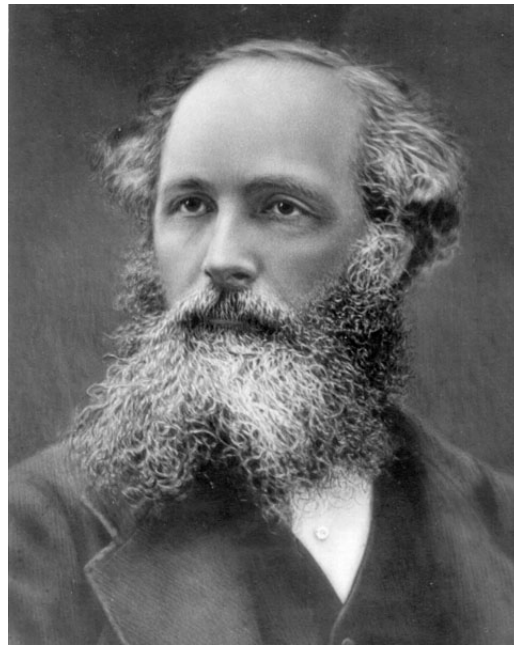


# JAMES CLERK MAXWELL



*Francisco Cánovas Picón*  
Universidad de Murcia  
Historia de la Física



# ÍNDICE GENERAL

<b>Índice general</b>	<b>2</b>
<b>1. Biografía</b>	<b>3</b>
<b>2. Electrodinámica</b>	<b>11</b>
2.1. Algunos problemas por resolver . . . . .	12
2.2. Sobre las líneas de fuerza de Faraday . . . . .	13
2.3. Sobre las líneas físicas de fuerza . . . . .	16
2.4. Modelo mecánico de Maxwell del campo electromagnético . . . . .	19
2.5. Magnitudes mecánicas y electromagnéticas . . . . .	21
2.6. Las leyes del campo electromagnético . . . . .	23
2.7. La teoría electromagnética de la luz . . . . .	26
2.8. La velocidad de la luz, una constante electromagnética . . . . .	28
2.9. Las limitaciones del artículo sobre las líneas físicas de fuerza . . . . .	30
2.10. Una teoría dinámica del campo electromagnético . . . . .	32
2.11. El desarrollo de la teoría sin el mecanismo . . . . .	34
2.12. La actitud de maxwell hacia la interpretación de su teoría . . . . .	37
<b>3. Termodinámica</b>	<b>40</b>
3.1. El problema inicial . . . . .	40
3.2. La solución de Maxwell . . . . .	41
<b>Bibliografía</b>	<b>43</b>

## BIOGRAFÍA

James Clerk Maxwell nació en Edimburgo el 13 de junio de 1831, de una familia que contaba entre sus antepasados muchas figuras destacadas. La fortuna de la familia había sido edificada por John Clerk, en París, en los años 1634 a 1646, volviendo luego a Escocia donde adquirió el dominio de los barones de Penicuik. Su hijo se casó con la nieta del poeta Sir William Drummond of Hawthornden, y algunos de sus descendientes llegaron a ser eminentes abogados escoceses, que enviaron a varios de sus hijos a estudiar a Leyden y otras ciudades extranjeras. El tío bisabuelo de Maxwell, John Clerk, era amigo de James Hutton, fundador de la geología moderna, y afirmaba haber encontrado la táctica naval mediante la cual Rodney ganó la batalla de la Dominique. El bisabuelo de Maxwell, Sir George Clerk, se había casado con una prima hermana, Agnes Maxwell, descendiente de Drummond, y heredera de Middlebie, que había adoptado el apellido de Clerk Maxwell. Resultó así que la familia entró en posesión de las heredades de Penicuik y Middlebie.

En su juventud tenía Maxwell cabello y barba negros, ojos casi negros y cutis pálido, y sus rasgos eran hermosos y expresivos. Rara vez reía, pero en sus ojos había un guiño expresivo cuando estaba de humor irónico. Tenía la tendencia a expresarse por hipérboles, contra la cual luchaba y que confundía a los espíritus simples. Cuando hablaba con ironía, su voz se tornaba ronca, dificultando la comprensión de lo que decía. Escribe Lewis Campbell, su biógrafo, que probablemente la tendencia de Maxwell a hablar en hipérboles, se incrementó por las reprimendas de su preceptor, y posteriormente en la escuela, pues era en parte un mecanismo psicológico de defensa.

Pertenecía a la clase de los "lairds", pequeños terratenientes escoceses, a la cual pertenecía desde hacía tres siglos su familia, de la cual habían salido varias personalidades destacadas en la historia de Escocia. Su padre contaba con una renta reducida, pero segura, y en su juventud se había dedicado esporádicamente a la profesión de abogado, en Edimburgo, concentrando, con el tiempo, su atención en la administración de su pequeña heredad, cerca de Middlebie, en Dumfriesshire. John Clerk Maxwell poseía alguna de las mejores cualidades de su clase; la seguridad de su situación se traducía en independencia de opinión y de acción y ocupaba su libertad mental en imaginar planes para el progreso de su propiedad y en informarse sobre el progreso de la ciencia y de la tecnología. Su esposa falleció cuando James tenía ocho años de edad, teniendo entonces que suplir a ésta en la educación de su hijo. La corriente de mutua comprensión que se tendió entre John Clerk Maxwell y su hijo James contribuyó a desarrollar en éste una capacidad de comprensión personal y espiritual. James pudo evitar de caer en la ideología de la clase terrateniente y familiarizarse con el espíritu de la cultura industrialista, gracias a su interés en la tecnología. De no mediar esta circunstancia no se habría podido transformar en un agente de la adaptación de las ciencias físicas inglesas a las necesidades de un nuevo orden social.

El intelecto de Maxwell poseía dos cualidades, ambas de singular importancia: la claridad y la aparente oscuridad. Tanto en su época como hasta ahora lo más estimado en él fue la parte clara de su mente, pues contenía la expresión del espíritu de su época. En cuanto a la parte oscura, de acuerdo con lo que vemos ahora, esbozó el espíritu de la época siguiente, y el conocimiento más profundo del siglo XX ha aclarado el significado de esa parte oscura.

La obra mayor que realizó Maxwell fue que mediante la reputación y autoridad que conquistó por su dominio de los recursos del pensamiento científico contemporáneo, pudo señalar la dirección a seguir para las futuras investigaciones. Igualó a los físicos del siglo XIX con sus propias armas, y luego señaló el camino a los del siglo XX, tanto en la física teórica como en la experimental. Su teoría de la electricidad y del magnetismo condujo a la teoría de la relatividad; su teoría dinámica de los gases contribuyó al establecimiento de la teoría de los cuantos, y sus planes de trabajos y métodos para el Laboratorio Cavendish, esbozados en su conferencia inaugural, condujeron a la física atómica experimental.

Cuando James Clerk Maxwell se hallaba en el periodo más intenso de su preparación para optar a la lista de honores de Cambridge se trasladó a casa de un amigo en Birmingham para tomar un breve descanso. Su padre le escribió que no dejara de “ver, si puedes, armeros, fabricación y ensayo de pólvora y de espadas, fábricas de papel maché y de laca, enchapado en plata por cementación y laminado, y por galvanoplastia, las fábricas de Elkington, el trabajo en bronce por vaciado y por estampado, etc.”. Esta carta no parece confirmar la reputación de indolencia que acompañaba a John Clerk Maxwell, y tiene notables semejanzas con la carta que Newton escribió a un joven pariente que visitaba Italia, y en la cual le aconseja que observe todos los procesos tecnológicos y fenómenos geológicos, sin mencionar las cosas que más han hecho famoso al país.

Antes de que James tuviera tres años, queda ya asentada en alguna carta de familia su espíritu curioso. En su infancia preguntaba a cada momento “¿Para qué sirve esto?” y si se le contestaba en forma vaga, insistía: “Pero, exactamente, ¿para qué sirve?”. Se ha anotado que el recuerdo más antiguo de Maxwell es el estar tirado en el césped frente a la casa paterna, mirando al sol y cavilando.

Su prima, Mrs. Blackburn, era una dibujante de talento, y ha dejado algunos deliciosos dibujos que representan a Maxwell en su niñez. A partir de los seis años frecuentemente está representado en actitud de profunda observación, o haciendo algo. Tenía muy buena memoria, y a los ocho años sabía de memoria hasta el salmo 119 de la Biblia. Desde su niñez estudió detalladamente la Biblia y las obras de Milton.

Cuando James tenía ocho años, su madre falleció, a los cuarenta y ocho años, aparentemente, de cáncer. Su padre realizó con gran comprensión, entonces, la tarea de guiar su vida. Es interesante hacer notar que los dos grandes físicos escoceses del siglo XIX se vieron privados de su madre desde su infancia, estando su educación a cargo de sus padres. Los pedagogos podrían realizar un estudio muy ilustrativo de la eficacia en la enseñanza en la mente comprensiva masculina, en oposición con los sentimientos maternos. Es posible que el desarrollo, y especialmente la precoz manifestación de los genios de Thomson y de Maxwell, hayan respondido, en gran parte, a las explicaciones completas de los fenómenos que les dieron sus ilustrados padres constituyendo así una base intelectual que no podrían haber recibido de madres afectuosas y hábiles, pero sin preparación científica.

James era muy feliz, en Glenlair, en la compañía de su inteligente padre, deleitándose con las variadas actividades de la vida campesina, jugando en el arroyo adyacente a la casa, y correteando por el campo. Solía ponerse ranas en la boca, para verlas salir saltando. Entre sus juguetes tenía un fenaquistiscopio, invento de Faraday, que constituye una forma primitiva del cinematógrafo. Años más tarde, aplicó el efecto visual de la rotación en su invento del trompo coloreado, y agregó lentes al fenaquistiscopio, adelantando un paso más hacia su forma moderna, el cinematógrafo. Lo utilizó para hacer ver escenas del choque de anillos torbellinos, la cual fue probablemente la primera aplicación del cinematógrafo a la ilustración de fenómenos científicos.

Al enfermar su madre, y durante unos dos años después de su muerte, Maxwell fue educado por un preceptor que manifestó que su pupilo era de aprendizaje lento. A poco de andar, la tía de Maxwell descubrió que el preceptor había tratado de meterle a la fuerza los conocimientos, recurriendo a veces al expediente de golpearle la cabeza con una regla, y de doblarle las orejas hasta hacérselas sangrar. Su padre no parece haberse percatado de estos métodos o haberlos aceptado como corrientes. Su biógrafo estaba convencido de que esta tiranía que sufrió en su edad temprana, fue causa de un “cierto titubeo en sus maneras y modo indirecto de responder” que conservó toda su vida.

Aunque el señor Maxwell había considerado cuidadosamente la cuestión de la educación de su hijo, permitió que éste fuera al colegio con la extravagante ropa de su propio diseño. James se apareció con una túnica en lugar de un saco, sus zapatos de punta cuadrada, sujetos con hebillas de bronce en vez de cordones negros, y una pechera en lugar de cuello. Después de la primera hora de clase se vio rodeado por sus condiscípulos que lo fastidieron e hicieron objeto de bromas a propósito de su extraordinaria indumentaria, a lo cual James les replicó irónicamente en el claro dialecto de Galloway. Por sus extrañas vestimentas y réplicas sus compañeros lo bautizaron con el sobrenombre de “Dafty” (aturdido). Cuando llegó a su casa de vuelta del colegio, su túnica estaba hecha tiras y su pechera arrancada, pero esto parecía divertirlo más que irritarlo. Su biógrafo hace notar acertadamente que su comportamiento ocultaba serias heridas de su espíritu.

Maxwell no se vio libre, ni trató de hacerlo, de su sobrenombre, durante su estadía en la escuela, y sus raras observaciones y risa eran interpretadas como señales de tontería. Durante muchos años, la escuela no despertó su interés, que seguía concentrado en “Glenlair” y en la casa de su tía en “Edinburgh”. Escribía a su padre cartas detalladas, ilustradas con dibujos, y aquél las leía con afectuosa comprensión, y cuando estaba en Edimburgo no se cansaba de hacer ver a su hijo cosas interesantes. Cuando tenía doce años lo llevó a ver “máquinas electromagnéticas” y a una reunión de la Edinburgh Royal Society.

Durante este periodo sus compañeros continuaron mortificándolo hasta el punto que a veces se volvía contra ellos y los atacaba con furor demoníaco. Su prolongada amistad con Lewis Campbell parece haberse iniciado en el patio de la escuela, una vez que Lewis se puso de su parte, contra sus perseguidores.

Con la adolescencia, progresó rápidamente su desarrollo intelectual. Consiguió vencer su inseguridad al recitar sus lecciones, escribiendo las palabras en los espacios de un plano de un ventanal que había en la habitación del rector, y aprendiéndolas en esa disposición. A la mañana siguiente, cuando se lo llamaba a dar la lección, miraba al ventanal y su imaginación visualizaba allí las palabras escritas. Temía que lo cambiaran de sitio en la clase impidiéndole así ver el ventanal. Desde el principio de su curso de matemáticas, Maxwell realizó progresos rápidos. A la edad de catorce años ganó la medalla de matemáticas y escribió a su tía que su amigo Campbell “había recibido una carta felicitándolo prematuramente por la medalla que al final gané yo; pero no existe rivalidad entre nosotros”. También ganó una medalla en la asignatura de poesía inglesa.

Su padre se preocupaba seriamente de que aprendiera bien matemáticas, llevándolo más frecuentemente a las reuniones de la Edinburgh Royal Society y de la Society of Arts. Uno de los conferenciantes de la Society of Arts era D.R. Hay, cuyas teorías sobre la interpretación matemática de la belleza mediante la forma y el color, habían sido muy debatidas. Habló sobre las propiedades matemáticas de la disposición de “huevo y saca” en los motivos ornamentales griegos. De aquí se suscitó la discusión de cómo construir óvalos perfectos. James estudió el problema y descubrió un método para trazar óvalos mediante un lápiz guiado por un hilo atado a dos alfileres. Aquí se pudo apreciar la importancia que la independencia económica tiene para poder alentar a un talento en formación. La libertad de ocupación de Mr. Maxwell le permitió darse inmediata cuenta del hallazgo de su hijo, pues dedicaba mucho tiempo a visitar a Hay y a J.D. Forbes, el distinguido profesor de Edimburgo, llamándoles la atención sobre el descubrimiento. Forbes quedó grandemente impresionado, y redactó el razonamiento de Maxwell en un lenguaje apropiado para una comunicación a la Royal Society de Edimburgo. En esta forma, antes de cumplir quince años, Maxwell fue conducido por su padre a una reunión

de la Royal Society de Edimburgo para oír la lectura de su primer trabajo. El profesor Forbes destacó que el procedimiento de Mr. Maxwell para trazar óvalos era más sencillo y general que el de Descartes, y que no se había sospechado que estas curvas, cuyas propiedades ópticas habían sido discutidas matemáticamente por Newton y Huygens, se podían construir en forma tan sencilla.

¡Descartes, Newton, Huygens! ¡Qué nombres aparecían en la discusión del trabajo matemático de un escolar!.

Nunca se oyó a Maxwell lamentarse de su educación clásica, y con frecuencia dijo en años posteriores que consideraba que el descubrimiento del pensamiento de un autor, sin otra ayuda que un diccionario y una gramática era uno de los mejores ejercicios mentales.

Apreció, no bien lo leyó, el valor del tratado *Mathematical Analysis of Logic*, de George Boole, que acababa de ser publicado y que es considerado actualmente como el fundamento de la moderna ciencia de la lógica matemática. A pesar de que contaba con el apoyo de los profesores Forbes, Kelland y Hamilton, no tenía mayor relación con sus compañeros, y su comportamiento seguía siendo algo excéntrico. Se vestía cuidadosamente, pero no usaba ropa almidonada, ni guantes y viajaba en tercera clase en el ferrocarril, pues prefería los asientos duros.

Estos trabajos (sobre prismas) despertaron considerable interés por el futuro de Maxwell, y así Forbes visitó al padre de aquél, y lo urgió a que lo enviase a Cambridge. Después de muchas deliberaciones éste decidió enviarlo a Peterhouse, donde se había destacado Thomson unos años antes y había ingresado ya Tait, su compañero de escuela. Los admiradores de Maxwell han discutido con frecuencia acerca de si hubiese salido ganando con ingresar antes a Cambridge, abandonando sus estudios en Edimburgo, inconexos y sin relación social. Algunos creen que habría concluido más pronto su preparación sistemática, obteniendo de ese modo, con más rapidez, una técnica para abordar problemas serios. Otros, en cambio, pensaron que su periodo de independencia en Edimburgo contribuyó a fortalecer su originalidad de pensamiento. Lo cierto es que Maxwell nunca dominó la matemática en grado comparable a su penetración en el campo de la física, y si hubiera ido antes a Cambridge, este ligero desequilibrio podría haberse remediado.

Cuando Maxwell se presentó personalmente a solicitar al doctor Thomson, entonces rector de Trinity College, que le permitiese pasarse a ese establecimiento, parecía tímido e inseguro; pero al poco rato sorprendió al rector presentándole un paquete conteniendo ejemplares de sus trabajos originales y acompañándolos con esta observación: "Tal vez esto le demuestre que no soy inepto para ingresar a su College".

Al poco tiempo pasó a ser alumno de William Hopkins, famoso profesor de matemáticas que había preparado a Stokes, Thomson y otros candidatos de nota, para el examen para optar a la lista de honores. Teniendo en cuenta el grado de desarrollo mental y su originalidad se puede considerar que siguió con notable conciencia las enseñanzas de Hopkins, y que se desempeñó igualmente bien en el extraño juego que es un examen para optar a honores. Hopkins quedó impresionado por la inmensa cantidad de conocimientos de Maxwell, así como por el desorden en que estaban; pero reconoció su genio, pues manifestó que Maxwell era, de lejos, el más notable de todos los alumnos que había tenido. Llegó a decir que Maxwell era casi incapaz de pensar equivocadamente en cuestiones de física, aunque su dominio de la parte formal de las matemáticas era deficiente.

En enero de 1854 se presentó a examen, diciendo a un amigo en esa oportunidad que cuando entró en el aula para buscar el primer tema, su mente estaba completamente vacía; pero al poco tiempo le invadió una lucidez extraordinaria. Cuando salió estaba mareado y titubeante. Su antiguo compañero Tait, que había participado con felicidad en esa competición el año anterior, ha dicho que jamás un buen alumno se presentó al examen peor preparado que lo estaba Maxwell. Obtuvo el segundo puesto, en gran parte, gracias a un poderoso esfuerzo mental. El primer puesto fue ganado por E.J. Routh, matemático talentoso y capaz, cuya facilidad le había permitido obtener más puntos que su competidor con la sola ayuda de su talento, caso análogo al de Stephen

Parkinson que aventajó a Thomson.

Poco tiempo después de graduarse, escribió a Thomson, pidiéndole consejo a propósito de la investigación. Le decía que había pensado estudiar electricidad, y preguntaba si a Thomson le molestaba que abordase ese tema. Evidentemente debió recibir una respuesta favorable, pues escribió a su padre que Thomson “está muy contento de que yo haga incursiones en sus dominios eléctricos”. Mientras preparaba el material para su primer trabajo de importancia Sobre las líneas de fuerza de Faraday se mantuvo intelectualmente activo en varios campos de la física. Nunca había abandonado las investigaciones a propósito de la sensación del color, sugeridas, así como su trabajo sobre la geometría del óvalo, por el libro de D.R. Hay sobre la teoría matemática del arte.

