fotones.

Actualmente la teoría estándar, unifica la fuerza electromagnética, con la fuerza débil y la fuerte. Sin embargo, la gravitación de acuerdo con la teoría general de la relatividad, se mantiene como una teoría independiente. La gravedad cuántica, ha logrado aspectos parciales de unificación, aunque actualmente, todavía no existe una teoría completa unificada.

Se han escogido seis experimentos ópticos sobre la luz, que ha sido fundamentales para la confirmación de las principales teoría físicas expuestas en el libro.

El experimento de Michelson y Morley, que muestra que la velocidad de la luz es misma en todos los sistemas inerciales con movimiento relativo uniforme, y que fue el fundamento de la teoría de la relatividad restringida y de la electrodinámica clásica.

El efecto Fizeau, sobre la composición de velocidades de un rayo de luz que se propaga en un medio material que se desplaza con movimiento, como confirmación de la teoría de la relatividad restringida aplicada electrodinámica de los medios materiales en movimiento.

El efecto Faraday, sobre la rotación de la polarización de un rayo de luz que se propaga en un medio material en un campo magnético, como confirmación de la teoría electrodinámica de Lorentz de la interacción del campo electromagnético con la materia.

El efecto Wilson-Wilson, sobre el efecto en las propiedades electromagnéticas de un material en rotación uniforme en un campo magnético, como confirmación de la aplicación de la teoría de la relatividad general a la formulación covariante de la electrodinámica en sistemas no inerciales.

El efecto fotoeléctrico y la radiación del cuerpo negro y, como confirmación de la teoría cuántica de la radiación.

En la historia del campo electromagnético o de la luz, se contiene el desarrollo de los principales problemas de la física, de sus teorías, hipótesis, leyes, y métodos matemáticos que se han aplicado para comprender como funciona la naturaleza. Este libro, es un recorrido por todos ellos, buscando cuales son los principios unificadores que subyacen, tratando de entender el universo como un todo integrado con un sentido lógico.

Pero, como muy bien lo expresó Julio Palacios, todo modelo matemático para representar la realidad no es más que una metáfora, y el desarrollo de la física es la historia de sus intuiciones.