

JAMES CLERK MAXWELL

MAXWELL: PENSAR LO INVISIBLE

James Clerk Maxwell y el arte de razonar más allá de
lo que podía verse

Juan Segurola

Versión 1.5 · 11 de septiembre de 2026

© 2026 Juan Segurola. All Rights Reserved.

En homenaje al 150.^º aniversario, en 2014, de la presentación por Maxwell de
A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field ante la Royal Society en 1864.
El artículo se publicó formalmente en 1865.

Índice

Prefacio	3
Prólogo: El número antes de que la teoría estuviera a salvo	11
1. El niño de Glenlair	21
2. Geometría, vidrio y tensión invisible	30
3. Cambridge, analogía y la física que Maxwell heredó	41
4. El color: inferir el ojo a partir de lo que ve	54
5. Faraday y Maxwell	68
6. Saturno: lo que no puede ser estable	79
7. Moléculas que nadie podía seguir	89
8. Vórtices, ruedas locas y un medio mecánicamente concebible	108
9. Desplazamiento y medio elástico	122
10. La velocidad	137
11. Una teoría dinámica sin la maquinaria de vórtices	153
12. ¿Cuánta maquinaria debe ser real?	162
13. Cuando fallaron las moléculas de Maxwell	171
14. Estabilidad, reguladores y ley estadística	179
15. La medición como teoría	186
16. Reconstruir a Maxwell	194
17. Lo que se conservó, lo que se eliminó y lo que regresó	201
18. De Maxwell al problema de la relatividad	213
Epílogo: Pensar lo invisible	223

Prefacio

Conocemos los electrones y la estructura atómica. Sabemos que las ondas de radio, la luz visible, la radiación infrarroja y los rayos X pertenecen a la misma familia electromagnética. Sabemos que los conceptos clásicos de espacio y tiempo acabarían transformándose con la relatividad.

Todo eso quedaba más allá del horizonte científico de Maxwell.

Otras ideas que hoy nos resultan igualmente familiares ocupaban para él una posición muy distinta. Que la luz fuera una perturbación electromagnética no era un conocimiento heredado, sino una conclusión que contribuyó a construir. Que los gases debieran entenderse como poblaciones inmensas de moléculas en movimiento seguía siendo una imagen física discutida, y el uso de la probabilidad para describir su comportamiento colectivo formaba parte de una ciencia todavía en desarrollo.

Para Maxwell, parte de lo que hoy llamamos física establecida seguía siendo hipótesis, inferencia o teoría inacabada.

Esa diferencia crea una de las mayores dificultades para comprenderlo.

Un estudiante moderno puede encontrarse con las ecuaciones de Maxwell en unas pocas páginas de un manual. La electricidad y el magnetismo ya han sido unificados. El campo electromagnético ya forma parte del lenguaje. La velocidad de la luz ya está esperando dentro de las ecuaciones. Las incertidumbres históricas han desaparecido. Las teorías rivales han sido eliminadas. La notación se ha modernizado. Argumentos desarrollados a lo largo de décadas se han comprimido en una secuencia lógica limpia.

El resultado es una física extraordinariamente poderosa, pero un mal lugar desde el que comprender el descubrimiento.

El destino se ha vuelto tan familiar que el viaje puede parecer casi inevitable.

No lo fue.

Este libro comienza intentando eliminar esa inevitabilidad.

Su tema es James Clerk Maxwell, pero su preocupación más profunda es un problema que va más allá de cualquier científico individual:

¿Cómo podemos aprender algo real sobre una parte de la naturaleza que no podemos ver directamente?

La física del siglo XIX se enfrentó repetidamente a este problema.

La electricidad podía producirse, medirse y transmitirse, pero su naturaleza física seguía siendo objeto de disputa. Los efectos magnéticos podían cartografiarse y manipularse, mientras que el mecanismo que había detrás era incierto. La luz podía reflejarse, refractarse, polarizarse y hacerse interferir, pero la naturaleza del medio a través del cual supuestamente viajaba seguía sin resolverse.

El comportamiento de los gases podía medirse con gran precisión, aunque ningún físico podía seguir las trayectorias de sus moléculas individuales. La estructura interna responsable de la percepción humana del color no podía inspeccionarse directamente. Incluso la constitución de los anillos de Saturno tenía que inferirse a partir de la observación astronómica y la mecánica, en lugar de tocarse, muestrearse o examinarse.

No eran problemas vacíos esperando a que un genio los llenara con la respuesta correcta. Estaban saturados de posibilidades competidoras.

La física del siglo XIX contenía éteres mecánicos, acciones a distancia, partículas eléctricas, líneas de fuerza, medios elásticos, hipótesis moleculares y analogías matemáticas. Los científicos coincidían con frecuencia en los resultados experimentales mientras discrepaban profundamente sobre lo que esos resultados significaban.

Maxwell trabajó dentro de ese paisaje en disputa.

La historia familiar dice que unificó la electricidad y el magnetismo, descubrió que la luz es electromagnética y dio a la física las ecuaciones que hoy llevan su nombre.

Todo eso requiere matices.

Las ecuaciones que la mayoría de los lectores conoce hoy no son simplemente las ecuaciones que Maxwell escribió en su forma moderna. Su teoría electromagnética se desarrolló a través de varias representaciones matemáticas y físicas diferentes. Parte de la imagería mecánica que utilizó

era explícitamente provisional. Algunas predicciones funcionaron de manera impresionante. Otras no. Partes de su teoría fueron reinterpretadas, simplificadas o rechazadas por científicos posteriores.

Incluso el Maxwell que encontramos hoy en los manuales es, en parte, una creación de generaciones posteriores.

Esa historia importa, pero este libro plantea otra pregunta antes de llegar al desenlace conocido.

¿Qué tenía realmente Maxwell delante en cada etapa? ¿Qué se había medido ya? ¿Qué teorías estaban disponibles? ¿Cuáles de ellas sabemos que conocía? ¿Qué representaban sus ecuaciones en aquel momento? ¿Qué cambió de un artículo al siguiente? ¿Qué conservó cuando cambió un modelo físico? ¿Qué abandonó? ¿Y qué hicieron de manera distinta otros científicos enfrentados a evidencias relacionadas?

Estas últimas preguntas son importantes porque este libro no pretende ser una biografía en la que el genio excepcional se presupone en la primera página y se confirma en todas las siguientes.

Maxwell puede resultar distintivo. O puede resultar un participante especialmente poderoso dentro de una cultura más amplia de analogía matemática, modelización mecánica e inferencia indirecta en el siglo XIX. Incluso distintas partes de su ciencia pueden revelar maneras diferentes de razonar.

Esa posibilidad debe permanecer abierta.

Una biografía incapaz de descubrir que su interpretación central es errónea no está investigando realmente a su sujeto. Está ilustrando una conclusión elegida de antemano.

Hay otra tentación a la que este libro se resistirá.

La creatividad científica suele describirse mediante momentos de revelación. Newton ve caer una manzana. Un científico sueña una solución. Otro se aleja de un problema difícil y de pronto lo comprende.

Estas historias resultan atractivas porque comprimen años de pensamiento en una escena fácil de recordar. Pero también difuminan cosas muy diferentes.

Una observación no es una teoría.

Una intuición no es una demostración.

Un modelo no es necesariamente una afirmación sobre la realidad.

Un resultado matemático no es automáticamente una interpretación física.

Y una interpretación física acertada todavía no equivale a una confirmación experimental.

Con Maxwell, la distinción es especialmente importante.

Las evidencias conservadas no nos dan acceso irrestricto a su pensamiento privado. Los artículos científicos terminados suelen presentar un argumento en el orden en que puede justificarse ante los lectores, no necesariamente en el orden en que surgió para el autor. Los recuerdos posteriores pueden mostrar cómo un científico llegó a describir un descubrimiento después de que ocurriera, sin proporcionar por ello un registro transparente del proceso mental original.

Por ese motivo, este libro no intentará narrar episodios no documentados dentro de la mente de Maxwell.

Cuando la interpretación vaya más allá del registro conservado, se identificará como interpretación en lugar de presentarse como hecho documentado.

El libro seguirá algo que podemos examinar con mayor seguridad:

las representaciones cambiantes que dejó tras de sí.

Aparece una analogía fluida. Después, una estructura mecánica. Luego, una formulación matemática distinta. Ciertas relaciones se conservan. Algunos mecanismos desaparecen. Las mediciones restringen lo que sigue siendo posible. Un problema encontrado en un dominio puede reaparecer más tarde en otro, aunque esa recurrencia no debe confundirse de antemano con la prueba de un método unificado.

Este rastro documental no nos entrega la conciencia de Maxwell. Nos da algo históricamente más fiable: evidencia de un trabajo científico que cambia de forma.

Y quizá eso sea suficiente para plantear una pregunta más precisa sobre la creatividad.

Tal vez lo interesante de la ciencia de Maxwell no fuera una provisión inusual de intuiciones misteriosas. Tal vez residiera, en parte, en la forma en que negociaba una frontera difícil: utilizar mecanismos físicos con suficiente fuerza como para hacerlos productivos, al tiempo que a veces se abstenía de comprometerse con su verdad literal; permitir que las relaciones matemáticas sobrevivieran cuando la imagen que ayudó a generarlas ya no inspiraba la misma confianza.

Esto es solo una proposición de trabajo.

Debe sobrevivir a la comparación.

William Thomson también utilizó representación mecánica y analogía. W. J. M. Rankine desarrolló mecanismos hipotéticos sofisticados mientras reflexionaba explícitamente sobre distintos tipos de teoría física. Gustav Kirchhoff, Hermann von Helmholtz, Wilhelm Weber, Rudolf Clausius y otros se enfrentaron a cuestiones relacionadas desde direcciones diferentes.

Su presencia es esencial.

Sin ellos, Maxwell solo sería comparado con el futuro, y el futuro es un rival injusto.

Faraday es todavía más importante.

Michael Faraday y Maxwell abordaron los problemas físicos con recursos intelectuales muy diferentes. El *Diary* experimental de Faraday conserva huellas inusualmente ricas del trabajo científico en curso. Los artículos matemáticos y la correspondencia de Maxwell conservan otro tipo de registro.

Por tanto, la relación entre ambos no es simplemente la historia familiar de un genio experimental seguido por un genio matemático.

Las ideas de Faraday sobre la inducción, la acción dieléctrica, el magnetismo, la luz y las líneas de fuerza contenían compromisos físicos propios. Maxwell no se limitó a traducirlas a ecuaciones. Las seleccionó, transformó y amplió.

En algunos momentos hizo matemáticamente visibles aspectos del mundo de Faraday.

En otros, las matemáticas cambiaron el mundo que se representaba.

Ese intercambio está cerca del centro de este libro.

Pero el trabajo electromagnético de Maxwell no puede entenderse de forma aislada.

Mientras desarrollaba ideas sobre electricidad y magnetismo, también estudiaba el color, el movimiento molecular, la medición y la estabilidad.

Esa simultaneidad importa.

El Maxwell que construía modelos mecánicos de un medio electromagnético era también el Maxwell que había empezado a tratar estadísticamente poblaciones enormes de moléculas invisibles. El físico que intentaba inferir los mecanismos de la visión del color a partir de experimentos de igualación trabajaba durante el mismo periodo amplio en el que pensaba sobre estructuras que no podían observarse directamente en electricidad y magnetismo.

El joven matemático que investigó la estabilidad de los anillos de Saturno se enfrentó a otra versión de un problema científico recurrente: cuando la inspección directa es imposible, ¿qué puede decirnos la restricción matemática sobre lo que un sistema puede y no puede ser?

Estos paralelismos pueden revelar una unidad en la práctica científica de Maxwell.

O quizá no.

La cronología se expondrá antes de ofrecer esa interpretación.

Por ello, la historia avanzará en gran medida en el orden en que Maxwell encontró sus problemas, en lugar de separar su vida en categorías retrospectivas como «el Maxwell electromagnético», «el Maxwell estadístico» y «el Maxwell del color».

Esos Maxwells eran una sola persona. Sus problemas se solapaban en el tiempo. Sus posibles conexiones deben tener la oportunidad de emerger, no fabricarse a posteriori.

El libro continuará también después de la muerte de Maxwell.

Murió en 1879, a los 48 años, antes de que las ondas electromagnéticas experimentales transformaran la recepción de su teoría y mucho antes de que el mundo tecnológico configurado por la electrodinámica del siglo XIX adquiriera su forma en el siglo XX.

Después de su muerte, otros científicos comenzaron a reconstruirlo.

Su teoría fue reescrita. Su notación cambió. Las imágenes mecánicas perdieron autoridad. Ciertas magnitudes fueron relegadas a un segundo plano. Algunas regresaron más tarde. Una teoría matemática compleja acabó convirtiéndose en el conjunto compacto de ecuaciones que hoy imprimen los manuales.

Einstein heredó no simplemente la teoría original de Maxwell, sino versiones de Maxwell ya transformadas por Hertz, Lorentz y otros.

Observar esta vida posterior nos permite distinguir al menos dos preguntas históricas diferentes:

¿Qué construyó realmente Maxwell?

¿Y qué decidió después la física que Maxwell había construido?

No siempre son la misma pregunta.

Esa diferencia es una de las razones por las que el Maxwell histórico sigue siendo interesante incluso cuando la física ya es conocida.

Por tanto, el propósito de este libro no es hacer a Maxwell más profético.

Es casi lo contrario.

Cuanto más cuidadosamente eliminamos el conocimiento del futuro, más extraordinarias se vuelven algunas de sus decisiones, mientras que otras resultan menos misteriosas.

Nos encontramos con un científico rodeado no de ignorancia, sino de conocimientos competidores. Vemos mediciones con incertidumbres importantes en lugar de constantes de manual. Vemos teorías antes de que su notación se volviera familiar, modelos antes de que la historia seleccionara qué partes sobrevivirían, errores y problemas sin resolver.

Y vemos lugares en los que el propio Maxwell sabía que su teoría había alcanzado una dificultad, en vez de fingir que la física posterior ya estaba contenida dentro de ella.

Este es el Maxwell que quiero comprender.

No la figura de mármol situada al comienzo de la física moderna.

No simplemente el nombre asociado a cuatro ecuaciones.

Y no un visionario que de algún modo poseyera conocimiento de descubrimientos que todavía no habían ocurrido.

Un físico en pleno trabajo, intentando establecer qué podía inferirse legítimamente a partir de un mundo físico incompleto y discutido.

Si podemos recuperar ese mundo con suficiente disciplina, quizá sea posible plantear otra pregunta.

No:

¿Cómo vio Maxwell el futuro?

Sino:

¿Cómo decidió Maxwell qué podía inferir legítimamente la física cuando el mecanismo subyacente permanecía oculto, era objeto de disputa o quizá ni siquiera estaba ahí para ser encontrado?

Ahí comienza este libro.

Prólogo

El número antes de que la teoría estuviera a salvo

El 19 de octubre de 1861, James Clerk Maxwell escribió a Michael Faraday.

Había estado trabajando sobre electricidad y magnetismo.

El artículo en el que aparecería aquel trabajo todavía no estaba terminado.

Su maquinaria era elaborada.

El espacio estaba lleno de un medio electromagnético. La acción magnética se representaba mediante celdas rotatorias. Los procesos eléctricos pronto exigirían aún más maquinaria. El mecanismo era hipotético. En la Parte II, publicada anteriormente en 1861, Maxwell ya había descrito la conexión mediante ruedas locas como provisional y temporal.

Y, sin embargo, las matemáticas habían producido algo que, a su juicio, podía ponerla a prueba.

Le dijo a Faraday:

«La concepción a la que he llegado ha conducido, al desarrollarla matemáticamente, a algunos resultados muy interesantes, capaces de poner a prueba mi teoría...»

Conviene detenerse en la frase.

Capaces de poner a prueba mi teoría.

No de demostrarla.

No de revelar la constitución final de la naturaleza.

De ponerla a prueba.

Un número eléctrico

Maxwell había utilizado las mediciones eléctricas de Wilhelm Weber y Rudolf Kohlrausch.

Habían determinado una relación entre distintos sistemas de medida eléctrica.

La magnitud tenía dimensiones de velocidad.

No era una medición de la luz.

Procedía de la electricidad.

Maxwell relacionó esa magnitud eléctrica con las propiedades mecánicas de su medio electromagnético propuesto.

Después introdujo una suposición adicional.

Le dijo a Faraday que, tras haber calculado la elasticidad del medio electromagnético en el aire, estaba:

| «suponiendo que es la misma que la del éter luminífero».

Bajo esa suposición, calculó la velocidad de las vibraciones transversales.

El resultado fue:

193.088 millas por segundo.

Otro número

Maxwell colocó entonces a su lado un valor que atribuía a la medición directa de Fizeau de la velocidad de la luz:

193.118 millas por segundo.

La diferencia era minúscula.

Unas treinta millas por segundo sobre más de 193.000.

Tal como Maxwell tenía las cifras delante, la coincidencia era extraordinaria.

Escribió:

| «Esta coincidencia no es meramente numérica».

Resulta tentador convertir este episodio en el instante en que Maxwell descubrió de repente que la luz era electromagnética.

Los documentos no exigen semejante escena.

Muestran algo más preciso.

Una suposición ya había entrado en el cálculo.

Después, una comparación numérica reforzó la confianza de Maxwell en ella.

La fórmula vino primero

La parte siguiente de la carta aporta una evidencia contemporánea de un valor excepcional.

Maxwell dijo a Faraday:

«Desarrollé las fórmulas en el campo, antes de ver el número de Weber...»

Según el propio relato de Maxwell, las fórmulas precedieron al número de Weber.

La carta registra después la secuencia con mayor detalle: las fórmulas se desarrollaron en el campo; se consultó el número de Weber; a partir de él se determinó la elasticidad; Maxwell supuso la misma elasticidad para el éter luminífero; de ahí se obtuvo la velocidad de onda; y solo entonces llegó la comparación óptica.

Eso basta para convertir la comparación en una prueba genuina en un sentido importante.

No nos dice todo lo que Maxwell ya sabía sobre la escala aproximada de las velocidades eléctricas.

No nos dice si conocía todos los resultados anteriores pertinentes.

No reconstruye un momento privado de sorpresa.

Pero sí establece un orden de actos documentados:

fórmulas,

número de Weber,

elasticidad,

suposición de la misma elasticidad para el éter luminífero,

velocidad de onda,

comparación óptica.

La teoría y la relación

A continuación Maxwell añadió la frase que será importante a lo largo de todo este libro.

Pensaba que ahora había:

«una fuerte razón para creer, sea o no mi teoría un hecho, que el medio luminífero y el electromagnético son uno solo».

El matiz es extraordinario.

Sea o no mi teoría un hecho.

Un resultado producido dentro de una teoría podía merecer confianza incluso cuando el estatuto literal de la teoría completa seguía sin resolverse.

Eso no significa que Maxwell fuera indiferente al mecanismo.

Estaba construyendo uno con un detalle extraordinario.

Significa que distintas partes de la construcción podían soportar pesos probatorios diferentes.

Pero los números no eran tan limpios como parecían

Hay otra razón para no convertir la carta en una leyenda.

El valor óptico que Maxwell citó a Faraday no era el número que Fizeau había publicado realmente.

La reconstrucción histórica indica que Maxwell había encontrado 193.118 millas por segundo en un manual de J. A. Galbraith y Samuel Haughton, donde el valor se atribuía a Fizeau.

El resultado publicado por Fizeau era distinto.

Cuando Maxwell publicó la Parte III de *On Physical Lines of Force* en enero de 1862, volvió a utilizar otro valor óptico.

Allí las velocidades eléctrica y óptica diferían aproximadamente un 1,3 por ciento.

La coincidencia casi perfecta de la carta privada ya había desaparecido.

Maxwell siguió extrayendo la inferencia.

La evidencia volvería a moverse

En 1865 ya estaba disponible la medición óptica mejorada de Léon Foucault.

Su valor se alejaba más del número electromagnético de Maxwell que el valor de Fizeau que Maxwell había impreso en 1862.

Maxwell incluyó el mismo ese número menos favorable.

La teoría sobrevivió.

Después, en 1868, Maxwell, con Charles Hockin realizando las comparaciones de galvanómetro y derivador, volvió a medir la relación entre unidades eléctricas.

Su resultado desplazó sustancialmente el valor eléctrico, hasta unos 288.000.000 metros por segundo, por debajo de todas las estimaciones ópticas que Maxwell había publicado.

La teoría sobrevivió también a eso.

Por tanto, la célebre coincidencia numérica nunca fue un único hecho fijo situado fuera de la historia.

Sus valores cambiaron.

Su contexto probatorio cambió.

Su interpretación cambió.

¿Por qué empezar aquí?

Porque el episodio contiene en miniatura la dificultad central de la ciencia de Maxwell.

Algo no puede verse directamente.

Se construye una representación.

La representación contiene supuestos.

Las matemáticas revelan una relación.

La medición la restringe.

Una comparación respalda parte de la construcción.

Pero el éxito no nos dice automáticamente qué parte de la representación debe creerse de manera literal.

Ese problema reaparece una y otra vez en la obra de Maxwell.

Tensión oculta

Años antes, Maxwell había estudiado los patrones producidos cuando se sometían sólidos transparentes a esfuerzos.

El estado interno del material no podía inspeccionarse sin más.

Sus consecuencias sí.

Color

Inferiría propiedades de la visión humana a partir de igualaciones controladas de color.

La maquinaria fisiológica misma permanecía en gran medida oculta.

Saturno

Determinaría de qué no podían estar hechos los anillos de Saturno preguntándose qué constituciones propuestas eran dinámicamente inestables.

No hacía falta viajar a Saturno.

Moléculas

Describiría poblaciones de moléculas que ningún observador podía seguir individualmente.

La probabilidad sustituiría a las trayectorias exhaustivas.

Electromagnetismo

Y, en el trabajo que lo hizo famoso, llenaría el espacio aparentemente vacío con representaciones cada vez más sofisticadas, para después dejar de lado buena parte de esa maquinaria detallada en el artículo de 1865 y conservar, sin embargo, relaciones que aquella maquinaria había ayudado a revelar.

Una palabra peligrosa: genio

A Maxwell se lo llama con frecuencia un genio.

La palabra no explica casi nada.

Si significa que produjo una obra científica de consecuencias extraordinarias, es inocua.

Si significa que la intuición llegaba por medio de una facultad privada inaccesible a la reconstrucción histórica, se convierte en una excusa para no examinar lo que hizo realmente.

Este libro toma el camino contrario.

Sigue representaciones fechadas.

¿Qué información estaba disponible?

¿Qué sabemos que Maxwell conocía?

¿Qué escribió?

¿Qué cambió entre una representación y la siguiente?

¿Qué sobrevivió?

¿Qué falló?

Conocemos el final

Ese es nuestro principal inconveniente.

Sabemos que existen ondas electromagnéticas.

Sabemos que el éter mecánico no sobrevivió.

Sabemos que la teoría cinética se volvió central para la física estadística.

Sabemos que los anillos de Saturno están compuestos principalmente por enormes cantidades de partículas separadas.

Sabemos de electrones, relatividad y mecánica cuántica.

Maxwell no.

El futuro no puede utilizarse como evidencia disponible para él.

No era una caja negra vacía

El mundo desconocido de la física del siglo XIX tampoco estaba vacío.

Allí donde la física posterior colocaría campos, electrones o conjuntos estadísticos, Maxwell y sus contemporáneos ya tenían contenidos rivales.

Las líneas de fuerza de Faraday.

Las partículas eléctricas interactuantes de Weber.

Éteres elásticos sólidos.

Los vórtices moleculares de Rankine.

Las moléculas de Clausius.

Analogías mecánicas de muchas clases.

El problema no era únicamente que el interior no pudiera verse.

Había demasiadas maneras plausibles de llenarlo.

¿Qué cuenta como evidencia?

Por eso el mecanismo por sí solo no podía decidir.

Un modelo oculto tenía que ganarse su papel científico a través de sus consecuencias.

Podía reproducir leyes conocidas.

Predecir una relación nueva.

Sobrevivir a una prueba de perturbación.

Explicar una regularidad experimental.

O fallar.

El fracaso importa a lo largo de todo este libro porque nos dice qué partes de una representación no sobrevivieron a restricciones independientes.

Los resultados erróneos de Maxwell no se eliminarán de la historia para que los correctos parezcan inevitables.

Una pregunta a la que el libro puede no lograr responder

Existe un segundo peligro.

Después de leer suficiente Maxwell, casi cualquier rasgo recurrente puede empezar a parecer exclusivamente maxwelliano.

Por eso este libro no se limitará a acumular ejemplos de su uso de analogías, modelos o mecanismos provisionales.

Sus contemporáneos también los utilizaban.

William Thomson lo hacía.

William Rankine lo hacía.

Otros separaban descripción y mecanismo de una forma aún más tajante.

La pregunta comparativa queda, por tanto, abierta desde el principio:

¿Utilizó Maxwell las representaciones provisionales de una manera significativamente distintiva, o estamos viendo una práctica científica más amplia del siglo XIX magnificada por estudiar de cerca a un solo hombre?

La respuesta puede ser la segunda, porque deliberadamente se permite que la prueba falle. Este libro considerará debilitado o derrotado el patrón candidato si los métodos de Maxwell difieren fundamentalmente de un dominio a otro, si las mismas prácticas son igualmente características de sus contemporáneos, si su relación con el experimento cambia radicalmente entre materias o si la supuesta unidad solo aparece después de que historiadores posteriores reorganicen su obra.

Estas condiciones se enuncian aquí antes de juzgar los casos para que la conclusión no pueda elegir su prueba después de conocer el resultado.

El primer documento ya nos advierte

La carta de octubre de 1861 no ofrece una filosofía de la ciencia.

Pero sí proporciona una restricción útil.

Maxwell podía escribir, en una sola carta, que un resultado matemático era capaz de poner a prueba su teoría y que la inferencia física resultante podía seguir siendo importante «sea o no mi teoría un hecho».

La distinción aparece en sus propias palabras.

El resto del libro pregunta con qué frecuencia reaparece esa distinción, cuánto trabajo intelectual realiza y si los contemporáneos de Maxwell afrontaron el mismo problema de manera diferente.

No hace falta un Eureka

No necesitamos conocer el instante exacto en el que Maxwell «comprendió» la naturaleza electromagnética de la luz.

No necesitamos imaginarlo mirando un número con asombro.

La secuencia documental ya es más rica que una historia semejante.

Formó una concepción.

Desarrolló las fórmulas.

Consultó el número de Weber.

Determinó a partir de él la elasticidad.

Supuso la misma elasticidad para el éter luminífero.

Obtuvo la velocidad de onda.

Comparó el resultado con un valor óptico.

Dijo a Faraday que el resultado podía poner a prueba la teoría.

Después cambiaron los números.

Y cambió la teoría.

La relación sobrevivió.

Ahí comienza nuestra historia.

Capítulo I

El niño de Glenlair

Había cosas.

Puertas, cerraduras y llaves. Arroyos cuyo curso desaparecía de la vista. Cables de campanilla que se internaban en partes de una casa que un niño no podía ver.

Y había un niño que quería saber qué ocurría después.