Después de un conjunto de experiencias realizadas con diferentes observadores, llegó a la conclusión de que el ojo humano es capaz de apreciar con gran precisión la semejanza de colores, que la apreciación se debe a una causa que reside en el ojo del observador y no a la verdadera identidad de los colores y que la ley de visión de los colores es, dentro de un cierto grado de aproximación, idéntica para todos los ojos normales. Maxwell demostró que, prácticamente, todo color puede obtenerse por la combinación de otros tres colores, que pueden, pues, ser aceptados como primarios. Adoptó como colores primarios ciertas longitudes de onda, la región del espectro correspondiente al rojo, al verde y al violeta. Descubrió que las personas daltónicas pueden comparar cualquiera de sus sensaciones ópticas coloreadas con combinaciones de dos colores primarios, confirmando así la teoría de que el daltonismo se debe a una deficiencia en una de las tres sensaciones primarias sobre las que se basa la percepción de los colores.

El resultado más importante de los trabajos de Maxwell sobre la visión de los colores fue aumentar su reputación científica. Por razones históricas, la física de los colores era tenida en gran estima en Inglaterra; había sido fundada por Newton y Young, y estudiada en tiempos de la juventud de Maxwell, por Brewster y Forbes. El tema estaba de moda y los trabajos que se vincularan con él no pasaban inadvertidos. El nombre de Maxwell fue añadido a los de Newton y Young en la lista de los que contribuyeron al importante conocimiento de la teoría de la visión de los colores, en 1860 la Royal Society le otorgó la medalla Rumford en mérito a sus trabajos.

La primera oración de Maxwell en sus trabajos sobre electricidad es “El estado actual de la ciencia de la electricidad parece particularmente desfavorable a la especulación”. Hace observar que algunos de los fenómenos de la electricidad estática, de la corriente eléctrica y del electromagnetismo se pueden describir matemáticamente, pero que, hasta ese momento, no se ha hallado ninguna teoría general que vincule entre sí los fenómenos de todos estos tipos. El investigador que busque una teoría general debe dominar una “considerable masa de conocimientos matemáticos de los más intrincados, cuya mera retención en la memoria lo estorba materialmente en su progreso”. Si ha de conseguirse la unificación de las distintas ramas de la teoría de la electricidad, debe hallarse algún método que simplifique los conceptos fundamentales en las distintas ramas, de manera que el estudioso pueda representárselos simultáneamente en su mente. Esta simplificación puede realizarse de dos maneras: hallando un denominador común bajo la forma de una expresión matemática, o mediante una hipótesis física. “En el primer caso, perdemos de vista por completo el fenómeno que deseamos explicar, y aunque podamos objetivar las consecuencias de ciertas leyes, nunca podremos obtener ideas más completas de las vinculaciones de aquel tema. Si por otra parte formulamos una hipótesis física, solamente tenemos una visión indirecta del fenómeno y nos vemos expuestos a no ver los hechos mismos y a sacar conclusiones apresuradas, todo ello como consecuencia de una explicación que sólo es parcial. En consecuencia debemos hallar algún método de investigación que permita que la mente pueda seguir cada paso del razonamiento mediante una clara interpretación física, sin verse obligada a recurrir a alguna teoría fundada en la rama de la física, de la cual se ha extraído esa interpretación, de manera que la mente no se vea apartada del tema principal, por sutilezas analíticas, ni tampoco llevada más allá de la verdad por alguna hipótesis afortunada”.

“Con el propósito de obtener imágenes físicas sin enunciar una teoría física, debemos familiarizarnos con la existencia de las analogías físicas. Entiendo por analogía física la similitud parcial que existe entre las leyes de una ciencia y las de otras, similitud que permite que cada una ejemplifique a la otra. Así, todas las ciencias matemáticas se fundan en relaciones entre las leyes físicas y las leyes de los números, de manera que el objeto que debe perseguir una ciencia exacta es reducir los problemas de la naturaleza a la determinación de cantidades mediante operaciones con números”.

Explica que las “líneas de fuerza” pueden representarse convenientemente mediante “delgados tubos de sección variable, que transportan un fluido imponderable”. La intensidad y la dirección de la fuerza es cualquier punto puede representarse mediante el movimiento del fluido. En el caso de un sistema de fuerzas completamente arbitrario habrá, generalmente, intersticios entre los tubos. Los tubos serán entonces meras superficies que guíen el movimiento de un fluido que llene todo el campo. Hace notar que el estudio matemático de las fuerzas eléctricas y magnéticas se ha basado generalmente en la representación de un modelo en el cual se supone que estas fuerzas son análogas a las reacciones entre ciertos puntos; pero ahora propone basar el tratamiento matemático en la suposición de que las reacciones de las fuerzas sean análogas a las existentes en el modelo hidrodinámico que ha descrito. Luego procede a demostrar que “las leyes de las atracciones y efectos de inducción de los imanes y de las corrientes eléctricas pueden imaginarse claramente sin realizar suposiciones respecto de la naturaleza física de la electricidad, y sin añadir nada a lo que ya se conoce por la experimentación”. Ya ha escrito “no estoy intentando establecer ninguna teoría física de una ciencia en la cual apenas he realizado experimentos”.

El eminente astrónomo real, Sir George Biddle Airy, declaró que “apenas podía imaginar que alguien que conozca la coincidencia existente entre los valores observados y los calculados en base a la acción a distancia, pueda titubear un instante entre esta acción simple y precisa, por una parte, y algo tan vago e impreciso como las líneas de fuerza, por otras”.

Debido a su comprensión de lo que es el espíritu de la investigación científica y a su imaginación geométrica, Maxwell quedó convencido de la exactitud de las concepciones de Faraday sin realizar él mismo ninguna investigación experimental sobre electricidad. Faraday a su vez supo apreciar inmediatamente los trabajos de Maxwell y en una carta fechada el 13 de noviembre de 1857 le escribe: “Siempre he comprobado que yo podía entender perfectamente sus conclusiones. Las cuales, aunque no me ilustran del todo sobre los pasos de su razonamiento, me presentan resultados, que ni exceden a la verdad ni quedan cortos, y que son de una naturaleza tan clara, que basándome en ellos puedo seguir pensando y trabajando”.

Maxwell demostraba con indiscutible lucimiento su dominio de las ideas de acción a distancia, y sin embargo, apoyaba la adopción de la noción aparentemente complicada de las líneas de fuerza de Faraday. Sus contemporáneos, intrigados, se preguntaban qué es lo que tenía en la mente, y decidieron finalmente que era una de sus extravagancias.

La memoria sobre los anillos de Saturno aumentó grandemente su reputación, y resultó ser de gran importancia táctica para su campaña, aun sólo esbozada, para copar y reformar la escuela científica de Cambridge, pues aquél trabajo inhibía a los hombres de ciencia de la vieja escuela para poner en duda su dominio de la física clásica. Con sus investigaciones sobre la física de los colores y los anillos de Saturno, Maxwell había satisfecho el gusto y el método de los más cerrados continuadores de Newton.

Durante el periodo en que preparaba su primer trabajo sobre las líneas de fuerza de Faraday, daba clases sobre fracciones decimales en los cursos de Cambridge para obreros. En marzo de 1856 escribía a su padre: “Estamos organizando una escuela preparatoria para muchachos grandes, con el fin de ayudarlos en sus estudios preliminares. También trabajamos a favor del cierre temprano de los negocios. Hemos conseguido la adhesión de todos los ferreteros, y de todos los zapateros, menos uno. Las librerías se han adherido durante un tiempo. La imprenta Pitt trabaja hasta horas avanzadas, y le vamos a solicitar que cierre”.



Se dice que el estudio que Maxwell realizó de las propiedades de los “cascotes voladores”, como llamaba a los anillos de Saturno, fue el origen de sus investigaciones sobre teoría dinámica de los gases para cuyo estudio presentó su primera contribución importante en 1859, en la reunión de la Aberdeen de la British Association. Al poco tiempo de estar en Aberdeen, Maxwell contaba que “allí no entienden chistes de ninguna clase, y no me he atrevido a hacer uno solo en dos meses; si se me ocurre uno me morderé la lengua”. A pesar de esto, se casó con la hija del director del Marischal College.

Al retirarse Forbes, la cátedra de filosofía natural de Edimburgo quedó vacante, y Maxwell se presentó para ella, pero los electores prefirieron a P.G. Tait. El Courant, periódico de Edimburgo, comentó en sus páginas que “se reconoce al profesor Maxwell en el ambiente científico como uno de los hombres de ciencia más notables. Pero hay otra condición que es deseable en un profesor de una Universidad como la nuestra, y es la capacidad para exponer verbalmente, partiendo de la suposición de que los alumnos tienen conocimientos deficientes o aun nulos. No dudamos que fue esta deficiencia la que indujo a los consejeros a preferir al señor Tait”.

Sea como fuere, dos universidades de su tierra nativa tuvieron la oportunidad de retenerlo como profesor, pero ambas prefirieron otros maestros. Algunos críticos consideran que el estado actual de la educación en Escocia es un resultado de preferir la aptitud pedagógica al genio creador, pues a la larga esta táctica no da resultado.

Se podría pensar que después de dos rechazos Maxwell abandonaría sus intentos de alcanzar una carrera académica, pero la cultura del siglo XIX tenía más suerte de la que merecía. A fines de 1860 quedó vacante una cátedra del King’s College de Londres, siendo designado Maxwell para ocuparla, cosa que hizo durante cinco años de labor fructífera, retirándose al final de este periodo debido a su salud precaria. En el otoño de 1860 había enfermado de viruela en Glenlair, y en 1865, andando a caballo, una rama le había lastimado la cabeza, accidente que fue seguido por un serio ataque de erisipela.

En 1859, Clausius publicó un cálculo de la longitud del “camino medio libre”, basándose en la distancia media existente entre las moléculas de una masa de gas y la distancia entre los centros de dos moléculas que chocan, en el momento de producirse éste. Maxwell leyó el trabajo de Clausius e independientemente dedicó toda su capacidad al desarrollo de la teoría dinámica de los gases y en la reunión de la British Association que tuvo lugar en Aberdeen en 1859 disertó sobre esta teoría. Clausius y sus predecesores, exceptuando al ignorado Waterston, suponían que todas las moléculas debían moverse con la misma velocidad. Esto evidentemente no podía suceder, pues los choques debían aumentar a veces, y a veces disminuir la velocidad de la molécula que ha chocado.

En su conferencia de Aberdeen, Maxwell dio una solución a este problema con auxilio de la teoría matemática de la probabilidad, demostrando que la distribución de las velocidades entre las moléculas sigue la misma ley que la de los errores en un grupo de observaciones, variando de cero a infinito, aunque el número de moléculas con velocidades muy elevadas es relativamente pequeño. La deducción de la distribución de las velocidades moleculares hecha por Maxwell en su trabajo original no es nada clara, aunque el resultado es correcto. Jeans ha dicho que su razonamiento “no parece tener ninguna relación con moléculas, o con la dinámica de su movimiento, con la lógica o el sentido común elemental”, y llega a “una fórmula que de acuerdo con todos los precedentes y todas las leyes de la filosofía científica debería estar equivocada sin duda alguna. Sin embargo se demostró más adelante que era correcta y actualmente se la denomina ley de Maxwell”. Para su determinación Maxwell había inventado la mecánica estadística.

Mientras que algunos expertos hombres de ciencia consideraban que la exhibición más brillante del genio de Maxwell es su contribución a la teoría dinámica de los gases, la mayoría de los físicos juzgan que su obra capital es su teoría electromagnética de la luz. Maxwell realizó la parte más importante de su trabajo sobre estas dos teorías durante los años comprendidos de 1860 a 1865 mientras ocupaba la cátedra en el King’s College de Londres, entre las edades de veintinueve y treinta y cuatro años. En este periodo llevaba una vida

muy ocupada: daba clases nueve meses al año, periodo muy largo para un curso universitario, y dentro de sus tareas incluía las clases para obreros.

Los hombres de ciencia de la categoría de Einstein y Maxwell, que realizaban grandes descubrimientos sin esfuerzos mentales excepcionales, muestran claramente la diferencia que existe entre diversos grados de la inteligencia humana. Los cerebros poderosos no experimentan dificultades en realizar descubrimientos magnos, mayores que las que experimentan los cerebros débiles para descubrir cosas intrascendentes. Los grandes resultados que produjeron con un esfuerzo mental normal, demuestran la verdadera magnitud de sus inteligencias.

Después de cinco agotadores años en Londres, Maxwell renunció, en 1865, su cátedra del King's College, retirándose a Glenlair. Estaba más atado a su pequeña heredad que a su carrera, y en esto no hacía más que atenerse a las tradiciones de la clase social a que pertenecía. En 1868, a la edad prematura de treinta y siete años, fue invitado a ocupar el cargo de decano del United College, en la Universidad de Saint Andrews, cargo que en realidad implicaba la dirección de la Universidad misma, pero ni aun este ofrecimiento tentador lo arrancó de Glenlair, donde se ocupaba escribiendo la gran obra *Treatise on Electricity and Magnetism*, y atendiendo a las obligaciones sociales y religiosas inherentes a la pequeña nobleza. Cerca de su casa hizo construir un buzón especial para las necesidades de su abundante correspondencia. Siempre se interesó por que la capilla local estuviera dotada de lo necesario y varias veces hizo contribuciones importantes. Asimismo, concurría con toda asiduidad a los oficios religiosos, y en su casa encabezaba las plegarias y frecuentemente improvisaba oraciones.

Después de algunos síntomas de dispepsia, a los que no había prestado atención, Maxwell enfermó gravemente en 1879, conociendo entonces que sus días estaban contados, y el 5 de noviembre murió, a los cuarenta y ocho años de edad.

## Capítulo 2

# ELECTRODINÁMICA

Einstein en su autobiografía :“Lo esencial en el ser de un hombre como yo está en qué piensa y cómo lo piensa, y no en lo que hace o padece”. Se esté de acuerdo o no con Einstein, hay que reconocer que una parte muy interesante de la vida de un pensador es qué piensa y cómo lo piensa. Lo que quizá pueda causarnos sorpresa es que el modo de pensar de un científico o un artista, su método, es casi tan único como su obra. Ya veremos que Maxwell abordó los problemas por un camino totalmente distinto del de Faraday. Mientras que Faraday pensaba directamente de las consideraciones metafísicas más abstractas a las teorías y experimentos más concretos, Maxwell se empeñaba en construir teorías físicas muy abstractas, que eran generales y matemáticas, pero que podían ser contrastadas por muchos experimentos diferentes. El talante peculiar de Maxwell marcó tanto la naturaleza de sus creaciones como la acogida que les dispensó la comunidad científica. Para una mejor comprensión del estilo de pensamiento de Maxwell, echemos una mirada a su historia personal hasta la fecha en que comenzó a investigar sobre electricidad y magnetismo.

Maxwell nació en el seno de una familia aristocrática escocesa, los Clerk, perteneciente a la alta sociedad desde hacía dos siglos. Hasta los diez años vivió en Glenlair, la hacienda solariega de su padre. Después asistió a la Academia de Edimburgo, y más tarde a la Universidad de esta ciudad. Poseía una excelente cultura general, destacando especialmente en matemáticas. A la edad de catorce años publicó su primer trabajo matemático, un método para dibujar curvas ovaladas con ecuaciones de grado superior a las de las elipses, utilizando lápiz, cuerda y dos alfileres. El método había sido y anticipado - aunque vagamente- por Descartes, pero en cualquier caso constituye un claro exponente de la forma de pensar de Maxwell, concreta y geométrica.

Maxwell tenía un ingenio deslumbrante, pero detrás latía una actitud de moral seriedad. Más adelante escribió, por ejemplo a su mujer largas cartas con discusiones religiosas de angustiosa seriedad, tema sobre el que nunca hablaba con casi nadie más. A la edad de diecinueve años fue a Cambridge, al Peterhouse College al principio y después al Trinity College (donde Newton había estudiado doscientos años antes). Cambridge confirmó todas las características caracterológicas de Maxwell su excentricidad, su agudeza, su seriedad, su erudición, y también su estilo de trabajo.

Quizá sea a través de sus escritos como mejor podamos hacernos una idea de la personalidad de Maxwell. Y de entre sus escritos, hay dos interesantes realizados nada más graduarse por Cambridge. Uno de los artículos es serio, y el otro es un producto clásico del humor de esta universidad. El primero consiste en unas cuantas líneas personales escritas a los veintitrés años cuando empezaba su carrera científica:

” Quien quiera disfrutar de la vida y actuar con libertad debe tener siempre presente el trabajo del día. No el trabajo de ayer, so pena de caer en la desesperación, ni el de mañana, so pena de convertirse en visionario, ni

tampoco el que culmina con el día, que es trabajo perecedero, ni tampoco el que permanece para la eternidad, porque no sirve para conformar sus acciones. Feliz es el hombre que puede reconocer el trabajo de hoy una porción conexas del trabajo de la vida y una concreción del trabajo de la eternidad. Los fundamentos de su confianza son inmutables, ya que ha sido partícipe del Infinito. Cumple esforzadamente su empresa diaria, porque el presente le ha sido otorgado en posesión. El hombre debería ser, pues una personificación del proceso divino de la naturaleza, y mostrar la unión de lo infinito con lo finito, sin menospreciar su existencia temporal, ya que sólo en ella es posible la acción individual, pero sin ignorar tampoco aquello que es eterno, consciente de que el Tiempo es un misterio que no podrá desvelar hasta que la Verdad eterna lo ilumine.”

El segundo fragmento es el comienzo de una charla sobre analogías, dada en 1856 ante el “Apostals Club”, compuesto por doce de los estudiantes más brillantes de Cambridge:

En la antigua y religiosa fundación de Peterhouse se observa la regla de que aquél que haga un retruécano será tenido por su autor, pero aquél que pretenda haberlo resuelto será considerado su publicador, y que ambos serán multados. Pues bien, así como en un retruécano yacen ocultas dos verdades bajo una sola expresión, en una analogía se descubre una sola verdad bajo dos expresiones. Cualquier cuestión relativa a analogías es, por tanto, la recíproca de una cuestión referente a retruécanos, y las soluciones pueden trasponerse por reciprocación. Pero toda vez que aún subsisten dudas acerca de la legitimidad del razonamiento por analogía, y habida cuenta de que el razonamiento por retruécanos, hemos de adoptar el método directo en punto a la analogía y luego, de ser necesario, deducir por reciprocación la teoría de retruécanos...

## 2.1. Algunos problemas por resolver

A partir de las investigaciones de Faraday, la electricidad se convirtió en uno de los problemas centrales de la física. Se vio que se trataba de una propiedad característica de todo tipo de materia, una propiedad íntimamente relacionada con el comportamiento químico y físico de los cuerpos materiales. Cada descubrimiento de Faraday planteó nuevos problemas de cara a una teoría general de la electricidad. Uno de los problemas fundamentales era encontrar una teoría unificada que diera cuenta del fenómeno de la electricidad estática, la atracción amperiana de las corriente y la inducción electromagnética.