James Clerk Maxwell nació en Edimburgo el 13 de junio de 1831, hijo de John Clerk Maxwell y Frances Cay. Fue el único hijo de ambos que sobrevivió a la primera infancia. Sus primeros años transcurrieron en gran medida en Glenlair, la propiedad familiar de Galloway, en el suroeste de Escocia, donde su padre estaba desarrollando la casa y administrando la finca.

Por una vez, no tenemos que empezar con un recuerdo escrito después de que Maxwell se hiciera famoso.

En abril de 1834, cuando James aún no había cumplido tres años, su madre escribió a su hermana Jane Cay acerca de la curiosidad persistente del niño. Describió su preocupación por puertas, cerraduras y llaves, su investigación de arroyos y cables de campanilla ocultos, y una pregunta que, según escribió, «nunca se le caía de la boca»:

 | «Show me how it doos» («Enséñame cómo funciona»).

La grafía pertenece al registro familiar. La curiosidad pertenece al niño.

Es una evidencia de valor inusual porque es contemporánea. Frances Maxwell no estaba recordando la infancia de un físico célebre. Estaba describiendo a su hijo pequeño.

Lo que documenta la carta es sencillo pero llamativo. Maxwell quería saber cómo funcionaban las cosas, incluidas aquellas cuyo mecanismo de conexión desaparecía de la vista.

No nos dice por qué.

Desde luego, tampoco nos dice que la teoría de campos estuviera de algún modo latente en la habitación infantil.

Esa conexión sería nuestra, no suya.

La observación responsable es más limitada: la curiosidad por conexiones ocultas aparece muy pronto en el registro documental.

Un mundo de mecanismos

Glenlair ofrecía abundante material para una curiosidad de ese tipo.

John Clerk Maxwell se había formado como abogado, aunque sus intereses iban mucho más allá del derecho. Sentía una fuerte atracción por la mecánica práctica, las máquinas y la mejora técnica, y participó activamente en el desarrollo de la finca.

El entorno en el que creció James contenía, por tanto, tanto procesos naturales como mecanismos contruidos.

Para el biógrafo existe la tentación de convertir esto en una teoría del desarrollo: la exposición repetida a mecanismos habría formado un hábito que más tarde se transformó en método científico.

Las evidencias conservadas no permiten esa conclusión.

Lo que sí puede decirse es que los objetos mencionados en la carta de 1834 pertenecían al entorno físico inmediato de Maxwell.

El niño encontraba efectos cuyas causas estaban parcialmente ocultas.

Preguntaba por ellas.

Por ahora, basta con eso.

Pérdida

Su primera infancia quedó interrumpida por la enfermedad y la muerte de su madre.

Frances Maxwell murió en 1839, cuando James tenía ocho años.

Había desempeñado un papel activo en su educación inicial. Durante su enfermedad se contrató a un tutor. El arreglo fracasó. El relato conservado afirma que el tutor trataba con dureza al niño, del que se decía que aprendía lentamente, y que finalmente se consideró fallido el experimento.

Tras la muerte de su madre, la crianza de Maxwell implicó a varios miembros de la familia.

Jane Cay, hermana de su madre, siguió siendo una figura importante y mantuvo con él una relación estrecha. Pero cuando Maxwell asistió posteriormente a la escuela en Edimburgo, su residencia principal allí fue el número 31 de Heriot Row, la casa de Isabella Wedderburn, hermana de su padre. Jane Cay se ocupó de él en determinados periodos, pero no actuó como única madre sustituta.

Estos detalles pueden parecer menores.

No lo son.

La mitología de la infancia suele simplificar una red de personas hasta convertirla en una única historia emocionalmente satisfactoria. Nuestra tarea es conservar la red.

La misma contención debe aplicarse a la muerte de la madre de Maxwell.

Sería fácil construir una narración psicológica en la que el duelo temprano produjera introspección, independencia o un deseo permanente de encontrar orden bajo la incertidumbre.

No existe evidencia suficiente para sostener una afirmación causal de ese tipo.

La pérdida pertenece a la historia porque perteneció a la vida de Maxwell.

No se convierte por ello en explicación de su física posterior.

Edinburgh Academy

En noviembre de 1841, con diez años, Maxwell comenzó a asistir a la Edinburgh Academy.

La transición fue difícil.

Su aspecto lo singularizó de inmediato. El relato posterior de Campbell describe las ropas caseras, los zapatos poco habituales y los modales rurales que atrajeron la atención de otros alumnos.

A diferencia de la carta de 1834, esta evidencia es retrospectiva.

Campbell escribía décadas después, tras la muerte de Maxwell, y la distinción importa.

Su narración registra, no obstante, una entrada incómoda en la vida escolar. Maxwell fue objeto de burlas. El apodo que quedó asociado a él allí fue «Dafty».

Fuentes posteriores lo escriben a veces «Daftie», pero Campbell y Garnett utilizan «Dafty».

El mismo relato añade un detalle útil: al parecer, Maxwell hizo pocos esfuerzos por librarse del apodo.

Eso complica la imagen más simple de una víctima pasiva.

Existen relatos de trato brusco y burlas. El reverendo W. Macfarlane, antiguo compañero de escuela, recordó posteriormente que Maxwell terminó por enfrentarse con energía a quienes lo atormentaban y fue ganándose gradualmente el respeto incluso de los compañeros más irreflexivos.

Es razonable afirmar que Maxwell fue objeto de burlas y que en ocasiones recibió un trato duro.

Sería menos responsable construir un diagnóstico psicológico moderno de acoso sostenido a partir de un conjunto reducido de fuentes retrospectivas.

Más importante aún, la historia no siguió siendo una historia de exclusión.

Maxwell estableció amistades duraderas.

Lewis Campbell se convirtió en amigo de toda la vida y finalmente en su biógrafo. Peter Guthrie Tait fue otro compañero cercano y más tarde un importante físico matemático.

Maxwell también empezó a destacar dentro de la escuela.

El muchacho inicialmente considerado rústico y excéntrico fue ganando respeto. Obtuvo buenos resultados en varias materias, ganó premios y desarrolló una capacidad matemática cada vez más visible.

La imagen del genio aislado es, por tanto, incorrecta.

Maxwell era inusual, y se burlaban de él.

Pero también quedó integrado en una red social e intelectual que perduró durante décadas.

Los sábados con su padre

El registro conservado se vuelve más concreto cuando el padre de Maxwell se encontraba en Edimburgo.

Campbell recordó que padre e hijo pasaban juntos las medias jornadas libres de los sábados. Visitaban lugares como Leith Fort, las obras asociadas al ferrocarril de Granton y los afloramientos geológicos de Salisbury Crag.

El sábado 12 de febrero de 1842, Maxwell recibió lo que Campbell llamó un regalo especial: lo llevaron a ver máquinas electromagnéticas.

El detalle es auténtico.

No debe exagerarse su importancia posterior.

Nada en el registro demuestra que Maxwell, entonces con diez años, viera aquellas máquinas y reconociera el tema que más tarde dominaría su reputación científica.

El episodio resulta valioso por otra razón.

El electromagnetismo entró en su mundo observable mucho antes de entrar en su teoría madura.

En aquel momento era un aparato.

Algo que podía demostrarse.

Algo que hacía cosas.

No hay razón para añadir destino a la escena.

De mirar a representar

Durante sus años escolares, el interés de Maxwell por la geometría se hizo cada vez más serio.

Uno de los problemas consistía en construir curvas ovales mediante alfileres, hilo y restricciones geométricas.

El punto de partida era concreto.

Podía dibujarse una curva.

Pero Maxwell generalizó la construcción.

En lugar de tratar un óvalo como una forma aislada, estudió una familia de curvas generadas por relaciones entre varios focos.

A los catorce años, el trabajo llamó la atención de James David Forbes, profesor de filosofía natural en la Universidad de Edimburgo.

El artículo, *On the Description of Oval Curves, and Those Having a Plurality of Foci*, fue comunicado a la Royal Society of Edinburgh por Forbes en abril de 1846, con observaciones del propio Forbes añadidas.

El logro era notable.

No era una creación surgida de la nada.

Curvas relacionadas habían sido estudiadas anteriormente, entre otros por Descartes. Sin embargo, el trabajo de Maxwell extendía y generalizaba la construcción.

El episodio nos ofrece una lección excepcionalmente temprana sobre el aspecto real de la originalidad científica.

Un problema ya tiene una historia.

Un joven investigador entra en ella.

Algo cambia.

La contribución reside en ese cambio.

Objeto y relación

El episodio geométrico introduce una distinción que seguirá siendo útil.

Los trozos de hilo y los alfileres son objetos físicos.

El óvalo dibujado entre ellos es otro objeto.

Pero el contenido matemático no reside en ningún trozo concreto de hilo ni en ninguna curva concreta.

Reside en una relación.

Cambie la construcción particular conservando la relación y las matemáticas sobreviven.

Esto todavía no constituye evidencia de una filosofía maxwelliana madura de los modelos.

Sería anacrónico convertirlo en tal cosa.

Pero sí es evidencia de que Maxwell ya trabajaba con una transformación fundamental de la ciencia matemática:

pasar de un objeto particular a la relación que lo genera.

Esa operación amplía aquello que puede comprenderse.

La forma visible deja de ser el final de la observación.

Se convierte en evidencia de una regla.

El problema de «genio»

Llegados a este punto, casi se espera que un biógrafo utilice la palabra.

Genio.

La capacidad matemática de Maxwell era claramente excepcional.

Pero «genio» se vuelve peligroso cuando deja de ser una descripción y empieza a funcionar como explicación.

¿Por qué resolvió el problema?

Porque era un genio.

¿Por qué advirtió la conexión?

Porque era un genio.

¿Por qué otros científicos igualmente capaces siguieron caminos distintos?

Porque Maxwell era un genio.

En realidad, no se ha explicado nada.

Por ello, este libro utilizará la palabra con moderación.

Si el estilo científico de Maxwell resulta distintivo, la diferencia debería ser visible en lo que hizo y en comparación con lo que otros hicieron en condiciones similares.

La etiqueta debe llegar después de la evidencia, no sustituirla.

La luz entra en la historia

En algún momento de 1847, cerca del final de los años escolares de Maxwell, ocurrió otro episodio importante.

Junto con su tío John Cay, Maxwell visitó al fabricante de instrumentos de Edimburgo William Nicol y observó experimentos con luz polarizada y los colores mostrados por vidrio no recocido.

Maxwell continuó después investigando por sí mismo aquellos fenómenos. Los relatos conservados describen un polariscopio sencillo, piezas de vidrio no recocido que él mismo preparó, dibujos coloreados de los patrones observados y el envío de algunos de esos dibujos a Nicol. Más tarde Nicol regaló a Maxwell un par de prismas fabricados por él.

El episodio posee rasgos tangibles de valor inusual.

Incluye un instrumento, observaciones, dibujos y trabajo experimental posterior.

La luz había entrado en la ciencia de Maxwell.

Todavía no como un objeto cuya naturaleza intentara explicar.

Al principio, la luz hacía otra cosa.

Revelaba una consecuencia óptica de una condición física que la visión ordinaria no podía detectar.

Esta distinción se volverá importante.

El niño de la carta de 1834 había preguntado por arroyos y cables de campanilla cuyo recorrido desaparecía de la vista.

Trece años más tarde, el problema científico se estaba volviendo más disciplinado.

La pregunta ya no era simplemente adónde iba algo oculto.

Era cómo una condición física inaccesible podía dejar una huella observable.

Y eso nos lleva de la biografía al experimento.

Capítulo 2

Geometría, vidrio y tensión invisible

Una pieza transparente de vidrio puede ocultar una historia mecánica.

Vista con luz ordinaria, puede parecer uniforme. Sin embargo, el enfriamiento o una fuerza aplicada pueden dejar el material en un estado de tensión interna.

Examinémosla ahora con luz polarizada.

Aparecen patrones.

Surgen colores donde antes no había nada visible.

La tensión no se ha convertido en un objeto que el ojo pueda inspeccionar directamente. Lo que se ha vuelto observable es una consecuencia óptica del estado mecánico.

Esta distinción es fundamental para la ciencia experimental.

Un instrumento rara vez hace visible lo invisible en un sentido simple.

Más a menudo establece una relación entre algo inaccesible y algo que puede detectarse.

Maxwell se encontró con este problema antes de cumplir veinte años.

Universidad de Edimburgo

Maxwell ingresó en la Universidad de Edimburgo en 1847, con dieciséis años.

Su trabajo geométrico continuó, pero el experimento adquirió cada vez mayor importancia.

La imagen posterior de Maxwell como un teórico casi puramente matemático puede ocultar este aspecto de su vida científica.

Construía aparatos.

Observaba.

Medía.

Comparaba consecuencias teóricas con experimentos.

Y, desde una etapa temprana, el desacuerdo experimental importaba.

Su encuentro con la luz polarizada es un buen lugar para observar este comienzo.

Nicol y la luz polarizada

Como describió el capítulo 1, la visita de Maxwell a William Nicol en 1847 lo introdujo directamente en experimentos con luz polarizada y vidrio no recocido.

Después continuó experimentando por su cuenta con estos fenómenos, en ensayos en los que los efectos ópticos revelaban una condición mecánica oculta.

El episodio no es una historia de invención aislada.

Nicol aportó instrumentación y conocimiento óptico práctico.

David Brewster ya había investigado los efectos ópticos producidos por materiales transparentes sometidos a tensión o no recocidos.

El tema tenía una historia científica antes de que Maxwell entrara en él.

Lo que importa es el papel que pronto desempeñó en su propio trabajo.

Un estado oculto, una consecuencia observable

La tensión mecánica dentro de un material transparente no puede cartografiarse normalmente con solo mirar el material.

La luz polarizada cambia la situación experimental.

La tensión puede modificar el comportamiento óptico del sólido. Cuando una luz adecuadamente polarizada lo atraviesa y después se analiza, el patrón resultante depende de la condición mecánica del material.

Podemos describir la lógica en lenguaje moderno como:

estado mecánico, consecuencia óptica, patrón observado

Las palabras son nuestras.

El experimento era del siglo XIX.

Sin embargo, para convertir el patrón en física, la observación por sí sola no bastaba.

Era necesaria una teoría matemática que conectara la deformación mecánica con el efecto óptico.

Ahí es donde se encontraron los intereses de Maxwell por la geometría, la mecánica y el experimento.

Cuando la teoría discrepa

El artículo de Maxwell *On the Equilibrium of Elastic Solids* fue leído ante la Royal Society of Edinburgh el 18 de febrero de 1850.

Su comienzo merece ser tomado en serio porque no parte del triunfo teórico, sino del fracaso.

Maxwell escribió:

«Hay pocas partes de la mecánica en las que la teoría haya diferido más del experimento que en la teoría de los sólidos elásticos.»

El problema afectaba a teorías derivadas de supuestos aparentemente plausibles sobre la constitución de la materia y las fuerzas moleculares.

Las matemáticas habían producido consecuencias.

El experimento se había negado a obedecerlas.

Maxwell analizó la insuficiencia de teorías moleculares anteriores de la elasticidad y la importancia de formulaciones capaces de acomodar con mayor éxito el comportamiento observado experimentalmente.

Es un excelente caso temprano para nuestros propósitos porque impide una narración demasiado sencilla acerca de la teoría.

Un modelo matemáticamente coherente puede partir de supuestos físicamente plausibles y aun así fracasar.

El fracaso no dice automáticamente al científico qué está mal.

Solo indica que alguna parte de la cadena que va de los supuestos a la medición debe reconsiderarse.

Predicción y prueba óptica

El prefacio editorial de Niven (1890) al trabajo de Maxwell de 1850 establece con suficiente claridad para nuestros fines la dirección del razonamiento óptico.

Maxwell desarrolló deducciones teóricas relativas a sólidos elásticos y después describió experimentos destinados a poner a prueba consecuencias de la teoría en óptica.

La secuencia importante es, por tanto:

teoría mecánica , consecuencia óptica predicha , comparación experimental

No deberíamos invertir esa secuencia sin evidencia directa.

Esto importa porque cambia la lección.

La luz polarizada no se limita a revelar a Maxwell una distribución desconocida de tensiones.

En cambio, proporciona una consecuencia observable experimentalmente frente a la cual puede ponerse a prueba una teoría mecánica.

El estado mecánico oculto y el efecto óptico visible quedan conectados a través de la teoría.

Una comparación moderna: el problema inverso

Hay un concepto relacionado que reaparecerá más adelante en este libro.

La ciencia moderna habla con frecuencia de un problema inverso.

En un problema directo se especifican un modelo y sus parámetros, y se calculan las consecuencias observables.

En un problema inverso se utilizan observaciones para inferir el estado o los parámetros subyacentes que podrían haberlas producido.

El término es muy posterior a Maxwell y no debería atribuírsele.

Tampoco debe presentarse su artículo de 1850 como si estuviera organizado explícitamente en torno al concepto moderno de problema inverso. La evidencia disponible sostiene con mayor seguridad la dirección directa: deducciones teóricas seguidas de pruebas ópticas experimentales.

Pero la distinción moderna sigue siendo útil para comprender una familia más amplia de situaciones científicas.

A veces la física predice una observación a partir de un modelo.

A veces intenta inferir una estructura oculta a partir de una observación.

Con frecuencia ambas direcciones interactúan.

Lo que importa históricamente es establecer qué dirección utilizaba realmente Maxwell en cada caso.

Lo que aporta el instrumento

El polariscopio hacía algo más que mejorar la vista.

Modificaba la evidencia accesible.

Sin la disposición óptica, regiones diferentes de un sólido transparente sometido a tensión podían parecer iguales.

Con luz polarizada, sus diferencias mecánicas podían producir consecuencias ópticas distintas.

El instrumento modificaba así aquello que podía convertirse en un hecho experimental.

Pero ese hecho no estaba libre de teoría.

Los colores y las bandas no llegaban etiquetados como «tensión».

Su interpretación dependía de la óptica y de la mecánica.

La observación científica ya estaba estratificada:

estado material,

interacción con la luz,

instrumento,

patrón visible,

interpretación matemática.

Esto adquiere cada vez mayor importancia a medida que la física avanza hacia objetos y procesos que no pueden inspeccionarse directamente.

Un nombre posterior: fotoelasticidad

Hoy situaríamos de forma natural este trabajo dentro de la historia de la fotoelasticidad, el uso de efectos ópticos para investigar tensiones mecánicas.

El término y la disciplina experimental madura llegaron después.

Utilizar la palabra moderna puede ayudar a orientar al lector, pero no debería hacer que la práctica histórica pareciera más asentada de lo que estaba.

Maxwell estaba entrando en un campo en evolución de elasticidad, óptica y mecánica experimental.

Brewster había establecido fenómenos ópticos importantes.

Stokes había desarrollado trabajos teóricos importantes sobre elasticidad.

Nicol aportaba experiencia óptica e instrumentación.

Maxwell reunió estos recursos en su propio trabajo.

Una vez más, la originalidad estaba distribuida a través de una red.

Modelos y restricciones

El comienzo del artículo de Maxwell resulta especialmente revelador porque las teorías que fracasaron no eran absurdas.

Se apoyaban en ideas plausibles acerca de la materia microscópica.

Precisamente por eso el fracaso es científicamente valioso.

Si una teoría construida a partir de una hipótesis molecular concreta produce una relación incorrecta entre magnitudes elásticas medibles, el experimento puede restringir la hipótesis incluso cuando las propias moléculas no pueden inspeccionarse.

El científico no necesita acceso visual directo al mecanismo propuesto para descartar consecuencias de ese mecanismo.

Esta distinción será importante en varios episodios posteriores.

La estabilidad dinámica restringirá las constituciones posibles de los anillos de Saturno.

Las mediciones del comportamiento de los gases restringirán los modelos del movimiento molecular invisible.

Las mediciones eléctricas y magnéticas restringirán explicaciones rivales de la acción electrodinámica.

La igualación de colores restringirá las teorías sobre la respuesta visual.

Los ejemplos son diferentes, y el libro no supondrá de antemano que Maxwell utilizó un único método idéntico en todos ellos.

Pero comparten una circunstancia epistémica:

el mecanismo no está directamente disponible, mientras que sus consecuencias sí lo están.

La teoría no es simplemente primero y el experimento después

El diagrama habitual del trabajo científico es lineal:

teoría,

predicción,

experimento,

confirmación o rechazo.

El trabajo temprano de Maxwell ya muestra por qué esto es demasiado simple.

Los hechos experimentales ya habían contribuido a producir el problema teórico.

El fracaso de teorías anteriores de la elasticidad motivó la búsqueda de una formulación mejor.

Los experimentos ópticos proporcionaron otro modo de ponerla a prueba.

El análisis matemático determinó qué consecuencias debían seguirse.

Los efectos observados incidieron después sobre la adecuación del análisis.

Teoría y experimento modificaban mutuamente sus posibilidades.

Esa interacción importa más que decidir cuál llegó «primero».

Una representación no es lo representado

Los patrones coloreados en un material sometido a tensión no son por sí mismos la tensión mecánica.

Son efectos que mantienen con ella una relación físicamente interpretable.

La ecuación tampoco es la tensión.

Es otra representación.

El sistema físico, la descripción matemática y la señal óptica son, por tanto, distintos.

Y, sin embargo, la ciencia funciona precisamente porque pueden establecerse relaciones entre ellos.

Esta distinción se volverá mucho más difícil más adelante.

Cuando Maxwell empiece a utilizar fluidos, vórtices y estructuras mecánicas para representar relaciones electromagnéticas, tendremos que preguntarnos repetidamente:

¿Qué pertenece al fenómeno físico?

¿Qué pertenece al modelo?

¿Qué pertenece a las matemáticas?

¿Y qué evidencia permite pasar de un nivel a otro?

Los experimentos con vidrio ofrecen un caso temprano y relativamente concreto.

El fracaso puede ser productivo

Un modelo físico fallido no tiene por qué ser inútil.

Puede mostrar qué magnitudes importan.

Puede identificar una relación que el experimento sea capaz de poner a prueba.

Puede revelar exactamente dónde se rompe un supuesto.

Y quizá sea posible conservar parte de la estructura matemática mientras se abandona la imagen microscópica original.

Esta posibilidad se volverá central más adelante.

Pero todavía no deberíamos atribuírsela a Maxwell como una filosofía distintiva.

Rankine, Thomson, Stokes y otros contemporáneos también se enfrentaban a la relación entre mecanismos hipotéticos y descripción matemática.

Algunos desarrollaban imágenes mecánicas elaboradas.

Otros hacían hincapié en relaciones restringidas experimentalmente.

Algunos hacían ambas cosas.

La comparación aún no se ha realizado.

La luz antes de la teoría electromagnética de la luz

Existe un contraste histórico que merece conservarse.

La luz ya formaba parte de la vida experimental de Maxwell años antes de entrar en su teoría electromagnética.

En Edimburgo, la luz funcionaba como herramienta de investigación.

Su polarización ayudaba a poner a prueba predicciones sobre la condición mecánica de la materia.

Más tarde, la luz entraría en la teoría de Maxwell desde otra dirección, a través de la electricidad, el magnetismo y la dinámica de un medio.

Maxwell en 1850 no sabía lo que concluiría en la década de 1860.

Los dos episodios van juntos solo porque la historia terminó situándolos en una misma vida.

Nuestra tarea es preservar el intervalo entre ambos.

La frontera

Cuando Maxwell dejó Edimburgo para ir a Cambridge en 1850, ya eran visibles varios elementos de su práctica científica.

Había pasado de construcciones geométricas a relaciones matemáticas más generales.

Había trabajado con instrumentos.

Había puesto a prueba experimentalmente consecuencias teóricas.

Había encontrado un caso en el que supuestos microscópicos plausibles fracasaban frente al comportamiento medido.

Y había utilizado luz polarizada para conectar un estado mecánico por lo demás inaccesible con efectos ópticos observables.

Eso todavía no establece un método maxwelliano unificado.

Establece algo más modesto.

Maxwell ya había trabajado repetidamente cerca de una frontera entre:

lo que podía observarse, lo que podía representarse y lo que podía inferirse legítimamente.

Cambridge situaría esa frontera dentro de un mundo intelectual mucho más amplio.

Faraday estaba desarrollando una concepción física de las líneas de fuerza.

Ampère había construido una electrodinámica poderosa en torno a fuerzas entre corrientes.

Weber ya había formulado la acción eléctrica mediante partículas cargadas en movimiento.

William Thomson utilizaba analogías matemáticas para conectar ramas aparentemente diferentes de la física.

Rankine trabajaría simultáneamente con mecanismos hipotéticos elaborados y con distinciones explícitas entre diferentes formas de teoría física.

No existía un único camino hacia una teoría del electromagnetismo.

Había imágenes físicas rivales, técnicas matemáticas y criterios de explicación distintos.

Antes de poder comprender el propio camino de Maxwell, esas alternativas deben tomarse en serio.

Ahí comienza la comparación.

Capítulo 3

Cambridge, la analogía y la física que Maxwell heredó

Cuando Maxwell llegó a Cambridge en octubre de 1850, la electricidad y el magnetismo no estaban esperando a ser unificados.

Ya estaban llenos de teorías.

Había leyes que funcionaban, experimentos reproducibles, técnicas matemáticas de enorme potencia e imágenes físicas que discrepaban acerca de qué eran realmente la electricidad y el magnetismo.

Es fácil olvidarlo porque los manuales modernos introducen la materia después de que gran parte del desacuerdo haya desaparecido.

Para Maxwell, el desacuerdo era la materia misma.

Antes de preguntar qué acabaría aportando, necesitamos reconstruir el paisaje intelectual en el que entró.

Cambridge

Maxwell ingresó primero en Peterhouse y poco después se trasladó a Trinity College.

Cambridge ofrecía algo que Edimburgo no había ofrecido: inmersión en una de las culturas matemáticas más fuertes de Gran Bretaña.

El Mathematical Tripos premiaba la rapidez, la técnica y la capacidad de resolver problemas difíciles bajo presión. Los estudiantes que se preparaban para él trabajaban a menudo con tutores privados conocidos como *coaches*, cuyo entrenamiento podía ser extraordinariamente exigente.

Maxwell estudió con William Hopkins, uno de los más célebres.

Se graduó en 1854 como Second Wrangler y compartió el primer puesto del Smith's Prize con Edward Routh.

Estas distinciones lo consolidaron como un matemático de Cambridge excepcionalmente capaz.

Pero el virtuosismo técnico no era lo mismo que elegir un problema científico.

Poco antes de graduarse, Maxwell comenzó a orientarse seriamente hacia la electricidad.

Una carta a William Thomson fechada el 20 de febrero de 1854 conserva esta etapa con una claridad inusual. Maxwell preguntaba cómo debía avanzar hacia la literatura más profunda un lector que poseyera un conocimiento divulgativo de las demostraciones eléctricas. En particular, quería saber cómo debían ordenarse Ampère y Faraday, y en qué momento convenía leer los propios trabajos de Thomson.

Lo importante aquí es la estructura de la petición.

Maxwell pedía un mapa intelectual.

No escribía como alguien que ya poseyera la respuesta.

Y los nombres que eligió revelan la dificultad, porque Ampère y Faraday no ofrecían dos versiones de una misma teoría.

Representaban formas sorprendentemente distintas de organizar el mundo eléctrico.

Ampère: fuerza sin intermediario visible

André-Marie Ampère había construido uno de los grandes logros matemáticos de la electrodinámica temprana.

Tras el descubrimiento de Ørsted de que las corrientes eléctricas afectan a las agujas magnéticas, Ampère desarrolló una teoría cuantitativa de las fuerzas entre circuitos recorridos por corriente.

Su éxito fue notable.

Pero su arquitectura física era muy distinta de la que más tarde se asociaría con Maxwell.

Las matemáticas describían interacciones entre corrientes eléctricas a través del espacio. Lo que ocurriera en la región intermedia no tenía que soportar la carga explicativa del modo en que Faraday exigiría posteriormente.

Para un lector moderno, acostumbrado a los campos, esto puede parecer incompleto.

Históricamente, no era en absoluto evidentemente incompleto.

La gravitación newtoniana había convertido la acción matemática entre cuerpos separados en un instrumento enormemente exitoso, aunque el estatuto metafísico de la acción a distancia siguiera siendo controvertido.

La electrodinámica podía, por tanto, perseguir una ambición comparable: determinar la ley que conectaba fuentes y fuerzas y calcular el resultado observable.

Una ley precisa podía ser científicamente poderosa incluso cuando ningún intermediario directamente observable ocupaba el espacio entre los cuerpos que interactuaban.

Había otra forma posible de pensar.

Faraday: el espacio intermedio importa

Michael Faraday abordaba el mismo mundo físico de otro modo.

Carecía en gran medida de la formación matemática avanzada que estructuraba la física de Cambridge.

Su poder científico procedía, en cambio, de la práctica experimental, la representación física y una capacidad extraordinaria para crear nuevas situaciones experimentales.

Para él importaba el espacio que rodeaba imanes, cables y cuerpos cargados.

Representaba la acción magnética y eléctrica mediante líneas de fuerza.

Estas no eran inicialmente ecuaciones.

Surgieron de maneras experimentales y geométricas de pensar sobre la dirección y distribución de la acción física.

Las limaduras de hierro alrededor de un imán podían mostrar patrones.

Una aguja magnética podía explorar direcciones punto por punto.

La inducción electromagnética mostraba que condiciones eléctricas o magnéticas cambiantes podían producir efectos en otro lugar.

Faraday fue tratando cada vez más la región intermedia no como un vacío irrelevante a través del cual simplemente actuara una fuerza, sino como algo físicamente implicado en el fenómeno.

Era más que una conveniencia diagramática.

Era una forma distinta de distribuir la carga explicativa.

Las matemáticas de Ampère podían preguntar:

¿Qué fuerza ejerce este elemento de corriente sobre otro?

El programa de Faraday alentaba cada vez más otra pregunta:

¿Qué condición física existe en toda la región entre ambos?

La distinción es esquemática y ninguno de los dos científicos puede reducirse a una frase.

Pero identifica una elección real a la que se enfrentaba cualquiera que entrara en la electrodinámica en la década de 1850.

¿Debía concentrarse la teoría principalmente en relaciones entre fuentes y fuerzas?

¿O debía intentar representar un estado físico distribuido por el espacio?

Maxwell no se limitaría a elegir una opción y rechazar la otra.

Su camino sería más complicado.

William Thomson: la analogía antes de Maxwell

Una tercera figura es esencial.

William Thomson, más tarde Lord Kelvin, era solo siete años mayor que Maxwell, pero cuando Maxwell solicitó su consejo ya había desarrollado métodos influyentes para conectar distintas ramas de la física matemática.

En 1842 Thomson examinó la correspondencia matemática entre conducción del calor y electrostática.

Los fenómenos eran físicamente diferentes.

El calor que fluía por un sólido no era electricidad distribuida alrededor de cuerpos cargados.

Pero las leyes que los gobernaban podían poseer una similitud matemática parcial.

Esa similitud podía hacer que una ciencia iluminara a la otra.

Maxwell definiría posteriormente una analogía física como:

«esa semejanza parcial entre las leyes de una ciencia y las de otra que hace que cada una de ellas ilustre a la otra.»

Esto es más preciso que afirmar que los fenómenos análogos deben parecerse físicamente.

No es necesario que lo hagan.

Lo que puede corresponder son las relaciones.

Eso otorgaba a la analogía un poder científico considerable.

Una estructura matemática ya comprendida en un campo podía convertirse en herramienta para abordar otro.

Thomson había demostrado la utilidad de este método antes de que Maxwell entrara en el electromagnetismo.

Y fue más lejos.

En junio de 1847 Thomson escribió a Faraday acerca de una analogía matemática que implicaba un sólido elástico. Advirtió explícitamente que solo había producido una analogía matemática y que no se había atrevido a convertirla en fundamento de una teoría física. Sin embargo, también sugirió que una teoría de ese tipo podría acabar explicando efectos magnéticos y, en palabras de Thomson, «con toda probabilidad explicar el efecto del magnetismo sobre la luz polarizada».

Esto importa enormemente para nuestra comparación.

La representación mecánica de relaciones electromagnéticas no comenzó con Maxwell.

Tampoco era exclusivamente maxwelliana la cautela acerca del estatuto ontológico de una representación matemática.

Thomson ya distinguía entre analogía matemática y teoría física.

La pregunta, por tanto, no es si Maxwell utilizaría más tarde analogías.

Es qué hizo con ellas.

La analogía como movimiento entre ciencias

La palabra analogía puede sonar débil hoy.

Puede sugerir una metáfora.

En la física matemática del siglo XIX podía ser mucho más poderosa.

Una analogía podía transferir organización matemática desde un dominio relativamente bien comprendido a otro mal comprendido.

Supongamos que las ecuaciones que describen el flujo de calor y un problema eléctrico tienen formas correspondientes.

Entonces los métodos desarrollados para uno pueden iluminar al otro.

La analogía puede sugerir variables útiles.

Puede revelar condiciones de contorno.

Puede volver calculable una relación antes oscura.

Y puede hacerlo sin afirmar que ambos sistemas físicos estén hechos de las mismas cosas.

Esto crea una libertad importante.

Un científico puede tomar prestada una estructura sin tomar necesariamente prestado el mecanismo.

Pero existe un peligro correspondiente.

Una representación puede hacerse tan vívida que su utilidad empiece a parecer evidencia de su verdad física literal.

La frontera entre analogía como instrumento y analogía como ontología se convertirá en una de las dificultades centrales del trabajo electromagnético de Maxwell.

No estaba solo ante ella.

Rankine: dos métodos y dos tipos de hipótesis

William John Macquorn Rankine ofrece una comparación especialmente exigente.

Como Thomson, pertenecía al mundo escocés de la física matemática y la ingeniería.

También trabajó con mecanismos hipotéticos elaborados, incluida una teoría del calor basada en vórtices moleculares.

Sin embargo, en 1855 distinguió explícitamente dos métodos de formación de teorías físicas.

Los llamó método hipotético y método abstractivo.

La distinción no era simplemente entre mala especulación y buenas matemáticas.

El tratamiento de Rankine era más sutil.

Dentro de la teoría hipotética distinguía lo que denominaba hipótesis objetivas, adoptadas como representaciones probables de estados de cosas que podrían existir realmente, de las hipótesis subjetivas, empleadas como medios convenientes para expresar las leyes de los fenómenos.

La diferencia es crucial.

Un mecanismo hipotético podía cumplir una función científica sin ser necesariamente afirmado como realidad literal.

Rankine fue aún más lejos.

Sostuvo que una teoría hipotética podía ser necesaria como paso preliminar, llevando los fenómenos a un grado suficiente de simplicidad y orden antes de que pudiera construirse una teoría abstractiva.

Esto lo convierte en una comparación particularmente peligrosa para nuestra proposición de trabajo.

Sería fácil decir que Maxwell era distintivo porque utilizaba productivamente hipótesis mecánicas sin comprometerse plenamente con su verdad literal.

Pero Rankine estaba articulando explícitamente posibilidades estrechamente relacionadas.

Y lo hacía mientras perseguía él mismo mecanismos moleculares hipotéticos.

La comparación, por tanto, no puede ganarse con vocabulario.

Si se gana, tendrá que ser mediante la práctica.

¿Qué tipos de hipótesis construyó cada uno?

¿Cuánto tiempo las conservaron?

¿Qué relaciones extrajeron?

¿Qué ocurrió cuando cambió un mecanismo?

Esas son preguntas históricas.

La comparación se vuelve más difícil

Imaginemos describir a Maxwell sin estos controles.

Utiliza analogías entre distintas ramas de la física.

Eso parece distintivo.

Thomson ya lo había hecho.

Construye representaciones mecánicas mientras advierte contra una interpretación literal.

De nuevo, potencialmente distintivo.

Pero Thomson ya había separado la analogía matemática del compromiso con una teoría física.

Utiliza mecanismos hipotéticos permitiendo al mismo tiempo que relaciones útiles puedan sobrevivirlos.

Rankine ya había desarrollado un vocabulario explícito para distinciones muy próximas.

El campo comparativo impide, por tanto, los elogios fáciles.

Ese es su propósito.

Si Maxwell resulta tener un estilo reconocible, deberá emerger frente a competidores de esta fortaleza.

Weber: otra arquitectura física

También existía un programa electromagnético fundamentalmente distinto.

Wilhelm Weber había formulado en 1846 una ley de fuerza electrodinámica construida alrededor de interacciones entre partículas eléctricas y su movimiento relativo.

No era una teoría primitiva a la espera de ser sustituida por campos.

Era una arquitectura física rival y sofisticada, con ambiciones matemáticas y explicativas importantes.

El programa de Weber demuestra hasta qué punto podía conceptualizarse de manera diferente un mismo dominio experimental.

Una teoría podía cargar el peso explicativo sobre fuerzas entre partículas eléctricas.

Otra podía situarlo en estados de un medio intermedio.

Ambas podían ser matemáticas.

Ambas podían enfrentarse al experimento.

El desacuerdo no era entre matemáticas e intuición.

Era entre distintas imágenes matemáticas de la realidad física.

Este punto importará repetidamente.

La teoría de Maxwell no surgió sobre un fondo vacío.

Entró en competencia con alternativas serias.

¿Qué sabía realmente Maxwell?

La distinción entre lo que estaba disponible y lo que Maxwell sabía de manera demostrable se vuelve ahora esencial.

La carta de 1854 proporciona evidencia directa de que Ampère, Faraday y Thomson estaban entrando en el horizonte de trabajo de Maxwell.

Eso es una evidencia mucho más fuerte que limitarse a observar que sus artículos habían sido publicados.

Las dos categorías deben mantenerse separadas.

Una idea científica puede existir en la literatura sin formar parte del mundo intelectual activo de un científico concreto.

La disponibilidad es contexto histórico.

La lectura, las citas, la correspondencia y la discusión proporcionan evidencia más fuerte de conocimiento.

Esta distinción se vuelve especialmente importante cuando distintos investigadores alcanzan ideas similares de manera independiente.

Maxwell pide un mapa

La estructura de la carta de 1854 es reveladora.

Maxwell no se limitó a pedir hechos a Thomson.

Quería un orden.

¿Cómo debían abordarse aquellos cuerpos de trabajo?

¿En qué etapa debía leerse a un autor en lugar de otro?

Era una petición de mapa a través de representaciones incompatibles.

La electrodinámica de Ampère se parecía poco a las investigaciones experimentales de Faraday.

Las líneas de fuerza de Faraday se parecían poco a las analogías matemáticas de Thomson.

Weber ofrecía otro marco más.

Entrar seriamente en la electricidad significaba aprender a moverse entre estas formas de descripción.

El problema no era únicamente una física difícil.

Era traducción.

Las matemáticas de Cambridge y las imágenes de Faraday

La formación de Cambridge proporcionó a Maxwell recursos matemáticos formidables.

El trabajo de Faraday ofrecía algo que la técnica de Cambridge no suministraba automáticamente: una concepción física organizada en torno a líneas, distribuciones espaciales y relaciones locales.

El resumen familiar afirma que Maxwell matematizó a Faraday.

Es verdad en un nivel de abstracción tan elevado que puede resultar engañoso.

Las matemáticas no llegan simplemente a traducir una imagen física intacta.

Elegir una representación matemática cambia aquello que puede expresarse.

Algunos aspectos del pensamiento físico de Faraday se vuelven más claros.

Otros pueden desaparecer.

Otros aún pueden adquirir consecuencias que Faraday nunca formuló.

El proceso transforma tanto las matemáticas como la representación física.

Maxwell tendría que decidir qué aspectos del mundo de Faraday podían representarse mediante matemáticas existentes y cuáles exigían nuevas construcciones.

No era una transcripción.

Era construcción de teoría.

La primera pregunta maxwelliana

¿Qué era, entonces, distintivo de Maxwell en este punto?

Todavía no lo sabemos.

En 1854 poseía una formación matemática excepcional.

Tenía experiencia en geometría, experimento y representación física.

Estaba entrando en un campo poblado por programas incompatibles.

Buscó orientación en Thomson.

Y se sentía cada vez más atraído por el trabajo de Faraday.

Pero nada de lo visto hasta ahora establece un método exclusivamente maxwelliano.

Thomson ya poseía un lenguaje de analogía matemática.

Rankine podía moverse entre maquinaria hipotética y abstracción.

Faraday había desarrollado una concepción física sofisticada del medio interpuesto.

Weber poseía una ontología alternativa organizada matemáticamente.

Ampère había demostrado la potencia de leyes electrodinámicas exactas.

Si nos detuviéramos aquí, la conclusión honesta sería que Maxwell entró en una cultura científica ya rica en muchas de las herramientas intelectuales que más tarde se asociarían con él.

Precisamente por eso importa lo que ocurre a continuación.

Lo que una analogía útil no debe afirmar

El primer gran artículo electromagnético de Maxwell comenzaría examinando la analogía física.

El problema al que se enfrentaba era sutil.

Una traducción matemática puramente formal podía conservar las ecuaciones y perder al mismo tiempo parte de la intuición física que hacía poderoso el trabajo de Faraday.

Un modelo mecánico literal podía ofrecer inteligibilidad física y, al mismo tiempo, afirmar sobre una realidad invisible más de lo que permitía la evidencia.

Entre ambas posibilidades había un espacio metodológico flexible ya explorado de diferentes maneras por Thomson y Rankine.

Maxwell entraría en ese espacio con su propia construcción.

Por ello, el capítulo 5 no preguntará si inventó la analogía física.

No lo hizo.

Planteará una pregunta más limitada:

¿Qué ocurrió cuando Maxwell utilizó la analogía para reconstruir las líneas de fuerza de Faraday?

Esa pregunta puede responderse a partir de un artículo fechado.

Por primera vez podremos examinar directamente la práctica electromagnética de Maxwell en lugar de inferirla desde su biografía.

La comparación comienza ahí.

Capítulo 4

El color: inferir el ojo a partir de lo que ve

Un haz de luz amarilla puede parecer amarillo.

Una mezcla adecuada de luz roja y verde también puede parecer amarilla.

Para un observador, en las condiciones apropiadas, ambas pueden resultar indistinguibles.

Físicamente, sin embargo, no tienen por qué ser la misma luz.

Esa distinción no fue un descubrimiento de Maxwell.

Newton ya había reconocido una versión de ella en la *Opticks*. Los colores producidos por composición, observó, podían parecerse en apariencia a colores espectrales homogéneos y, sin embargo, diferir en la constitución física de la luz. Newton también representó geométricamente las mezclas mediante un círculo cromático y una construcción de centro de gravedad.

Más de un siglo después, Maxwell entró, por tanto, en un problema que ya poseía una historia tanto física como geométrica.

Su contribución consistiría menos en anunciar que la apariencia y la constitución física podían diferir que en convertir la igualación de colores en un experimento cuantitativo controlado.

El sistema oculto que estaba investigando no era un éter ni una molécula.

Era el sistema visual humano.

Dos problemas llamados color

A primera vista, el color parece pertenecer a la luz.

La luz solar atraviesa un prisma y se despliega en un espectro. Los distintos componentes espectrales pueden distinguirse físicamente. Un físico podría, por tanto, imaginar que una teoría completa del color debería ser simplemente una teoría completa de la luz.

Pero eso es solo una parte del problema.

Estímulos físicamente diferentes pueden producir el mismo color percibido, mientras que cambios en el observador pueden modificar qué estímulos parecen equivalentes.

El color pertenece, por tanto, a una relación entre estímulo físico, sistema sensorial y percepción.

Esta distinción tenía raíces profundas.

Newton había establecido que luces compuestas y homogéneas podían coincidir en apariencia cromática sin volverse físicamente idénticas.

Thomas Young propuso después una explicación fisiológica de otro tipo.

Young y tres respuestas

En su Bakerian Lecture de comienzos del siglo XIX, Young se enfrentó a una dificultad.

Si el espectro variaba de forma continua, ¿necesitaría la retina un mecanismo resonante diferente para cada color posible?

Sugirió, en cambio, que el número de respuestas retinianas fundamentales podía ser pequeño.

Propuso tres sensibilidades principales.

La asignación concreta de colores evolucionó en sus escritos, pero el paso conceptual fue decisivo.

La enorme diversidad del color percibido podía generarse a partir de un número limitado de canales de respuesta fisiológica.

Young proporcionó una hipótesis fisiológica.

Todavía no disponía del posterior programa cuantitativo de igualación cromática de Maxwell.

Los pigmentos no son luces

Otra dificultad surgía de una observación familiar.

Los pintores sabían que los pigmentos azul y amarillo podían producir verde.

Resultaba tentador esperar que la luz azul y la luz amarilla se comportaran de manera semejante.

No lo hacen.

La distinción parece obvia una vez que se enseñan por separado la mezcla aditiva y la sustractiva.

Históricamente, establecer esa separación exigió experimentación.

Helmholtz la abordó explícitamente en 1852, distinguiendo el proceso físico implicado cuando se combinan luces coloreadas de la absorción selectiva que se produce cuando se mezclan pigmentos.

Maxwell trató posteriormente la misma historia experimental en su informe de 1856 *On the Theory of Compound Colours with reference to Mixtures of Blue and Yellow Light*. Allí se refirió a experimentos con sectores coloreados en rotación, incluido el trabajo realizado por James David Forbes en Edimburgo en 1849.

La cuestión aparentemente sencilla de azul más amarillo obligaba, por tanto, a separar tres niveles:

la composición espectral de la luz,

el comportamiento de los materiales coloreados,

y

la sensación visual resultante.

Grassmann antes de Maxwell

Es esencial una segunda comparación contemporánea.

En 1853 Hermann Grassmann publicó leyes matemáticas de mezcla de colores.

Grassmann trató la combinación cromática mediante una estructura lineal que implicaba tres variables independientes.

Esto importa porque una reconstrucción moderna podría hacer parecer que Maxwell inventó el tratamiento matemático tridimensional del color.

No lo hizo.

El paisaje intelectual ya contenía la hipótesis fisiológica de Young, la geometría de mezclas de Newton, el análisis óptico de Helmholtz y las leyes matemáticas de Grassmann.

Que Maxwell conociera o no el artículo de Grassmann de 1853 en la etapa relevante debe establecerse por separado.

La disponibilidad no es conocimiento.

Hasta que se encuentre evidencia directa de lectura o cita, Grassmann pertenece a la clase comparativa histórica, no automáticamente a las entradas intelectuales documentadas de Maxwell.

La distinción es importante porque el desarrollo independiente o parcialmente independiente puede ser históricamente revelador por sí mismo.

El disco de colores

Maxwell abordó experimentalmente el color con un aparato sencillo pero poderoso.

En *Experiments on Colour, as perceived by the Eye, with remarks on Colour-Blindness*, publicado a mediados de la década de 1850, utilizó discos giratorios divididos en sectores coloreados ajustables.

Cuando los discos giraban con suficiente rapidez, los sectores individuales dejaban de percibirse por separado.

El ojo informaba de una mezcla.

Las proporciones, sin embargo, seguían siendo medibles.

Esto transforma el problema.

En lugar de limitarse a afirmar que dos colores parecen similares, un observador puede especificar las proporciones de los componentes necesarias para producir una igualación.

La igualdad sigue siendo perceptiva.

Las condiciones que producen esa igualdad pasan a ser cuantitativas.

Ese es uno de los pasos importantes de Maxwell.

Un juicio visual adquiere coordenadas numéricas.

Forbes antes de Maxwell

Forbes ya había experimentado con colores giratorios en 1849, y el propio Maxwell reconoció posteriormente esos experimentos.

Una vez más, la originalidad emerge dentro de una práctica ya existente.

Maxwell no creó de la nada el experimento de los colores giratorios.

Lo que desarrolló fue un programa cuantitativo progresivamente más sistemático.

Los sectores ajustables permitían medir proporciones.

Las igualaciones repetidas podían compararse.

Podían someterse a prueba distintos observadores.

La deficiencia en la visión del color podía convertirse en evidencia experimental en lugar de ser únicamente una curiosidad clínica.

Tres números

Supongamos que se eligen tres estímulos de referencia.

A continuación, se iguala un color objetivo ajustando sus contribuciones relativas.

Si la igualación es posible, el objetivo puede representarse cuantitativamente.

Una enorme variedad de apariencias perceptivas puede organizarse así mediante tres variables independientes.

Esto no significa que Maxwell descubriera por sí solo el hecho abstracto de que la mezcla de colores pueda representarse en tres dimensiones. Grassmann ya había formulado leyes lineales tridimensionales, mientras que el círculo cromático de Newton proporcionaba una genealogía geométrica anterior.

La aportación cada vez más distintiva de Maxwell consistió en conectar esa estructura con igualaciones cromáticas medidas en observadores reales.

La geometría se volvió experimental.

¿Qué establece una igualación de color?

Aquí es donde el problema epistémico se vuelve especialmente interesante.

Supongamos que dos espectros físicamente distintos producen el mismo juicio perceptivo.

¿Qué se ha establecido?

No que las luces sean físicamente idénticas.

Newton ya había advertido contra esa conclusión.

Lo que se ha establecido es que, para ese observador y en esas condiciones, el sistema visual proyecta esos estímulos distintos sobre el mismo resultado perceptivo.

Esa igualdad es empírica.

Puede reproducirse.

Puede cuantificarse.

Puede compararse entre observadores.

Y establece restricciones para cualquier explicación plausible del mecanismo visual.

La maquinaria fisiológica permanece oculta.

Las relaciones que produce, no.

Young vuelve como hipótesis experimental

La propuesta de Young de tres respuestas podía someterse ahora a una forma de prueba mucho más fuerte.

Si la igualación cromática normal exige realmente tres variables independientes, ello es compatible con un sistema visual que posea tres clases independientes de respuesta inicial.

El experimento no muestra esos receptores.

Restringe los modelos posibles de ellos.

Esta distinción debe mantenerse nítida.

Maxwell no inspeccionó tres tipos de conos.

Midió relaciones entre estímulos e igualaciones perceptivas.

La hipótesis fisiológica ganó apoyo porque podía dar cuenta de la dimensionalidad de esas relaciones.

El daltonismo como experimento natural

Los observadores con deficiencias cromáticas proporcionaban una prueba aún más incisiva.

Si la visión normal se comporta como si tres dimensiones independientes de respuesta contribuyeran a la igualación, unos sistemas visuales alterados deberían cambiar la estructura de las igualaciones posibles.

Maxwell investigó experimentalmente el daltonismo.

Esto transformó una variación entre observadores en evidencia acerca del sistema que genera la percepción cromática.

Un componente del mecanismo seguía siendo inaccesible.

Sin embargo, su alteración podía modificar relaciones medibles.

Eso convierte la deficiencia cromática en un experimento natural.

La lógica es poderosa:

alterar el sistema,

observar qué distinciones desaparecen,

inferir restricciones sobre la organización oculta.

Una vez más, la inferencia no es observación directa.

Es evidencia indirecta estructurada.

Katherine Maxwell

El observador importaba porque la igualación cromática terminaba en la percepción humana.

Katherine Maxwell participó en este trabajo.

El registro histórico señala explícitamente observaciones realizadas tanto por la señora Maxwell como por el propio Maxwell.

Eso basta para el presente capítulo.

No necesitamos afirmar más de lo que establece la fuente.

Su presencia importa tanto científicamente como biográficamente.

Un segundo observador hace posible distinguir, al menos en parte, entre una relación peculiar del propio sistema visual de Maxwell y otra reproducida en una persona diferente.

El observador formaba parte del aparato.

De colores de papel a mezclas espectrales

Los papeles coloreados giratorios tenían limitaciones.

Los pigmentos poseen espectros de reflexión complejos.

Un papel rojo no es un rojo espectral puro.

Un papel verde no refleja únicamente una sola longitud de onda.

Maxwell desarrolló, por tanto, métodos ópticos más controlados.

Su caja de colores utilizaba rendijas, prismas y disposiciones ópticas para combinar regiones espectrales seleccionadas y comparar cuantitativamente las mezclas.

Su gran artículo *On the Theory of Compound Colours, and the Relations of the Colours of the Spectrum* fue recibido por la Royal Society el 5 de enero de 1860, comunicado por Stokes y leído el 22 de marzo.

El manuscrito y los diagramas conservados siguen en el archivo de la Royal Society.

El propio aparato pertenece a una historia material más amplia, todavía conservada, del trabajo experimental de Maxwell.

El cambio de método importaba porque los componentes espectrales estaban físicamente mejor definidos que los papeles coloreados.

El mapeo entre estímulo físico e igualdad perceptiva podía, por tanto, ponerse a prueba con mucha mayor precisión.

Lo que Maxwell añadió al panorama existente

Llegados a este punto, la comparación puede formularse con mayor cuidado.

Newton ya había distinguido la semejanza de apariencia cromática de la identidad de constitución física y había representado geométricamente las mezclas.

Young había propuesto una fisiología de tres componentes.

Helmholtz había aclarado la diferencia entre mezclar luces y mezclar pigmentos.

Grassmann había formulado leyes lineales tridimensionales de mezcla de colores.

La contribución de Maxwell consistió en poner en contacto cuantitativo y experimental sostenido varios de estos hilos.

Midió igualaciones cromáticas.

Utilizó proporciones ajustables.

Pasó de papeles coloreados a mezclas espectrales.

Comparó observadores.

Aprovechó la deficiencia cromática.

Y utilizó estas mediciones para poner a prueba las implicaciones fisiológicas de la visión tricromática.

Es una afirmación más limitada que hacer de Maxwell el creador de la teoría tridimensional del color.

También es más fuerte porque es históricamente defendible.

La Medalla Rumford

En noviembre de 1860 Maxwell recibió la Medalla Rumford de la Royal Society por su trabajo sobre el color.

El hecho de la concesión es seguro.

No necesitamos adornarlo con una paráfrasis no verificada del razonamiento de la Sociedad.

El reconocimiento importa porque muestra que el trabajo sobre el color no era un proyecto lateral excéntrico recordado únicamente porque Maxwell se hizo más tarde famoso por el electromagnetismo.