Además había gran cantidad de problemas relativos a las relaciones entre la electricidad y la materia, la explicación de las propiedades de los dieléctricos, de las sustancias día y paramagnéticas, de las reacciones electroquímicas, y de las rotaciones magnéticas del plano de polarización de la luz. El estudio de estas relaciones se convirtió muy pronto en un campo de investigación variado y lleno de posibilidades. De hecho, durante bastante tiempo, la teoría de la electricidad fue el tema punta de la física y de la química, ya que se creía que toda la materia contenía cargas ( desde el modelo atómico de Thomson en 1903). La electricidad era el campo de batalla donde todas las concepciones del mundo esperaban probar su validez. El hecho de desarrollar una teoría unificada de la electricidad dentro del esquema de una determinada concepción del mundo, esperaba probar su validez. El hecho de desarrollar una teoría unificada de la electricidad dentro del esquema de una determinada concepción del mundo, con exclusión de las demás, hubiese sido un gran avance para la ciencia. Los problemas de la electricidad se estudiaron, pues , desde muy diferentes puntos de vista.

En lo siguiente el texto se centrará en aquellas concepciones del mundo que se inspiran en las de Faraday. Al pasar por alto muchos problemas de gran riqueza y variedad tiene el inconveniente de que puede darnos una visión deformada de la historia de la ciencia en una determinada época, pero en cambio la ventaja de exponer con gran brevedad un periodo relativamente largo de la historia. La historia de la ciencia es como una saga, donde en lugar de haber muchas aventuras que convergen en un héroe, hay muchos héroes y una sola aventura.

Desde Faraday hasta Einstein, los avances fundamentales en el desarrollo de la teoría de campos fueron producto del intento de resolver dos problemas afines. En primer lugar se trataba de conseguir una teoría unificada de la acción de la electricidad estática, las corrientes permanentes, y la inducción electromagnética; en segundo lugar, descubrir la verdadera relación entre la luz y el electromagnetismo. James Clerk Maxwell fue el primero en abordar estos problemas a la luz de la teoría de campos. Bajo el hechizo de Faraday esperaba resolver ambos problemas con una teoría matemática clara y precisa.

Además de los descubrimientos de Faraday, es necesario señalar tres aspectos importantes de la situación problemática de Maxwell para poder entender el papel que su teoría desempeñó en la cuestión de la naturaleza del mundo físico.

El primero de estos aspectos es el intento de Weber y otros (incluyendo el desarrollo de la ley de Ohm por Kirchhoff) de resolver el problema de una teoría unificada según esquemas newtonianos. El segundo factor es el desarrollo de la teoría de la conservación de la energía, que afectaba a todas las ramas de las ciencias físicas. Por último, está el nacimiento de una nueva metafísica cartesiana y su aplicación por Thompson; Maxwell utilizó esta nueva metafísica para interpretar a Faraday.

## 2.2. Sobre las líneas de fuerza de Faraday

La historia de los descubrimientos de Maxwell en electricidad y magnetismo comienza con una carta a su amigo William Thomson poco después de licenciarse por Cambridge (Thomson se había graduado nueve años antes):

Ahora que acabo de ingresar en el ingrato estamento de los licenciados, he comenzado a pensar en leer. Actividad placentera, durante cierto tiempo, entre libros de mérito reconocido que uno no ha leído, pero que debería haber leído. Con todo tenemos una fuerte tendencia a volver a los temas de la física, y varios de los aquí presentes querríamos abordar la electricidad. Imaginemos una persona que tiene un conocimiento rudimentario de los experimentos eléctricos y una ligera aversión a la Electricidad de Murphy, ¿cómo debería proceder en la lectura y el trabajo para conseguir cierta comprensión de la materia que pueda serle útil en posteriores lecturas? Si esta persona quisiera leer a Ampère, Faraday, etc, ¿en qué secuencia disponerlos y en qué momento y en qué orden debería abordar la lectura de los artículos que usted ha publicado en el Cambridge Journal? Si usted tiene en la cabeza alguna respuesta a estas cuestiones, tres de nosotros estaríamos gustosos de recibir por escrito sus consejos.

Maxwell empezó sus investigaciones leyendo los *Experimental Researches in Electricity*, de Faraday, después de decidir que no iba a estudiar más matemáticas sobre esta materia hasta haber leído a Faraday. También leyó por sugerencia de Thomson, la teoría de Weber, y comentó: "Confieso que a primera vista no me ha gustado". Es muy posible que Maxwell no tratara la teoría de Weber, por los complicados efectos que ésta atribuía a la acción a distancia. Faraday sabía lo difícil que era introducir fuerzas no centrales dentro del esquema newtoniano; igual de poco plausible encontraba Maxwell la dependencia de la velocidad y la aceleración de las fuerzas que actúan a distancia. Así las cosas, Maxwell se planteó el problema de desarrollar las ideas de Faraday dentro de una teoría matemática del electromagnetismo.

Para entender cómo pretendía Maxwell llevar a cabo su objetivo, hay que tener presente que su interpretación de Faraday es completamente diferente de la que conoce. Utilizaba, como Thomson, una interpretación en función del éter, lo cual le permitió construir varios modelos matemáticos que podía estudiar utilizando las leyes de Newton. Maxwell era consciente de que su interpretación era algo distinta de la de Faraday, pero pensaba que era preferible a la teoría del campo.

A lo largo de todo su trabajo sobre electricidad, Maxwell siguió el "método de las analogías", inspirado

en parte en la analogía que Thomson estableció entre el calor y la electricidad. Este método le permitía una extraordinaria flexibilidad, animándole a proponer teorías que a él mismo le parecían poco verosímiles, pero que le brindaban sistemas matemáticos muy clarificadores al aplicarlos a los fenómenos que trataba de estudiar. Lo liberador del “método de las analogías” reside en el hecho de que permite el desarrollo de teorías, en un principio consideradas como falsas, pero que pueden arrojar luz sobre la verdad; un método que Faraday recomendaba. Por otro lado, estimula a construir teorías distintas de las favoritas, y en general anima a hacer teorizaciones que nadie se creería, pero que pueden ser de un provecho.

La concepción que tenía Maxwell de su situación problemática y su idea de cómo abordarlos están expuestas contundentemente en la introducción a su primer artículo sobre electromagnetismo, “On Faraday’s Lines of Force”.

El método que Maxwell propugna es, desde luego, solamente uno entre un número ilimitado. Como Maxwell señala, tiene algunos puntos fuertes. En este primer artículo, Maxwell construyó *analogías* de dos de las teorías de Faraday, poniéndolas en lenguaje matemático: la teorías de la distribución de las líneas de fuerza, y la teoría del estado electrónico. Maxwell demostró así que las teorías de Faraday eran matemáticamente respetables, si bien su trabajo no condujo a ningún resultado matemático nuevo. Digamos de paso que Faraday en persona había acogido con gran entusiasmo la defensa de Thomson había hecho de alguna de sus ideas, y Maxwell albergaba ahora la esperanza de que Faraday, que acababa de terminar los *Experimental Researches*, leyera su artículo.

Veamos en primer lugar la analogía de las líneas de fuerza que presentó Maxwell. Si llenamos de líneas de fuerza el espacio que rodea a un imán, como hizo Faraday, “obtendríamos un modelo geométrico de los fenómenos físicos que nos indicaría la dirección de la fuerza, pero no su intensidad en cualquier punto, para lo cual necesitaríamos de otro método”. La solución de Maxwell consistía en “considerar estas curvas no como simples líneas, sino como finos tubos de sección variable que transportan un fluido incompresible”. En cualquier punto del campo, la magnitud y dirección de la fuerza vendría entonces representada por la dirección y magnitud del fluido imaginario.

Pasemos ahora a la analogía mecánica de la electricidad. La carga positiva se considera como una *fente* e fluido que viene de forma continua una cantidad de fluido que depende de su intensidad. La carga negativa es como un *sumidero* que absorbe todo el fluido de las proximidades proporcionalmente a su intensidad. Según Faraday, hay la misma cantidad de carga positiva que de negativa, y por tanto, los sumideros nunca dejan de absorber fluido. Se trata desde luego, de fluido extraño, que continuamente está creándose en un lugar y destruyéndose en otro. Pero Maxwell recalca que, al tratarse de una analogía matemática de los fenómenos, podemos asignarle todas las propiedades que queramos.

Maxwell construye también una analogía de la acción del dieléctrico suponiendo que el fluido ( que no tiene inercia) fluye a través de un medio resistente que ejerce sobre aquél una fuerza proporcional a su velocidad. Variando la resistencia del medio por el que discurre el fluido, obtenemos una analogía de la acción de los materiales dieléctricos y diamagnéticos: ante una región de mayor resistencia, el fluido tenderá a rodearlo, desviando las líneas de flujo, como en el caso físico en que las líneas de fuerza se desvían por acción de un material diamagnético.

Maxwell amplía después la analogía introduciendo un medio cuya resistencia al flujo varía con la dirección y demuestra cómo esta analogía explica los efectos magnéticos que tienen lugar en los cristales. Como el fluido es incompresible, el volumen de cualquier parte del fluido ha de permanecer constante en el tiempo. por consiguiente, la velocidad del fluido tendrá que disminuir según se va alejando de la fuente. De hecho, la velocidad del fluido obedecerá la ley del inverso del cuadrado. Maxwell demostró también que así como la velocidad es análoga a la fuerza en el campo eléctrico, la presión en un punto del fluido es análoga al potencial. Vemos, pues, que en el caso estático es posible reconciliar la teoría de Poisson con la teoría de las *líneas de*

fuerza.

¿Puede utilizarse este modelo mecánico para construir una teoría unificada de la electricidad, como tiene que ser, según Maxwell, toda teoría nueva que pretenda ser satisfactoria? Maxwell no llega a contestar esta pregunta. Se limita a mencionar la demostración de Kirchhoff de que la *fuerza electroscópica* de Ohm es idéntica al potencial eléctrico, y que “quedaría definitivamente establecida la conexión entre la electricidad de tensión y la corriente eléctrica” si conociéramos cuánta carga debe pasar por segundo por un cable para obtener una unidad de corriente, medida en unidades de intensidad de campo magnético asociado. Esta conexión, aunque valiosa, no constituirá una teoría unificada, porque necesitaríamos saber si la corriente es el flujo de un fluido eléctrica, o una vibración y la carga eléctrica. Maxwell menciona la teoría de que la electricidad es un fluido, pero prosigue luego con ideas que son como un eco de las de Faraday, a quien cita puntualmente. En resumen, Maxwell no contaba con ninguna teoría unificada que fuera más allá de los límites de Faraday.

En la segunda parte de “On Faraday’s Lines of Force”, Maxwell expone su teoría de la inducción electromagnética, basada en una teoría del estado electrotónico. “La fuerza electromotriz depende de la variación del número de líneas de inducción magnética que atraviesan el circuito”, dice Maxwell, explicando la teoría de Faraday.

“Es natural suponer que una fuerza de este tipo que depende de la variación del número de líneas, se deba a un cambio de estado que viene medido por el número de estas líneas” este estado no es sino el estado electrotónico de Faraday, para el que Maxwell propone una expresión matemática. Así justificaba Maxwell su trabajo sobre la obra de Faraday, que era completamente ignorada por todos los demás:

La conjetura de un filósofo (Faraday) tan familiarizado con la naturaleza puede a veces estar más preñada de verdad que la ley experimental mejor establecida por investigadores empíricos, y aunque no es obligado admitirla como verdad física, cabe aceptarla como una idea nueva con la cual clarificar nuestros conceptos matemáticos.

Maxwell descubrió una expresión matemática del estado electrotónico que coincide con la función potencial de Neumann ( en aquel entonces Maxwell no conocía la obra de Neumann). Pero hay que señalar que el potencial vectorial de la posterior teoría de Maxwell, más elaborada, no siempre es el de Neumann. Como indicó más tarde. Helmholtz, sólo coinciden para corrientes estacionarias cerradas el camino seguido por Maxwell hasta llegar al potencial vectorial es diferente del de Neumann. Maxwell empezó por formular matemáticamente la idea de Faraday de que la inducción es igual al número de líneas de fuerza que atraviesan el circuito. Luego obtuvo la función cuyo cambio da la fuerza electromotriz del circuito, utilizando un teorema probado, entre otros, por Thomson.

Aunque el potencial vectorial puede ser considerado como una medida de la intensidad del estado electrotónico, no proporciona ninguna medida de la intensidad del estado electrotónico, no proporciona ninguna teoría de la naturaleza de la tensión que, según Faraday, era de origen de este estado. Maxwell era consciente de que se necesitaba algo más para establecer una teoría física del estado electrotónico y tenía la esperanza de llegar a descubrirlo. El problema era ahora establecer un mecanismo que explicara las acciones del campo electromagnético, y especialmente el estado electrotónico. Dice en un artículo ( en una defensa del uso de las matemáticas)

La idea del estado electrotónico nunca la he tenido en la mente en una forma que permita explicar su naturaleza y propiedades sin recurrir a simples símbolos... Espero que a través de un cuidadoso estudio de las leyes de los sólidos elásticos y del movimiento de los fluidos viscosos pueda descubrir un método de construir una concepción mecánica de este estado electrotónico que se adapte al razonamiento general.

¿Por qué tanto interés en volcarse en este nuevo programa de investigación si estaba tan a mano la brillante teoría unificada de la electricidad de Weber?

Es bueno dos maneras de contemplar un tema, y admitir que hay dos maneras diferentes de contemplarlo. El principal mérito de una teoría provisional es que sirve de guía para la experimentación, sin obstaculizar el avance de la teoría correcta en el momento en que aparezca. También hay objeciones a la idea de que las fuerzas últimas de la naturaleza depende de la velocidad de los cuerpos entre los que actúan... el principio de la Conservación de la Fuerza impone que estas fuerzas actúen según la línea de unión de las partículas y dependan sólo de la distancia.

Después de su éxito inicial con la formulación de expresiones matemáticas para ciertas partes de la teoría de Faraday, Maxwell se dedicó al arduo problema de encontrar una explicación mecánica de las leyes que había expresado matemáticamente, una explicación que condujera a una teoría unificada de la electricidad. Si Maxwell se mostró muy flexible en su acercamiento a la explicación mecánica, fue porque creía que su teoría sería, en el mejor de los casos, una primera aproximación a la teoría verdadera ( que no llegaría hasta conocer perfectamente el éter). Se tomó la libertad de imaginar un mecanismo imposible que, sin embargo, podría presentar analogías como ciertas. Uniendo sabiamente su capacidad de imaginación y su facilidad matemática, Maxwell hizo un avance fundamental en la teoría de campos.

### 2.3. Sobre las líneas físicas de fuerza

Maxwell logró efectivamente hallar una representación mecánica del estado electrotónico y del campo electromagnético en general. En un artículo publicado en 1861-62, y titulado "On Physical Lines of Force" expuso el modelo y sus propiedades matemáticas. Con este artículo Maxwell irrumpió hacia una nueva teoría del electromagnetismo, que se convirtió en el centro de toda investigación posterior; resultado de estas investigaciones fueron, entre muchas otras cosas, el descubrimiento de las radioondas, la teoría electromagnética de la luz y el posterior desarrollo del telégrafo y el teléfono.

En su primer trabajo, "On Faraday's Lines of Force" (publicado en 1855-56), Maxwell había desarrollado matemáticamente muchas de las ideas de Faraday; por ejemplo, la de que la inducción es producto de líneas de fuerza en movimiento, la de la capacidad inductiva específica y la de la permeabilidad magnética. ¿Qué esperaba Maxwell conseguir con la construcción de un modelo mecánico del campo de cuya corrección él mismo dudaba? ¿qué problemas trataba Maxwell de resolver con tal modelo? Maxwell, al igual que Thomson, creía que el campo electromagnético realmente está constituido por un éter subordinado a las leyes de la mecánica newtoniana. Esto era razón suficiente para buscar un mecanismo. Su idea era que aunque no diera con el mecanismo correcto, podía encontrar uno que fuera lo suficientemente parecido al verdadero como para poseer algunas propiedades comunes. Pero ese mecanismo, ¿no conduciría a las mismas ecuaciones que las del primer artículo, careciendo de propiedades contrastables? Maxwell esperaba más de ese mecanismo.

Al parecer, Maxwell creía que los resultados de sus primitivos artículos tenían que ser modificados con la introducción de la velocidad finita de la inducción electromagnética. Maxwell, al igual que Faraday, tenía argumentos metafísicos que le impulsaban a aceptar que la inducción electromagnética requiere tiempo para propagarse por el campo. Según el concepto de éter mantenido por Maxwell, cada parte del éter no actúa sobre las demás a distancia sino sólo sobre las contiguas ( como en Descartes). Si se supone que el éter es una sustancia elástica y con masa, entonces la velocidad de propagación ha de ser finita. Y había una razón poderosa para creer que el éter poseía estas propiedades ( la velocidad finita de la luz). Aquí nos refiremos naturalmente al *éter luminífero*, que no tiene por qué estar relacionado con el campo electromagnético; pero a Maxwell le constaba creer que existiesen dos éteres superpuestos, uno para la luz y otro para el electromagnetismo. Además, el descubrimiento de Faraday de la rotación magnética de la luz polarizada demostraba la existencia de una íntima relación entre la luz y el magnetismo. Por tanto, lo natural era asignar al mismo éter los efectos electromagnéticos y los luminosos. Y si este éter tiene en el caso de la luz una velocidad finita de respuesta



¿por qué no en el de la inducción electromagnética? Es más, las ondas luminosas ¿no serían un fenómeno electromagnético, como Faraday sugería?

El problema de Maxwell se centraba, pues, en dar con un modelo del éter del campo electromagnético que incorporara la masa y elasticidad necesaria para la velocidad finita, y llegar incluso a formular una teoría electromagnética de la luz. Las ideas de Faraday jugaron un papel muy importante en la construcción del modelo, sobre todo la de que la conducción y el asilamiento (incluidos los del espacio) son procesos que difieren en grado pero no en cualidad. El objetivo de Maxwell era la creación de una teoría unificada de la electricidad, el magnetismo y la luz.

Una sugerencia de Faraday sirvió de punto de partida para la construcción del modelo mecánico. Faraday había dicho que la distribución de las líneas magnéticas de fuerza podía determinarse suponiendo que existe tensión a lo largo de dichas líneas y una presión entre ellas. Adoptando la metafísica cartesiana de Thomson, Maxwell pasó a preguntarse qué explicación mecánica podía tener esta desigualdad de presiones en un fluido, o medio móvil. La clave la encontró en los trabajos de Thomson, donde se establecía la necesidad de suponer un movimiento turbulento en torno a las líneas magnéticas de fuerza en un medio diamagnético; pensaba que esta era la única forma de explicar la rotación de la luz de Faraday. Maxwell hizo suya la idea de los remolinos magnéticos y la aplicó a todas las líneas de fuerza, tanto en el espacio como en un medio material.

Esta generalización daba una respuesta al problema de la explicación mecánica de la desigualdad de presiones a lo largo de las líneas de fuerza y entre ellas:

La explicación que primero se nos ocurre (a Maxwell) es que el exceso de presión en la dirección ecuatorial procede de la fuerza centrífuga de los remolinos del medio que tienen sus ejes situados paralelamente a la dirección de las líneas de fuerza.... Suponemos, de momento, que todos los remolinos de una parte determinada del campo giran en la misma dirección según ejes casi paralelos, pero que al pasar de una parte del campo a otra se pueden producir variaciones en la dirección de los ejes, en la velocidad de rotación y en la densidad de sustancia de los remolinos. Estudiaremos el efecto mecánico resultante sobre un elemento del medio, y de la expresión matemática de estas resultantes pasaremos a deducir el carácter físico de las diferentes partes que lo componen.

En sus deducciones, Maxwell introduce la hipótesis fundamental de que la masa de los remolinos magnéticos dependen de la permeabilidad magnética del medio por lo tanto, la energía del campo magnético - la energía cinética de los remolinos- es función de la constante de permeabilidad.