Sus contemporáneos ya lo consideraban un trabajo importante.

Pero reconocimiento no debe confundirse con culminación.

La fisiología seguía estando solo parcialmente restringida.

Una ventana retrospectiva: tres clases de conos

Aquí, y solo aquí, podemos permitir deliberadamente que la fisiología posterior entre en el capítulo.

La visión humana moderna del color comienza con tres clases de fotorreceptores de tipo cono cuyas sensibilidades espectrales se solapan.

Sus señales son transformadas posteriormente por circuitos retinianos y neurales, incluidos procesos oponentes.

Las mediciones directas de fotopigmentos de los conos y de sensibilidades espectrales receptoras solo fueron posibles mucho más tarde, especialmente mediante trabajos fisiológicos y microspectrofotométricos en la década de 1960.

Esas mediciones aportaron una capa de evidencia biológica que no estaba disponible para Maxwell.

El punto histórico importante no es que Maxwell predijera la arquitectura completa de la visión cromática moderna.

No lo hizo.

Es que las mediciones psicofísicas ya habían impuesto fuertes restricciones cuantitativas sobre la primera etapa del sistema mucho antes de que fuera posible acceder fisiológicamente a ella de manera directa.

Las relaciones eran medibles antes de que el mecanismo pudiera examinarse directamente.

Mayo de 1861

El episodio más famoso del trabajo de Maxwell sobre el color ocurrió en la Royal Institution en mayo de 1861.

Maxwell demostró el principio de reconstruir una apariencia cromática a partir de tres componentes registrados por separado.

Thomas Sutton preparó registros fotográficos de una cinta de tartán coloreada a través de distintos filtros.

Las imágenes se proyectaron a través de filtros coloreados correspondientes y se superpusieron.

Apareció una imagen en color.

El episodio suele denominarse la primera fotografía en color.

Esa descripción necesita matices.

El principio subyacente era importante, pero la química fotográfica no se comportó de una forma tan simple como sugiere una reconstrucción moderna.

Las emulsiones fotográficas disponibles eran extremadamente insensibles a la luz roja.

Por ello, una exposición directa a través de un filtro rojo debería haber producido muy poco registro útil.

Análisis históricos posteriores, especialmente el de Ralph Evans en 1961, mostraron que probablemente el resultado exitoso dependió de radiación de longitud de onda más corta, incluida radiación ultravioleta reflejada por partes de los tintes, que contribuyó al registro nominalmente rojo.

La demostración tuvo éxito.

Pero una parte de la vía física no fue la que implica la leyenda simplificada.

Quando un experimento exitoso contiene la razón equivocada

Esto no vuelve inútil la demostración.

La hace científicamente más interesante.

La arquitectura conceptual era sólida:

realizar registros separados,

recombinar los componentes correspondientes,

aprovechar las propiedades de la visión cromática humana.

Pero la implementación fotográfica concreta incluía un comportamiento del detector que complicaba la cadena causal prevista.

Un experimento puede, por tanto, tener éxito y contener al mismo tiempo un mecanismo no intencionado.

La lección va mucho más allá de la fotografía.

Los filtros dejan pasar radiación no deseada.

Los detectores poseen curvas de respuesta.

Los materiales reflejan radiación fuera del espectro visible.

El aparato tiene una física propia.

El resultado no puede comprenderse simplemente leyendo la intención del experimentador.

Hay que reconstruir qué ocurrió físicamente.

Percepción y medición

El color también nos obliga a refinar la palabra observación.

Un observador mira a través de un instrumento e informa de una igualación.

Ese juicio es perceptivo.

También está experimentalmente restringido.

Las proporciones de los estímulos están controladas.

Pueden compararse observaciones repetidas.

Pueden compararse distintos observadores.

La visión cromática deficiente cambia la estructura de las igualaciones.

Aquí la objetividad científica no surge eliminando al observador.

Surge estructurando las condiciones bajo las cuales informa el observador.

Es una diferencia importante.

Mapa y mecanismo

Las relaciones cromáticas empíricas pueden seguir siendo útiles incluso cuando la explicación fisiológica adquiere mayor detalle.

Una igualación cromática medida en el siglo XIX no deja de ser una igualación porque la neurofisiología del siglo XX descubra circuitos oponentes.

La relación empírica sobrevive a un cambio en el mecanismo utilizado para explicarla.

Esta posibilidad se aproxima a un tema que encontraremos después en el trabajo electromagnético de Maxwell.

Pero la comparación todavía no debe elevarse a conclusión sobre un método unificado de Maxwell.

Newton, Young, Helmholtz y Grassmann ya muestran que la ciencia del color era un problema colectivo de representación, medición y mecanismo.

La pregunta no es si Maxwell fue el único en reconocer esta estructura.

No lo fue.

La pregunta es qué añadió a ella.

Varios problemas científicos a la vez

La cronología importa.

El trabajo de Maxwell sobre el color se solapó con sus primeros trabajos electromagnéticos.

Sus investigaciones cromáticas de 1855 pertenecen al mismo periodo en que *On Faraday's Lines of Force* estaba tomando forma.

Su principal artículo cuantitativo sobre el color apareció en 1860.

La demostración en la Royal Institution siguió en 1861.

Durante esos años también estaba desarrollando la teoría cinética y avanzando hacia las construcciones electromagnéticas mecánicas de *On Physical Lines of Force*.

Las categorías de los manuales separan estos temas.

La vida de trabajo de Maxwell no lo hacía.

Esa simultaneidad no demuestra un método común.

Solo nos proporciona la evidencia necesaria para poner a prueba si existió alguno.

Una yuxtaposición, todavía no una genealogía

Los experimentos sobre el color y el trabajo electromagnético pueden ahora situarse uno junto al otro sin afirmar que uno enseñara a Maxwell cómo hacer el otro.

En el color, estímulos físicamente distintos pueden producir la misma relación perceptiva medida.

En electromagnetismo, Maxwell preguntará pronto si representaciones físicas distintas pueden preservar las mismas relaciones matemáticas.

La semejanza nos corresponde investigarla a nosotros.

Todavía no es una transferencia documentada dentro de la mente de Maxwell.

La distinción importa.

Por ello, el siguiente capítulo retrocede ligeramente en el tiempo y sigue otro hilo que ya había empezado mientras se desarrollaban los experimentos sobre el color.

Las líneas de fuerza de Faraday.

Maxwell estaba a punto de preguntar qué podían conservar las matemáticas de una imagen física poderosa, poco convencional y difícil de expresar en el lenguaje del análisis de Cambridge.

Ahí comienza su primera gran transformación electromagnética.

Capítulo 5

Faraday y Maxwell

Michael Faraday no necesitaba ecuaciones para hacer físicamente interesante el espacio vacío.

No debe interpretarse esta frase como si rechazara las matemáticas.

Sus experimentos eran cuantitativos, disciplinados y extraordinariamente sofisticados.

Pero el lenguaje físico con el que representaba la acción eléctrica y magnética difería profundamente del tratamiento matemático dominante de fuerzas actuando entre cuerpos distantes.

Las líneas importaban.

La región intermedia importaba.

La dirección importaba.

Para James Clerk Maxwell, esto creaba un problema poco habitual.

¿Cómo podía hacerse matemáticamente productiva la concepción física de Faraday sin sustituirla por una teoría que Faraday no había dado?

El mundo físico que Maxwell heredó de Faraday

Las investigaciones eléctricas de Faraday ya habían transformado el espacio entre los cuerpos, de un hueco pasivo, en parte del fenómeno.

La inducción electromagnética dependía de condiciones físicas cambiantes.

Los dieléctricos afectaban a la inducción electrostática.

Las acciones magnéticas y eléctricas podían representarse mediante líneas cuya disposición describía el estado de la región que rodeaba los cuerpos.

Faraday no proporcionó a Maxwell las ecuaciones que los manuales posteriores llamarían maxwellianas.

Le proporcionó algo más difícil de traducir:

una forma física de organizar los fenómenos.

Traducir sin reemplazar

El artículo de Maxwell de 1855-56 *On Faraday's Lines of Force* anuncia directamente el problema.

Quiere presentar las ideas de Faraday en forma matemática.

Pero desconfía de dos peligros opuestos.

Uno es partir de una fórmula matemática y perder de vista los fenómenos físicos.

El otro es comprometerse demasiado con una hipótesis física e introducir accidentalmente rasgos que carecen de respaldo probatorio.

Su herramienta propuesta es la analogía física.

Una analogía física utiliza una semejanza de relaciones matemáticas entre dominios diferentes para iluminar uno mediante el otro.

La analogía puede permitir calcular sin exigir identidad literal.

El fluido imaginario

El primer gran recurso de Maxwell es un fluido incompresible.

Las líneas de fuerza se representan como si fueran líneas de corriente.

La velocidad del fluido imaginado representa la intensidad y dirección de la fuerza.

La construcción permite a Maxwell transformar una geometría difícil de la acción eléctrica y magnética en relaciones familiares de la hidrodinámica.

Pero controla inmediatamente su estatuto.

El fluido no se ofrece como la sustancia de la electricidad.

No es una afirmación acerca de lo que llena el espacio.

Maxwell afirma que es:

«ni siquiera un fluido hipotético introducido para explicar fenómenos reales».

La frase importa porque elimina un error retrospectivo fácil.

Maxwell está utilizando imágenes físicas detalladas.

Y al mismo tiempo niega que la imagen sea una teoría física literal.

Una representación puede calcular

El fluido imaginario posee, por tanto, un estatuto inusual.

Es más rico que una mera notación.

Podemos imaginar su movimiento.

Podemos utilizar ecuaciones desarrolladas para fluidos.

Pero su valor científico no depende de descubrir que la electricidad consiste literalmente en tal fluido.

La representación transporta relaciones.

Esta distinción reaparecerá una y otra vez.

Explicación prematura

Maxwell también advierte contra imponer una explicación demasiado pronto.

Cerca del final de la discusión sobre el fluido contraponen los peligros de una teoría prematura que pretenda explicar causas a la posibilidad de que una teoría más madura proporcione finalmente una explicación física después de haber interrogado más plenamente a la naturaleza.

El punto importante no es que Maxwell se oponga a la explicación física.

No se opone.

Pospone el compromiso cuando la evidencia todavía no puede sostenerlo.

Es una posición más exigente que «los modelos son meras ficciones» o «las imágenes mecánicas son la realidad».

El estado electrotónico de Faraday

El artículo se vuelve después más difícil.

Faraday había introducido un estado electrotónico en sus primeros trabajos sobre inducción electromagnética.

Fuera cual fuese la condición física representada por ese término, no era directamente medible como una fuerza ordinaria actuando en un instante.

Sin embargo, los cambios asociados a ella estaban conectados con efectos eléctricos inducidos.

Maxwell necesitaba una representación matemática capaz de transportar esa estructura.

Introdujo lo que llamó:

«funciones electrotónicas, o componentes de la intensidad electrotónica».

Estas funciones son antecesoras de lo que las matemáticas posteriores tratarían mediante el potencial vector.

Pero ese nombre posterior no debe hacer que el concepto de 1855 parezca ya acabado de antemano.

Maxwell dice lo que no sabe

El pasaje más revelador es una autoevaluación.

Maxwell escribe:

«La idea del estado electrotónico, sin embargo, todavía no se ha presentado a mi mente de una forma que permita explicar claramente su naturaleza y propiedades sin recurrir a meros símbolos.»

La limitación es suya.

No está afirmando que la teoría de Faraday sea deficiente porque carezca de una realización mecánica satisfactoria.

Está diciendo que él mismo todavía no posee una.

La distinción importa.

Los símbolos pueden utilizarse antes de que la naturaleza física del estado representado se haya vuelto clara.

Notación artificial

Maxwell hace todavía más explícito el estatuto:

«Esta representación no implica ninguna teoría física; es solo una especie de notación artificial.»

De nuevo, un lector posterior debe resistirse a convertir la frase en formalismo en el sentido del siglo XX.

Maxwell quería teoría física.

Pero aquí distingue la representación matemática de una teoría física.

La representación es útil incluso mientras su referente físico sigue sin estar claro.

Un artículo, más de un nivel representacional

Este es uno de los hechos más importantes del capítulo.

On Faraday's Lines of Force no funciona con un único estatuto epistémico fijo.

El fluido imaginario es explícitamente no literal.

Las funciones electrotónicas se describen como notación artificial.

La analogía física conecta dominios sin afirmar identidad física.

En otros momentos Maxwell discute qué tendría que explicar una futura teoría física.

Coexisten distintas herramientas representacionales.

Esto es más preciso que limitarse a decir «Maxwell utilizaba modelos».

La teoría rival de Weber

Cerca del final del artículo, Maxwell se enfrenta a una posibilidad muy diferente.

Wilhelm Weber había construido una teoría electrodinámica matemáticamente poderosa en la que partículas eléctricas actuaban directamente unas sobre otras según una fuerza dependiente de la distancia y del movimiento relativo.

Maxwell no la descarta.

La llama «una teoría realmente física, que satisface las condiciones requeridas quizá mejor que cualquiera inventada hasta ahora».

Eso vuelve su respuesta más reveladora.

¿Por qué seguir desarrollando otra representación cuando existe un rival fuerte?

Maxwell registra además una objeción específica: «También hay objeciones a hacer que fuerzas últimas de la naturaleza dependan de la velocidad de los cuerpos entre los cuales actúan». La misma familia de objeciones reaparece en su discusión de 1865 sobre las dificultades mecánicas de una acción a distancia dependiente de la velocidad.

Dos maneras de mirar

Maxwell responde:

«es bueno tener dos maneras de mirar un asunto, y admitir que existen dos maneras de mirarlo.»

Es una afirmación publicada por el propio Maxwell, no un recuerdo posterior.

Aparece en la parte final de *On Faraday's Lines of Force*.

Se está defendiendo la pluralidad de representación mientras la teoría física sigue sin resolverse.

Una teoría temporal

Maxwell continúa:

«No creo que tengamos actualmente derecho a comprender la acción de la electricidad...»

Después llega la frase especialmente importante para este libro:

«el principal mérito de una teoría temporal es que guíe el experimento, sin impedir el progreso de la verdadera teoría cuando esta aparezca.»

La formulación tiene dos caras.

Una teoría temporal debe guiar el experimento.

No es especulación ociosa.

Pero no debe bloquear una teoría mejor solo porque sus imágenes se hayan vuelto familiares.

Utilidad y verdad permanente no son idénticas.

La teoría temporal tiene una función positiva

Las frases finales van más allá de la advertencia anterior contra una teoría prematura.

Maxwell asigna explícitamente una función positiva a la teoría temporal.

Puede guiar el experimento.

Y defiende explícitamente mantener más de una manera de representar el tema.

Todavía no es un método exclusivamente maxwelliano

Sería fácil detenerse aquí y anunciar la tesis del libro.

Sería prematuro.

William Thomson ya había utilizado analogías con sugerencias mecánicas mientras evitaba comprometerse con su verdad física literal.

William Rankine había distinguido explícitamente teorías hipotéticas y abstractivas y había defendido la teoría hipotética como herramienta preliminar.

Las observaciones de Maxwell pertenecen, por tanto, a un debate victoriano más amplio acerca de analogía, mecanismo y representación.

La pregunta comparativa sigue abierta.

Lo que Maxwell tomó de Thomson

Maxwell identifica a Thomson como una fuente importante de su tratamiento matemático.

En la introducción de *On Faraday's Lines of Force* escribe que la analogía entre las fórmulas del calor y de la atracción había sido señalada, según creía, por primera vez por William Thomson.

En otro lugar del artículo cita explícitamente el trabajo de Thomson de 1847 *On a Mechanical Representation of Electric, Magnetic and Galvanic Forces*.

La conexión es, por tanto, documental, no simplemente paralela.

En 1855-56 Maxwell había leído el mismo artículo sobre representación mecánica cuya carta acompañante a Faraday servirá más adelante en este libro como control de su propio uso de la analogía.

Eso no convierte el método posterior de Maxwell en una herencia reducible a Thomson.

Sí impide una historia en la que Maxwell invente la analogía física de manera aislada.

Lo que Maxwell tomó de Faraday

La contribución de Faraday es diferente.

Las líneas de fuerza no son simplemente geometría decorativa aplicada después de que ya exista una teoría matemática.

Organizan los fenómenos físicos que Maxwell intenta conservar matemáticamente.

El estado electrotónico plantea otro problema: en el trabajo de Faraday existe una condición físicamente sugerente antes de que Maxwell disponga de una explicación matemática y mecánica satisfactoria de ella.

Maxwell traduce.

Pero la traducción modifica el objeto.

La traducción crea nuevas posibilidades

Una vez que las relaciones físicas de Faraday adquieren forma matemática, Maxwell puede compararlas con otros sistemas matemáticos.

Puede calcular casos límite.

Puede preguntar si teorías rivales producen las mismas consecuencias observables.

Puede transportar relaciones matemáticas de una analogía física a otra.

La representación se convierte en instrumento para nuevas investigaciones.

Ese es exactamente el papel positivo que Maxwell asigna a la teoría temporal.

Faraday no desaparece

Es tentador narrar esto como si las matemáticas sustituyeran la intuición de Faraday.

La teoría electromagnética posterior vuelve especialmente atractiva esa historia.

Pero Maxwell regresa repetidamente al lenguaje físico de Faraday.

Las líneas permanecen.

La polarización dieléctrica sigue siendo importante.

En 1865 Maxwell reconoce explícitamente el trabajo de Faraday de 1846 *Thoughts on Ray-Vibrations* al discutir la teoría electromagnética de la luz.

Faraday sigue siendo un coprotagonista intelectual, no un preliminar prematemático.

Una incompletitud productiva

El estado electrotónico proporciona un caso útil de comprensión incompleta.

Maxwell puede escribir ecuaciones que implican una magnitud cuya naturaleza, según él mismo reconoce, todavía no sabe explicar con claridad sin símbolos.

No es ignorancia disfrazada de conocimiento.

La limitación se declara.

Las matemáticas siguen transportando relaciones con significado experimental.

La física puede poseer, por tanto, una representación parcial disciplinada antes de poseer un mecanismo satisfactorio.

A más de mil millones de kilómetros

El siguiente gran problema del libro difícilmente podría parecer más distinto.

Saturno está a más de mil millones de kilómetros de la Tierra incluso en oposiciones relativamente cercanas.

Sus anillos no podían tocarse, muestrearse ni someterse a pruebas mecánicas.

Y, sin embargo, Maxwell llegaría a una conclusión fuerte acerca de su constitución física.

El camino no sería la analogía en la misma forma.

Sería la eliminación mediante la dinámica.

El cambio de tema es deliberado.

Si existe una unidad en el razonamiento de Maxwell, debe sobrevivir a un cambio tan grande.

Lo que establece el capítulo 5

En 1856 podemos documentar varias posiciones distintas.

Una analogía física puede calcular sin ser literalmente verdadera.

Una representación matemática puede ser útil incluso cuando Maxwell carece de una interpretación física clara de ella.

Más de una representación de los mismos fenómenos puede tener valor científico.

Una teoría temporal puede guiar el experimento sin merecer compromiso permanente.

Estas afirmaciones están ahora ancladas en el propio texto publicado de Maxwell.

La pregunta ya no es si a veces trabajaba de este modo.

Lo hacía.

La pregunta más difícil es si esto era distintivamente maxwelliano.

Para responderla necesitamos comparación.

Y necesitamos otros dominios.

Saturno proporciona el siguiente.

Capítulo 6

Saturno: lo que no puede ser estable

Saturno puede verse.

Sus anillos no pueden manipularse.

En tiempos de Maxwell, incluso su constitución física básica seguía siendo incierta.

¿Eran sólidos?

¿Fluidos?

¿Semejantes a una nube?

¿Formados por cuerpos separados?

La respuesta no podía obtenerse viajando hasta allí.

Había que inferirla a partir de lo que los distintos sistemas de anillos posibles podían y no podían hacer.

El problema le fue dado a Maxwell

La primera corrección es de autoría.

Maxwell no inventó la comparación tripartita que estructuraba el problema.

La establecieron los examinadores del Adams Prize.

El problema del Adams Prize se anunció el 23 de marzo de 1855.

El anuncio indicaba a los candidatos que consideraran tres constituciones físicas posibles:

un anillo rígido;

un anillo fluido o parcialmente aeriforme;

y un anillo formado por masas no unidas entre sí.

Los candidatos debían preguntar, para cada hipótesis por separado, si las atracciones y movimientos de Saturno y los anillos podían satisfacer las condiciones de estabilidad mecánica.

El espacio comparativo procedía, por tanto, del enunciado del premio.

La contribución de Maxwell reside en lo que hizo dentro de él.

Estabilidad, no solo apariencia

Un dibujo de Saturno puede mostrar el aspecto de un anillo.

No puede mostrar si ese anillo podría persistir dinámicamente.

Una configuración puede ser imaginable geométricamente y seguir siendo inestable.

Un anillo rígido perfectamente centrado alrededor de un planeta es un ejemplo.

En un instante, la geometría puede parecer admisible.

La pregunta importante es qué ocurre después de una pequeña perturbación.

¿Regresa el sistema?

¿Permanece acotado?

¿Se desvía cada vez más?

¿Se rompe?

La estabilidad convierte la persistencia en evidencia.

Laplace ya había atacado el anillo sólido

Maxwell no fue el primero en reconocer la dificultad.

Laplace ya había mostrado que un anillo sólido uniforme centrado en Saturno no podía permanecer estable.

Maxwell entró, por tanto, en un problema dinámico ya existente.

La pregunta históricamente útil no es:

¿Quién consideró por primera vez un anillo sólido de Saturno?

Sino:

¿Qué añadió Maxwell?

El anillo rígido uniforme

Un anillo rígido uniforme es inestable.

Si su centro se desplaza ligeramente respecto a Saturno, las fuerzas gravitatorias resultantes no se limitan a restaurarlo.

El desplazamiento puede crecer.

La simetría en el equilibrio no basta, por tanto.

Una configuración matemáticamente posible en un instante puede ser dinámicamente imposible como sistema persistente.

¿Podría sobrevivir un anillo rígido irregular?

Maxwell examinó después si un anillo rígido fuertemente no uniforme podría permanecer estable.

En principio, una concentración adecuada de masa podía alterar la dinámica.

Pero la estabilidad exigía una irregularidad extrema.

Maxwell encontró que haría falta un satélite de aproximadamente cuatro veces y media el peso del anillo, una disposición que consideró demasiado artificialmente ajustada para concordar con los arreglos naturales observados en otros lugares, pues un exceso o defecto muy pequeño volvería a hacer inestable el anillo.

El punto es sutil.

No demostró que todo anillo rígido imaginable fuera matemáticamente imposible.

Demostró que las alternativas rígidas estables exigían una constitución incompatible con lo que hacía plausible el sistema observado.

Posibilidad no es plausibilidad

Esta distinción importa a lo largo de todo el libro.

Una construcción matemática puede existir sin ser una descripción física creíble.

El anillo rígido cargado de masa constituye, por tanto, un caso límite útil.

El cálculo no pregunta simplemente:

¿Pueden escribirse ecuaciones?

Pregunta si una configuración dinámicamente admisible encaja además con el objeto astronómico que se intenta explicar.

El anillo fluido

Un anillo fluido continuo tampoco escapa al problema de la estabilidad.

Las distintas partes de un anillo así responderían de manera diferente a la atracción de Saturno.

Las perturbaciones se propagan por el fluido.

Los movimientos resultantes generan ondas y redistribuyen el material.

El análisis de Maxwell llevó a la conclusión de que un anillo fluido continuo no podía conservar el sistema de anillos observado como un cuerpo continuo estable.

Sus perturbaciones acabarían destruyendo esa continuidad.

La hipótesis fluida fracasa, por tanto, por una razón dinámica diferente de la del anillo rígido uniforme.

Un anillo de satélites separados

La tercera hipótesis cambia fundamentalmente el problema.

Supongamos que el anillo no es en absoluto un objeto coherente único.

Supongamos que consta de muchas masas independientes, cada una orbitando Saturno.

Entonces las partículas vecinas no tienen por qué compartir una única velocidad angular rígida.

Los cuerpos situados a diferentes distancias pueden girar a distintas velocidades orbitales.

El anillo se convierte en un sistema de muchos satélites, no en un único cuerpo mecánico continuo.

Este es el caso en el que el análisis de Maxwell encontró una vía viable hacia la estabilidad.

Ondas dentro de un anillo particulado

Incluso esta solución no era trivial.

Un anillo de satélites independientes puede perturbarse.

Sus partículas se influyen gravitatoriamente unas a otras.

Maxwell analizó, por tanto, ondas de perturbación que se propagaban por el anillo.

La hipótesis particulada no fue aceptada simplemente porque evitara la rigidez.

Tenía que satisfacer sus propias restricciones dinámicas.

Ahí reside buena parte de la profundidad matemática del ensayo.

El anillo oscuro importa

La dinámica no era la única evidencia.

Los astrónomos habían identificado recientemente un anillo interior tenue, el llamado anillo oscuro o crepuscular.

Su apariencia proporcionaba una restricción observacional adicional.

Maxwell sostuvo que el paso de la luz a través de una región semejante podía comprenderse si los rayos atravesaban espacios entre partículas separadas.

Un medio sólido o fluido continuo no ofrecía de manera tan natural la misma interpretación.

La evidencia óptica y el análisis dinámico apuntaban, por tanto, en la misma dirección.

Lo que concluyó Maxwell

La conclusión de Maxwell fue que los anillos debían estar constituidos por un número indefinido de partículas no conectadas, girando alrededor del planeta a distintas velocidades según sus respectivas distancias.

La conclusión es llamativa porque las partículas individuales no podían resolverse con los telescopios del siglo XIX.

Su existencia fue inferida.

Conocer por imposibilidad

El razonamiento es, por tanto, parcialmente eliminativo.

Maxwell no empieza viendo partículas individuales del anillo.

Considera constituciones físicas.

La dinámica descarta algunas.

La observación restringe otras.

Lo que queda gana credibilidad.

Es otra manera de aprender algo acerca de lo invisible.

En el capítulo 5, la analogía permitía desarrollar relaciones sin comprometerse plenamente con un mecanismo subyacente.

Aquí, la imposibilidad elimina constituciones candidatas.

Pero Maxwell no eligió los candidatos

Esta distinción debe seguir siendo visible.

Las alternativas rígida, fluida y de masas incoherentes fueron especificadas por el problema del Adams Prize.

Maxwell no creó la prueba inventando esas tres posibilidades.

Su logro estuvo en:

la profundidad del análisis de estabilidad;

el tratamiento de anillos rígidos no uniformes;

el análisis de perturbaciones y ondas en anillos particulados;

y la combinación de eliminación dinámica con evidencia astronómica, incluido el anillo oscuro.

Esto es más preciso que atribuirle todo el marco comparativo.

Frente a Laplace, no en lugar de Laplace

La relación con Laplace presenta igualmente varias capas.

Laplace ya había identificado la inestabilidad del caso rígido uniforme.

Maxwell extendió mucho más la investigación.

Preguntó qué tipos de anillo rígido no uniforme podrían sobrevivir.

Analizó anillos fluidos.