El segundo paso de la construcción del modelo era encontrar una analogía mecánica de la corriente eléctrica que estableciera una relación entre ésta y el magnetismo. Maxwell propuso una solución muy ingeniosa que consistía en suponer que la electricidad está constituida por bolitas que separan a unos remolinos magnéticos de otros, considerando a éstos como barras flexibles con superficies rugosas. Así exponía Maxwell el problema y su solución:

Suponiendo que sea correcta la explicación de las líneas de fuerza mediante remolinos moleculares, cabe preguntarse por qué una determinada distribución de remolinos supone una corriente eléctrica. Una respuesta satisfactoria nos facilitaría mucho el camino hacia la resolución del verdadero problema, que no es sino contestar a la pregunta: ¿Qué es la corriente eléctrica?.

Me ha costado mucho aceptar la existencia de remolinos a través de todo un medio, girando codo con codo en la misma dirección en torno a ejes paralelos. Las porciones contiguas de dos remolinos consecutivos deben moverse en direcciones opuestas; y es difícil comprender cómo el movimiento de una parte del medio pueda coexistir con un movimiento contrario de la porción contigua e incluso producirlo.

La única idea que me ha ayudado a concebir este tipo de movimiento es que los remolinos están separados por una capa de partículas girando cada una alrededor de su propio eje, en dirección opuesta a la de los

remolinos, de forma que las superficies de contacto entre partículas y remolinos tienen el mismo sentido de movimiento.

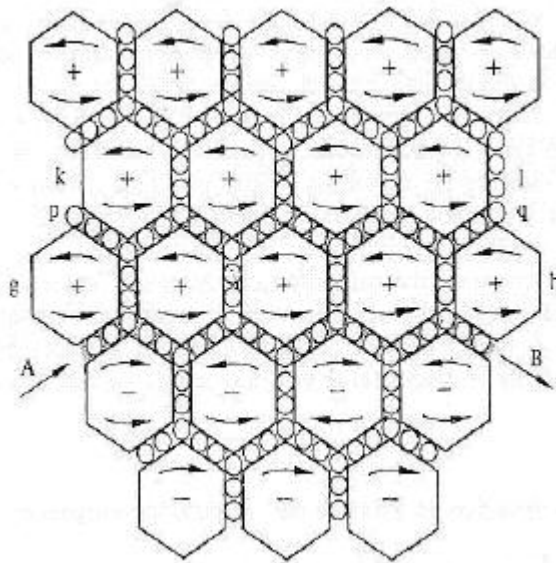


Figura 2.1: Modelo mecánico utilizado por Maxwell.

En mecánica, cuando se quiere que dos ruedas giren en la misma dirección, se coloca entre ellas otra rueda que engrane con ambas, y que se llama “piñón loco”. La hipótesis que sugiero sobre los remolinos es que entre cada dos remolinos contiguos se interpone una capa de partículas que actúa como piñón loco; de esta forma cada remolino tiende a hacer que sus vecinos se muevan en su misma dirección.

En mecánica, el piñón loco se monta generalmente sobre un eje fijo; pero en trenes epicicloidales y otros aparatos como, por ejemplo, en el regulador de Siemens para máquinas de vapor, hay piñones locos cuyo centro es móvil. En todos estos casos, el movimiento del centro es la mitad de la suma de los movimientos de las circunferencias de los piñones entre los que está situado. Examinemos ahora las relaciones que debe existir entre el movimiento de nuestros remolinos y el de la capa de partículas interpuestas entre ellos a modo de piñones locos.

El desplazamiento de las partículas eléctricas constituye la corriente eléctrica. Mientras pasa corriente, las partículas se mueven de un remolino a otro. Al desplazarse pueden dar saltos y provocar una pérdida de energía que aparece en forma de calor; pero mientras están girando, no hay rozamiento entre la partícula y el remolino, y no se producen pérdidas de energía. En principio, pues, parece posible mantener indefinidamente un campo magnético.

El tercer paso en la construcción del modelo fue el suponer que los remolinos magnéticos están dotados de elasticidad. Esta hipótesis exige una velocidad finita de variación de los estados del mecanismo: una velocidad de inducción finita. Y proporciona también una explicación de la electricidad estática: en un dieléctrico, los ejes de los remolinos magnéticos no pueden moverse. Si una causa exterior al mecanismo ejerce fuerzas sobre las partículas eléctricas, éstas deforman elásticamente los remolinos magnéticos. Esta deformación pone en juego a las fuerzas elásticas del remolino, que presiona sobre las partículas eléctricas circundantes. Se supone que la fuerza de un remolino sobre una partícula eléctrica representa la fuerza eléctrica debida a la carga. Así pues, Maxwell, al igual que Faraday, aportó una teoría de campo de la carga. La adopción de tal teoría de

carga ( y por tanto de la corriente) le valió los resultados más originales de su teoría.

## 2.4. Modelo mecánico de Maxwell del campo electromagnético

El modelo mecánico del campo electromagnético de Maxwell es uno de los más imaginativos pero menos verosímiles que nunca se hayan inventado. Es el único modelo del éter que logró unificar la electricidad estática, la electricidad corriente, los efectos inductivos y el magnetismo, y a partir de él, Maxwell dedujo sus ecuaciones del campo magnético, y su teoría electromagnética de la luz. La deducción de las ecuaciones es enrevesada y asombrosa. Continuamente atribuye a su modelo propiedades descabelladas, sin que quepa en cabeza humana que haya un sistema real que posea tales propiedades.

Pero Maxwell se mueve dentro de este laberinto de suposiciones con total seguridad y claridad de propósito ¿Cómo consiguió resultados tan buenos con tanta seguridad y siguiendo caminos tan inverosímiles?

Lo primero que se le ocurre a uno es que Maxwell nos ha timado: que conocía de antemano los resultados y que amañó el modelo para conseguirlos. La sospecha es absolutamente falsa, pero no deja de tener un grano de verdad. Maxwell sabía que tenía que obtener ciertos resultados, tales como la ley del inverso del cuadrado para la electricidad estática y el magnetismo estático, y sin duda amañó el modelo para conseguirlo. Pero aún así, la construcción del modelo estaba plagada de restricciones e incertidumbres. La principal condición que Maxwell impuso al mecanismo fue que obedeciera a las leyes de la mecánica newtoniana. Entre las principales incertidumbres figuran:

- 1.- qué modificaciones había que introducir en la teoría tradicional para reformularla como una teoría de campos de acción contigua,
- 2.- si se podía establecer o no una teoría electromagnética de la luz dentro de la teoría así reformulada.

Al parecer, Maxwell no tenía idea en un principio de qué ecuaciones iba a encontrar, ni siquiera si podría desarrollar o no una teoría electromagnética de la luz. Un ejemplo de la inseguridad en que se movía Maxwell es la introducción de la corriente de desplazamiento ( más adelante se nombrarán). Aunque luego resultaría ser una de las principales innovaciones del artículo, Maxwell no se dio cuenta de eso hasta varios años después de su publicación ¿Por qué confiaba entonces Maxwell en que este método tan insólito podía proporcionarle suculentos resultados? Posiblemente su seguridad se debiera a su fe en la teoría de campos. Faraday y Thomson le había convencido de que la acción a distancia no era viable, y que el único modelo satisfactorio desde el punto de vista de la metafísica era la teoría de campos. Otra razón fue su fe en las tres leyes de la mecánica de Newton.

La combinación de ambas cosas - su fe en la teoría de campos y en las leyes de Newton - le brindaron un programa parecido al de Thomson: explicar todo en términos de un éter supeditado a las leyes de Newton. Ahora bien, toda teoría verdadera debe ser consistente con los hechos experimentales, y ninguna teoría de sentido común proporciona una teoría unificada del electromagnetismo que posea poder deductivo para explicar los hechos: la verdad tenía que ser extraña. Maxwell sabía que una teoría correcta tenía que parecer extraña, al menos originalmente, así que estaba dispuesto a comprobar si cualquier hipótesis consistente con sus principios metafísicos era realmente verdadera o no. Aun en el caso de que ninguno de los aspectos de su modelo mecánico fuese literalmente correcto, el hecho de ser un modelo mecánico podría conferirle algunas propiedades correctas, propiedades como las del mecanismo verdadero. Por eso Maxwell cedió a la tentación de considerar como verdaderas ciertas partes del modelo ( por ejemplo, los remolinos magnéticos, Maxwell se tomó realmente en serio la idea del magnetismo como remolinos en rotación, como lo demuestra uno de sus experimentos: "el momento angular del sistema de remolinos depende de su diámetro medio; de forma que si

el diámetro fuera perceptible, deberíamos esperar que un imán se comportara como si en su interior tuviera un cuerpo girando, y que esto pudiera detectarse experimentalmente estudiando la rotación libre de un imán. Yo he hecho experimentos en relación con lo anterior, pero aún no he agotado todas las posibilidades del aparato”), aunque más tarde no dejó de resaltar que los resultados obtenidos eran correctos, independientemente del mecanismo utilizado.

La deducción de las ecuaciones de Maxwell a partir del modelo establecido es muy complicada, y esencialmente de carácter matemático. Maxwell quería que fuera una teoría matemática exacta, y las restricciones de la deducción formal son una guía importante en tales teorías. La dificultad de entender las deducciones se hace aún mayor por los errores que el mismo Maxwell cometió. Por estas razones, el análisis completo de la deducción de Maxwell queda fuera del alcance de este libro. Pero, aun sin seguir los pasos matemáticos, es posible hacerse una idea de las líneas generales de la deducción y del contenido físico que el modelo mecánico introduce en las ecuaciones.

Para hacer comprensible el proceso que siguió Maxwell, se describirá aquí el modelo de tres formas diferentes. Primero se explicará cómo el modelo sirve para explicar un caso importante, la inducción electromagnética, dedicando para ello el resto de esta sección. Después se explicará qué magnitudes electromagnéticas están correlacionadas con qué aspectos del mecanismo, y se hará un breve esquema de la deducción. Por último se expondrá con detalle las deducciones. Las páginas siguientes son, de difícil lectura, pero aún son descripciones más sencillas que las originales. La empresa de Maxwell era de una dificultad realmente grande; pero su autor era un virtuoso, y el resultado fue una maravilla.

Para comenzar, veamos cómo funciona el mecanismo. El campo magnético y la corriente están relacionados así: la corriente es el movimiento de las partículas eléctricas; cuando una partícula se mueve, roza las paredes del remolino magnético contiguo y lo pone en movimiento. La rotación de este remolino provoca la rotación de todas las partículas eléctricas que están en contacto con él. Estas partículas rozan al girar contra los remolinos en contacto con ellas, provocando su rotación y así hasta que todo el espacio se llena de remolinos magnéticos en movimiento. Por lo tanto, una partícula eléctrica con libertad de movimiento en un conductor produce un campo magnético alrededor del cable.

La parte más importante y más bella del modelo de la siguiente manera: supongamos, para empezar, que tenemos dos cables conductores, uno de ellos recorrido por una corriente estacionaria. Supongamos también que un dieléctrico rodea a ambos cables. Las bolas eléctricas del primer cable se moverán a su través, rozando con los remolinos magnéticos del exterior del cable; estos remolinos se restregarán contra otras bolas eléctricas, que a su vez rozarán contra otros remolinos, etc. las bolitas del dieléctrico girarán sin trasladarse, debido a la igualdad de las velocidades de los remolinos a ambos lados de la bola. De la misma forma, las bolitas eléctricas del otro cable, aunque libres de moverse, no tienden a hacerlo, sino que girarán sin traslación como las del dieléctrico.

Supongamos ahora que la corriente del cable disminuye. En el modelo esto significa que las partículas eléctricas empiezan a moverse más despacio, haciendo que los remolinos magnéticos adyacentes pierdan también velocidad. Por lo tanto, habrá una diferencia de velocidad entre el remolino contiguo al cable y el siguiente, con el resultado de que las bolas que quedan entre ambos tienden a ponerse en movimiento. y la diferencia de velocidades quedará absorbida inicialmente por una distorsión elástica de los remolinos. El remolino deformado ejercerá una fuerza sobre las partículas, que se mueven más de prisa, disminuyendo su velocidad. Y así pasará por todo el campo una onda de desplazamiento de las partículas eléctricas y un campo magnético variable. Cuando la onda llega al otro cable, las bolitas eléctricas que hay en él se pondrán en movimiento y provocarán la inducción de una corriente en el cable.

El lector, después de oír hablar de estos cojinetes que vuelan entre remolinos elásticos, puede llegar a pensar con Pierre Duhem: “Creíamos adentrarnos en la tranquila y pulcra estancia de la razón; pero hete aquí que

estamos en una fábrica". La fábrica, sin embargo, dio algunos productos notables, a saber, las ecuaciones del campo electromagnético y la teoría electromagnética de la luz.

Maxwell se impuso a sí mismo varias condiciones al construirse el modelo mecánico y deducir sus propiedades. Una era su objetivo de relacionar la elasticidad y la masa del mecanismo con propiedades electromagnéticas; la otra, la necesidad de ser congruente con los experimentos del electromagnetismo ya conocidos. Para comprender los problemas que Maxwell tuvo que superar para poder llevar a cabo la deducción, lo más sencillo es empezar por ver qué magnitudes electromagnéticas, bien que este proceder no es precisamente el que siguió el pensamiento de Maxwell.

## 2.5. Magnitudes mecánicas y electromagnéticas

Cada una de las magnitudes mecánicas y eclécticas está específicamente representadas por un aspecto del modelo mecánico. En un medio conductor, la intensidad de corriente en un punto ( $\mathbf{j}$ ) viene representada por el número de bolas que pasan por ese punto en un segundo. Estas partículas eléctricas rozan contra los remolinos adyacente y les transmiten un movimiento de rotación. La intensidad de la fuerza magnética ( $\mathbf{H}$ ) está representada por la velocidad del remolino en su superficie. Su dirección viene dada por la del eje del remolino; Maxwell supone que si miramos a lo largo del eje del remolino y vemos que éste gira en el sentido de las agujas del reloj, entonces estamos mirando en dirección norte, es decir aquella hacia donde sería impulsado un polo norte magnético. La densidad media (masa) de los remolinos se corresponde con la permeabilidad magnética,  $\mu$ , del campo. Por lo tanto, la energía del campo magnético viene dada por la energía cinética de los remolinos en movimiento, que es proporcional a  $\mu H^2$ .

Si dos remolinos vecinos describen un movimiento de rotación con velocidades distintas, sobre las partículas que hay entre ellos se ejercerá una fuerza tangencial. Esta fuerza representa la parte de la fuerza electromotriz ( $\mathbf{E}$ ) debida a la inducción. El estado electrotónico o potencial vectorial ( $\mathbf{A}$ ) está relacionado con el momento de los remolinos, por lo cual la fuerza electromotriz es una función de la variación del momento de los remolinos.

Si las bolitas eléctricas forman parte de un dieléctrico, no podrán desplazarse de su posición, pero sí sufrir una deformación elástica bajo la acción de las fuerzas que actúan sobre ellas. El grado en que el material de una bola eléctrica se desplaza por efecto de las fuerzas depende de las constantes elásticas de la bola. Maxwell supuso que el desplazamiento total ( $\mathbf{D}$ ) es directamente proporcional a la fuerza que actúa sobre la bola; la constante de proporcionalidad es análoga a la constante dieléctrica o capacidad inductiva ( $\epsilon$ ) del medio ( $D = \epsilon E$ ). La energía del campo eléctrico se corresponderá con la energía elástica de las partículas deformadas. Esta energía tiene que ser igual al trabajo realizado para deformar las partículas: la fuerza ejercida por los remolinos, multiplicada por el desplazamiento de las sustancia (que es proporcional a  $\mathbf{E} \cdot \mathbf{D} = \epsilon E^2$ ).

En el modelo de Maxwell, la carga está producida por una presión mutua ejercida por las partículas eléctricas. La presión es análoga al potencial eléctrico o tensión ( $\Psi$ ). La diferencia de presión a ambos lados de una partícula eléctrica constituye la contribución de la electricidad a la fuerza electromotriz. Un cuerpo cargado es aquel cuyas partículas eléctricas ejercen una presión neta sobre las partículas del dieléctrico circundante. Señalemos que la causa de esta presión ha de ser ajena al mecanismo propiamente dicho.

Maxwell dedujo sus ecuaciones en tres etapas. En primer lugar utilizó la hipótesis de los remolinos para explicar los efectos puramente magnéticos. La segunda etapa consistió en utilizar la hipótesis de la elasticidad de las bolas para explicar los fenómenos de la carga eléctrica. Cada una de estas etapas fue un paso hacia la coronación de su obra: la teoría electromagnética de la luz.

La idea que encierra la primera etapa es realmente ingeniosa; su desarrollo es relativamente directo. Como y ase ha dicho, el punto de partida de Maxwell fue la sugerencia de Faraday de que existe una tensión en las

líneas de fuerza, y una presión entre ellas. Faraday apuntó que la forma que tomaba las líneas en una situación determinada depende de la permeabilidad magnética del medio, y precisó que el movimiento de un cuerpo magnético o diamagnético cabía considerarlo como debido a las fuerzas de tensión a lo largo de las líneas de fuerza que pasan por el cuerpo y a la presión entre ellas.

Pero ¿en qué casos aparece un desequilibrio entre las tensiones del campo, de modo que las líneas de fuerza y los cuerpos que las componen se muevan? ¿en que otros casos se da el equilibrio, que hace que las líneas de fuerza se distribuyan como alrededor de un imán en reposo? Para contestar a estas preguntas haría falta tener una expresión cuantitativa de las tensiones ¿Qué modelo mecánico podría proporcionar tensiones análogas a las de Faraday, un modelo que nos permitiese calcular exactamente las tensiones y fuerzas involucradas y que quizá fuese incluso cierto? Esta es la primera cuestión a la que Maxwell dedicó sus esfuerzos en la búsqueda de las ecuaciones del campo.

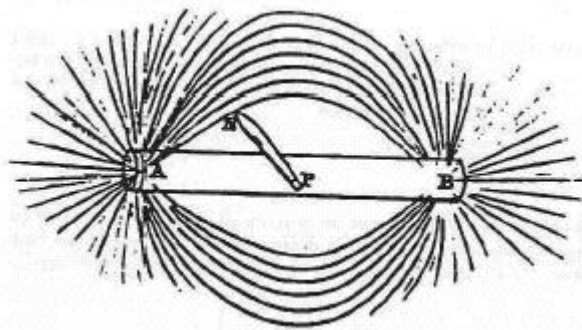


Figura 2.2: Líneas de fuerza en un imán estático. Primer dibujo realizado por Faraday y utilizado por Maxwell.

Para resolver el problema, Maxwell propuso que las tensiones podrían ser producidas por la rotación de los remolinos en torno a las líneas de fuerza. La rotación sería la causa de que la presión fuera del eje fuese mayor que a lo largo del mismo. Una expresión exacta de esta diferencia de presiones haría posible el cálculo de las fuerzas que nacen de la tensión, y el conocimiento de estas fuerzas determinaría a su vez la distribución de las líneas e fuerza y las condiciones bajo las cuales se mueven. El primer resultado que Maxwell obtuvo al derivar las propiedades de su modelo fue el cálculo de la inferencia de presión:  $p_1 - p_2$  era igual a  $\mu H^2/4\pi$ , siendo  $\mathbf{H}$  la velocidad del remolino en su superficie y  $\mu/4\pi$  una constante que depende de la densidad del remolino. La tensión cabía desglosarla, pues, en dos partes, la presión  $p_1$  en la dirección del eje del remolino, la línea de una presión  $p_1$  en todas las direcciones, una tensión de  $\mu H^2/4\pi$  fuerza. Maxwell identificó más tarde la presión general  $p_1$  con el término  $\mu H^2/8\pi$ , dando con esto una expresión cuantitativa a la tensión tensión y presión que Faraday creía podía ser la explicación de la distribución de las líneas de fuerza.

Conocida ya la diferencia cuantitativa de presión a lo largo de las líneas de fuerza, Maxwell dedujo la expresión de la tensión en cualquier dirección en un punto del mecanismo. Las componentes de la expresión de una tensión constituyen un *tensor*, como se le llama hoy día. A partir del tensor se puede calcular la fuerza resultante ejercida sobre cualquier punto del medio. Maxwell demostró que en caso de permeabilidad magnética uniforme y ausencia de corrientes en el medio, cumple la ley del inverso del cuadrado. Comprobada la validez del modelo en este caso límite, Maxwell pudo identificar entonces  $\mathbf{H}$ , la velocidad de los remolinos en su superficie, con la intensidad magnética, (como ya mencionamos, la dirección  $\mathbf{H}$  se toma a lo largo del eje del remolino).

Partiendo de la tensión, Maxwell había deducido una expresión general para la fuerza a que está sometido

un cuerpo para o diamagnético dentro de un campo magnético de permeabilidad variable. Aunque el resultado era muy general, no estaba en contradicción con la expresión que podía calcularse a partir de las teorías de acción a distancia. La deducción era muy importante demostraba cómo la idea de Faraday de la tensión a lo largo de las líneas de fuerza podía expresarse cuantitativamente y porque permitió a Maxwell identificar la velocidad del remolino con la intensidad magnética. Una vez hecha esta identificación, quedaba decidida gran parte de la investigación restante. Todas las demás analogías tenían que ser consistentes con la analogía inicial de la intensidad magnética. Como suele ocurrir, el primer paso fue una restricción pero también una guía.

## 2.6. Las leyes del campo electromagnético

La identificación de la velocidad de los remolinos con la intensidad magnética fue la base del resto de la deducción. El siguiente problema que abordó Maxwell fue el de hallar las leyes que relacionan la corriente y el campo magnético. Dentro del modelo, el problema era relacionar el movimiento de las bolitas eléctricas con la rotación de los remolinos magnéticos. Había dos dificultades: primero, demostrar que el movimiento de las bolitas eléctricas daba lugar a la distribución correcta de la fuerza magnética, de la velocidad de los remolinos; segundo, demostrar que determinadas variaciones de la fuerza magnética ejercerían una fuerza sobre las partículas eléctricas, la fuerza electromotriz de inducción. La clave de la solución está en el hecho de que la velocidad de traslación de una bola es igual a la semidiferencia de las velocidades de los remolinos contiguos. (Maxwell no tiene aquí en cuenta la elasticidad de las bolas eléctricas, que introduciría más tarde.)

Dado que la relación entre la velocidad del remolino y el movimiento de traslación de las bolas eléctricas es fija, se puede expresar el movimiento de las bolas (corriente) en función de la variación de la velocidad de los remolinos (intensidad magnética) de un punto a otro. Maxwell descubrió tal función, que ahora recibe el nombre de *rotacional*. En general, el rotacional de un campo de fuerzas expresa el par de rotación que se ejercería sobre una pequeña bola situada en un punto del campo. Al relacionar la corriente con el rotacional del campo magnético Maxwell tuvo que suponer que hay  $\pi/2$  bolas eléctricas por unidad de superficie de los remolinos magnéticos. Esta hipótesis dio la ecuación  $p = \pi \nabla \times \mathbf{H}/2$  (igual que antes,  $p$  es la corriente y  $\mathbf{H}$  la fuerza magnética). Maxwell demostró que esta ecuación era consistente con la conocida distribución de las líneas magnéticas de fuerza alrededor de una corriente estacionaria.

El siguiente problema era el de desarrollar una teoría de la inducción magnética basada en las propiedades del modelo. Para deducir las leyes de la inducción, Maxwell utilizó un método difícil y tortuosos. Su objetivo era encontrar una expresión general de la fuerza electromotriz que actúa sobre un conductor que se mueve a través de un campo magnético, y quería evitar a toda costa la introducción de hipótesis especiales sobre las fuerzas elásticas de las bolas eléctricas. Para evitarlo, dedujo las leyes de inducción indirectamente, partiendo de consideraciones de trabajo y energía. Llevó a cabo la deducción en dos etapas: primero calculó la fuerza que ejerce un campo magnético variable sobre un conductor en reposo, y después la fuerza que origina el movimiento del conductor a través de un campo magnético.

Maxwell se basó en consideraciones energéticas para deducir la relación que existe entre la fuerza electromotriz sobre un conductor en reposo y la variación de la fuerza magnética. En primer lugar demostró que la energía cinética (densidad) de los remolinos en rotación es  $\mu H^2/8\pi$  como ya dijimos. Después calculó la cantidad de energía que por unidad de tiempo se introduce en el sistema por la acción de la fuerza electromotriz (las fuerzas electromotrices son aquellas que actúan sobre las bolitas eléctricas). Según la ley de Newton de acción y la reacción, la fuerza que los remolinos ejercen sobre las bolas debe ser igual y opuesta a la fuerza de reacción sobre los remolinos. La energía introducida por segundo en los remolinos es igual al producto de esta fuerza de reacción por la velocidad producida en el remolino.

La variación de la energía de un remolino podría también expresarse en términos de la variación de la fuerza magnética, utilizando la fórmula anterior para la densidad de energía de los remolinos. Maxwell logró así relacionar la variación de la fuerza magnética con el producto de la fuerza electromotriz por la velocidad de los remolinos. Y como antes había relacionado ya esta velocidad con la fuerza magnética, llegó por fin a una ecuación que relacionaba la fuerza electromotriz con la variación de la fuerza magnética. La función resultó ser de nuevo un rotacional:  $\nabla \times \mathbf{E} = \mu(d\mathbf{H}/dt)$ . Finalmente, Maxwell señaló que se podía deducir  $\mu\mathbf{H}$  del estado electrotónico  $\mathbf{A}$ :  $\mu\mathbf{H} = \nabla \times \mathbf{A}$ . El estado electrotónico podía identificarse como el momento reducido de los remolinos magnéticos. La fuerza electromotriz es entonces igual a la variación de este momento, como ya se establecía en aquel primer trabajo de Maxwell, "On Faraday's Lines of Force":  $\mathbf{E} = d\mathbf{A}/dt$ .

La segunda etapa de la deducción consistió en deducir la fuerza sobre un conductor en movimiento. En la primera no había tenido en cuenta la posibilidad de que los remolinos pudieran curvarse o alargarse. Ahora, en esta segunda etapa, supuso que el movimiento de un conductor a través de un remolino haría que el remolino tendiera a comprimirse o alargarse. Maxwell demostró que el estirar un remolino tendería a aumentar su velocidad, y el comprimirlo a disminuirla; en este resultado basó su teoría de los conductores en movimiento.

Consideremos un cable recto, perpendicular a los ejes de remolinos paralelos, y moviéndose en dirección perpendicular tanto al eje del cable como a los remolinos. El cable empuja al remolino que tiene delante y lo estira, con lo cual aumenta su velocidad. Así pues, la velocidad de los remolinos delante y detrás de las partículas eléctricas del conductor será diferente. Este diferencial de velocidades origina una fuerza que actúa sobre las bolas eléctricas y las impulsará a moverse por el cable; es decir, el movimiento del cable a través de las líneas magnéticas de fuerza producen una corriente eléctrica. En el trascurso de la deducción, Maxwell descubrió que la fuerza electromotriz debida al movimiento del conductor es el producto vectorial de la velocidad del conductor por la fuerza magnética ( $\mathbf{E} = \mathbf{v} \times \mu\mathbf{H}$ ).

Tres elementos componen, pues la fuerza electromotriz total de un conductor en movimiento:

- la fuerza eléctrica debida a la carga estática,
- la fuerza de inducción electromagnética debida a la variación del estado electrotónico, calculada como si el remolino no se desplazara de su posición,
- la fuerza de inducción electromagnética debida al movimiento del conductor, fuerza que se origina por estiramiento de los remolinos,

$$\mathbf{E} = \nabla\Psi + \frac{d\mathbf{A}}{dt} + \mathbf{v} \times \mu\mathbf{H}$$

Hay que señalar que Maxwell ignoró la fuerza electromotriz debida al movimiento de un medio magnéticamente polarizado. Posiblemente fue Helmholtz el que primero se dio cuenta de esta omisión. El carácter unificado de la fuerza electromotriz es característico de la teoría de Maxwell en "Sobre la física de la fuerza". En versiones posteriores su teoría, la fuerza debida a la variación del conjunto magnético se considera como parte del campo eléctrico, mientras que la fuerza que resulta del movimiento de un conductor es de índole muy diferente y no se la considera como parte integrante del campo eléctrico. En la versión de Lorentz de la teoría de Maxwell se hace especialmente clara esta división. El modelo mecánico de Maxwell fue la última teoría de la electricidad y el magnetismo que tuvo el carácter unificado con que Faraday había soñado.

Después de desarrollar una teoría de la relación entre corrientes y magnetismo, Maxwell añadió la última hipótesis que su mecanismo necesitaba: la elasticidad de los remolinos magnéticos. Su objetivo era triple: en primer lugar, modificar la teoría de la inducción electromagnética; segundo demostrar que su modelo explicaba la carga estática; y por último, demostrar que las perturbaciones del campo electromagnético se propagan



a la velocidad de la luz. Maxwell comenzó la teoría suponiendo que la magnitud del desplazamiento de la materia de los remolinos es directamente proporcional a la fuerza (electromotriz) que actúa sobre la pared del remolino ( $\mathbf{D} = \mathbf{E}/4\pi c^2$ ). La constante  $c$  caracteriza la elasticidad de los remolinos, y  $1/4\pi c^2$  es la capacidad inductiva del medio.

Lo primero que señala Maxwell es la necesidad de modificar la relación que previamente había establecido entre corriente y magnetismo. Con anterioridad había supuesto dos causas para la diferencia de velocidad entre dos remolinos vecinos: o se debía al paso de una corriente continua, o a la presión de un conductor en movimiento. ahora era necesario admitir la posibilidad de un pequeño desplazamiento de las bolas de un dieléctrico. Imaginemos dos bolas eléctricas en un dieléctrico y un remolino entre ambas. Debido a las fuerzas electromotrices, puede que el remolino se halle muy estirado perpendicularmente a su eje. Este estiramiento es análogo a la polarización eléctrica. Si el remolino se recupera, el material que lo constituye retorna a su posición original. Mientras tiene lugar esta del remolino se moverá en direcciones contrarias. Así pues, las bolas eléctricas se pondrán en movimiento en direcciones opuestas, igual que si hubiese conducción. En otras palabras, un cambio de desplazamiento produce, igual que una corriente eléctrica, un campo magnético.

Maxwell expresó esto mismo matemáticamente diciendo que a la corriente de conducción hay que sumarle una corriente de desplazamiento, es decir la tasa de variación del desplazamiento  $d\mathbf{D}/dt$ . Esta corriente total sería la responsable del campo magnético. La relación entre la corriente total y el campo magnético es de nuevo la función rotacional:  $4\pi\mathbf{j} + d\mathbf{D}/dt = \nabla \times \mathbf{H}$ . Maxwell no examinó las consecuencias que para la inducción tenía la corriente de desplazamiento, pese a que esta modificación de la ecuación anterior era, por implicación, una revisión de toda la teoría de la inducción. En lugar de eso, Maxwell la utilizó para demostrar que el modelo podía dar cuenta de las fuerzas eléctricas debidas a cuerpos cargados.

Por raro que parezca - parece claro que una teoría de la carga debería ser el punto de partida para cualquier teoría del electromagnetismo - hasta ahora Maxwell no había considerado la relación entre fuerza electromotriz y carga. Lo que ocurre es que evitó introducir la carga en el modelo, otorgando en cambio un peso fundamental a la corriente y a su relación con el campo magnético. Aunque esto le permitió el desarrollo de una teoría unificada del magnetismo y la corriente, impidió que la carga entrara a formar parte del modelo. La carga es una causa del desplazamiento de la partícula eléctrica fuera del mecanismo propiamente dicho. Para descubrir la relación entre la carga y la fuerza eléctrica, Maxwell tuvo que apoyarse en una deducción más o menos indirecta que tuviera en cuenta todas las hipótesis que se habían formulado sobre el modelo.

Maxwell comenzó estudiando el desplazamiento originado por la presencia de una carga. Encontró la expresión por medio de la ecuación de continuidad de la carga ( $\nabla\mathbf{j} + dQ/dt = 0$ ), que expresa que la variación de la cantidad de carga de una región dada es igual a la diferencia entre la cantidad de corriente que sale de la región y la que entra. La ecuación es, pues, una relación entre cargas y corriente de conducción; la anterior ecuación para la corriente total relaciona la corriente de conducción con el desplazamiento. Combinando ambas, Maxwell descubrió la relación entre la carga y el desplazamiento que ésta produce: si un cuerpo está cargado, el número de líneas de desplazamiento que entran es diferente del de las que salen del cuerpo. A mayor carga, más diferencia ( $Q = \nabla\mathbf{D}$ ). Dada esta relación, ¿cómo sabemos que el campo eléctrico ejercerá una fuerza sobre un cuerpo cargado?

Maxwell se basó en consideraciones energéticas para encontrar la fuerza que actúa sobre un cuerpo cargado. Si dos cuerpos cargados se acercan uno al otro muy lentamente, el campo magnético que se crea es despreciable, y la conservación de la energía debe cumplirse para el campo eléctrico solo. La energía del campo eléctrico viene dada por el trabajo que realizan las fuerzas electromotrices sobre las bolas eléctricas. El trabajo es el producto de la fuerza electromotriz y el desplazamiento producido. Por su anterior demostración, Maxwell conocía la distribución del desplazamiento en torno a una carga, con lo cual podía calcular el cambio de energía producido por el cambio de posición de dos cargas. Esta variación de energía debe ser igual al trabajo

realizado sobre el sistema al mover las cargas en contra de las fuerzas que ejerce el campo.

Incluso es posible demostrar qué fuerzas debe ejercer el campo para que se cumpla el principio de conservación de la energía. Cuando Maxwell llevó a cabo la deducción, obtuvo que las cargas interactúan según la ley del inverso del cuadrado. Es decir, las cargas obedecen la ley de Coulomb. Lo que Maxwell dedujo no fue exactamente la ley de Coulomb, sino esta ley corregida para los dieléctricos,

$$F = c^2 \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (2.1)$$

La constante  $K$  está relacionada con la capacidad inductiva específica mediante la expresión  $\epsilon = 1/4\pi c^2$ .

Esta deducción de la ley de Coulomb ponía fin a dos de las tareas que Maxwell se había planteado:

- 1.- hallar ecuaciones del campo que describan los fenómenos electromagnéticos,
- 2.- probar que estas ecuaciones eran consistentes con los experimentos conocidos.

Y demostró también que su modelo mecánico era una analogía muy próxima al campo electromagnético. No obstante, Maxwell miraba más lejos; quería desarrollar una teoría matemática que identificara la luz con las vibraciones del campo electromagnético. El complejo mecanismo estaba especialmente diseñado para que las ondas transversales de velocidad finita pudieran moverse por el campo y las líneas de fuerza pudieran describir esa vibración lateral de la que hablaba Faraday.

## 2.7. La teoría electromagnética de la luz

El mayor acierto del artículo “Sobre las líneas física de fuerza” fue el de identificar la luz con un fenómeno electromagnético. Posiblemente uno de los principales problemas que llevaron a Maxwell a construir un modelo fue el de desarrollar una teoría donde la inducción tuviera velocidad finita. Para asegurar la finitud de la velocidad, había dotado a su mecanismo de masa y de elasticidad y había acertado en la identificación de muchas de las propiedades mecánicas con magnitudes electromagnéticas conocidas. Si lograba deducir la velocidad de las ondas en el mecanismo a partir de estas propiedades electromagnéticas entonces tendría una predicción que sería contrastable independientemente del mecanismo. El objetivo de Maxwell era, pues, la relación entre la velocidad de inducción y las magnitudes electromagnéticas.

Existía ya una teoría general de la elasticidad que fijaba la velocidad de las ondas transversales en un mecanismo sujeto a las leyes de Newton. Según esta teoría, el cuadrado de la velocidad de las ondas transversales es igual al cociente entre la rigidez (aquí lo simbolizamos con  $r$ , por no estar especificada la naturaleza del medio) y la densidad del medio, ( $v = \sqrt{E/\rho}$ ). El problema se reducía, por lo tanto, al conocimiento de la rigidez y densidad del mecanismo en términos de sus propiedades electromagnéticas. Para resolver el problema Maxwell sentó unas cuantas hipótesis simplificadoras, más o menos arbitrarias.

En primer lugar, supuso que la masa de las bolas eléctricas y su elasticidad eran despreciables. (anteriormente había tenido que prescindir del momento de las bolas en la teoría de inducción.) Toda la elasticidad y toda la masa están en los remolinos. La expresión de la elasticidad del mecanismo estaba ya, pues, a mano: Maxwell había demostrado ya que la densidad de los remolinos ( $\rho$ ) podía correlacionarse con la permeabilidad magnética del medio ( $\mu$ ):  $\rho = \pi\mu$ .

Quedaba luego el problema de hallar la rigidez de los remolinos en términos de magnitudes eléctricas. La propiedad elástica clave de los remolinos es que el desplazamiento de su material es proporcional a la fuerza electromotriz que actúa sobre ellos. La constante de proporcionalidad es análoga a la capacidad inductiva

específica del medio. La cuestión era, por tanto, relacionar la rigidez de los remolinos con la capacidad inductiva específica. El problema se complica por la existencia de dos constantes que caracterizan las fuerzas que se originan en el desplazamiento: la constante de rigidez que determina la resistencia a la torsión, y la constante de elasticidad tridimensional, que determina la resistencia a la compresión o a la dilatación (Aquí se supone que existe una relación lineal entre el desplazamiento y las fuerzas elásticas implicadas.)

Para obtener la relación entre la capacidad inductiva específica y la rigidez, Maxwell tenía antes que construir una teoría del desplazamiento producido por la acción de la fuerza electromotriz y de las fuerzas que se producen por este desplazamiento. La teoría tenía que cumplir una condición: los remolinos tenían que reaccionar a las fuerzas electromotrices de forma que permanecieran en equilibrio en una situación estática. Con esta idea in mente, Maxwell supuso primero que la fuerza electromotriz que actúa sobre la materia que constituye el remolino varía con el seno del ángulo cuyo origen es el punto de contacto de la partícula eléctrica con el remolino. Después supuso que el desplazamiento de la materia de las bolas era puramente tangencial: la materia podía sufrir una torsión alrededor del centro de la bola, pero no podía desplazarse hacia dentro ni hacia fuera. Esta hipótesis era fundamental, ya que sólo permite que se originen en el mecanismo ondas transversales.