Desarrolló matemáticamente el caso particulado.

Conectó la dinámica con rasgos observados.

Aquí el progreso significa extender un problema heredado, no sustituir a un científico anterior por uno posterior.

El resultado no era directamente observable

La conclusión seguía siendo inferencial.

Ningún observador del siglo XIX vio las partículas individuales de los anillos orbitando Saturno.

La evidencia procedía de:

la existencia continuada de los anillos;

su estructura observada;

las leyes conocidas de la mecánica;

y la inestabilidad de constituciones rivales.

Es un ejemplo especialmente limpio de conocimiento físico que supera la observación directa.

Más de tres décadas después

En 1895, James Edward Keeler utilizó espectroscopia para examinar el movimiento de distintas partes de los anillos de Saturno.

Los desplazamientos Doppler mostraron que las zonas interiores se movían más rápido que las exteriores.

Ese es el patrón de rotación esperado para partículas separadas en órbita y no para un disco sólido rígido.

Esta evidencia posterior apoyó con fuerza la interpretación particulada.

Pero debe seguir siendo posterior.

Maxwell no poseía la observación de Keeler cuando escribió el ensayo.

Confirmación posterior no es evidencia anterior

La distinción es esencial.

Keeler puede decirnos que la conclusión de Maxwell sobrevivió a una prueba observacional independiente.

Keeler no puede introducirse dentro del razonamiento original de Maxwell.

La historia debe contarse, por tanto, en dos etapas:

primero la inferencia decimonónica a partir de la estabilidad;

después la prueba espectroscópica posterior.

Saturno no enseñó a Maxwell teoría cinética

Una historia retrospectiva tentadora conectaría Saturno directamente con la física molecular posterior de Maxwell.

El anillo consta de muchas partículas pequeñas.

Un gas consta de muchas moléculas pequeñas.

Ambos implican comportamiento colectivo.

Pero semejanza estructural no es causalidad documental.

No hay necesidad de afirmar que Saturno enseñó a Maxwell a pensar estadísticamente.

Los dos episodios pueden compararse sin inventar una transferencia.

Lo que puede compararse legítimamente

La comparación sigue siendo útil.

En ambos casos, el sistema contiene muchos constituyentes que no pueden seguirse individualmente.

Pero las tareas matemáticas difieren.

En Saturno, la dinámica orbital y la estabilidad eliminan constituciones físicas.

En los gases, la probabilidad y las distribuciones de velocidades describen poblaciones.

La semejanza de escala no implica identidad de método.

Este es exactamente el tipo de comparación que necesita el libro para que su tesis de unidad siga siendo contrastable.

La persistencia como evidencia

Saturno introduce una idea que reaparecerá más adelante.

Un sistema físico nos dice algo por el hecho de seguir existiendo.

Si una constitución propuesta se destruyera rápidamente bajo pequeñas perturbaciones, la persistencia observada del sistema real cuenta en contra de esa constitución.

La ausencia de catástrofe se convierte en evidencia.

Esta lógica reaparecerá de otras formas.

Un regulador que regresa tras una perturbación es estable.

Un experimento eléctrico nulo restringe una ley de fuerza porque no aparece un efecto esperado.

Lo que no ocurre puede ser físicamente informativo.

Lo que establece el caso de Saturno

El caso establece menos de lo que afirmaría una versión heroica, pero más que un mero cálculo.

Maxwell heredó un problema de premio estructurado.

Heredó el resultado anterior de Laplace.

Dentro de ese marco desarrolló un análisis dinámico profundo que eliminó las descripciones rígida y fluida continua del sistema observado e hizo del anillo particulado la interpretación física viable.

Las partículas constituyentes no se vieron directamente.

Se infirieron a partir de restricciones.

Otra vía hacia lo invisible

El capítulo 5 mostró una representación cuya utilidad podía exceder el compromiso con su mecanismo literal.

El capítulo 6 muestra otra estrategia.

A veces la estructura oculta se aborda no construyendo una imagen, sino descubriendo qué imágenes no pueden sobrevivir.

Las dos rutas son diferentes.

La diferencia importa.

Si el libro termina encontrando una unidad en el razonamiento de Maxwell, no podrá ser porque todos los problemas se resolvieran mediante analogía.

A veces Maxwell aprendía qué podía contener el mundo invisible determinando qué no podía contener.

Capítulo 7

Moléculas que nadie podía seguir

Un gas parece simple.

Llene un recipiente de aire y nada visible anuncia la violencia que supuestamente está ocurriendo en su interior.

No hay proyectiles evidentes.

No pueden verse impactos.

No puede seguirse ninguna trayectoria individual.

La presión parece suave.

La temperatura parece pertenecer al gas en su conjunto.

Y, sin embargo, a mediados del siglo XIX una imagen física cada vez más sería afirmaba que esta continuidad aparente ocultaba una población inmensa de partículas en movimiento.

Si esa imagen era correcta, la física se enfrentaba a un problema peculiar.

Los movimientos microscópicos no eran simplemente difíciles de observar.

Había demasiados para que resultara útil el ideal habitual de predicción mecánica.

La respuesta de Maxwell transformaría el problema.

En lugar de intentar conocer cada molécula, preguntaría cómo podía conocerse estadísticamente una multitud.

Probabilidad antes que moléculas

La probabilidad no entró de repente en el pensamiento de Maxwell en 1860.

Una carta a Lewis Campbell escrita en 1850, cuando Maxwell todavía se preparaba para Cambridge, contiene ya una observación llamativa acerca de lo que llamó el «cálculo de Probabilidades».

El contexto no era la teoría cinética.

La distinción importa.

No podemos utilizar un comentario juvenil sobre probabilidad como prueba de que Maxwell ya hubiera concebido la física estadística.

Pero establece que la probabilidad formaba parte de su vocabulario intelectual mucho antes de su primer artículo sobre gases.

Para nuestros fines, la pregunta importante no es si a Maxwell le gustaba la probabilidad.

Es qué ocurrió cuando la probabilidad pasó a formar parte de una teoría física cuyos componentes individuales no podían seguirse.

Un gas hecho de partículas en movimiento

La teoría cinética de los gases era anterior a Maxwell.

Daniel Bernoulli había relacionado la presión de un gas con el movimiento molecular en el siglo XVIII.

Investigadores posteriores, entre ellos Herapath, Joule, Krönig y Rudolf Clausius, desarrollaron distintas versiones de la idea.

El propio Maxwell abrió el artículo de 1860 reconociendo esta herencia:

«Daniel Bernoulli, Herapath, Joule, Kronig, Clausius, etc., han mostrado que las relaciones entre presión, temperatura y densidad en un gas perfecto pueden explicarse suponiendo que las partículas se mueven con velocidad uniforme en líneas rectas...»

La frase hace dos cosas a la vez.

Reconoce a los predecesores.

E identifica la simplificación que Maxwell está a punto de eliminar.

A menudo se había tratado a las partículas como si todas compartieran una misma rapidez.

La innovación de Maxwell consistiría en permitir que la población contuviera una distribución.

Clausius y las colisiones

Un modelo molecular ingenuo crea inmediatamente un problema.

Si las moléculas de un gas se mueven a velocidades muy altas, ¿por qué los gases no se transportan con igual rapidez de un extremo a otro de una habitación?

¿Por qué la difusión necesita un tiempo apreciable?

Clausius proporcionó una respuesta esencial.

Una molécula puede moverse rápidamente y, sin embargo, recorrer solo una distancia corta antes de chocar con otra molécula.

Su trayectoria cambia entonces repetidamente.

Un movimiento microscópico rápido no implica un transporte macroscópico rápido en una sola dirección.

Maxwell reconoció explícitamente esta contribución:

| «M. Clausius ha determinado la longitud media del recorrido...»

La frase es breve.

Su importancia no lo es.

Una vez que las colisiones dominan la imagen microscópica, seguir una molécula resulta todavía menos atractivo como método.

Su camino se interrumpe una y otra vez.

El estado de una partícula queda entrelazado con el estado estadístico de muchas otras.

El gas sigue siendo mecánico.

Pero su descripción útil no tiene por qué ser una historia mecánica completa.

Maxwell entra en el problema

Maxwell estaba leyendo a Clausius mientras desarrollaba su propia teoría cinética en 1859.

La correspondencia conservada con Stokes establece ese contexto.

La teoría fue presentada por primera vez en la reunión de la British Association celebrada en Aberdeen en septiembre de 1859 y apareció en dos partes en *Philosophical Magazine* en 1860.

La comparación con Clausius sigue siendo esencial.

Clausius ya había convertido las colisiones en algo central.

La aportación de Maxwell no consistió en sustituir un gas estático por moléculas en movimiento.

Consistió en formular una pregunta diferente acerca de esas moléculas.

¿Tenían que tener todas la misma rapidez?

La simplificación que tenía que desaparecer

El supuesto de velocidad uniforme hacía manejable el cálculo.

Pero las colisiones dificultan que un estado semejante pueda conservarse.

Incluso si todas las moléculas comenzaran con la misma rapidez, las colisiones producidas con ángulos diferentes redistribuirían el movimiento entre componentes y entre partículas.

El estado natural del gas debería contener, por tanto, una gama de velocidades.

Hoy esto parece obvio porque la distribución de Maxwell ya resulta familiar.

No era obvio antes de que alguien hiciera de la propia distribución parte de la teoría.

Ese fue el paso decisivo de Maxwell.

No una velocidad, sino una población

En *Illustrations of the Dynamical Theory of Gases*, Maxwell consideró un número muy grande de partículas esféricas perfectamente elásticas sometidas a colisiones.

Tras un número suficiente de encuentros, sostuvo, las partículas deberían asentarse en una distribución estadística regular de velocidades.

En este punto cambia el objeto del cálculo.

Ya no preguntamos:

¿Cuál es la velocidad de la molécula?

Preguntamos:

¿Cuántas moléculas tienen velocidades dentro de un intervalo determinado?

Es un cambio profundo en el nivel de descripción.

No se ha declarado inexistente la trayectoria mecánica individual.

Se ha convertido en el objeto equivocado para la pregunta.

Una analogía física sometida a prueba

Pero Maxwell fue cuidadoso acerca de lo que establecía su modelo.

No comenzó afirmando que los gases reales estuvieran constituidos literalmente por esferas perfectamente elásticas que obedecían exactamente los supuestos de su cálculo.

Escribió:

«Si se descubre que las propiedades de un sistema semejante de cuerpos corresponden a las de los gases, quedará establecida una importante analogía física.»

La frase fija el estatuto epistémico del modelo de 1860.

Las moléculas como tales ya eran tomadas en serio por muchos físicos.

El sistema concreto de Maxwell de partículas esféricas perfectamente elásticas era algo más específico.

Su relación con los gases reales tenía que ponerse a prueba.

El modelo no era el gas.

Era una analogía física candidata cuyo éxito dependía de su correspondencia con propiedades observables.

Tres componentes

Toda velocidad molecular puede descomponerse en tres componentes perpendiculares.

Maxwell utilizó x , y y z para esos componentes.

Su supuesto crucial era que:

«la existencia de la velocidad x no afecta en modo alguno a la de las velocidades y o z , puesto que todas ellas forman ángulos rectos entre sí y son independientes...»

Junto con la isotropía, esto hace que la distribución se factorice.

Las distribuciones resultantes de los componentes presentan la conocida forma de campana, de la cual se deriva la distribución de las rapidezces moleculares.

Hoy el resultado matemático es tan familiar que puede desaparecer la originalidad del movimiento representacional.

Un estado físico estaba siendo descrito ahora mediante una distribución.

Maxwell cuestiona después su propio supuesto

La derivación no debe hacerse más limpia por efecto de la retrospectiva.

El supuesto de independencia no es un teorema intemporal de la mecánica.

El propio Maxwell volvió sobre él.

En 1867 escribió:

«Como este supuesto puede parecer precario, determinaré ahora la forma de la función de otra manera.»

Esta es una evidencia histórica más fuerte que limitarse a decir que matemáticos posteriores criticaron la derivación.

La cautela procede del propio Maxwell, en 1867.

Un resultado que había introducido con éxito podía seguir siendo valioso mientras la ruta mediante la cual lo obtuvo por primera vez necesitaba ser reconsiderada.

Este patrón importará repetidamente en el libro.

La distribución no es solo ignorancia

¿Por qué utilizar probabilidad?

Una respuesta posible es meramente práctica:

porque no podemos conocer todas las velocidades moleculares.

La respuesta es insuficiente.

Una distribución de probabilidad hace más que confesar ignorancia.

Genera predicciones cuantitativas sobre el comportamiento colectivo.

A partir de una distribución pueden calcularse magnitudes medias.

Puede preguntarse por la presión.

El transporte.

Las colisiones.

La viscosidad.

La conducción térmica.

La difusión.

La representación estadística añade, por tanto, estructura en lugar de limitarse a descartar información microscópica.

Los detalles inaccesibles son sustituidos por regularidades medibles en otro nivel.

Una compresión enorme

Imagine registrar el estado mecánico completo de un gas.

Para cada molécula harían falta al menos una posición y una velocidad.

Para una cantidad macroscópica ordinaria de gas, el número de variables sería astronómico.

Y el estado cambiaría inmediatamente a medida que se produjeran colisiones.

Una distribución realiza una compresión extraordinaria.

En lugar de seguir cada molécula, la física describe cómo se reparte una población entre velocidades posibles.

La identidad individual se descarta.

Permanece la estructura estadística.

No es simplemente una conveniencia matemática.

Cambia aquello que cuenta como descripción física satisfactoria.

Mecánica sin trayectorias completas

La mecánica clásica se asocia con frecuencia al ideal de que, dadas unas condiciones iniciales exactas y unas leyes exactas, el movimiento futuro es calculable en principio.

La teoría cinética no niega necesariamente ese ideal a escala molecular.

Pero pone de manifiesto una diferencia entre determinación mecánica en principio y predicción física útil.

Aunque cada colisión obedeciera exactamente la mecánica, un gas macroscópico puede describirse con mucha mayor eficacia mediante distribuciones y promedios.

La teoría introduce así probabilidad sin exigir primero indeterminismo microscópico.

Este punto debe protegerse frente a la retrospectiva del siglo XX.

Las probabilidades de Maxwell no deben transformarse retrospectivamente en incertidumbre cuántica.

Las moléculas de su teoría de 1860 son objetos mecánicos clásicos.

La novedad reside en el nivel al que se describe la población.

De cuerpos ocultos a presión visible

La imagen molecular es directamente inaccesible.

La presión no lo es.

Un gas ejerce fuerza sobre las paredes del recipiente.

Dentro de la teoría cinética, esa presión macroscópica suave puede relacionarse con un número enorme de impactos microscópicos.

Una vez más, la magnitud visible o medible no se parece al proceso oculto que la produce.

La presión no es un pequeño impacto ampliado.

Es una magnitud colectiva que emerge de muchos impactos.

Este es un tipo distinto de puente entre estructura oculta y observación respecto de los que ya hemos encontrado.

En el vidrio sometido a tensión, un estado mecánico producía una señal óptica.

En el color, estímulos físicos producían igualaciones perceptivas.

En Saturno, la estabilidad eliminaba constituciones posibles.

En un gas, un comportamiento macroscópico suave se reconstruye a partir de una multitud de acontecimientos microscópicos que ningún observador puede seguir individualmente.

Lo que Clausius ya había conseguido

La comparación con Clausius debe seguir siendo fuerte.

Clausius ya había conectado el movimiento molecular con propiedades termodinámicas macroscópicas.

Había hecho centrales las colisiones.

Había desarrollado el recorrido libre medio.

Había tratado el movimiento molecular interno de formas que superaban el modelo más simple de partícula puntual.

El logro de Maxwell no fue, por tanto, la propia teoría cinética.

La afirmación más precisa es esta:

introdujo una distribución estadística de velocidades moleculares en la teoría cinética y comenzó a derivar propiedades medibles de los gases a partir de esa distribución.

Aquí se encuentra el cambio histórico.

Colisiones y regularidad estadística

Existe una tensión conceptual dentro de la teoría.

Las colisiones complican las trayectorias individuales.

Dos partículas se aproximan.

Chocan.

Cambian de dirección.

Repítase esto en una población inmensa y la historia microscópica resulta cada vez más difícil de seguir.

Y, sin embargo, Maxwell esperaba que la población mostrara una distribución estadística regular.

Un movimiento individual complicado podía coexistir con una regularidad colectiva simple.

Es una idea importante.

Pero el argumento de Maxwell de 1860 no debe elevarse silenciosamente al posterior tratamiento boltzmanniano del equilibrio.

Las etapas deben mantenerse diferenciadas.

Boltzmann todavía no está aquí

La expresión distribución de Maxwell-Boltzmann invita a otra distorsión.

Une dos nombres con tanta naturalidad que puede parecer que pertenecieron a una colaboración o a una teoría simultánea.

No fue así.

Ludwig Boltzmann era más joven.

Sus grandes trabajos cinéticos y estadísticos siguieron a la distribución inicial de Maxwell y desarrollaron el tema en direcciones que Maxwell todavía no había tomado.

Sus trabajos interactuarían más tarde.

En esta etapa del relato, en 1860, estamos observando la distribución de Maxwell.

Boltzmann corresponde a una etapa posterior.

Viscosidad: el resultado sorprendente

Maxwell utilizó el modelo molecular para investigar propiedades de transporte.

Una predicción resultó especialmente llamativa.

El coeficiente de viscosidad debía ser independiente de la densidad del gas.

Maxwell sabía lo sorprendente que resultaba.

Escribió:

«el coeficiente de fricción es independiente de la densidad. Una consecuencia semejante de una teoría matemática resulta muy sorprendente...»

Pero la cláusula siguiente es igual de importante:

«...y el único experimento que he encontrado sobre el asunto no parece confirmarla.»

Esto cambia la textura histórica del resultado.

En 1860, la independencia de la viscosidad respecto de la densidad no se presentó como un triunfo teórico limpio a la espera de confirmación experimental posterior.

Maxwell la publicó explícitamente reconociendo que el único experimento que conocía parecía discrepar.

El modelo generaba un resultado audaz.

La evidencia disponible todavía no lo apoyaba.

Una teoría informa contra sí misma

Esa frase importa más allá de la viscosidad.

Maxwell no ocultó la discrepancia.

La incluyó dentro del artículo.

El resultado se convierte así en un ejemplo excepcionalmente claro de teoría funcionando bajo presión probatoria.

La teoría dice una cosa.

El experimento conocido parece decir otra.

Maxwell conserva el cálculo y registra el conflicto.

Experimentos posteriores modificarán la situación probatoria.

Pero ese éxito posterior no debe proyectarse hacia atrás sobre 1860.

El fracaso del calor específico ya está presente

El artículo contiene un problema aún más profundo.

Maxwell consideró partículas más complejas que simples esferas, permitiendo compartir energía entre movimiento traslacional y rotacional.

La predicción resultante fracasaba frente a la relación conocida entre los dos calores específicos de los gases.

Maxwell escribió que:

«un sistema de partículas semejantes no podría satisfacer en modo alguno la relación conocida entre los dos calores específicos de todos los gases.»

Dio para la relación observada un valor aproximado de 1,408.

No es una dificultad que surgiera años más tarde.

Está presente en el primer artículo cinético.

El modelo logra producir una distribución de velocidades y resultados importantes de transporte al mismo tiempo que fracasa en otra comparación termodinámica fundamental.

Es la desigualdad del desarrollo teórico en su forma más clara.

Éxito y fracaso en el mismo artículo

El artículo de 1860 no puede narrarse, por tanto, como:

distribución primero,

triunfo,

problemas después.

Su estructura es más interesante.

Maxwell introduce una representación estadística poderosa.

Deriva consecuencias no triviales.

Una consecuencia entra en conflicto con el único experimento relevante que conoce.

Otra construcción fracasa frente a la relación conocida de los calores específicos.

Y publica todo ello junto.

El artículo es al mismo tiempo un avance y un registro de sus propias limitaciones.

Precisamente por eso importa para este libro.

¿Qué sobrevive?

Los fracasos no borran la distribución de velocidades.

Ni la supervivencia de la distribución convierte al modelo de esferas duras en correcto en todos los aspectos.

Distintas partes de la teoría ya tienen futuros distintos.

La representación estadística resulta duradera.

El modelo de interacción intermolecular cambiará.

El tratamiento de los calores específicos seguirá siendo problemático.

La predicción sobre viscosidad recibirá posteriormente un apoyo experimental más fuerte, pero su dependencia con la temperatura creará otro problema.

La teoría no es simplemente correcta ni simplemente incorrecta.

Sus componentes se separan.

Una distribución describe lo que nadie ve

Ningún experimentador del siglo XIX podía observar molécula por molécula la distribución completa de velocidades de Maxwell.

La distribución se infería mediante estructura teórica y mediante las consecuencias colectivas que generaba.

Eso podría hacerla parecer menos física que una trayectoria visible.

Pero la física ya había aprendido que observabilidad y utilidad física no son idénticas.

Una magnitud puede ser directamente inaccesible y, aun así, formar parte de una red estrechamente restringida de relaciones medibles.

La teoría cinética añade algo nuevo:

el objeto oculto no es simplemente un mecanismo invisible. Es toda una población.

La individualidad desaparece

Un rasgo llamativo de la descripción estadística es aquello que descarta.

¿Qué molécula tiene qué velocidad?

Para muchas cuestiones macroscópicas, no importa.

Intercambie las identidades de dos moléculas por lo demás idénticas y la distribución no cambia.

La teoría ignora deliberadamente la individualidad.

No porque las moléculas individuales hayan dejado de existir en el modelo.

Sino porque la propiedad macroscópica que se calcula no depende de sus nombres.

Saber menos de cada partícula puede permitir saber más del gas.

¿Es física la probabilidad?

A continuación surge una pregunta más difícil.

¿Qué significa exactamente la distribución de probabilidad?

¿Describe frecuencias reales dentro de una población enorme?

¿Es una representación de conocimiento incompleto?

¿Es un recurso matemático justificado por simetría?

¿Cómo producen o mantienen las colisiones la distribución?

El artículo de Maxwell de 1860 no resuelve todas estas cuestiones.

Tampoco deberíamos fingir que los fundamentos posteriores de la mecánica estadística ya estaban presentes.

La probabilidad estaba realizando ya un trabajo físico sustantivo antes de que su interpretación estuviera completamente asegurada.

Herschel y Quetelet

La forma matemática obtenida por Maxwell tenía una historia fuera de la teoría cinética.

Distribuciones semejantes en forma de campana pertenecían a la teoría de errores y a trabajos estadísticos asociados a figuras como John Herschel y Adolphe Quetelet.

Los historiadores han investigado si esas tradiciones influyeron en la derivación de Maxwell.

La posibilidad es históricamente plausible, pero la ruta documental de influencia sigue sin resolverse.

La regla de conocimiento sigue vigente.

Una forma matemática similar no establece una ruta de influencia.

Mientras no se demuestre que Maxwell leyó o utilizó esas fuentes, Herschel y Quetelet pertenecen al problema comparativo y genealógico, no a una narración causal documentada.

La disponibilidad no es conocimiento.

Semejanza no es influencia.

Saturno y las moléculas

La proximidad respecto al trabajo de Maxwell sobre Saturno resulta igualmente tentadora.

En un problema, un anillo aparentemente continuo se analizó como muchos cuerpos separados en órbita.

En otro, un gas aparentemente continuo se analizó como muchas moléculas en movimiento.

La semejanza estructural nos resulta evidente.

No debe transformarse automáticamente en una secuencia causal dentro de la mente de Maxwell.

Por ahora pueden situarse uno junto al otro.

Saturno pregunta cómo puede una multitud producir una estructura macroscópica persistente.

La teoría cinética pregunta cómo puede una multitud producir regularidad estadística.

Que Maxwell conectara o no él mismo esas preguntas del modo en que nosotros lo hacemos sigue siendo una cuestión documental.

Tres cautelas fechadas

Empieza a aparecer un patrón, pero debe registrarse, no concluirse.

En 1855 Maxwell introdujo un fluido imaginario afirmando que «ni siquiera [era] un fluido hipotético introducido para explicar fenómenos reales».

En 1860 describió su sistema de partículas elásticas como una analogía física cuya correspondencia con los gases aún debía establecerse.

En 1861 afirmó que la conexión mediante ruedas locas no era una a la que asentaría de buen grado como hipótesis eléctrica.

Tres fechas, dos dominios.

Tres cautelas fechadas.

La semejanza es históricamente significativa.

Pero si constituye un método distintivamente maxwelliano, y no una práctica decimonónica más amplia compartida con figuras como Thomson y Rankine, queda para una comparación posterior.

Debe decidirlo el Epílogo, no este capítulo.

¿Qué puede conocerse sin seguir?

Ya puede formularse el cambio más profundo del capítulo.

Tradicionalmente, la mecánica había obtenido gran parte de su poder explicativo de las trayectorias.

¿Adónde irá el planeta?

¿Cómo se moverá el proyectil?

¿Qué órbita se sigue de la fuerza?

La teoría cinética se enfrenta a un sistema en el que las trayectorias existen en principio pero no pueden servir como descripción útil principal.

Simplemente hay demasiadas.

La solución de Maxwell no consistió en abandonar la mecánica.

Consistió en cambiar el objeto de conocimiento.

No prediga cada molécula.

Prediga la distribución.

No exija la historia microscópica completa.

Calcule la regularidad colectiva.

Ese cambio abrió una nueva vía hacia lo invisible.

No fue una victoria limpia

A finales de 1860, Maxwell no había resuelto la teoría cinética.

Había creado una representación estadística de enorme potencia.

También había publicado evidencia de que partes del modelo todavía no concordaban con lo conocido.

El conflicto sobre la viscosidad cambiaría más tarde.

El problema de los calores específicos se profundizaría.

La ley de fuerza intermolecular se revisaría.

Y el propio Maxwell volvería sobre la derivación de la distribución.

Esto no empaña el logro.

Forma parte de la forma histórica real del logro.

Una representación entre varias

En 1860 el trabajo científico de Maxwell ya contenía una variedad extraordinaria de representaciones.

Curvas geométricas.

Patrones ópticos.

Ecuaciones de igualación cromática.

Líneas de Faraday.

Un fluido imaginario.

Componentes electrotónicos.

Conjuntos de partículas en órbita.

Ahora, una distribución de probabilidad sobre velocidades moleculares.

La lista resulta sugerente.

Pero sugerencia no es demostración.

El propio modelo gaseoso de 1860 nos advierte contra una separación demasiado tajante.

Las esferas perfectamente elásticas también se ofrecían como una analogía física sometida a prueba.

En electromagnetismo, otros modelos tendrían igualmente distintos niveles de compromiso.

La pregunta importante no es, por tanto:

¿Qué modelos creía Maxwell y cuáles simplemente inventaba?

Es más difícil:

¿Cómo distinguía entre las partes de una representación que estaban restringidas empíricamente, que eran provisionalmente útiles, mecánicamente concebibles o que todavía no habían sido demostradas?

Esa pregunta nos lleva ahora de nuevo al electromagnetismo.

La siguiente construcción edificará primero el medio mecánico; después llegarán el desplazamiento, la elasticidad y la propagación.