Una vez construido en detalle el mecanismo por el que la fuerza electromotriz produce desplazamientos, Maxwell investigó las fuerzas elásticas que éstos producen. El problema estribaba en relacionar el desplazamiento con la constante de rigidez y de elasticidad tridimensional. Aunque Maxwell había supuesto que todo el desplazamiento era tangencial, la tendencia del remolino a contraerse o dilatarse tenía su importancia, porque un remolino tiende a contraerse o dilatarse cuando está sometido a torsión. De hecho, se supone que la presión ejercida al intentar dilatarse o contraerse es el potencial debido a la carga estática, de modo que para relacionar el desplazamiento con las fuerzas en un remolino en equilibrio Maxwell tuvo que admitir que las constantes de rigidez y de elasticidad tridimensional guardan una proporción fija de seis a cinco. Esta proporción es la que se da en un sólido perfecto, donde las fuerzas proceden todas ellas de pares de partículas.

Maxwell pudo finalmente establecer la deseada relación entre la rigidez y la capacidad inductiva específica utilizando todas estas hipótesis sobre los remolinos. Descubrió que la capacidad inductiva específica es igual a  $1/4$  del inverso de la rigidez:  $\epsilon = 1/4\pi c^2$ , donde  $\pi c^2$  es la rigidez. Maxwell había conseguido expresar la velocidad de las ondas transversales del mecanismo en términos de la capacidad inductiva específica y la permeabilidad magnética del medio. La densidad del medio estaba relacionada con la permeabilidad magnética, y la rigidez con la capacidad inductiva específica; se sabía que el cuadrado de la velocidad de las ondas transversales era la razón entre ambas. La fórmula exacta es  $v^2 = c^2/\mu$ . Midiendo la capacidad inductiva específica y la permeabilidad magnética de un medio, podía predecirse la velocidad de las ondas de inducción.

Pero ¿cómo medir en las mismas unidades la capacidad inductiva específica y la permeabilidad magnética, de forma que pueda hallarse en qué proporción están? Hasta ahora sólo hemos descrito experimentos para conocer en términos relativos la mayor o menor permeabilidad magnética de un medio. Y la interacción entre dos polos magnéticos es tanto más débil cuanto más permeable sea el medio. ¿cómo encontrar una medida standard para comparar la capacidad inductiva específica y la permeabilidad magnética de un medio determinado? Para contestar a esta pregunta hay que explicar el problema de establecer unidades electromagnéticas, problema que hasta ahora se ha tratado de evitar porque en general es bastante tedioso y no aporta nada a la comprensión de las concepciones del mundo. Pero hay un punto clave donde los experimentos sí entran en la cuestión: la determinación de la constante  $c$ ; que resulta ser precisamente la velocidad de la luz.

## 2.8. La velocidad de la luz, una constante electromagnética

La dificultad básica a la hora de fijar las unidades de corriente es que tiene que ser compatible con los dos aspectos de la corriente, el eléctrico y el magnético. En principio es fácil fijar una unidad de carga o una unidad de imanación. La e carga puede definirse como la cantidad que ejerce la unidad de fuerza (medida mecánicamente) sobre otro cuerpo cargado, situado a una distancia unidad. De la misma forma, una unidad de polo magnético puede definirse por la fuerza que produce a una distancia unidad. La unidad de corriente se puede establecer en base a unidades magnéticas o electrostáticas. Sea, por ejemplo, un circuito circular que encierra la unidad de área. Si por él pasa una corriente estacionaria, ejercerá una fuerza magnética constante. Podemos decir que se trata de una corriente de intensidad unidad si su fuerza magnética sobre un imán situado a cierta distancia es la misma que la que produciría un imán situado a cierta distancia es la misma que la que produciría un imán, con polos de intensidad unidad, situados a una distancia unidad (suponiendo que el imán está orientado perpendicularmente al plano del círculo). La unidad de carga también se podría definir a partir de consideraciones electromagnética perpendicularmente al plano del círculo). La unidad de carga también se podría definir a partir de consideraciones electromagnéticas, diciendo que es la unidad de carga que pasa por un punto del circuito en un segundo; pero esta unidad pudiera no concordar con la anterior, basada en la electricidad estática. ¿Qué relación existe entre estas dos unidades de carga? O dicho de otro modo, en una unidad de corriente definida desde el punto de vista electromagnético, ¿cuántas unidades de carga, definidas estáticamente, pasan por un punto en un segundo?.

La solución es necesariamente empírica; no se trata de definirla, sino de verla en la práctica; es decir, se trata de determinar qué cantidad de carga por segundo produce cuál intensidad del campo magnético. La dificultad de definir unidades nace de querer relacionar los efectos eléctricos y magnéticos.

Si definimos las unidades de carga electrostáticas y electromagnéticas como antes, la cuestión experimental se plantea así: ¿cuál es la razón entre las unidades de medida electrostáticas y electromagnéticas?, sin entrar en dificultades técnicas podemos ver el problema. Podríamos empezar con dos cartas, pequeñas esferas con carga opuesta, de manera que situadas a una distancia unidad, se atraerán con una fuerza unidad. Después descargaríamos las esferas a través de un circuito que incluyera un electrolito. Faraday ya demostró que el grado de disociación de un electrolito podía utilizarse como medida standard para otras corrientes. Tendríamos, pues un método para ver cuántas unidades de electricidad, medidas electrostáticamente recorren por segundo el circuito. Por otro lado, podríamos construir un imán de intensidad unidad, según la definición anterior, y ver su efecto sobre una aguja magnética de prueba, separada una cierta cantidad del imán.

Después podríamos construir nuestro anillo de área unidad, con un electrolito intercalado en el circuito. Cuando la corriente fuese lo suficientemente intensa para que su acción sobre la aguja sea equiparable a la del imán de intensidad unidad, sabríamos que el circuito está recorrido por una unidad de corriente, definida electromagnéticamente. Con esta intensidad de corriente podríamos comprobar a qué velocidad se descompone el electrolito; esta velocidad nos daría la cantidad e unidades electrostáticas de carga que pasan por segundo. Llamáramos así a la solución del problema: sabríamos cuántas unidades electrostáticas (esu) hay en una unidad electromagnética (emi).

Ahora bien, en todos los argumentos anteriores hemos prescindido de la capacidad inductiva específica y de la permeabilidad magnética; los resultados dependerían del medio en que se realizan las medidas. A mayor capacidad inductiva, obtendríamos un mayor valor para la unidad de carga, medida electrostáticamente. Análogamente, obtendríamos diferentes unidades electromagnéticas en medios de diferente permeabilidad magnética. La manera de tener en cuenta esa variabilidad consiste en elegir un medio como patrón de referencia de todos los demás. El vacío parece ser el medio más natural. Si hallamos la razón entre las unidades anteriores en el vacío, podemos predecir los efectos eléctricos y magnéticos relativos de cualquier otro medio, porque

podemos medir su capacidad inductiva específica y su permeabilidad magnética en relación con las del vacío. El conocimiento de las constantes dieléctricas y magnéticas nos permitiría predecir exactamente en qué medida la relación entre los efectos eléctricos y magnéticos del medio difieren de la del vacío.

Tomando como patrón el vacío, podemos por tanto formular las leyes del electromagnetismo para todos los medios, siempre que conozcamos la constante fundamental del vacío, es decir, la relación entre unidades electrostáticas y electromagnéticas. Pero, ¿qué significan la capacidad inductiva y la permeabilidad magnética del vacío? Desde el punto de vista actual, la respuesta física a esta pregunta no tiene la más mínima importancia, ya que podemos dar a las constantes del vacío cualquier valor numérico sin que varíe el contenido físico de las ecuaciones. Por ejemplo, se le puede dar a ambas constantes el valor 1 e introducir directamente la razón entre las dos en la ecuación que relaciona la corriente con el campo magnético, o bien introducir la proposición implícitamente dando valores apropiados (distintos de 1) a las constantes eléctricas y magnéticas del vacío. El contenido físico es el mismo.

En el artículo de Maxwell, sin embargo, la elección del sistema de unidades no era arbitrario, sino fundamental para sus deducciones. Es decir, si Maxwell hubiera tomado como 1 el valor de las constantes eléctricas y magnéticas, no habría podido deducir las ecuaciones en las que aparece la relación fundamental entre las dos anteriores, ya que éstas no aparecerían en el mecanismo. El hecho es que las constantes estaban tan imbricadas en el mecanismo, que Maxwell pensó que, a través de la masa que la elección de las constantes atribuía a su mecanismo, podría encontrar pruebas de la realidad del mismo. Pensó, por ejemplo, en la posibilidad de que los remolinos tuvieran suficiente diámetro como para que pudieran notarse efectos giroscópicos. Sin embargo, no pudo detectar ninguno.

El sistema de unidades encastrado en las ecuaciones de Maxwell era un sistema electromagnético. En él había utilizado los símbolos  $\mu$  y  $1/4\pi c$ , para representar respectivamente la permeabilidad magnética y la constante dieléctrica, y había establecido la relación entre estas dos constantes y las propiedades mecánicas del mecanismo. Después dedujo la ley del inverso del cuadrado para la electricidad estática y para el magnetismo e interpretó las constantes según el sistema electromagnético. Esta interpretación por implicación convirtió las ecuaciones del mecanismo en leyes electromagnéticas exactas; y en ellas  $\mu$  valía 1 en el vacío y  $c$  en el vacío era la razón entre las unidades magnéticas y eléctricas. El fijar el valor de  $\mu$  en la unidad se debió a que Maxwell dedujo la expresión  $m_1 m_2 / \mu r^2$  para la ley del inverso del cuadrado de polos magnéticos; en el sistema electromagnético, la unidad de polo magnético ejerce la unidad de fuerza a una distancia unidad, por lo cual, la  $\mu$  de la expresión debe valer 1. La unidad de carga en el sistema electromagnético de carga no produce una fuerza unidad a la distancia unidad; dos cargas electromagnéticas iguales se repelen con una fuerza que vale  $k^2$ , siendo  $k$  la razón entre las constantes unidad. Examinemos este punto clave.

Sabemos, por la ley de Coulomb, que dos cargas en reposo se repelen en el vacío con una fuerza  $e_1 e_2$ , donde  $e_1$  y  $e_2$  están, por definición, en unidades electrostáticas,  $r_2$ . Un emu es la cantidad de carga que produce un efecto magnético unidad cuando fluye en una corriente que recorre la unidad de longitud en la unidad de tiempo. Experimentalmente, esta cantidad de carga, situada a la distancia unidad, produce una fuerza eléctrica  $k$  veces la unidad. Una unidad electrostática de carga es aquella que produce una unidad de fuerza eléctrica a una unidad de distancia. Por lo tanto, una cantidad de carga medida en emu ( $e'$ ) contendrá  $k$  veces esa cantidad esu ( $e$ ), es decir,  $e = ke'$ , siendo  $k$  la proporción entre ambas. La anterior expresión de la ley de Coulomb en (esu) tendría la siguiente forma en emu:

$$F = \frac{ke'_1 \cdot ke'_2}{r^2} = k^2 \frac{e'_1 e'_2}{r^2} \quad (2.2)$$

Ya se ha dicho que Maxwell había deducido a través de su modelo que la fuerza que una carga ejerce sobre otra debería tener la expresión  $c^2 e_1 e_2 / r^2$ . Por lo tanto, para que sus ecuaciones fueran consistentes con el sistema electromagnético de unidades bastaba con identificar el valor de  $c$  con el vacío con la razón entre esu

y emu, que hemos llamado más arriba  $k$ . Eso fue lo que hizo Maxwell, y con ello logró completar la relación entre las leyes de su modelo y las del electromagnetismo. En concreto, relacionó la razón entre esu y emu, que se determina experimentalmente, con la velocidad de las ondas transversales en el modelo: pues originalmente había definido  $\mu$  (fijado ahora en el valor 1 en el vacío) como proporcional a la densidad de los remolinos magnéticos ( $\rho = \pi\mu$ ) y había establecido  $c$  (cuyo valor en el vacío era ahora igual al cociente entre esu y emu) como una función de la rigidez de las bolas eléctricas ( $r = \pi c^2$ ). Sólo los remolinos poseían masa, y la rigidez era una propiedad exclusiva de las bolas eléctricas. Por lo tanto, se había establecido la relación entre las propiedades mecánicas que determinan la velocidad de las ondas transversales del mecanismo y una constante que se podía determinar por experimentos electromagnéticos.

Recordemos que la velocidad de las ondas transversales en un mecanismo es la raíz cuadrada del cociente entre la rigidez y la densidad ( $v^2 = r/d$ ). Según las relaciones establecidas por Maxwell, la velocidad de las ondas debería ser  $c/\sqrt{\mu}$ . Como acabamos de ver, en el vacío  $\mu$  vale la unidad y  $c$  es la razón entre unidades electromagnéticas y electrostáticas. Así pues, en el modelo mecánico de Maxwell, la velocidad de las ondas transversales es la misma que la relación entre las unidades electrostáticas y electromagnéticas.

La fórmula  $v = c/\sqrt{\mu}$  es válida no sólo en el vacío sino también en materiales dieléctricos, pudiéndose determinar la  $c$  y la  $\mu$  de estos materiales en relación a los del vacío. Como el valor de  $\mu$  en la mayoría de los tipos de vidrio es aproximadamente 1 la velocidad de las ondas a través del vidrio depende fundamentalmente de su capacidad dieléctrica. La velocidad de la luz en un medio determina su índice de refracción (el grado en que desvía un rayo de luz), con lo cual el índice de refracción de un medio dependería de  $c$ , como hace notar Maxwell, este nexo con lo empírico es algo más tenue que el que proporciona  $c$  en el vacío:

Debido a la naturaleza desconocida, y probablemente complicada, de las reacciones de las partículas pesadas en el medio etéreo, es posible que no podamos descubrir ninguna relación numérica general entre las razones ópticas, eléctricas y magnéticas.

En cualquier caso, si se conociera el valor de  $c$  en el vacío, la teoría podría predecir la velocidad de las ondas transversales en este medio. Maxwell elaboró la teoría en Glenlair, su casa de campo. Al regresar a Londres buscó el valor del cociente entre las unidades electromagnéticas y electrostáticas, que había sido determinado años antes por Wilhelm Weber. Weber había medido la mitad de  $c$  utilizando otro sistema de unidades. Cuando Maxwell consultó el valor de  $c$ , descubrió que el valor medido por Weber coincidía casi exactamente con el de la velocidad de la luz: acababa de nacer la teoría electromagnética de la luz.

## 2.9. Las limitaciones del artículo sobre las líneas físicas de fuerza

El artículo de Maxwell "On Physical Lines of Force" (Sobre las líneas físicas de fuerza) es en algunos aspectos el más extraordinario de la historia de la teoría de campos. En él, Maxwell inventó y trabajó con una teoría que desde un principio creía insostenible, pero que produjo resultados que figuran entre los más fructíferos en la historia de la ciencia. En la mayoría de los demás artículos relacionados con nuestro relato, el autor partía de una idea inicial con cierta consistencia, aunque su elaboración originara luego dificultades y contradicciones. El artículo de Maxwell tiene un carácter distinto, diferente incluso del resto de sus trabajos.

Faraday tenía una idea clara de los entres que debían existir - los campos de fuerza - pero no de las leyes a que estaban supeditados. Carecía de una teoría unificada de la corriente y del campo que pudiera ser contrastada independientemente, y no contaba realmente con leyes matemáticas que describieran el campo. Maxwell no sabía más que Faraday acerca de qué pasaba en el campo o cuál era la interacción entre éste y las corrientes; pero, confiado en que la verdad estaba en alguna teoría de campos, inventó una teoría no del todo coherente y avanzó con ella hacia una idea más elaborada.

Tras obtener los resultados, llegó la hora de reconsiderar la teoría que los había hecho posibles. Había dos direcciones para desarrollar la teoría: elaborar aún más el mecanismo hasta dar con una teoría completamente mecánica del electromagnetismo, o bien liberar a la teoría del mecanismo. Maxwell escogió la segunda opción, quizá por que intuyera que su modelo no tenía salvación.

Los obstáculos que se oponían al desarrollo del modelo eran enormes. En primer lugar había problemas generales, como el de explicar la interacción de la materia con el mecanismo. Por ejemplo, si los remolinos tienen masa y oponen resistencia a ser penetrados por las bolas eléctricas, ¿por qué un cuerpo neutro no encuentra dificultad al moverse en el seno de un campo? Se supone que los remolinos son propulsados por las bolas eléctricas en el interior de un material conductor, y a su vez actúan sobre ellas. Si los remolinos no tienen masa ¿cómo pueden penetrar en el conductor? Si sus superficies pueden rozar con las bolas eléctricas, ¿por qué no también contra las demás partículas del cable? Las partículas eléctricas tienen que interactuar con la materia del conductor, porque se supone que la carga es el resultado de la acción deformadora de la materia del conductor ( o del dieléctrico) sobre las partículas eléctricas. Como vemos, las cuestiones relacionadas con la interacción materia-partículas son fundamentales en la teoría, y no pueden ignorarse.

El mecanismo adolecía de muchas dificultades internas además de la de su interacción con la materia ordinaria. Una de ellas era la forma de los remolinos. Si fueran cilindros, las bolas no constituirían un engranaje perfecto; en unos sitios desplazarían a los remolinos y en otros ni los tocarían. Además, se moverían de un lado a otro y dispararían energía, incluso en un campo estacionario. Para evitar estas dificultades, Maxwell los dibujó como hexágonos cuyas aristas se mueven como correas de transmisión. Pero, por otro lado, había calculado la fuerza centrífuga de los remolinos como si se tratara de un fluido girando circularmente en torno a un eje, de manera que la hipótesis de la forma hexagonal no sería realmente consistente.

Y quedan aún muchas otras dificultades. Al calcular las tensiones se supone que los remolinos son fluidos, pero al mismo tiempo impenetrables por las bolas. Todos los cálculos se realizan sobre remolinos cuyos ejes siguen la dirección de las líneas de fuerza tal y como las dibujó Faraday, pero una vez que son alterados por un conductor en movimiento, por ejemplo, dejan de estar en esa dirección.

Los problemas de la interacción entre el mecanismo y la materia así como los de índole interna, era problemas graves. ¿Merecería la pena abordarlos?, si hubiera realmente remolinos y bolas eléctricas en el campo la respuesta sería afirmativa; pero el modelo era muy poco satisfactorio desde el punto de vista metafísico, y Maxwell decidió abandonarlo. La escasa verosimilitud del modelo radica en la supuesta existencia de dos tipos radicalmente distintos de materia: las partículas eléctricas son bolitas que carecen de masa, mientras que los remolinos magnéticos son largas barras flexibles con masa, y entre ambos tipos está el espacio vacío. ¿Por qué iban a tener propiedades tan diferentes los dos tipos de materia? La hipótesis de gran diversidad sólo podía justificarse dentro del modelo mismo. Los remolinos tendrían cabida en un modelo cartesiano del mundo, pero Maxwell admitía tanto el vacío como la materia. Además, como Maxwell lo había considerado los efectos gravitatorios sobre su modelo mecánico, parecía necesario aceptar la hipótesis de que la materia ordinaria era distinta de las bolas y de los remolinos. Para resumir: se había introducido con cierta arbitrariedad gran cantidad de diversidad , y tanto una como otra son inaceptables para la metafísica.

Los remolinos eran consistentes con la metafísica cartesiana, y quizá eso explique la debilidad de Maxwell sentía por ellos. Incluso creía que el campo estaría constituido por algún mecanismo que obedeciera las leyes de Newton. Pero sabía también que su modelo era poco satisfactorio desde cualquier punto de vista físico o metafísico. Por esto se decidió a considerar el problema de liberar las ecuaciones y la teoría electromagnética de la luz de su modelo mecánico.