Y terminará produciendo un número que obligará a Maxwell a comparar la electricidad con la luz.

Capítulo 8

Vórtices, ruedas locas y un medio mecánicamente concebible

En 1855 Maxwell había introducido un fluido imaginario y había advertido inmediatamente al lector que no lo confundiera con una explicación física.

Seis años después hizo algo mucho más arriesgado.

Llenó el campo magnético de materia en rotación.

El cambio importa.

El fluido de *On Faraday's Lines of Force* había sido deliberadamente artificial. Su función era transportar relaciones matemáticas desde la hidrodinámica hacia la electricidad y el magnetismo.

La maquinaria de *On Physical Lines of Force* era diferente.

Había vórtices.

Había tensiones.

Había partículas intermedias.

Había movimiento de rotación.

Había algo parecido a un sistema mecánico de transmisión incorporado al propio medio.

Y Maxwell quería saber si una maquinaria semejante podía dar cuenta mecánicamente de efectos electromagnéticos conocidos.

Aquí es donde la expresión «modelo mecánico de Maxwell» se vuelve al mismo tiempo útil y peligrosa.

Útil, porque el modelo es inequívocamente mecánico.

Peligrosa, porque el artículo no asigna el mismo estatuto a todos sus componentes.

Esa distinción es la clave para comprender lo que sigue.

Tensión antes que maquinaria

Maxwell no comenzó dibujando una máquina microscópica elaborada para luego preguntar qué efectos electromagnéticos podía imitar.

Comenzó por las tensiones mecánicas requeridas en un medio magnético.

La dirección de la fuerza magnética en una región implicaba una tensión anisótropa.

Una representación mecánica tendría, por tanto, que reproducir las fuerzas resultantes correctas a lo largo y transversalmente a las líneas magnéticas.

El movimiento de rotación ofrecía una posible causa.

Un vórtice genera tensión centrífuga.

Un sistema de vórtices alineados con las líneas magnéticas podía, por tanto, reproducir las tensiones direccionales asociadas a la acción magnética.

El orden importa.

Primero aparece la relación de tensiones.

Después, una causa propuesta para esa tensión.

Más tarde el propio Maxwell hace explícita la distinción.

La tensión mecánica correspondiente a la fuerza electromagnética, escribe, es válida:

«independientemente de cualquier teoría particular acerca de la causa de este estado de tensión, o del modo en que pueda mantenerse en el medio.»

Esta frase debería gobernar todo el capítulo.

La relación de tensiones y el mecanismo propuesto para sostenerla no poseen el mismo estatuto probatorio.

Vórtices moleculares

Maxwell imaginó el medio magnético lleno de vórtices de materia en rotación cuyos ejes seguían las líneas de fuerza magnética.

La intensidad magnética correspondía a la velocidad de rotación.

Las propiedades asociadas a la inducción magnética entraban a través de propiedades asignadas al medio rotatorio.

El modelo traducía magnitudes electromagnéticas a magnitudes mecánicas.

La intensidad magnética se convertía en rotación.

La tensión magnética se convertía en tensión centrífuga.

El estado electromagnético invisible adquiriría un contenido mecánicamente imaginable.

Pero la palabra imaginable es crucial.

Un mecanismo puede hacer inteligibles unas relaciones sin que cada rasgo del mecanismo haya sido establecido de forma independiente.

Rankine ya utilizaba vórtices

Ni siquiera los vórtices moleculares eran exclusivos de Maxwell.

W. J. Macquorn Rankine había desarrollado un programa sustancial basado en vórtices antes de la construcción electromagnética de Maxwell.

Rankine afirmó que sus investigaciones sobre la acción mecánica del calor habían comenzado en 1842, y en 1855 publicó explícitamente sobre la hipótesis de vórtices moleculares en relación con la elasticidad y el calor.

Sus vórtices no eran los vórtices de Maxwell.

La física detallada y los fenómenos que pretendían explicar eran diferentes.

Pero Rankine importa como comparación porque demuestra que los mecanismos microscópicos vorticiales ya formaban parte de los recursos conceptuales de la física matemática británica.

Actualmente no existe base documental verificada para afirmar que Maxwell tomara la idea de Rankine.

El texto accesible de *On Physical Lines of Force* no lo menciona.

La semejanza, por tanto, no es influencia.

Rankine pertenece aquí como práctica paralela.

Thomson entra directamente

William Thomson ocupa una posición probatoria distinta.

Maxwell lo cita.

Thomson ya había trabajado con representaciones mecánicas de efectos magnéticos y ópticos y había separado explícitamente la analogía matemática del compromiso con una teoría física.

Más importante aún, en la Parte IV de *On Physical Lines of Force*, Maxwell invoca el argumento de Thomson relativo al efecto magnetoóptico.

Maxwell escribe que Thomson había señalado que la acción magnética sobre la luz exigía:

«una rotación real que tenga lugar en el campo magnético.»

Maxwell añade después que la dirección de rotación está conectada con la dirección de las líneas magnéticas de un modo que:

«parece indicar que el magnetismo es realmente un fenómeno de rotación.»

Es un lenguaje más fuerte que el utilizado en el artículo para otros componentes del mecanismo.

Y aparece en la Parte IV, después de la construcción anterior de tensiones.

La cronología importa.

La hipótesis de rotación no entró en todo el artículo con un único estatuto probatorio fijo.

Adquirió apoyo adicional cuando Maxwell la conectó con el problema magnetoóptico.

El problema de los vórtices vecinos

Aparece de inmediato una dificultad mecánica.

Vórtices adyacentes que giraran en el mismo sentido general tendrían superficies vecinas moviéndose en direcciones opuestas.

Si los vórtices estuvieran en contacto directo, interferirían mecánicamente.

Maxwell necesitaba una forma de conexión entre ellos.

Su solución fue colocar pequeñas partículas entre los vórtices.

Hizo explícita la analogía mecánica:

«En mecánica, cuando se pretende que dos ruedas giren en la misma dirección, se coloca entre ellas una rueda que engrana con ambas, y a esta rueda se la llama “rueda loca”.»

Maxwell propuso después capas de partículas que actuaran como esas ruedas locas entre vórtices vecinos.

El término pertenece, por tanto, a la propia descripción mecánica de Maxwell, no a una abreviatura posterior de los manuales.

La salvedad sobre las ruedas locas

Sin embargo, Maxwell se niega explícitamente a presentar esa conexión como algo establecido en la naturaleza.

Escribe:

«No la presento como un modo de conexión existente en la naturaleza, ni siquiera como uno al que asentaría de buen grado como hipótesis eléctrica.»

Continúa diciendo que es, no obstante:

«un modo de conexión mecánicamente concebible y fácil de investigar»

y añade que cualquiera que comprenda:

«el carácter provisional y temporal de esta hipótesis»

puede verse ayudado, y no obstaculizado, por ella.

Es una de las piezas de evidencia más importantes de todo el artículo.

La maquinaria de ruedas locas no es simplemente incierta.

Maxwell no le concede explícitamente su asentimiento ni siquiera como hipótesis eléctrica.

Su valor reside en que es mecánicamente concebible y calculable.

La electricidad entra en la maquinaria

Las partículas intermedias realizan, sin embargo, un trabajo sustancial dentro del modelo.

Su movimiento de traslación representa la corriente eléctrica.

Su interacción con los vórtices transmite efectos rotacionales.

Las fuerzas tangenciales corresponden a acción electromotriz.

Cuando estas partículas pasan de una región molecular a otra, Maxwell escribe que pueden:

«experimentar resistencia, de modo que se desperdicie energía eléctrica y se genere calor.»

El modelo conecta así corriente, resistencia y calor dentro de una única construcción mecánica.

Su débil estatuto ontológico no lo vuelve científicamente ocioso.

Un mecanismo provisional puede seguir generando consecuencias estructuradas.

Dirección arbitraria

No todos los rasgos de los vórtices vienen impuestos por la física.

Maxwell afirma explícitamente:

«También supusimos, de manera completamente arbitraria, que la dirección de estos vórtices es tal que...»

La convención de dirección es, por tanto, representacional.

No se presenta como un hecho descubierto acerca del medio invisible.

Esto importa porque muestra que el modelo contiene rasgos de tipos diferentes.

Algunos están restringidos por las relaciones electromagnéticas.

Otros son elecciones necesarias para completar la representación.

Un modelo no es, por tanto, un bloque único de afirmaciones igualmente respaldadas.

Tamaño indeterminado

Lo mismo ocurre con la escala.

Maxwell escribe:

«El tamaño de los vórtices es indeterminado, pero probablemente muy pequeño comparado con el de una molécula completa de materia ordinaria.»

La primera cláusula es crucial.

La teoría no determina su tamaño.

La segunda es una especulación sobre la escala probable.

Los vórtices ocupan, por tanto, una región inaccesible sin quedar fijados cuantitativamente por el modelo.

De nuevo, el componente posee un respaldo más débil que las relaciones de tensión que ayuda a representar.

Cinco capas epistémicas

El artículo puede ahora separarse en al menos cinco capas.

1. Relaciones de tensión electromagnética. Estas sobreviven independientemente de una causa mecánica concreta.
2. Rotación en el campo magnético. Se trata con mayor seriedad y recibe posteriormente apoyo mediante el argumento magnetoóptico de Thomson.
3. Conexión mediante ruedas locas. Es explícitamente provisional, mecánicamente concebible y no algo a lo que Maxwell diga que asentaría de buen grado como hipótesis eléctrica.
4. Convención de dirección. Se elige arbitrariamente.

5. Escala microscópica. Permanece indeterminada.

Esta jerarquía es más fiel a Maxwell que preguntar si «creía en el modelo de vórtices».

No existía un único grado de creencia que asignar.

¿Creía Maxwell en los vórtices?

La pregunta puede formularse ahora con mayor precisión.

¿Creía Maxwell que ocurría algo genuinamente rotacional en el campo magnético?

En la Parte IV, su lenguaje sugiere un compromiso real con la rotación, expresado con cierta cautela: «parece indicar» que el magnetismo es realmente un fenómeno de rotación.

¿Creía que el mecanismo detallado de ruedas locas existía literalmente?

No.

Su propia salvedad muestra que se reserva explícitamente ese asentimiento.

¿Creía que las relaciones de tensión eran válidas?

Afirma explícitamente que no dependen de una teoría particular de su causa mecánica.

¿Conocía el tamaño o la convención de dirección de los vórtices microscópicos?

No.

El propio texto gradúa los componentes.

El historiador no debería volver a aplanarlos.

Rankine como comparación más difícil

Este refinamiento mejora también la comparación con Rankine.

Rankine ya había distinguido hipótesis objetivas, adoptadas como representaciones probables de cosas que podían existir realmente, de hipótesis subjetivas, utilizadas como maneras convenientes de expresar las leyes de los fenómenos.

También había sostenido que la teoría hipotética podía servir como paso preliminar necesario hacia una teoría abstractiva.

Son categorías del propio Rankine.

Ya muestran que un contemporáneo podía distinguir niveles diferentes de compromiso dentro de la modelización hipotética.

La pregunta comparativa posterior es, por tanto, más estrecha.

¿Graduaba también Rankine los componentes de sus propios mecanismos de vórtices de manera tan explícita como Maxwell aquí?

La respuesta tendrá que buscarse en los propios artículos de Rankine sobre vórtices.

No deberíamos responderla a partir de comentarios necrológicos retrospectivos.

Concebibilidad mecánica

¿Por qué construir ruedas locas si Maxwell no quería asentir a ellas como maquinaria eléctrica real?

Porque vuelven mecánicamente concebible la conexión.

La frase importa.

La explicación física decimonónica exigía a menudo más que equivalencia formal.

Una teoría podía reproducir ecuaciones y dejar, sin embargo, oscuro el proceso causal.

La representación mecánica suministraba una secuencia de acciones:

rotación,

contacto,

traslación,

tensión,

resistencia,

calor.

Podía imaginarse cómo un proceso daba origen a otro.

El mecanismo realizaba, por tanto, trabajo conceptual y calculatorio aunque fuera provisional.

Un regulador dentro de la máquina electromagnética

Al explicar cómo las ruedas locas pueden transmitir movimiento mientras sus centros se desplazan, Maxwell proporciona un ejemplo mecánico concreto: el regulador de Siemens para máquinas de vapor.

La referencia merece conservarse para más adelante.

Establece que los mecanismos de regulación ya formaban parte del repertorio mecánico de Maxwell en 1861, siete años antes de *On Governors*.

No establece que transfiriera un método común del electromagnetismo a la teoría de control, o a la inversa.

Por ahora es simplemente un punto de contacto documentado.

Su importancia, si la tiene, pertenece al capítulo posterior sobre estabilidad.

El coste de la riqueza mecánica

Cada mecanismo añadido crea supuestos adicionales.

El medio debe poseer propiedades mecánicas.

Los vórtices necesitan inercia rotacional.

Las partículas intermedias necesitan restricciones.

La resistencia exige una forma de impedir su movimiento.

El calor exige otra forma de movimiento o transferencia de energía.

La máquina explicativa se vuelve cada vez más elaborada.

Esa riqueza genera poder.

También genera vulnerabilidad.

Un modelo con muchos compromisos físicos tiene muchos posibles puntos de fallo.

Rotación no es lo mismo que ruedas locas

Esta distinción será esencial más adelante.

El fracaso del mecanismo intermedio detallado no eliminaría automáticamente la idea de rotación.

El abandono de una conexión microscópica semejante a engranajes no eliminaría automáticamente la relación de tensiones.

La desaparición de toda la imagen mecánica no eliminaría automáticamente las ecuaciones derivadas de ella.

Las distintas capas pueden sobrevivir de manera diferente.

Precisamente por eso el artículo no puede clasificarse como una única hipótesis mecánica indivisible.

Una secuencia de fortalecimiento y debilitamiento

La cronología interna de *On Physical Lines of Force* se vuelve ahora analíticamente útil.

En la construcción inicial, los vórtices mecánicos proporcionan una causa posible de la tensión magnética.

La maquinaria de ruedas locas es abiertamente provisional.

Más adelante, la evidencia magnetoóptica concede al elemento rotacional una afirmación física más fuerte.

Esto significa que el modelo no se ensambla una vez y después simplemente se defiende.

Su equilibrio probatorio interno cambia a lo largo de la secuencia del artículo.

Ese es exactamente el tipo de transformación documental que este libro intenta seguir.

¿Qué sobrevive si falla la máquina?

La pregunta más importante puede formularse ahora sin ambigüedad.

Si desaparecen las ruedas locas, ¿qué queda?

Puede permanecer la relación de tensiones.

Puede permanecer, en forma transformada, la relación matemática entre intensidad magnética y rotación.

Permanece la conexión empírica entre magnetismo y rotación óptica.

El modo concreto de conexión no necesita sobrevivir con ellas.

Esta posibilidad ya no es simplemente una interpretación impuesta desde fuera.

El propio artículo nos dice que una capa es independiente de la causa particular que sostiene la tensión y que otra es explícitamente temporal.

Esto proporciona a la historia posterior una prueba concreta.

Hacia la elasticidad

La construcción vorticial todavía carece de algo esencial.

Para conectar el electromagnetismo con la luz, una perturbación debe poder propagarse.

El medio debe responder al desplazamiento.

Debe almacenar y devolver energía.

Debe poseer una forma de elasticidad.

Ese requisito transforma de nuevo el modelo.

Maxwell tiene ahora que preguntar qué ocurre cuando las partículas eléctricas intermedias se desplazan de sus posiciones de equilibrio.

Si el desplazamiento produce una fuerza restauradora, el medio puede almacenar energía.

Si las regiones vecinas interactúan adecuadamente, las perturbaciones pueden propagarse.

Este es el camino hacia uno de los cálculos más trascendentes de la física del siglo XIX.

Y el orden histórico importa enormemente.

Maxwell no comenzó con un argumento moderno de un condensador para luego añadir una corriente de desplazamiento con el fin de preservar la conservación de carga.

Llegó al desplazamiento eléctrico a través de la mecánica de un medio polarizable y elástico dentro de este modelo en evolución.

El siguiente capítulo comienza ahí.

¿Qué debería sobrevivir?

La teoría de vórtices nos deja una versión más precisa de la pregunta central del libro.

Una teoría física puede contener:

fenómenos observados,

relaciones matemáticas,

relaciones de tensión independientes del mecanismo,

una hipótesis física con cierto apoyo empírico,

maquinaria provisional,

convenciones arbitrarias,

y propiedades microscópicas indeterminadas.

Estas capas no tienen por qué compartir el mismo destino.

Eso es lo que vuelve históricamente interesante el posterior desmontaje de la maquinaria de Maxwell.

La pregunta no es simplemente si los vórtices eran verdaderos.

Es:

¿Qué partes de la construcción necesitó conservar la física posterior para conservar las relaciones que sí funcionaban?

La siguiente transformación comienza cuando se permite que el medio ceda.

No fluyendo hasta desaparecer.

Sino desplazándose.

Y empujando de vuelta.

Capítulo 9

Desplazamiento y medio elástico

Un aislante no conduce.

Suena sencillo.

Aplique una fuerza eléctrica a un metal y la electricidad puede moverse a través de él. Aplique el mismo tipo de fuerza a través de vidrio, aire u otro buen aislante y ninguna corriente de conducción sostenida atraviesa el material.

Pero algo sigue ocurriendo.

La influencia eléctrica se transmite.

Una botella de Leyden puede cargarse.

Diferentes materiales aislantes pueden comportarse de manera distinta incluso cuando todos impiden la conducción ordinaria.

Para Maxwell, esa diferencia se convirtió en una de las rutas por las que el propio medio entró en la dinámica electromagnética.

La ruta histórica importa porque la historia moderna suele contarse al revés.

Hoy puede introducirse la corriente de desplazamiento mediante un condensador que se carga, escribir una forma moderna de la ley de Ampère, observar un problema de continuidad e insertar el término que falta.

Es matemáticamente eficiente.

No fue la ruta de Maxwell.

En la Parte III de *On Physical Lines of Force*, publicada en enero de 1862 después de que las Partes I y II aparecieran en 1861, la ruta pasa por la inducción dieléctrica de Faraday, la polarización eléctrica, un medio elástico y la construcción mecánica de vórtices.

Para comprender lo que hizo Maxwell tenemos que seguir esa ruta, no sustituirla por la nuestra.

El dieléctrico de Faraday

Faraday ya había convertido la materia aislante en algo físicamente importante.

Durante sus investigaciones sobre inducción electrostática en la década de 1830 descubrió que distintas sustancias aislantes podían afectar de manera diferente a la inducción.

La región entre conductores cargados no se comportaba, por tanto, como un simple hueco geométrico pasivo.

Importaba el material que la llenaba.

Faraday trató la acción dieléctrica mediante un estado polarizado de la materia interpuesta.

Maxwell heredó ese problema físico.

En un conductor, la electricidad puede pasar de forma continua.

En un dieléctrico, la acción eléctrica puede transmitirse mientras se impide la conducción ordinaria.

¿Cómo podían pertenecer esas dos respuestas a un mismo marco físico?

Dos propiedades, no una

Maxwell comienza distinguiendo la conducción del comportamiento dieléctrico.

Escribe:

«Un cuerpo conductor puede compararse con una membrana porosa que opone más o menos resistencia al paso de un fluido, mientras que un dieléctrico es como una membrana elástica que puede ser impermeable al fluido, pero transmite la presión del fluido de un lado al otro.»

Dos materiales pueden ser igualmente buenos aislantes y, aun así, actuar de manera distinta como dieléctricos.

La distinción es esencial.

Un dieléctrico no es simplemente un mal conductor.

Posee otra respuesta eléctrica.

La comparación mecánica ya sugiere qué tipo de respuesta tiene Maxwell en mente.

Un cuerpo poroso permite el paso.

Un cuerpo elástico puede deformarse sin permitirlo.

La conducción disipa.

El desplazamiento elástico puede almacenar y devolver.

Polarización sin transporte continuo

Maxwell adopta después la imagen de polarización de Faraday.

Escribe:

«En un dieléctrico sometido a inducción, podemos concebir que la electricidad de cada molécula se desplaza de tal manera...»

Un lado de la molécula se vuelve eléctricamente positivo y el otro eléctricamente negativo.

La imagen es microscópica.

Pero el desplazamiento puede representarse en todo el dieléctrico.

Existe, por tanto, un desplazamiento eléctrico general aunque la electricidad no esté pasando continuamente de una molécula a otra como ocurre en la conducción.

La distinción es crucial.

El desplazamiento no es corriente ordinaria.

Una vez que alcanza un valor fijo, permanece fijo.

Pero mientras está cambiando, la situación es distinta.

Maxwell continúa:

«Este desplazamiento no equivale a una corriente, porque cuando ha alcanzado cierto valor permanece constante, pero es el comienzo de una corriente, y sus variaciones constituyen corrientes en dirección positiva o negativa, según aumente o disminuya el desplazamiento.»

Esta es la puerta histórica hacia lo que la física posterior aislaría como corriente de desplazamiento.

No un defecto en una ecuación moderna.

Una polarización cambiante dentro de un dieléctrico.

Relación y mecanismo se separan

Maxwell dice después algo metodológicamente decisivo:

«Estas relaciones son independientes de cualquier teoría acerca del mecanismo interno de los dieléctricos...»

La relación entre fuerza electromotriz y desplazamiento no depende lógicamente de una explicación microscópica completa.

Pero Maxwell no se detiene ahí.

Añade inmediatamente que cuando la fuerza electromotriz produce desplazamiento y el dieléctrico se recupera con una fuerza electromotriz igual:

«no podemos evitar considerar los fenómenos como los de un cuerpo elástico, que cede ante una presión y recupera su forma cuando se retira la presión.»

Las dos afirmaciones deben leerse juntas.

Las relaciones son independientes de una teoría microscópica.

Sin embargo, los fenómenos invitan con fuerza a una interpretación elástica.

Una vez más, el propio texto de Maxwell gradúa las capas representacionales.

La elasticidad entra en la Parte III

La cronología dentro del artículo importa.

La elasticidad de forma no debe proyectarse hacia atrás sobre las Partes I y II como si ya hubiera sido una propiedad establecida de las celdas vorticiales.

En la Parte III Maxwell sostiene que el modelo ahora la necesita.

Escribe:

«No he intentado explicar esta acción tangencial, pero es necesario suponer, para dar cuenta de la transmisión de la rotación desde las partes exteriores a las interiores de cada celda, que la sustancia de las celdas posee elasticidad de forma...»

La frase añade otra cautela fechada al registro.

«No he intentado explicar...»

Y después, otro supuesto requerido.

El mecanismo está creciendo.

La luz aparece como plausibilidad

La conexión óptica aparece inmediatamente.

Maxwell continúa:

«La teoría ondulatoria de la luz nos exige admitir este tipo de elasticidad en el medio luminífero para explicar las vibraciones transversales. No debe sorprendernos, por tanto, que el medio magnetoeléctrico posea la misma propiedad.»

Esto debe calibrarse cuidadosamente.

La óptica ya está presente como fuente de plausibilidad cuando se introduce la elasticidad.

La posterior comparación numérica con la velocidad de la luz todavía no se ha realizado.

Por ello no debemos ni eliminar la óptica de esta etapa ni convertir el resultado numérico posterior en su premisa oculta.

La conexión es sugerente antes de ser cuantitativa.

El propio medio es dieléctrico

Un lector moderno puede oír la palabra dieléctrico y pensar únicamente en vidrio, resina, aceite u otra sustancia aislante ordinaria situada entre conductores.

Eso es demasiado limitado para la Parte III de Maxwell.

El propio medio vorticial llena el espacio.

La sustancia celular posee elasticidad.

El desplazamiento eléctrico pertenece, por tanto, no solo a dieléctricos materiales ordinarios, sino al medio electromagnético que ocupa la región entre cuerpos.

Este punto se vuelve esencial cuando Maxwell conecte posteriormente ese medio con la luz.

No existe un vacío, vacío en el sentido moderno, dentro de la construcción mecánica.

La región intermedia está físicamente llena.

Del desplazamiento a la corriente

Maxwell realiza entonces el movimiento matemático.

Ya ha conectado fuerza electromotriz y desplazamiento eléctrico.

Diferencia esa relación respecto al tiempo.

Después afirma:

«Pero una variación del desplazamiento equivale a una corriente, y esta corriente debe tenerse en cuenta en las ecuaciones (9)...»

El desplazamiento variable entra así en las ecuaciones que relacionan corriente y fuerza magnética.

Eso es lo que respalda el texto de 1862.

Todavía no significa que Maxwell derive la velocidad de propagación de cambios eléctricos y magnéticos que se generan continuamente unos a otros.

Esa ruta posterior pertenece a *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*.

Aquí el término de desplazamiento modifica las ecuaciones electromagnéticas, pero el cálculo de propagación que sigue continúa siendo mecánico.

La continuidad viene después

Solo después de modificar las ecuaciones de corriente introduce Maxwell la ecuación de continuidad.

Ese orden es históricamente importante.

La ruta pedagógica moderna suele invertirlo:

primero aparece la continuidad,

aparece un problema,

la corriente de desplazamiento repara el problema.

El artículo de Maxwell procede de otra manera.

Primero aparecen la polarización dieléctrica y el desplazamiento.

El desplazamiento cambiante se trata como corriente.

Se modifican las ecuaciones de corriente.

Después se escribe la continuidad.

La conservación de carga pertenece a la estructura resultante.

No es el origen documentado del concepto de desplazamiento.

Energía en el desplazamiento

La imagen elástica proporciona además un lugar para la energía eléctrica recuperable.

Maxwell escribe explícitamente acerca de:

| «La energía en el medio debida a los desplazamientos eléctricos...»

De nuevo, importa el medio.

La energía eléctrica se asigna a un estado físico distribuido por el espacio.

No debemos sustituir la expresión de Maxwell por una fórmula moderna de energía de campo.

Pero el cambio conceptual ya es visible.

El medio interpuesto puede transportar energía.

Conductor y dieléctrico

El contraste puede formularse ahora con claridad.

En un conductor:

la fuerza electromotriz produce transporte continuo;

la resistencia disipa energía.

En un dieléctrico:

la fuerza electromotriz produce desplazamiento;

el medio responde elásticamente;

puede almacenarse energía;

un desplazamiento cambiante contribuye como corriente.

Diferentes respuestas materiales se integran en un mismo marco electromagnético.

Una ruta mecánica hacia la propagación

Ahora llega el punto que debe mantenerse separado de 1865.

En 1862 la velocidad de propagación es una propiedad del medio mecánico elástico.

Maxwell considera vibraciones transversales a través de la sustancia elástica de la que están formadas las celdas.

La velocidad pertinente depende de la elasticidad transversal de esa sustancia y de su densidad.

En una forma abreviada de aspecto moderno, tiene la forma de la conocida relación mecánica:

velocidad igual a la raíz cuadrada de elasticidad dividida por densidad.

Esa es la ruta.

Las celdas poseen inercia.

Poseen elasticidad de forma.

Por tanto, las perturbaciones transversales pueden viajar a través de ellas.

La velocidad viene determinada mecánicamente.