## 2.10. Una teoría dinámica del campo electromagnético

La nueva tarea de Maxwell era obtener, al margen del mecanismo, los mismo resultados que se contenían en “Sobre las líneas físicas de fuerza”, para lo cual tenía que enfrentarse con dos dificultades. La primera consistía en independizar las ecuaciones del modelo específico, y la segunda, deducir, también si el modelo, la velocidad de las ondas electromagnéticas. La primera tenía fácil solución: Maxwell se limitó a enunciar las ecuaciones para magnitudes electromagnéticas, al margen de cualquier posible explicación mecánica que se pudieran esgrimir. Pero entonces ¿cómo interpretar las ecuaciones si no era mediante el modelo mecánico?

Maxwell creía que la verdadera explicación de sus ecuaciones tenía que basarse en algún mecanismo supeditado a las leyes de Newton. No conocía la naturaleza de tal mecanismo, pero para satisfacer las ecuaciones tendría que poseer energía en cada punto del campo. Por eso insistió Maxwell en que todo lo relacionado con la energía fuera interpretado literalmente. Así explicaba el cambio de rumbo respecto del primer artículo:

En alguna ocasión anterior intenté describir un tipo particular de movimiento y un tipo particular de tensión, dispuestos de tal modo que explicaran los fenómenos. En el presente artículo no hago ninguna hipótesis de esta clase; y al utilizar términos como momento eléctrico y elasticidad eléctrica... pretendo sólo dirigir la atención del lector hacia fenómenos mecánicos que le ayuden a comprender los eléctricos.. las expresiones de este tipo que aparecen a lo largo del artículo han de tomarse como ilustrativas, nunca como explicatorios.

Al hablar de la energía del campo, me gustaría, no obstante, que se me entendiera al pie de la letra. Toda energía es lo mismo que energía mecánica, ya exista en forma de movimiento o de elasticidad o en cualquier otra. La única cuestión es : ¿dónde reside? Según las teorías antiguas, reside en los cuerpos electrizados, circuitos conductores e imanes, en la forma de una magnitud desconocida llamada energía potencial, o capacidad de producir ciertos efectos a distancia. en nuestra teoría reside en el campo electromagnético, en el espacio que rodea a los cuerpos electrizados y magnéticos, y también en los cuerpos mismos. Y reside en dos formas diferentes, que cabe describir, sin hacer hipótesis, como polarización magnética y polarización eléctrica, o bien, según una hipótesis muy probable, como el movimiento y la tensión de un mismo medio.

Este enunciado es toda la explicación que Maxwell dio a sus ecuaciones , y la teoría pasó a sus discípulos en este estado de semiinterpretación. Había aspectos en que la teoría era susceptible de gran desarrollo sin necesidad de tomar postura sobre cuestiones de interpretación. En otros aspectos, eso no era posible. la teoría podía aplicarse directamente a interacciones microscópicas entre cargas y corrientes; tenía capacidad de predicción sobre todo lo concerniente a la carga y la corriente, cualesquiera que fueran las magnitudes mecánicas relacionadas con ellas. Pero en problemas como la interacción microscópica entre las cargas, el campo y la materia, la teoría no podía desarrollarse sin una interpretación más avanzada. La dificultad estribaba en la divergencia entre la teoría interpretada mecánicamente y la teoría sin hipótesis relacionadas con una interpretación de este tipo. De hecho, la teoría sin hipótesis mecánicas siguió interpretándose, y la interpretación fue, en ciertos aspectos importantes, más newtoniana que faradayana.

Maxwell no analizó en detalle su interpretación no mecánica, probablemente porque la consideraba no definitiva. Sin embargo, la utilizó ampliamente. Para entendernos, a partir de ahora se denominará *interpretación operativa*. Sus características eran

- 1.- las magnitudes electromagnéticas se consideran fundamentales, y
- 2.- el campo es una realidad independiente.

Consideremos la primera característica. En las ecuaciones de Maxwell aparecen magnitudes que representan la carga, la corriente, la fuerza magnética, etc. ya hemos dicho que es posible fijar y medir unidades de estas magnitudes sin introducir para nada propiedades mecánicas del campo, como masa y velocidad. Es más,



Maxwell fue incapaz de descubrir pruebas independientes de las propiedades mecánicas, como el momento angular de los remolinos magnéticos. Por tanto, se pueden considerar como fundamentales las magnitudes electromagnéticas y contrastar las ecuaciones independientemente de cualquier hipótesis mecánica.

Aunque no existía una interpretación mecánica, Maxwell deseaba retener una interpretación de campo; y no era del todo y no era del todo injustificado el interpretar así las ecuaciones: según las teorías de acción a distancia, cabía decir que la causa directa de una fuerza que actúa sobre un cuerpo es otro cuerpo. La fuerza total que actúa sobre un cuerpo podía explicarse por la posición y energía de los cuerpos que lo rodean. Pero ese no es el caso de la teoría de Maxwell. Por ejemplo, es posible que la causa de la radiación que incide sobre un cuerpo de prueba haya tenido lugar en el pasado; mientras la radiación viajaba hasta el cuerpo habrá transcurrido un tiempo. Como la acción sobre un cuerpo cargado no puede atribuirse a ninguno de los cuerpos contemporáneos, parece natural considerar el campo como causa de la acción.

En varios aspectos importantes, la interpretación operativa constituía una ruptura con la interpretación mecánica. Aquí, los campos eléctricos y magnéticos era explicados como materia en movimiento. el mecanismo satisfacía los deseos de Faraday de encontrar una teoría unificada de los campos eléctricos y magnético, aunque nunca pensó que fuese newtoniano. En la interpretación operativa, sin embargo, los campos son independientes y se interpenetran. En el mecanismo, los aspectos eléctricos y magnéticos del campo están relacionados por un tipo de acción contigua, mientras que en la interpretación operativa las fuerzas magnéticas variables originan fuerzas eléctricas en el mismo punto que aquellas.

El desdoblamiento de los dos campos trae consigo consecuencias físicas y metafísicas. Como ya se ha dicho, los remolinos del mecanismo tienen momento angular y deberían dar lugar a efectos giroscópicos. Y también deberían manifestarse otros efectos en la interacción microscópica entre la corriente y el campo. Por ejemplo, está el problema de cómo se produce calor debido al flujo de partículas por un cable. Maxwell decía que cuando las partículas eléctricas pasaban de un remolino al siguiente saltaban de un lado para otro y se producía calor. No explicitó el proceso por el que las partículas eléctricas podían interaccionar con la materia ordinaria, pero es evidente que en una teoría detallada de la interacción habría que tener en cuenta el tamaño de las partículas y la masa de los remolinos. Todas estas consideraciones han desaparecido en la interpretación operativa. En lugar de que los remolinos actúen sobre partículas contiguas, el campo actúa directamente sobre la materia conductora en el mismo punto que el campo.

Esto nos lleva a la ruptura más drástica de la interpretación operativa: materia y campo con entes distintos e interpenetrantes. En el modelo mecánico no quedaba claro cómo tenía lugar la interacción entre materia y campo. La teoría de la carga en el mecanismo era lo que más se acercaba a una teoría de la interacción materia-campo. Según Maxwell, la materia ordinaria se carga al desplazar el material de las bolas eléctricas que contiene en su interior. No investigó el mecanismo concreto por el que se produce el desplazamiento, sino que evitó el problema utilizando la ley de conservación de la energía. Pero, como se supone que tanto los remolinos como las bolas están constituidos por materia ordinaria que opone resistencia a la penetración y obedece a las tres leyes de Newton, era de esperar que el mecanismo consistiese en algún tipo de acción contigua. La materia y el campo serían, pues, de la misma sustancia y obedecerían a las mismas leyes; pero la interpretación operativa rechaza esta posibilidad de desarrollo, que sería una teoría unificada del campo y la materia.

En la interpretación operativa, el campo actúa directamente sobre la materia situada en el mismo punto que la intensidad que actúa; no hay ningún mecanismo de acción contigua unificado. El rechazo de Maxwell hacia el programa de una teoría unificada del campo no era inconsciente sino deliberada. Más tarde, en 1873, diría:

[Faraday] habla incluso de las líneas de fuerza de un cuerpo como si en algún sentido fuesen parte de él mismo, de modo que en su acción sobre cuerpos distantes no puede decidirse que actúe donde no está.

Pero esa no es una idea dominante de Faraday. Su opinión, creo yo, era más bien que el campo del espacio está lleno de líneas de fuerza, cuya distribución depende de la de los cuerpos situados en su seno, y que la acción mecánica y eléctrica sobre cada cuerpo viene determinada por las líneas que convergen en él.

La separación de materia y campo fue el origen de gran número de dificultades, algunas de las cuales siguen sin resolverse. Muchas de ellas pudieron evitarse en el nivel macroscópico, como ya se ha dicho; pero cualquier teoría de los dieléctricos, de la electrólisis o de la relación entre carga y materia tenía que enfrentarse con el problema de la interpretación correcta de las ecuaciones. El resto de nuestra historia es, en cierta medida, un intento de superar los problemas suscitados por la teoría de Maxwell.

En resumen: Maxwell adoptó una teoría de la carga y de la corriente fundamentada en el concepto de campo, pero rechazó la teoría de los campos de fuerza de Faraday aplicada a la materia. Su ruptura con Faraday le llevó a mantener una visión del mundo no del todo coherente. Antes de analizar los problemas de la teoría de Maxwell, veamos cómo desarrolló con éxito su interpretación operativa.

## 2.11. El desarrollo de la teoría sin el mecanismo

En el artículo "A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field" (1864-65), Maxwell trató de resolver dos problemas. Uno era liberar del mecanismo a las ecuaciones, el otro deducir la velocidad de las ondas electromagnéticas sin utilizar el mecanismo. Como ya se explicó en el apartado anterior, el primero era de fácil solución, aunque suscitó grandes problemas. El segundo era un problema clave. La teoría electromagnética de la luz era el resultado más importante de su trabajo "On Physical Lines of Force", pero en la deducción de la velocidad de las ondas electromagnéticas Maxwell había utilizado hipótesis muy explícitas relacionadas con el mecanismo. Entre otras cosas, había supuesto que la masa de las bolas eléctricas era despreciable, que el desplazamiento era puramente tangencial, y que sus módulos de rigidez y compresión guardaban una proporción determinada. Todas estas hipótesis se utilizaron como premisas en la deducción de la velocidad de las ondas electromagnéticas.

- a) Ecuación de la corriente total:  $\mathbf{T} = \mathbf{j} + \frac{d\mathbf{D}}{dt}$
- b) Ecuación de la fuerza magnética:  $\mu\mathbf{H} = \nabla \times \mathbf{A}$
- c) Ecuación de la corriente eléctrica:  $\nabla \times \mathbf{H} = 4\pi\mathbf{T}$
- d) Ecuación de la fuerza electromotriz:  $\mathbf{E} = \mathbf{v} \times \mu\mathbf{H} - \frac{d\mathbf{A}}{dt} - \nabla\psi$
- e) Ecuación de la elasticidad eléctrica:  $\mathbf{E} = k\mathbf{D}$
- f) Ecuación de la resistencia eléctrica:  $\mathbf{E} = -r\mathbf{j}$
- g) Ecuación de la electricidad libre:  $\rho + \nabla\mathbf{D} = 0$
- h) Ecuación de la continuidad:  $\frac{d\rho}{dt} + \nabla\mathbf{D} = 0$

Las ecuaciones están expresadas como aparecen en "una teoría dinámica del campo electromagnético".  $\mathbf{T}$  significa corriente total,  $\mathbf{j}$  corriente de conducción,  $\mathbf{D}$  desplazamiento,  $\mathbf{H}$  la fuerza magnética,  $\mathbf{A}$  estado electrotónico o potencial vector,  $\mathbf{E}$  fuerza electromagnética y  $\mathbf{v}$  velocidad del conductor en movimiento. Todas

son magnitudes vectoriales. El resto son escalares,  $\mu$  es la permeabilidad magnética,  $\psi$  el potencial electrostático escalar,  $k$  el inverso de la corriente dieléctrica,  $r$ , la resistencia del conductor y  $\rho$  la densidad de carga.

La notación vectorial la inventó Heaviside y Gibbs después de la muerte de Maxwell. Maxwell escribió , para cada ecuación , de las seis primeras, tres ecuaciones: una para la componente  $x$ , otra para la  $y$ , y otra para la  $z$ .

Las ecuaciones de la (a) a la (e) quedaron ya explicadas en páginas anteriores, la (f) es la forma diferencial de la ley de Ohm, generalizada para dieléctricos y cargas en movimiento; y la ecuación (h) establece que la variación de la densidad de carga en una región es igual a la cantidad de corriente que entra o sale de la región. Los nombres de las ecuaciones son los que propuso Maxwell.

Maxwell había demostrado que las ondas electromagnéticas se mueven a la velocidad de la luz. El problema era deducir este resultado a partir de las ecuaciones únicamente. Caso de conseguirlo, Maxwell podría decir que sus ecuaciones constituían, junto con la interpretación operativa, una poderosa teoría del electromagnetismo. Reexaminó las ecuaciones, y corrigió de paso los errores que se habían realizado en los signos de las magnitudes expuestas. Halló luego una posible relación entre sus ecuaciones y la velocidad de la luz. Descubrió que la existencia de la corriente de desplazamiento por sí misma confiere a las líneas de fuerza la inercia de la que Faraday hablaba. Utilizando exclusivamente sus ecuaciones, Maxwell demostró que la velocidad de las ondas electromagnéticas es  $c$ . Repitamos una vez más que el valor de esta constante coincide con la velocidad de la luz y con el cociente entre las unidades electromagnética y electrostáticas. Combinando las ecuaciones (b) y (c), obtenemos:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = \mu \nabla \times \mathbf{H} = \nabla(\nabla \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A} \quad (2.3)$$

Con las ecuaciones (a) y (d), Maxwell obtiene estas otras:

$$\begin{aligned} \mathbf{T} &= \frac{d\mathbf{D}}{dt} \\ \mathbf{E} &= -\frac{d\mathbf{A}}{dt} - \nabla\psi \end{aligned} \quad (2.4)$$

Utilizando como hipótesis simplificadora la no existencia de corrientes ni de conductores en la región considerada.

Y la ecuación e, es  $\mathbf{E} = k\mathbf{D}$ . Combinando estas tres ecuaciones se obtiene:

$$\mathbf{T} = \frac{1}{k} \left( -\frac{d^2 \mathbf{A}}{dt^2} - \frac{d\nabla\psi}{dt} \right) = 0 \quad (2.5)$$

Sustituyendo el valor de  $T$  en la primera ecuación obtenemos:

$$k (\nabla(\nabla \mathbf{A}) \nabla^2 \mathbf{A}) + 4\pi\mu \left( -\frac{d^2 \mathbf{A}}{dt^2} - \frac{d\nabla\psi}{dt} \right) = 0 \quad (2.6)$$

Si tomamos el rotacional en ambos miembros de la expresión, los términos con gradiente se anulan, y utilizando la ecuación (b) se obtiene:

$$\nabla^2 \mu \mathbf{H} = \left( \frac{4\pi\mu}{k} \right) \frac{d^2 \mu \mathbf{H}}{dt^2} \quad (2.7)$$

Que es una ecuación de ondas. Este tipo de ecuaciones eran ya por entonces muy conocidas y se sabía que sus soluciones eran ondas.

En el caso de ondas planas, la velocidad es  $\sqrt{4\pi\mu/k}$ . Maxwell volvió a demostrar que  $k$  en el vacío es  $4\pi c^2$ , siendo  $c$  la razón entre unidades electromagnéticas. De aquí se deduce que en el vacío, donde  $\mu = 1$ , las ondas se propagan con una velocidad igual a  $c$ .

La velocidad de propagación de las ondas magnéticas a través de un medio depende de su permeabilidad magnética y de su constantes dieléctrica, y la función coincide con la predicha por el modelo mecánico. Maxwell demostró también que la onda magnética debe ser transversal, igual que las del otro modelo mecánico. Así pues, había conseguido obtener los mismos resultados que daba el modelo mecánico, sólo que utilizando únicamente sus ecuaciones. En realidad había ido un poco más allá, porque ahora había demostrado que la onda era transversal. En su primer artículo había demostrado que las ondas del mecanismo eran transversales, pero no había estudiado sus propiedades eléctricas y magnéticas.

A partir de sus ecuaciones, Maxwell dedujo nuevas propiedades de las ondas electromagnéticas, que expuso en sus obras "A Dynamicla Theory of the Electromagnetic Field" y en el Treatise on Electricity and Magnetism (Tratado sobre electricidad y magnetismo), publicado ocho años más tarde, en 1873. En el primero, Maxwell demuestra que el mecanismo sólo pueden originarse ondas transversales. Este resultado era muy importante, porque uno de los problemas más urgentes que tenían planteado las teorías de la luz basadas en el éter era el diseño de un medio tal que no permitiera la creación de ondas longitudinales en su seno.

Posteriormente, Maxwell dedujo una relación entre la conductividad y la transparencia. Cuando más conductor es un material, más absorbe la luz. La idea era que cuando las ondas electromagnéticas penetran en un conductor, "habrá no sólo desplazamientos eléctricos, sino también verdaderas corrientes de conducción, en las cuales la energía eléctrica se transforma en calor, debilitándose así la ondulación". De ahí que los conductores sean opacos, y los medios transparentes, buenos aislantes. Al aplicar este resultado, nos topamos sin embargo, con el mismo problema de siempre: la relación entre la materia y el campo. La resistencia de un cuerpo ¿es la misma cuando está sometido a las rápidas vibraciones de la luz que cuando está bajo la tensión continua de una batería? Si la teoría de Maxwell es válida, la respuesta es negativa. Los electrolitos son buenos conductores, pero son transparentes, y un pan de oro deja pasar más luz que la que predice Maxwell. Maxwell explicaba el proceso de electrólisis suponiendo que durante el poco tiempo que actúa la fuerza eléctrica en una dirección no es capaz de separar las moléculas del electrolito. En cambio, no podía explicar la gran transmisión de luz a través de un pan de oro, ni tampoco, por supuesto, que la mayoría de los dieléctricos fueran opacos. Pero al no existir una teoría detallada de la interacción entre la materia y el campo, todos estos problemas no constituyen una refutación directa de la teoría de Maxwell.

Maxwell calculó la energía de los componentes eléctricos y magnéticos de las ondas electromagnéticas y descubrió que la mitad de esta energía era eléctrica y la otra mitad magnética. En el Treatise demostraba detalladamente cómo la onda de desplazamiento eléctrico acompaña a la magnética. (Maxwell dedujo la ecuación de ondas del vector potencial y halló que la fuerza eléctrica es igual a su variación con el tiempo.) en el caso de un rayo de luz polarizado en un plano, la onda eléctrica se propaga junto a la magnética dispuesta perpendicularmente entre sí. Maxwell señaló también que la resultante es una presión; debido a su escasa magnitud, no llegó a descubrirse hasta el siglo XX. Finalmente, Maxwell demostró que su teoría explicaba también, de una forma parecida a las demás teorías, el comportamiento de la luz polarizada en cristales.