Todavía no se deriva de un ciclo recíproco en el que campos eléctricos y magnéticos cambiantes se sostienen mutuamente.

Esa segunda ruta corresponde a una etapa posterior.

Las dos rutas deben permanecer separadas

La distinción será central en el capítulo II.

1862:

una onda elástica transversal viaja por un medio vorticial mecánico.

1864-65:

Maxwell reorganiza la teoría y deriva la propagación ondulatoria a partir de ecuaciones electromagnéticas después de apartar la maquinaria detallada de vórtices.

Ambas rutas conducen hacia la luz electromagnética.

No son el mismo argumento.

Si las fusionamos, borramos una de las transformaciones más importantes del trabajo de Maxwell.

¿En qué sobrevivió realmente el desplazamiento?

La historia de supervivencia es más sutil que afirmar que el desplazamiento molecular de Maxwell desapareció mientras sobrevivía un término matemático.

Parte de la imagen molecular sí sobrevivió.

Para dieléctricos materiales ordinarios, la teoría electrónica posterior representaría la polarización mediante el desplazamiento de cargas eléctricas ligadas dentro de la materia.

Una polarización cambiante corresponde a una corriente real de carga ligada.

La imagen de Maxwell de estados eléctricos opuestos apareciendo a ambos lados de una unidad molecular no es, por tanto, simplemente la parte que la física moderna descartó más completamente.

Fue transformada.

Lo que cambió más radicalmente

La transformación más radical afecta al espacio vacío.

En la construcción de Maxwell de 1862, el medio electromagnético llena la región entre cuerpos.

Se comporta como un dieléctrico.

Posee elasticidad.

Su desplazamiento es, por tanto, desplazamiento de algo.

La electrodinámica posterior conserva la estructura matemática correspondiente en el vacío después de que el éter mecánico pierda su papel físico.

El término moderno de vacío no necesita que materia eléctrica microscópica se desplace a través de un medio elástico.

Ese es el cambio más profundo.

La relación sobrevive después de que desaparezca su referente mecánico original.

La historia detallada de esa transformación pertenece al capítulo 17.

Por ahora solo necesitamos registrar la distinción.

El registro de supervivencia

El inventario debería decir, por tanto:

Materia ordinaria:

La polarización molecular sobrevive transformada en teorías microscópicas posteriores de los dieléctricos.

Espacio vacío:

El término de desplazamiento sobrevive después de que se abandone el medio dieléctrico mecánico que originalmente proporcionaba su portador físico.

Matemáticas:

Un desplazamiento eléctrico variable en el tiempo sigue contribuyendo a las ecuaciones electromagnéticas.

Lo que sobrevive no es idéntico a lo que Maxwell imaginó originalmente.

Pero tampoco es simplemente un símbolo despojado de toda relación física.

Lo que el modelo tenía que hacer

La construcción vorticial debía reproducir relaciones electromagnéticas conocidas.

Tenía que acomodar el comportamiento dieléctrico.

Tenía que representar la tensión magnética.

Tenía que incorporar la corriente.

Tenía que dejar lugar a la polarización de Faraday.

Estas son restricciones documentales visibles en el artículo.

Eso es suficiente aquí.

Faraday permanece dentro de la construcción

La conexión con Faraday no es retórica.

La discusión de Maxwell sobre polarización dieléctrica pertenece a la línea de investigación desarrollada por Faraday.

Pero incluso aquí debemos distinguir genealogía de identidad.

Faraday proporcionó la concepción física de participación y polarización dieléctricas.

Maxwell incorpora esa concepción a una nueva estructura matemática y mecánica.

El resultado no es simplemente Faraday traducido a ecuaciones.

La representación cambia aquello que puede hacerse.

Un coeficiente dependiente del dieléctrico

La relación de Maxwell incluye un coeficiente dependiente de la naturaleza del dieléctrico.

Esa es la formulación histórica más segura en esta etapa.

Una reconstrucción posterior puede relacionar esta magnitud con el desarrollo de las constantes dieléctricas y la capacidad inductiva específica de Faraday.

La genealogía posterior no debe introducirse dentro de la terminología del propio Maxwell.

El artículo nos dice aquí lo que necesitamos:

los diferentes dieléctricos poseen distintas respuestas eléctricas.

Esas diferencias entran en las ecuaciones.

El modelo se vuelve capaz de producir ondas

Una vez que las celdas poseen inercia y elasticidad de forma, el medio puede soportar vibraciones transversales.

Ese es el hecho mecánico necesario para el siguiente paso.

La velocidad de esas vibraciones puede calcularse a partir de las propiedades mecánicas de la sustancia celular.

Después Maxwell conecta esas propiedades con magnitudes electromagnéticas.

Y solo entonces se vuelve posible una comparación numérica extraordinaria.

El número eléctrico

La medición eléctrica del siglo XIX utilizaba más de un sistema de unidades.

Una relación entre medidas electrostáticas y electromagnéticas producía una magnitud con dimensiones de velocidad.

La historia de esa magnitud es técnicamente delicada.

Weber y Kohlrausch midieron la constante electrodinámica de Weber.

Esa constante no es simplemente idéntica a la razón que Maxwell utiliza después: interviene un factor de $\sqrt{2}$ en la conversión.

La distinción se pierde con facilidad en relatos modernos.

Se tratará explícitamente en el capítulo 10.

Para el presente capítulo basta con que la medición eléctrica suministrara una magnitud numérica que podía conectarse con la velocidad de onda mecánica del medio de Maxwell.

El número todavía no ha hablado

Maxwell calculará una velocidad de aproximadamente

310.740.000.000 milímetros por segundo.

La comparará con un valor para la velocidad de la luz derivado de las mediciones de Fizeau.

Los números serán sorprendentemente próximos.

Pero la concordancia no se interpreta a sí misma.

Antes de citar la inferencia de Maxwell, el capítulo 10 debe reconstruir:

qué midieron realmente Weber y Kohlrausch;

por qué importa un factor de $\sqrt{2}$;

qué mostró y qué no mostró el trabajo de Kirchhoff de 1857 sobre señales en cables;

qué mediciones ópticas de velocidad estaban disponibles;

y qué tenía derecho Maxwell a concluir de la comparación.

Solo entonces debería aparecer la famosa inferencia.

Lo que establece el capítulo 9

La ruta hasta ahora es:

inducción dieléctrica de Faraday,

polarización,

desplazamiento eléctrico,

respuesta elástica,

desplazamiento cambiante contado como corriente,

elasticidad de la sustancia celular,

vibración mecánica transversal.

Esa es la secuencia de 1862.

No es una derivación de manual moderno.

Y todavía no es la derivación mediante ecuaciones de campo de 1865.

Mantener separadas esas tres historias es esencial.

Lo que sobrevive y lo que cambia

La maquinaria de la Parte III no sobrevivirá intacta.

Las celdas desaparecen.

Las ruedas locas desaparecen.

El dieléctrico mecánico universal desaparece.

Pero la historia no es un simple caso de mecanismo descartado y matemáticas preservadas.

La polarización molecular en materia ordinaria sobrevive en teorías microscópicas transformadas.

El desplazamiento en el espacio vacío sobrevive matemáticamente mientras pierde el portador mecánico que Maxwell le asignó.

Y el propio cálculo de ondas será reconstruido pronto por Maxwell a través de una ruta teórica diferente.

La supervivencia es selectiva.

Y transformada.

La siguiente pregunta

El medio elástico soporta ahora una perturbación transversal.

Su velocidad puede calcularse.

La medición eléctrica suministra un número con las mismas dimensiones.

La óptica suministra otro.

Maxwell está a punto de colocarlos uno junto a otro.

La comparación suele narrarse como si los números revelaran instantáneamente la naturaleza de la luz.

No fue así.

Un número solo tiene significado dentro de un argumento.

Por eso el siguiente capítulo no preguntará únicamente si los números coincidían.

Preguntará:

¿Qué tenía que ser cierto antes de que su concordancia contara como evidencia?

Capítulo 10

La velocidad

Un número no es una teoría.

Dos números que casi coinciden tampoco son una teoría.

Su concordancia se convierte en evidencia científica solo cuando existe una razón por la que deban estar conectados.

En 1861 James Clerk Maxwell obtuvo un número a partir de la electricidad y el magnetismo.

Lo comparó con un número atribuido a la velocidad de la luz.

La concordancia, tal como la informó entonces, era casi exacta.

Unos meses después, en la publicación impresa, los números eran diferentes.

Tres años más tarde, habían vuelto a cambiar.

La conclusión sobrevivió.

La historia numérica cambió.

Esa secuencia importa.

Dos sistemas para medir la electricidad

La medición eléctrica del siglo XIX tenía una complicación que la notación moderna tiende a ocultar.

Las magnitudes eléctricas podían definirse mediante efectos físicos distintos.

Un sistema se basaba en fuerzas electrostáticas.

Otro se basaba en efectos magnéticos asociados a corrientes.

La relación numérica entre ambos sistemas debía, por tanto, determinarse experimentalmente.

Y esa relación tenía dimensiones de velocidad.

Ese hecho, por sí solo, no la identificaba con la luz.

Simplemente hacía dimensionalmente posible semejante comparación.

Weber y Kohlrausch

Wilhelm Weber y Rudolf Kohlrausch realizaron en 1856 la comparación eléctrica crucial.

Determinaron una constante electrodinámica que conectaba magnitudes eléctricas medidas de formas diferentes.

Las convenciones históricas de unidades son traicioneras.

La unidad electrodinámica de corriente de Weber y la unidad electromagnética de corriente utilizada posteriormente por Maxwell difieren en un factor de $\sqrt{2}$.

El propio Maxwell afirma más tarde en el *Treatise* que la unidad electromagnética de corriente excede a la unidad electrodinámica en la razón $\sqrt{2}$ a 1.

Tras la conversión pertinente, la velocidad utilizada por Maxwell fue:

310.740.000 metros por segundo.

Esta es la cifra que posteriormente imprimió.

Weber y Kohlrausch no habían medido la luz.

Habían medido una constante eléctrica.

Antes de Maxwell: Kirchhoff

Maxwell no fue el primer físico en encontrar una velocidad comparable a la de la luz dentro de un cálculo eléctrico.

En 1857 Gustav Kirchhoff analizó la propagación en conductores dentro de un marco electrodinámico asociado con Weber.

Para un caso límite obtuvo una velocidad de propagación «muy aproximadamente igual» a la velocidad de la luz.

La velocidad numérica era igualmente la constante de Weber dividida por $\sqrt{2}$.

Es una comparación importante.

Pero no es la teoría de Maxwell.

Kirchhoff analizaba perturbaciones eléctricas en conductores.

El resultado de Maxwell de 1862 se refiere a ondas mecánicas transversales en un medio electromagnético elástico.

La igualdad de escala no borra la diferencia de arquitectura física.

Sigue sin verificarse si Maxwell conocía el resultado de Kirchhoff mientras realizaba su inferencia de 1861.

El paisaje histórico contiene el resultado.

El conocimiento documentado de Maxwell, todavía no.

La ruta de Maxwell en 1861-62

La propia ruta de Maxwell seguía siendo mecánica.

En la Parte III de *On Physical Lines of Force*, su medio posee densidad y elasticidad de forma.

Una perturbación transversal puede, por tanto, propagarse por él con una velocidad determinada por esas propiedades mecánicas.

Las magnitudes electromagnéticas determinan los parámetros relevantes.

El resultado es una velocidad derivada de mediciones eléctricas y magnéticas.

En el artículo impreso Maxwell da:

310.740.000.000 milímetros por segundo

o

193.088 millas por segundo.

El cálculo todavía no procede de campos eléctricos y magnéticos que se regeneran mutuamente.

Eso pertenece a 1864-65.

En 1862 la onda sigue siendo una vibración transversal de un medio mecánico elástico.

La carta del 19 de octubre de 1861

La evidencia más valiosa es anterior a la publicación.

El 19 de octubre de 1861 Maxwell escribió a Faraday.

La carta es contemporánea del trabajo y se conserva a través de la transmisión manuscrita.

Maxwell comienza diciendo que la concepción que había desarrollado había conducido, al ser trabajada matemáticamente, a:

«algunos resultados muy interesantes, capaces de poner a prueba mi teoría»

y a relaciones numéricas entre fenómenos ópticos, eléctricos y electromagnéticos.

La formulación importa.

La comparación es una prueba en el propio lenguaje de Maxwell.

Pero la prueba no está libre de supuestos.

El supuesto entra antes de la comparación

Maxwell explica a Faraday que, a partir de la determinación de Weber y Kohlrausch, había calculado la elasticidad del medio en el aire.

Después añade un supuesto explícito:

supone que esa elasticidad es la misma que la del éter luminífero.

Bajo ese supuesto calcula la velocidad de las vibraciones transversales.

Por tanto, la secuencia de la carta no es:

cálculo,

comparación,

identidad.

Es:

hipótesis acerca del medio,

cálculo bajo esa hipótesis,
comparación con un número óptico,
fortalecimiento de la creencia en la hipótesis.

La comparación pone a prueba una construcción que ya contiene la identificación como supuesto.

193.088 y 193.118

Maxwell da su resultado electromagnético:

193.088 millas por segundo.

Después escribe:

«Fizeau ha determinado la velocidad de la luz = 193118 millas por segundo, mediante experimento directo.»

Tal como se presenta en la carta, la diferencia es de unas treinta millas por segundo sobre aproximadamente 193.000.

Aproximadamente un 0,016 por ciento.

Después llega la célebre frase:

«Esta coincidencia no es meramente numérica.»

Leída en su contexto documental, la frase sigue a una concordancia numérica aparentemente extraordinaria.

Pero el número óptico no era el valor publicado por Fizeau

Aquí la historia se vuelve más complicada.

La cifra citada por Maxwell en la carta no procedía directamente del artículo original de Fizeau.

La reconstrucción histórica indica que Maxwell encontró 193.118 millas por segundo en un manual de J. A. Galbraith y Samuel Haughton, donde se atribuía a Fizeau.

El propio valor publicado por Fizeau era diferente.

Convertido adecuadamente, era aproximadamente:

195.937 millas por segundo.

Esto cambia la textura probatoria del episodio.

La concordancia casi exacta de la carta de Maxwell dependía del número óptico que tenía delante en aquel momento.

La medición óptica subyacente no concordaba de forma tan perfecta.

Antes de ver el número de Weber

Maxwell añade otra pieza importante de evidencia.

Dice a Faraday que había desarrollado las fórmulas en el campo antes de ver el número de Weber.

Eso establece algo real pero limitado.

Según el propio Maxwell, las fórmulas precedieron a que viera el número de Weber.

En ese sentido, la comparación es independiente del valor exacto de Weber.

No demuestra que Maxwell no tuviera ninguna idea previa de su orden de magnitud aproximado.

Según un relato histórico, Weber y Kohlrausch habían discutido ellos mismos la proximidad de su constante eléctrica a la velocidad óptica, mientras que otros trabajos historiográficos discrepan acerca de cómo la interpretaron.

Kirchhoff ya había obtenido una velocidad de propagación próxima a la de la luz en 1857.

Sigue abierta la cuestión de si Maxwell conocía alguno de esos hechos en el momento pertinente.

Se aplica, por tanto, la regla de conocimiento.

«Sea o no mi teoría un hecho»

La carta contiene una de las reservas metodológicas más fuertes de Maxwell.

Después de la comparación afirma que ahora existe:

| «fuerte razón para creer»

que los medios luminífero y electromagnético son uno solo,

| «sea o no mi teoría un hecho.»

No es una modestia decorativa.

Separa dos preguntas.

¿Es literalmente verdadera la teoría detallada?

Y:

¿Ha revelado el cálculo una relación que merece ser creída?

Maxwell las responde en niveles distintos.

Primera etapa: octubre de 1861

La primera etapa documentada es, por tanto:

Valor eléctrico: 193.088 millas/s.

Valor óptico que Maxwell tenía delante: 193.118 millas/s.

Diferencia aparente: alrededor del 0,016 %.

Fuente del número óptico: atribución a Fizeau en un manual, no el valor original publicado por Fizeau.

Interpretación de Maxwell: evidencia fuerte para identificar los medios luminífero y electromagnético, sin comprometerse plenamente con la teoría detallada.

Este es el episodio histórico de 1861.

No debe fusionarse con el artículo impreso.

Segunda etapa: enero de 1862

Cuando apareció la Parte III de *On Physical Lines of Force*, Maxwell imprimió un número óptico diferente.

Dio para la velocidad de Fizeau:

70.843 leguas por segundo

y la convirtió en:

314.858.000.000 milímetros por segundo

o

195.647 millas por segundo.

Pero la propia cifra contenía un error de transcripción.

El valor publicado por Fizeau era 70.948 leguas, no 70.843.

La comparación impresa difiere, por tanto, tanto del resultado original de Fizeau como del valor del manual que Maxwell había citado a Faraday.

La velocidad electromagnética permanece:

310.740.000 metros por segundo.

La diferencia es ahora de aproximadamente un 1,3 por ciento.

«Concuerda con tanta exactitud»

A pesar de esa diferencia mayor, Maxwell escribe en el artículo publicado:

«La velocidad de las ondulaciones transversales en nuestro medio hipotético, calculada a partir de los experimentos electromagnéticos de MM. Kohlrausch y Weber, concuerda con tanta exactitud con la velocidad de la luz calculada a partir de los experimentos ópticos de M. Fizeau, que apenas podemos evitar la inferencia de que la luz consiste en ondulaciones transversales del mismo medio que es causa de los fenómenos eléctricos y magnéticos.»

Importa la frase completa.

«Concuerda con tanta exactitud» es el juicio de Maxwell.

«Apenas podemos evitar la inferencia» es su conclusión.

La concordancia numérica es menos exacta que en la carta privada.

La conclusión sobrevive.

La segunda etapa no es la primera

Esto nos proporciona una valiosa lección contra la retrospectiva.

No hubo una única coincidencia numérica inmutable.

El número óptico cambió entre la carta y el artículo.

El valor publicado contenía un error de transcripción.

Y, sin embargo, Maxwell siguió considerando físicamente significativa la concordancia.

Esto nos dice más acerca de la estructura de su argumento que una historia pulida de igualdad exacta.

Weber y Kohlrausch como otro control

La propia constante eléctrica ya había invitado a compararla con la luz.

Según una reconstrucción histórica, Weber y Kohlrausch advirtieron la proximidad numérica pero negaron que tuviera significado físico.

La historiografía está dividida acerca de cuán explícita fue esa comparación.

Lo que importa aquí es el punto más general.

Una proximidad numérica puede existir sin portar la misma interpretación teórica.

La contribución de Maxwell no fue simplemente advertir dos números semejantes.

Fue conectar la magnitud eléctrica con una velocidad de onda transversal en el medio que identificaba con el éter luminífero.

Esa es la novedad más precisa.

Kirchhoff de nuevo

Kirchhoff refuerza el mismo punto.

Ya había encontrado una velocidad eléctrica de escala luminosa.

Pero su resultado pertenecía a la propagación en conductores.

El de Maxwell pertenecía a una vibración transversal que atravesaba un medio electromagnético identificado con el medio luminífero.

Los números por sí solos no definen el significado teórico.

Lo hace el modelo que los rodea.

¿Qué se estaba poniendo realmente a prueba?

La carta de octubre dice que los resultados son capaces de poner a prueba la teoría de Maxwell.

¿Qué, exactamente, se está poniendo a prueba?

No todas las partes del mecanismo vorticial.

No las ruedas locas.

No el tamaño de los vórtices.

No una convención arbitraria acerca de la dirección de rotación.

La comparación pone a prueba si las magnitudes eléctricas dentro de la construcción de Maxwell producen la misma escala de propagación que las ondas ópticas.

Es una prueba más estructural.

Y la propia frase de Maxwell «sea o no mi teoría un hecho» muestra que no equiparaba el éxito en esa comparación con la verificación de cada detalle mecánico.

Tercera etapa: 1865

En 1865 la situación probatoria vuelve a cambiar.

En *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*, Maxwell imprime juntas varias estimaciones de velocidad.

Para el valor electromagnético da:

310.740.000 metros por segundo.

Para Fizeau:

314.858.000 metros por segundo.

Después proporciona lo que llama los experimentos más precisos de Foucault:

298.000.000 metros por segundo.

Y añade también un valor procedente de la aberración astronómica:

308.000.000 metros por segundo.

El panorama numérico es ahora visiblemente más amplio.

Foucault amplía la diferencia

La determinación óptica mejorada de Foucault no acerca el valor óptico al valor eléctrico de Maxwell.

Lo aleja.

310,74 millones frente a 298 millones de metros por segundo supone una discrepancia de aproximadamente un 4 por ciento.

El propio Maxwell imprime ambos números.

El hecho es esencial.

En 1865 la teoría electromagnética de la luz ya no se apoyaba retóricamente en una identidad numérica casi exacta como la presentada en la carta de 1861. La segunda derivación, a partir de las ecuaciones de campo, proporcionaba otra ruta. Maxwell escribía ahora que «la velocidad de la luz deducida del experimento concuerda suficientemente bien con el valor de v deducido del único conjunto de experimentos que poseemos hasta ahora».

Tres etapas de evidencia

La cronología puede resumirse ahora.

Octubre de 1861

193.088 frente a 193.118 millas/s.

Concordancia aparente casi exacta.

Número óptico procedente de una atribución de manual.

La identidad de los dos medios entra como supuesto y queda reforzada por la comparación.

Enero de 1862

310,74 frente a 314,858 millones de m/s.

Diferencia de aproximadamente un 1,3 por ciento.

La cifra óptica contiene el error de transcripción de Maxwell.

Maxwell escribe, no obstante, «concuerta con tanta exactitud».

1865

310,74 frente a los 298 millones de m/s de Foucault, con otras estimaciones ópticas también incluidas.

La diferencia puede ser de varios puntos porcentuales.

La teoría electromagnética de la luz permanece.

La estructura probatoria ha cambiado.

La evidencia no permanece congelada

Esto es científicamente más interesante que una única igualdad milagrosa.

Un argumento inicial puede sobrevivir mientras cambia uno de sus números de apoyo.

Pero solo sobrevive si relaciones, experimentos o estructuras teóricas adicionales le proporcionan apoyo.

La fuerza de la teoría de Maxwell en 1865 no puede reducirse, por tanto, a la calidad de la concordancia numérica de 1861.

La propia teoría había sido reconstruida.

Foucault es evidencia posterior

La cronología sigue siendo esencial.

El resultado de Foucault de 1862 no condujo a Maxwell a su inferencia de octubre de 1861.

Llegó después.

Tampoco debería utilizarse Foucault simplemente como una confirmación más precisa.

Numéricamente debilitó la proximidad original.

Su importancia reside en la evolución del paisaje experimental.

El número eléctrico también cambiaría

El lado electromagnético no era una constante final entregada de una vez para siempre por Weber y Kohlrausch.

La relación entre unidades eléctricas volvería a medirse con métodos mejorados.

Esa historia pertenece al trabajo metrológico de Maxwell y se tratará más adelante.

La igualdad entre propagación electromagnética y óptica no se volvió más creíble porque las mediciones originales de la década de 1850 fueran perfectas.

No lo eran.

Se volvió más creíble porque teoría, medición y ondas electromagnéticas experimentales convergieron cada vez más.

La posibilidad anterior de Faraday

Faraday ya había especulado en 1846, en *Thoughts on Ray-Vibrations*, acerca de una propagación asociada a líneas de fuerza.

Maxwell reconoció explícitamente ese trabajo en 1865.

Pero la regla de conocimiento debe seguir respetándose para 1861.

Que Maxwell conociera y citara más tarde el artículo de Faraday de 1846 no demuestra, por sí mismo, exactamente cuándo o cómo entró en el razonamiento de 1861.

Un reconocimiento posterior no es evidencia contemporánea del proceso.

El paisaje pertenece al historiador

Weber y Kohlrausch.

Kirchhoff.

Faraday.

Thomson.

Fizeau.

Todos forman parte auténtica del paisaje histórico.

Pero debemos distinguir ese paisaje de aquello que Maxwell tenía demostrablemente delante en un momento concreto.

Para octubre de 1861 sabemos directamente que tenía el número de Weber y la cifra óptica del manual porque él mismo lo dice.

Otras posibles entradas siguen sujetas a la regla de conocimiento.

No hace falta un Eureka

Nada en este episodio exige que inventemos un destello de reconocimiento.

La carta nos da algo mejor.

Una concepción declarada.

Un desarrollo matemático.

Un supuesto.

Una prueba numérica.

Una comparación.

Una creencia reforzada.

Son actos documentales.

Bastan.

Una prueba sin victoria limpia

La comparación de velocidades es, por tanto, al mismo tiempo más fuerte y más débil que la leyenda.

Más fuerte, porque la relación matemática estaba suficientemente estructurada para que Maxwell considerara el resultado numérico una prueba genuina.

Más débil, porque la famosa concordancia cambiaba sustancialmente según el valor óptico utilizado.

La primera coincidencia casi perfecta dependía de un valor de manual.

El artículo publicado contenía un error numérico de transcripción.

La medición mejor de Foucault amplió la discrepancia.

Y la teoría de Maxwell sobrevivió a las tres etapas.

¿Qué sobrevivió realmente?

No la igualdad exacta de 1861.

No el número óptico concreto.

No todos los componentes mecánicos.

Lo que sobrevivió fue la relación:

la velocidad característica de propagación electromagnética es la velocidad de la luz.

Después, en 1864-65, Maxwell derivaría la onda a través de una ruta teórica diferente.

Eso constituye una base mucho más fuerte que cualquier coincidencia numérica individual.

Crece la serie de cautelas

El episodio de la velocidad también se suma a la secuencia documental de reservas de Maxwell.

1855:

un fluido imaginario que no se ofrece como sustancia hipotética.

1860:

un sistema de esferas elásticas cuya correspondencia con los gases todavía debía establecerse.

1861:

maquinaria de ruedas locas explícitamente provisional y temporal.

Octubre de 1861:

| «sea o no mi teoría un hecho.»

1862:

relaciones dieléctricas independientes de una teoría del mecanismo interno.

1862:

«No he intentado explicar esta acción tangencial.»

Esto constituye ya un patrón documental sustancial.

El Epílogo tendrá que compararlo con Thomson, Rankine y otros antes de decidir qué, si algo, era distintivamente maxwelliano.

Una conclusión que sobrevive a su primera evidencia

La teoría electromagnética de la luz no permaneció atada a las circunstancias numéricas exactas en las que Maxwell la anunció por primera vez a Faraday.

Es una de las lecciones más profundas del episodio.

La comparación de 1861 ayudó a Maxwell a reforzar una hipótesis.

El artículo de 1862 publicó la inferencia.

La teoría de 1865 reorganizó las matemáticas y mostró un paisaje numérico menos perfecto.

La conclusión sobrevivió porque se amplió la red de razones que la apoyaba.

Lo que ocurre después

El mecanismo detallado de vórtices había ayudado a Maxwell a obtener el primer resultado electromagnético sobre la luz.

Pero en 1865 la teoría ya no necesitaría esa maquinaria de la misma manera.

Esto nos proporciona la siguiente prueba.