Maxwell había encontrado relación entre la transparencia y la resistencia eléctrica, y entre el poder de refracción y las constantes dieléctricas y magnéticas. La inexistencia de una teoría de la interacción entre materia y el campo impidió que todas estas relaciones pudieran ser contrastadas directamente. Pero aún así eran de gran importancia, ya que demostraban que la teoría electromagnética de la luz podía, en principio, contrastarse con independencia de las otras teorías de la luz, y que en estas pruebas entraban todos los aspectos electromagnéticos de la luz y de los cuerpos sobre los que inciden. La teoría de Maxwell prometía ser útil en el descubrimiento de nuevos hechos sobre la estructura de la materia y la naturaleza de la luz, y también sobre

electricidad y magnetismo.

Después de deducir directamente de sus ecuaciones la teoría de la luz, Maxwell se dio cuenta de la gran importancia de la corriente de desplazamiento, y en el *Treatise* señaló que la corriente de desplazamiento era “una de las principales peculiaridades” de su teoría. La corriente de desplazamiento aparecía en todas las deducciones de las ondas electromagnéticas en la teoría de Maxwell. Se ve fácilmente que la existencia de la corriente de desplazamiento influiría mucho en el comportamiento del campo. Pensemos en una carga en reposo que es súbitamente acelerada. En las teorías de acción a distancia, todo el campo se aceleraría a la vez, y esto iría acompañado de la difusión de un campo magnético, igual que si fuese una corriente de conducción ordinaria. Este campo magnético variaría con el campo eléctrico. La fuerza magnética variable crearía a su vez fuerzas electromotrices inducidas, que serían la causa de un desplazamiento, también variable, que de nuevo originaría un campo magnético.

En resumen, el campo sería escenario de interacciones sumamente complejas, que no tendrían lugar sin la existencia de desplazamiento y de corrientes de desplazamiento. Por desgracia, no se conoce ninguna explicación intuitiva de por qué la corriente de desplazamiento necesita de ondas, ni de las diferentes configuraciones de ondas y campos a que da lugar. Para obtener estos resultados es necesario utilizar deducciones formales.

Hay una determinada propiedad matemática de la corriente total que puede darnos una idea del papel de las corrientes de desplazamiento. Esta propiedad es la *divergencia* de la corriente total es cero. Se trata de la misma condición observada en el movimiento de un fluido incompresible, y vela porque el fluido sólo fluya en circuitos cerrados. Dentro de la teoría de Maxwell, esta condición significa que todas las corrientes totales son cerradas, lo cual, como es natural, no ocurre si sólo incluimos la corriente de conducción e ignoramos la de desplazamiento. Un condensador como la botella de Leyden puede descargarse a través de un cable al cual está conectado. a través del cable pasará una corriente, pero el cable no es cerrado, sino que termina en los dos lados del aislante. Como mencionó Maxwell en su “*Note on the Electromagnetic Theory of Light*” (1868), en el caso de esa descarga la corriente total sí es cerrada. La corriente de desplazamiento que tiene lugar en el aislante completa el circuito.

Según esta idea ( del desplazamiento), la corriente producida cuando se descarga un condensador constituye un circuito completo, y su trayectoria podía ser trazada incluso dentro del mismo dieléctrico mediante un galvanómetro adecuado. No tengo noticia de que nadie lo haya hecho, y por tanto esta parte de la teoría, aunque es una consecuencia natural ( del resto) , no está verificada experimentalmente. El experimento sería, sin duda, muy complicado y delicado.

Aunque Maxwell sabía que su teoría podía contrastarse con corrientes abiertas, no conocía los tipos más importantes de contrastación, que más tarde descubrirían Helmholtz y Hertz.

## 2.12. La actitud de Maxwell hacia la interpretación de su teoría

Maxwell había demostrado la gran potencia de sus ecuaciones, pero en realidad no tenía claro cómo interpretarlas. Aunque en “*A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*” y en el *Treatise* utilizó la interpretación que aquí ha sido llamada operativa, nunca la discutió explícitamente, ni tampoco estudió sus relaciones con otras posibles interpretaciones, de manera que sus discípulos hallaron grandes dificultades para entender la teoría. no comprendían claramente el modelo del mundo en que pretendía articularse, aun sabiendo que era distinto de los conocidos.

Para entender más fácilmente la actitud de Maxwell hacia la interpretación, vamos a remontarnos al origen de la teoría. en un principio Maxwell se apoyó en la imagen cartesiana del mundo, donde el medio omnipresente obedece las leyes de la mecánica de Newton. Pero, incapaz de construir una explicación mecánica viable del

campo electromagnético, independizó las ecuaciones de la analogía mecánica y, a pesar de no contar con un mecanismo para el campo, trató de defender una teoría de campos. Presentó para ello un fuerte argumento, la deducción de la teoría electromagnética de la luz, así como la posibilidad de contrastarla. Y expuso además otros argumentos que no he mencionado aquí: demostró que la idea de que la energía y la tensión están localizadas en el campo es congruente con su teoría, y señaló, aunque no muy convincentemente, que su teoría podía deducirse a partir de los experimentos de Faraday.

Maxwell abogó también por sus ecuaciones señalando que son consistentes con la hipótesis de un mecanismo. Presentó este argumento por primera vez en "A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field" y consistía en una "ilustración dinámica" del mecanismo de la inducción electromagnética. En esta ilustración dinámica, Maxwell suponía "un cuerpo  $C$  conectado de tal suerte a dos puntos de alimentación  $A$  y  $B$ , que su velocidad es  $p$  veces la de  $A$  y  $q$  veces la de  $B$ ". Además, supuso que  $A$  y  $B$  experimentan una resistencia proporcional a su velocidad. Sin ningún otro conocimiento del mecanismo, Maxwell logró deducir el efecto sobre  $B$  de un cambio de velocidad en  $A$ . Para ello utilizó la formulación lagrangiana de la teoría de Newton, porque utilizando las ecuaciones de Lagrange no hace falta introducir las fuerzas específicas de ligadura en el mecanismo.

En esta analogía,  $A$  y  $B$  representan dos corrientes, el cuerpo  $C$  es el mecanismo que posee energía en el campo. La resistencia eléctrica es análoga a la resistencia (proporcional a la velocidad) que se opone al movimiento de los cuerpos  $A$  y  $B$ . Maxwell comprobó que podía desarrollar una teoría detallada de la inducción basándose en esta analogía. La forma concreta en que depende la velocidad de  $B$  de los cambios de la de  $A$  se corresponde exactamente con el efecto inductivo de una corriente sobre otra.

Las consecuencias de este argumento no fueron precisamente las que Maxwell buscaba. Demostró que la teoría era consistente con la existencia de un mecanismo newtoniano en el campo, pero esto quería decir que habría un número infinito de mecanismos que podían explicar la interacción entre corrientes. Utilizando las ecuaciones de Lagrange, podía llevarse a cabo la deducción sin tener en cuenta los detalles de la relación entre una corriente y la siguiente. Maxwell había pretendido que su artículo fuera "una teoría dinámica del campo electromagnético", pero el efecto del argumento fue poner en tela de juicio la empresa de buscar una explicación mecánica del campo. La teoría expuesta en el artículo no depende realmente de la hipótesis de un mecanismo newtoniano. En lugar de ser el primer paso hacia la consecución de una teoría mecánica, resultó ser el primero en el sentido opuesto.

En el *Treatise*, Maxwell volvió a considerar el problema de una interpretación mecánica. Mencionó el argumento de Thomson de la existencia de remolinos en medios donde tenía lugar la rotación de la luz de Faraday, y trató de desarrollar la teoría de los remolinos al margen de su antiguo mecanismo. De nuevo, los aplicó a la explicación de la rotación de Faraday. Maxwell concluía así su discusión:

Creo que hay buenas pruebas para creer que en el campo magnético se da cierto fenómeno de rotación, que esta rotación la ejecutan gran número de porciones muy pequeñas de materia que giran en torno a sí mismas, orientados sus ejes en la dirección de la fuerza magnética, y que las rotaciones de todos estos remolinos dependen unas de otras a través de algún tipo de mecanismo que las conecta.

El intento que en aquel momento hice ("Sobre las líneas físicas de fuerza") para imaginar un modelo operativo de este mecanismo hay que tomarlo por lo que generalmente es: una demostración de que es posible pensar en el mecanismo como algo capaz de proporcionar una conexión mecánicamente equivalente a la conexión real que existe entre las partes del campo electromagnético. El problema de determinar el mecanismo necesario para establecer una clase concreta de conexión entre los movimientos de las partes de un sistema admite siempre infinitas soluciones. Algunas pueden ser más torpes o más complejas que otras, pero todas deben satisfacer las condiciones de un mecanismo general.

No obstante, los siguientes resultados de la teoría son de gran valor:

- 1.- La fuerza magnética es el efecto de la fuerza centrífuga de los remolinos.
- 2.- La inducción electromagnética de las corrientes es el efecto de las fuerzas que entran en juego cuando varía la velocidad de los remolinos.
- 3.- La fuerza electromotriz tiene su origen en la tensión que actúa sobre el mecanismo de conexión.
- 4.- El desplazamiento eléctrico proviene de la deformación elástica del mecanismo de conexión.

Maxwell creía que la explicación verdadera resultaría al final ser de naturaleza mecánica, pero en el tema de la interpretación mecánica se hallaba en una posición bien incómoda. Consiguió demostrar que había infinitos mecanismos coherentes con sus ecuaciones, pero no logró describir ni uno sólo en concreto. No obstante, tampoco le preocupaba demasiado este estado tan poco satisfactorio de su teoría, pues presentía que el problema del mecanismo tendría que aguardar hasta que se hicieran investigaciones experimentales más profundas en torno a la relación entre las moléculas de la materia ordinaria y la electricidad. Así exponía Maxwell la situación:

Estamos tan poco familiarizados con los detalles de la constitución molecular de los cuerpos, que no es probable que en relación con un determinado fenómeno - como el de la acción magnética sobre la luz- se pueda formar ninguna teoría satisfactoria hasta que, mediante una inducción fundada en una serie de casos diferentes en los que se compruebe que los fenómenos visibles dependen de acciones donde intervienen las moléculas, logremos averiguar algo más concreto sobre las propiedades que deben atribuirse a una molécula para satisfacer las condiciones que imponen los hechos observados.

Maxwell fue también un gran pionero en la teoría molecular del calor, una vertiente de su trabajo que hasta ahora no se ha tocado pero se abordará en el capítulo dos.

En resumen, Maxwell creía que la interpretación correcta de sus ecuaciones era un mecanismo subordinado a las leyes de la mecánica newtoniana, pero no sabía cuál tenía fe en el mecanismo y no creyó necesario analizar explícitamente la interpretación operativa que utilizó para hacer sus predicciones electromagnéticas. En su deseo de conseguir una teoría mecánica del campo se esforzó por demostrar que las ecuaciones apoyaban una interpretación en función de campos y que podían interpretarse mediante un mecanismo newtoniano.

En Inglaterra la postura de Maxwell tenía algunos adeptos. En 1871-79, durante la última parte de su vida, fue el primer profesor de física experimental de la Universidad de Cambridge, donde por aquel entonces estudiaban J. J. Thomson, G. G. Gitzgerald y J. H. Poynting. Todos ellos entendían la teoría según la concepción de Maxwell y Oliver Heaviside, autodidacta inglés, no dudó un momento en tomar la teoría de Maxwell como programa de investigación. Pero los físicos del continente, como Helmholtz, tomaron como punto de partida la teoría newtoniana de la gravitación, y la de Maxwell se les hacía muy rara. El primer problema era establecer la diferencia entre Maxwell y la escuela de acción a distancia, de Ampère y Weber.

Maxwell murió joven, en 1879, a la edad de 48 años, dejando como herencia sus brillantes ideas para que las desarrollaran sus sucesores. Estos se encontraron con una teoría poderosa y compleja a la vez, llena de dificultades, pero también de prometedoras líneas de investigación.

## TERMODINÁMICA

### 3.1. El problema inicial

Rumford, se preguntaba por qué el calórico salía del cañón. Los partidarios de la teoría del calórico contestaron que era porque el taladro rompía en pedazos el metal, dejando que el calórico contenido en éste fluyese hacia afuera, como el agua de un jarrón roto.

Rumford, escéptico, revolvió entre los taladros y halló uno completamente roto y desgastado. “Utilizad éste”, dijo. Los obreros objetaron que no servía, que estaba gastado; pero Rumford repitió la orden en tono más firme y aquellos se apresuraron a cumplirla.

El taladro giró en vano, sin hacer mella en el metal; pero en cambio producía aún más calor que uno nuevo. Imagínense la extrañeza de los obreros al ver el gesto complacido del conde.

Rumford vio claro que el calórico no se desprendía por la rotura del metal, y que quizá no procediese siquiera de éste. El metal estaba inicialmente frío, por lo cual no podía contener mucho calórico; y, aun así, parecía que el calórico fluía en cantidades ilimitadas. Para medir el calórico que salía del cañón, observó cuánto se calentaba el agua utilizada para refrigerar el taladro y el cañón, y llegó a la conclusión que si todo ese calórico se reintegrara al metal, el cañón se fundiría.

Rumford llegó al convencimiento que el calor no era un fluido, sino una forma de movimiento. A medida que el taladro rozaba contra el metal, su movimiento se convertía en rápidos y pequeñísimos movimientos de las partículas que constituían el bronce. Igual daba que el taladro cortara o no el metal; el calor provenía de esos pequeñísimos y rápidos movimientos de las partículas, y, como es natural, seguía produciéndose mientras girara el taladro. La producción de calor no tenía nada que ver con ningún calórico que pudiera haber o dejar de haber en el metal.

El trabajo de Rumford quedó ignorado durante los cincuenta años siguientes. Los científicos se contentaban con la idea del calórico y con inventar teorías que explicaran cómo fluía de un cuerpo a otro. La razón, o parte de la razón, es que vacilaban en aceptar la idea de diminutas partículas que experimentaban un movimiento rápido y pequeñísimo que nadie podía ver. Sin embargo, unos diez años después de los trabajos de Rumford, John Dalton enunció su teoría atómica. Poco a poco, los científicos iban aceptando la existencia de los átomos. ¿No sería, entonces, que las pequeñas partículas móviles de Rumford fuesen átomos o moléculas (grupos de átomos)? Podía ser. Pero ¿cómo imaginar el movimiento de billones y billones de moléculas invisibles? ¿Se movían todas al unísono, o unas para un lado y otras para otro, según una ley fija? ¿O tendrían acaso un movimiento aleatorio, al azar, con direcciones y velocidades arbitrarias, sin poder decir en qué dirección y con



qué velocidad se movía cualquiera de ellas?

El matemático suizo Daniel Bernouilli, a principios del siglo XVIII, algunas décadas antes de los trabajos de Rumford, había intentado estudiar el problema del movimiento aleatorio de partículas en gases. Esto fue mucho antes que los científicos aceptaran la teoría atómica y, por otro lado, las matemáticas de Bernouilli no tenían tampoco la exactitud que requería el caso. Aun así, fue un intento válido.

En los años 60 del siglo XIX entró en escena James Clerk Maxwell, quien partió del supuesto que las moléculas que componían los gases tenían movimientos aleatorios, y mediante agudos análisis matemáticos demostró que el movimiento aleatorio proporcionaba una bella explicación del comportamiento de los gases.

Maxwell mostró cómo las partículas del gas, moviéndose al azar, creaban una presión contra las paredes del recipiente que lo contenía. Además, esa presión variaba al comprimir las partículas o al dejar que se expandieran. Esta explicación del comportamiento de los gases se conoce por la teoría cinética de los gases.

Maxwell suele compartir la paternidad de esta teoría con el físico austriaco Ludwig Boltzmann. Los dos, cada uno por su lado, elaboraron la teoría casi al mismo tiempo.

### 3.2. La solución de Maxwell

Una de las importantes leyes del comportamiento de los gases afirma que un gas se expande al subir la temperatura y se contrae al disminuir ésta. Según la teoría del calórico, la explicación de este fenómeno era simple: al calentarse un gas, entra calórico en él; como el calórico ocupa espacio, el gas se expande; al enfriarse el gas, sale el calórico y aquél se contrae. ¿Qué tenía que decir Maxwell a esto? Por fuerza tuvo que pensar en el experimento de Rumford. El calor es una forma de movimiento. Al calentar un gas, sus moléculas se mueven más deprisa y empujan a las vecinas hacia afuera. El gas se expande. Al disminuir la temperatura, ocurre lo contrario y el gas se contrae.

Maxwell halló una ecuación que especificaba la gama de velocidades que debían tener las moléculas gaseosas a una temperatura dada. Algunas se movían despacio y otras deprisa; pero la mayoría tendrían una velocidad intermedia. De entre todas estas velocidades había una que era máximamente probable a una temperatura dada. Al subir la temperatura, aumentaba también esa velocidad más probable.

Esta teoría cinética del calor era aplicable tanto a líquidos y sólidos como a gases. En un sólido, por ejemplo, las moléculas no volaban de acá para allá como proyectiles, que es lo que sucedía en un gas; pero en cambio podían vibrar en torno a un punto fijo. La velocidad de esta vibración, lo mismo que las moléculas proyectiles de los gases, obedecían a las ecuaciones de Maxwell.

Todas las propiedades del calor podían ser exploradas igual de bien por la teoría cinética que por la del calórico. Pero aquélla daba fácilmente cuenta de algunas propiedades (como las descritas por Rumford) que la teoría del calórico no había conseguido explicar bien.

La teoría del calórico describía la transferencia de calor como un flujo de calórico desde el objeto caliente al frío. Según la teoría cinética, la transferencia de calor era resultado del movimiento de moléculas. Al poner en contacto un cuerpo caliente con otro frío, sus moléculas, animadas de rápido movimiento, chocaban con las del objeto frío, que se movían más lentamente. Como consecuencia de ello, las moléculas rápidas perdían velocidad y las lentas se aceleraban un poco, con lo cual fluía calor del cuerpo caliente al frío. La concepción del calor como una forma de movimiento es otra de las grandes ideas de la ciencia. Maxwell le dio mayor realce aún mostrando cómo utilizar el movimiento aleatorio para explicar ciertas leyes muy concretas de la naturaleza cuyo efecto era totalmente predecible y nada aleatorio.

La idea de Maxwell fue luego ampliada notablemente, y los científicos dan hoy por supuesto que el compor-

tamiento aleatorio de átomos y moléculas pueden producir resultados muy asombrosos. Cabe, inclusive, que la vida misma fuese creada a partir de la materia inerte en los océanos mediante movimientos aleatorios de átomos y moléculas.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Las teorías de los campos de fuerza: desde Faraday hasta Einstein, William Berkson; versión española de Luisa González Seco. Madrid: Alianza, D.L. 1981
- [2] **Libros maravillosos**
- [3] Revista eureka. Enseñanza y Divulgación de la Ciencia.
- [4] Introducción a los conceptos y teorías de las Ciencias Físicas por Gerald Holton; revisada y ampliada por Stephen G. Brush. Reverté, 1993.
- [5] La temperatura, Ya. Smorodinski; traducido del ruso por Carlos Rodríguez. Moscú: Editorial Mir, 1983.
- [6] Classical electrodynamics, John David Jackson, 3ra edición, John Wiley and Sons, Inc., 1999.
- [7] Electrodinámica Clásica, Brédov y otros, Editorial Mir.
- [8] Lecciones de Física, Volumen II: Electromagnetismo y materia, Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, Matthew Sands. México: Pearson Educación, 1998-2000.
- [9] Biografía de la Física. George Gamow, 1ª ed., 6ª reimp. Madrid: Alianza, 1998.
- [10] Física, Marcelo Alonso, Edward J. Finn. México: Prentice-Hall, cop. 2000.