Si la onda electromagnética sobrevive cuando se elimina el mecanismo microscópico, ¿qué parte de la teoría estaba transportando realmente el resultado?

Esa pregunta conduce directamente al capítulo II.

Capítulo II

Una teoría dinámica sin la maquinaria de vórtices

En 1865 Maxwell publicó una teoría del campo electromagnético que tenía un aspecto diferente del mecanismo de 1861-62.

Es fácil exagerar la diferencia.

Los vórtices moleculares y sus partículas intermedias ya no organizan la derivación.

Pero el campo electromagnético no se ha convertido en un campo moderno inmaterial.

Maxwell sigue suponiendo un medio.

Sigue hablando de energía en ese medio.

Y llama a la teoría dinámica por una razón concreta:

| «porque supone que en ese espacio hay materia en movimiento.»

La transición no es, por tanto, de mecanismo a matemáticas puras.

Es el paso de una construcción mecánica muy especificada a una teoría dinámica más general en la que el movimiento interno detallado queda sin especificar.

Un artículo escrito en 1864, publicado en 1865

On a Dynamical Theory of the Electromagnetic Field fue recibido por la Royal Society el 27 de octubre de 1864 y leído el 8 de diciembre.

El artículo impreso apareció en 1865.

Estas fechas importan porque el argumento electromagnético ya estaba cambiando mientras Maxwell continuaba trabajando dentro del programa abierto por *On Physical Lines of Force*.

El artículo posterior no es un resumen retrospectivo escrito después de que la teoría mecánica hubiera desaparecido.

Es la siguiente etapa del mismo programa de investigación.

El campo es una región de acción física

Maxwell define el campo electromagnético como la parte del espacio situada en las proximidades de cuerpos electrizados o magnéticos en la que pueden ocurrir fenómenos electromagnéticos.

Esto suena familiar a un lector moderno.

Pero el contenido físico asociado a la palabra es diferente.

Escribe explícitamente acerca de:

«un medio etéreo que llena el espacio y permea los cuerpos».

El campo no está sustituyendo a todo medio.

Describe el estado de una región en la que un medio sigue estando físicamente implicado.

¿Por qué llamarla dinámica?

Leído junto con la explicación que Maxwell da de la palabra *dinámica* en §3, el artículo trata el movimiento y la energía como propiedades del sistema físico representado.

En su teoría de campo, lo son.

Desarrolla la teoría utilizando energía cinética y potencial.

No se trata de lenguaje decorativo añadido a las ecuaciones a posteriori.

La dinámica forma parte de la arquitectura.

El campo es algo en lo que puede almacenarse energía y a través de lo cual pueden formularse relaciones dinámicas.

La alternativa de acción a distancia

Maxwell comienza frente a un competidor real.

Discute teorías asociadas a Weber y C. Neumann, describiéndolas como:

«extraordinariamente ingeniosas y de alcance maravillosamente amplio».

La formulación importa.

El programa rival no se descarta como primitivo.

Es poderoso.

Parte de su atractivo reside en su capacidad para expresar matemáticamente interacciones electromagnéticas sin construir un medio mecánico interpuesto.

La objeción de Maxwell no es que carezca de sofisticación matemática.

Señala, en cambio, las dificultades mecánicas implicadas cuando partículas actúan a distancia mediante fuerzas dependientes de sus velocidades.

Su propia teoría toma otra ruta.

La localidad todavía necesita un medio

La preferencia de Maxwell por una descripción de campo todavía no significa que la interacción ocurra en un espacio geométrico vacío sin portador físico.

El medio proporciona la localidad.

La energía y la tensión pertenecen a la región intermedia.

Los cambios se propagan a través de ella.

Por eso la palabra *campo* debe leerse históricamente.

El compromiso físico ha cambiado respecto al modelo vorticial, pero no ha desaparecido.

El párrafo más importante: §73

El propio Maxwell nos dice cómo ha cambiado el estatuto del mecanismo.

En la Parte III, §73, recuerda que en el artículo anterior había intentado dar cuenta de la acción electromagnética suponiendo:

«un tipo particular de movimiento y un tipo particular de deformación».

Después declara lo que hace ahora:

| «En el presente artículo evito cualquier hipótesis de este tipo».

Esto es más preciso que afirmar que abandonó simplemente la mecánica.

No evita la dinámica.

Evita especificar ese mecanismo mecánico interno concreto.

Después llega la reserva decisiva.

Maxwell afirma que expresiones como momento eléctrico y elasticidad eléctrica deben considerarse:

| «ilustrativas, no explicativas.»

La frase ofrece al libro uno de sus ejemplos más claros de compromiso graduado.

¿Qué sigue físicamente comprometido?

El mismo artículo que convierte esas expresiones en ilustrativas continúa afirmando que la teoría es dinámica porque hay materia en movimiento.

Coexisten, por tanto, dos niveles de compromiso.

En un nivel, Maxwell sigue comprometido con un medio físico que porta un estado dinámico.

En otro, el vocabulario mecánico concreto utilizado para representar ese estado es explícitamente ilustrativo, no explicativo.

La diferencia no debe difuminarse.

De mecanismo concreto a dinámica general

La teoría vorticial de 1861-62 proporcionaba una arquitectura interna de aspecto literal:

celdas en rotación,

deformación elástica,

partículas intermedias,

y una ruta mecánica hacia los efectos electromagnéticos.

La teoría de 1865 ya no necesita esos componentes.

En su lugar, Maxwell organiza el tema mediante energía y dinámica de sistemas conectados.

El campo se trata como un sistema dinámico sin especificar el mecanismo molecular detallado que pudiera haber debajo.

Esto supone una reducción de especificidad mecánica.

No es una retirada completa del realismo físico.

Veinte variables, veinte ecuaciones

La compactación madura de las cuatro ecuaciones enseñadas hoy no aparece todavía.

La propia presentación de Maxwell contiene veinte magnitudes y veinte ecuaciones organizadas en grupos.

Esa complejidad es históricamente importante.

La teoría que después se llamaría «ecuaciones de Maxwell» sería reorganizada sustancialmente por Heaviside, Gibbs, Hertz y otros.

La teoría de Maxwell de 1865 ya es poderosa, pero aún no posee la forma visual mediante la cual los estudiantes del siglo XX suelen encontrarla.

La segunda ruta hacia las ondas

En 1862 la velocidad de la perturbación electromagnética surgía como propiedad mecánica del medio elástico que componía las celdas.

El artículo de 1865 alcanza la propagación por otra ruta.

Maxwell toma las ecuaciones generales de campo y considera una región no conductora.

A partir de esas ecuaciones deriva una perturbación transversal que se propaga con una velocidad definida.

Los engranajes detallados ya no realizan la derivación.

La onda está ahora integrada en una teoría de campo más general.

Es la segunda ruta electromagnética del libro.

Mantenerla separada de la de 1862 es esencial.

Regresa la comparación con la luz

La velocidad vuelve a ser comparable con mediciones ópticas.

Maxwell no dice que la concordancia numérica sea exacta.

Escribe:

«Por tanto, la velocidad de la luz deducida del experimento concuerda suficientemente bien con el valor de v deducido del único conjunto de experimentos que poseemos hasta ahora.»

La cláusula final importa porque la propia evidencia eléctrica volvería a medirse más tarde.

Después formula la conclusión física más fuerte:

«la luz es una perturbación electromagnética propagada a través del campo conforme a leyes electromagnéticas.»

La diferencia entre ambas frases importa.

La evidencia numérica es aproximada.

La identificación teórica es fuerte.

Una teoría más fuerte con números menos perfectos

Esto crea una inversión histórica útil.

La carta privada de 1861 había presentado una coincidencia numérica espectacularmente próxima.

El artículo de 1862 todavía describía la concordancia como tan exacta que la inferencia parecía casi inevitable.

En 1865 las mediciones mostraban ya una dispersión visible.

Y, sin embargo, la afirmación teórica de Maxwell sobre la luz se había vuelto más explícita.

La confianza ya no descansaba en una única casi igualdad numérica dramática.

La sostenía una estructura teórica más amplia.

Las vibraciones de rayos de Faraday

Maxwell también reconoce a un predecesor que no debe borrarse de esta historia.

En la Parte I, §20, se refiere a *Thoughts on Ray-Vibrations* de Faraday, de 1846.

Faraday había especulado con que la propagación de la luz pudiera estar asociada a líneas de fuerza.

Maxwell afirma que la teoría de Faraday es:

| «la misma en sustancia»

que la teoría que él ha empezado a desarrollar en el artículo, salvo que en 1846 no había datos a partir de los cuales pudiera calcularse la velocidad de propagación.

Ese reconocimiento pertenece a 1865.

No demuestra qué sabía Maxwell del artículo en 1861.

La cuestión de conocimiento debe seguir fechándose.

¿Qué se ha vuelto independiente del mecanismo?

No todo.

La existencia de un medio sigue siendo física.

La energía en el campo sigue siendo física.

La materia en movimiento sigue siendo física.

Lo que se ha vuelto menos dependiente del mecanismo detallado es la estructura matemática que conecta las magnitudes electromagnéticas.

La teoría puede derivar propagación sin exigir al lector que acepte vórtices moleculares y ruedas locas.

Eso es un cambio real en la arquitectura representacional.

Una teoría puede hacerse más general diciendo menos

El artículo de 1865 es, en cierto sentido, menos pictórico que la teoría de 1861-62.

Especifica menos acerca de la constitución microscópica del medio.

Y, sin embargo, es más general.

Esa combinación es uno de los temas recurrentes del trabajo de Maxwell.

Eliminar detalles puede aumentar el alcance cuando esos detalles no transportan las relaciones que importan.

La teoría queda menos ligada a un mecanismo posible concreto mientras conserva la estructura dinámica necesaria para los fenómenos electromagnéticos.

Pero el mecanismo no ha muerto simplemente

La historia posterior impide una narración demasiado limpia.

Maxwell siguió discutiendo explicaciones mecánicas después de 1865.

El *Treatise* volvió a la hipótesis de vórtices moleculares al discutir la rotación magnética de la luz.

Por tanto, §73 no debe leerse como una renuncia permanente a las hipótesis mecánicas.

Su redacción es más limitada:

en el presente artículo evita una hipótesis de ese tipo.

La precisión fortalece, no debilita, el argumento histórico.

Lo que establece el capítulo II

La transición de 1862 a 1865 no es:

fantasía mecánica, verdadera teoría de campo.

Es:

mecanismo especificado, teoría dinámica de campo más general,

con el medio físico conservado,

el mecanismo detallado ya no necesario para la derivación,

y el estatuto de determinadas expresiones mecánicas explícitamente rebajado de explicación a ilustración.

Es una transición más complicada.

También más reveladora.

La siguiente pregunta es inevitable.

Si las ecuaciones pueden sobrevivir mientras cambian los mecanismos, ¿cuánta parte de la maquinaria debe creer real un físico?

Capítulo 12

¿Cuánta maquinaria debe ser real?

El trabajo electromagnético de Maxwell entre 1855 y 1865 no muestra una única relación fija entre matemáticas y mecanismo.

Muestra varias.

Un fluido imaginario puede ser abiertamente no literal.

Una magnitud electrotónica puede funcionar como notación artificial antes de que su naturaleza física esté clara.

Una teoría temporal puede guiar el experimento.

Un mecanismo de vórtices moleculares puede desarrollarse con extraordinario detalle.

Una parte de ese mecanismo puede presentarse como mecánicamente concebible mientras Maxwell afirma que no asentaría de buen grado a ella como hipótesis eléctrica.

Y en 1865 puede evitarse una hipótesis mecánica detallada mientras la teoría sigue siendo dinámica y mantiene un compromiso físico con materia en movimiento.

Esto no es inconsistencia en el sentido trivial.

Es una arquitectura estratificada de compromiso.

Diez años, varios estatutos

La secuencia abarca aproximadamente diez años.

1855-56: el fluido imaginario «ni siquiera [es] un fluido hipotético» introducido para explicar fenómenos reales.

1855-56: la representación electrotónica «no implica ninguna teoría física» y es «solo una especie de notación artificial».

1855-56: se defiende la teoría temporal porque puede guiar el experimento sin obstaculizar una futura teoría verdadera.

1861: la conexión mediante ruedas locas es mecánicamente concebible, pero Maxwell afirma que no asentaría de buen grado a ella como hipótesis eléctrica.

1862: se declara que la relación entre fuerza electromotriz y desplazamiento eléctrico es independiente de cualquier teoría del mecanismo interno de los dieléctricos.

1864-65: Maxwell afirma que en el presente artículo evita la hipótesis anterior de un movimiento y una deformación particulares, y que las expresiones mecánicas son «ilustrativas, no explicativas».

Una única etiqueta como *modelo* oculta estas diferencias.

A qué nos compromete una ecuación

El artículo de 1865 ofrece un caso especialmente claro.

Maxwell llama dinámica a la teoría porque:

| «supone que en ese espacio hay materia en movimiento.»

Ese es un compromiso físico.

Pero en §73 también afirma:

| «En el presente artículo evito cualquier hipótesis de este tipo»

al referirse al movimiento y deformación particulares anteriores.

Y dice que expresiones como momento eléctrico y elasticidad eléctrica deben considerarse:

| «ilustrativas, no explicativas.»

Eliminar las ruedas locas no elimina, por tanto, el compromiso físico.

Lo redistribuye.

La teoría está menos comprometida con un mecanismo microscópico concreto y sigue comprometida con un medio, con energía y con un estado dinámico.

No todos los símbolos tienen la misma ontología

Esto se olvida con facilidad una vez que las ecuaciones se escriben en una notación uniforme.

Una línea matemática puede contener magnitudes con estatutos físicos distintos.

Algunas pueden representar magnitudes directamente medibles.

Otras, estados inferidos.

Otras, coordenadas dentro de un formalismo dinámico.

Otras pueden funcionar como lenguaje analógico.

La ecuación por sí sola no anuncia cuál es cuál.

La interpretación histórica exige, por tanto, el texto explicativo de Maxwell.

La analogía física no es una sola cosa

La secuencia electromagnética muestra también que la «analogía» puede desempeñar varios trabajos.

Una analogía fluida puede transportar matemáticas sin afirmar una sustancia fluida literal.

Una analogía elástica puede hacer mecánicamente inteligibles tensiones y propagación.

Una construcción concreta de vórtices puede proporcionar un mecanismo desarrollado.

Un término como elasticidad eléctrica puede permanecer después como ilustración una vez que el mecanismo ha quedado sin especificar.

Llamar «analogías» a todas estas cosas es correcto pero insuficiente.

Las diferencias son epistémicas.

Un mecanismo puede ser productivo antes de ser seguro

La teoría de vórtices produjo consecuencias teóricas reales.

Organizó tensiones magnéticas.

Conectó el desplazamiento dieléctrico con la corriente electromagnética.

Produjo una velocidad de onda transversal.

Su productividad científica no puede, por tanto, evaluarse únicamente preguntando si existieron celdas de éter en rotación.

Un mecanismo puede contribuir a una teoría exitosa incluso si el propio mecanismo pierde posteriormente su estatuto.

Esto no es una excusa retrospectiva para una imagen falsa.

Las relaciones todavía tienen que sobrevivir a restricciones independientes.

Las propias reservas de Maxwell

Lo importante es que las cualificaciones no fueron inventadas por historiadores posteriores para salvarlo.

Maxwell proporcionó muchas de ellas él mismo.

| «ni siquiera un fluido hipotético»

| «solo una especie de notación artificial»

| «teoría temporal»

| «no asentaría de buen grado»

| «independientes de cualquier teoría acerca del mecanismo interno de los dieléctricos»

| «ilustrativas, no explicativas»

Tomadas conjuntamente, las frases muestran una diferenciación repetida entre lo que una representación puede hacer y cuán literalmente debe leerse.

Pero todavía no demuestran que esa diferenciación fuera exclusiva de Maxwell.

Thomson es un control, no un precursor al que superar

William Thomson complica cualquier afirmación fácil de singularidad.

En 1847 describió a Faraday su propia construcción como:

| «meramente un esbozo de la analogía matemática».

Dijo que no se había atrevido a convertirla en fundamento de una teoría física.

Sin embargo, también consideró la posibilidad de que una teoría de ese tipo, combinada con la teoría ondulatoria de la luz, pudiera explicar el efecto del magnetismo sobre la luz polarizada.

La práctica de explotar una representación mecánicamente sugerente mientras se retiene el compromiso físico pleno es, por tanto, anterior al trabajo electromagnético maduro de Maxwell.

Maxwell no está solo.

Rankine es un control todavía más incisivo

William Rankine vuelve más difícil la comparación.

En 1855 sostuvo que:

| «una teoría hipotética es necesaria como paso preliminar»

para reducir los fenómenos a simplicidad y orden antes de poder avanzar en la construcción de una teoría abstractiva.

Al mismo tiempo, Rankine desarrollaba un rico programa mecánico basado en vórtices moleculares.

Esto se aproxima mucho al patrón candidato examinado en este libro:

utilizar un mecanismo oculto especificado como herramienta de trabajo,

mientras se evita que la certeza de las relaciones generales dependa por completo de la verdad de ese mecanismo.

La semejanza debe tomarse en serio.

La semejanza no resuelve la identidad del método

El caso de Rankine impide una conclusión simple.

Su programa abstractivo buscaba relaciones cuya certeza no dependiera de la verdad de una hipótesis mecánica, mientras él seguía trabajando con esa hipótesis.

El movimiento de Maxwell en 1865 es más limitado y diferente: en ese artículo evita explícitamente el mecanismo particular anterior mientras conserva una estructura electromagnética dinámica.

Ni siquiera esa diferencia debería exagerarse.

Maxwell volvió más tarde a la explicación mediante vórtices moleculares en el *Treatise* al discutir la rotación magnética de la luz.

El registro histórico no nos ofrece una escalera limpia de mecanismo a abstracción.

Nos ofrece estrategias solapadas.

Ludvig Lorenz: otro control

Ludvig Lorenz aporta una cautela adicional.

En 1867 Lorenz desarrolló una teoría electromagnética independiente de la luz, publicada en *Philosophical Magazine*, cuarta serie, volumen 34, páginas 287-301.

Es posterior al artículo de Maxwell de 1865, pero fue desarrollada de forma independiente y por una ruta distinta, utilizando potenciales retardados.

Esto importa porque la identificación exitosa de Maxwell de la luz con una perturbación electromagnética no demuestra que su ruta mecánica o representacional concreta fuera exclusivamente necesaria.

Arquitecturas teóricas diferentes podían aproximarse a relaciones afines.

La subdeterminación no es derrota

Si varias representaciones reproducen fenómenos importantes, la física no se vuelve imposible.

El problema cambia.

Se pregunta qué relaciones son robustas entre representaciones.

Se pregunta qué experimentos adicionales pueden distinguir las alternativas.

Se pregunta si un mecanismo genera nuevas consecuencias más allá de las relaciones ya compartidas.

La multiplicidad de representaciones aumenta, por tanto, la demanda de evidencia discriminante.

No eliminan la posibilidad de conocimiento.

Las ecuaciones no eligen su propia interpretación

Las ecuaciones de Maxwell de 1865 restringen los fenómenos electromagnéticos.

No dicen por sí mismas a un historiador posterior cuán literalmente debía entenderse cada expresión mecánica que las acompañaba.

Para eso importa la prosa.

§3 nos dice que la teoría supone materia en movimiento.

§73 nos dice que determinadas expresiones mecánicas son ilustrativas, no explicativas.

Ambas afirmaciones deben leerse juntas.

Una sin la otra distorsiona la teoría.

La caja negra moderna

Un lector moderno puede resolver muchos problemas electromagnéticos sin preguntar qué sustancia mecánica llena el espacio.

Es un hecho retrospectivo útil.

No es el punto de partida de Maxwell.

Llamar «caja negra» a las ecuaciones maduras solo puede ser útil, por tanto, si se marca la metáfora como nuestra.

Maxwell no habitaba un mundo conceptual en el que las ecuaciones de campo simplemente flotarán libres de medio, energía y cuestiones mecánicas.

La pregunta histórica es cómo las relaciones adquirieron una independencia creciente respecto de imágenes mecánicas concretas.

¿Qué sobrevive a un cambio de imagen?

La respuesta difiere según el caso.

Parte del vocabulario desaparece.

Algunos mecanismos desaparecen.

Algunas relaciones permanecen.

Algunas magnitudes conservan su nombre y adquieren nuevas interpretaciones físicas.

Algunos físicos posteriores reorganizan las ecuaciones de forma tan profunda que la forma canónica ya no se parece al sistema impreso de Maxwell.

La supervivencia de una relación no es, por tanto, identidad de significado.

Es continuidad bajo transformación.

Poincaré y Duhem: lectores posteriores de la pluralidad de Maxwell

La pluralidad representacional que dejó Maxwell se convirtió en un problema para físicos y filósofos posteriores.

Poincaré destacó el poder sugerente de las múltiples rutas de Maxwell.

Duhem objetó las contradicciones que podía tolerar semejante pluralidad.

Estas respuestas pertenecen a la vida posterior de la teoría de Maxwell.

No son evidencia de lo que Maxwell pretendía privadamente, sino de lo que lectores posteriores encontraron llamativo en la arquitectura de su obra.

¿Cuánta maquinaria debe ser real?

La respuesta histórica no es un número.

Los propios escritos de Maxwell distribuyen el compromiso de manera desigual.

En algunos lugares niega explícitamente un estatuto físico literal.

En otros construye un mecanismo como explicación física plausible.

En 1865 conserva materia en movimiento mientras rehúsa especificar el mecanismo microscópico anterior.

La pregunta no puede responderse, por tanto, diciendo simplemente:

nada de la maquinaria importaba, o

la maquinaria tenía que ser literalmente verdadera.

Ambas respuestas son demasiado simples.

Lo que establece la secuencia electromagnética

Entre 1855 y 1865 Maxwell trabajó repetidamente con representaciones cuya utilidad científica no se correspondía uno a uno con su estatuto físico literal.

Esta afirmación es documental.

La afirmación adicional de que eso fuera distintivamente maxwelliano es comparativa.

Thomson y Rankine ya hacen dudosa la versión más fuerte.

Lorenz muestra que resultados teóricos relacionados podían alcanzarse independientemente.

El juicio comparativo final pertenece, por tanto, al final del libro, después de examinar los otros dominios.

Por ahora, la evidencia electromagnética nos proporciona algo más modesto y seguro:

una teoría puede realizar un trabajo científico serio mientras el estatuto ontológico de parte de su maquinaria permanece deliberadamente abierto.

Capítulo 13

Cuando fallaron las moléculas de Maxwell

Una buena teoría puede fracasar de una forma informativa.

La teoría cinética de Maxwell ya lo había demostrado en 1860.

La distribución de velocidades era poderosa.

El modelo de esferas elásticas producía consecuencias medibles.

Y Maxwell publicó evidencia de que algunas partes de la construcción ya estaban en dificultades.

Los años siguientes no se limitaron a reparar esos problemas.

Algunos experimentos reivindicaron una predicción.

Otras mediciones empujaron la teoría hacia una nueva ley molecular.

Y esa nueva ley fue elegida, según la propia explicación de Maxwell, para ajustarse a un resultado experimental que posteriormente resultó no ser correcto con carácter general.

La historia no es, por tanto, una secuencia de error seguida de corrección.

Es más interesante.

Regresa la viscosidad

La independencia de la viscosidad gaseosa respecto de la densidad había parecido sorprendente en 1860.

Maxwell había señalado explícitamente que el único experimento conocido por él no parecía confirmarla.

Volvió experimentalmente sobre la cuestión.

En 1866 podía informar de dos conclusiones llamativas:

la viscosidad era independiente de la densidad,

y, según sus mediciones, era muy aproximadamente proporcional a la temperatura absoluta.

El primer resultado apoyaba una de las predicciones más sorprendentes de la teoría cinética.

El segundo creaba otro problema.

Katherine y el experimento

Katherine Maxwell participó en el trabajo experimental, incluido el mantenimiento del aparato bajo condiciones térmicas controladas.

Lo importante aquí es que la investigación sobre viscosidad fue trabajo experimental realizado dentro de la práctica doméstica y de laboratorio de Maxwell, no simplemente un cálculo comprobado por otra persona.

La densidad funciona

El resultado relativo a la densidad es teóricamente llamativo.

Reducir la densidad de un gas deja menos moléculas para transportar cantidad de movimiento.

Pero también aumenta sus recorridos medios entre colisiones.

Esos efectos pueden compensarse.

La viscosidad puede, por tanto, permanecer casi independiente de la densidad.

A mediados de la década de 1860, los trabajos experimentales, incluidos los de Maxwell y otros investigadores como O. E. Meyer, estaban haciendo cada vez más creíble esta predicción inicialmente sorprendente.

Un resultado que en 1860 estaba enfrentado al único experimento conocido por Maxwell estaba adquiriendo apoyo empírico.

La temperatura falla

La dependencia con la temperatura era distinta.

Para esferas duras elásticas, la teoría daba una viscosidad que variaba aproximadamente como la raíz cuadrada de la temperatura absoluta.

Los experimentos de Maxwell sugerían, en cambio, que la viscosidad era proporcional a la temperatura absoluta.

Concluyó, por tanto, que debía abandonarse la interacción de esferas duras.

Su afirmación de 1867 es excepcionalmente explícita:

«El resultado experimental de que la viscosidad es proporcional a la temperatura absoluta nos obliga a abandonar esta hipótesis...»

Después declara qué debe sustituirla:

«...y a adoptar la hipótesis de una fuerza repulsiva inversamente proporcional a la quinta potencia de la distancia entre las moléculas, que es la única ley de fuerza que proporciona este resultado.»

Esa es la razón declarada por Maxwell.

La nueva ley de fuerza fue elegida para reproducir la dependencia con la temperatura que se había medido.

La ley de la quinta potencia

Una fuerza repulsiva que variara con la inversa de la quinta potencia de la distancia intermolecular tenía una propiedad matemática notable.

Hacía tratables partes importantes del problema de colisiones.

Los coeficientes de transporte podían derivarse con una potencia analítica inusual.

Las partículas que obedecen esta interacción acabarían conociéndose como moléculas de Maxwell.

Pero la tratabilidad era una consecuencia de la elección.

No fue la razón que Maxwell dio para realizarla.

La razón que dio fue el ajuste experimental.

El experimento había desviado el modelo

Ese ajuste no permaneció seguro.

En 1893 William Sutherland podía mirar retrospectivamente la historia y escribir que Maxwell había sido llevado, por experimentos inexactos, a creer que la viscosidad de los gases naturales era proporcional a la temperatura absoluta.

Mediciones posteriores dieron exponentes de temperatura que variaban aproximadamente entre 0,7 y 1,0, según el gas.

La proporcionalidad simple $\eta \propto T$ no era una ley universal.

La ironía histórica es aguda.

El experimento había obligado a Maxwell a abandonar las esferas duras.

Pero el experimento también lo empujó hacia una ley de fuerza ajustada a una relación que tampoco era correcta con carácter general.

El experimento puede restringir en la dirección equivocada

Esto complica una filosofía simple de la contrastación.

A menudo decimos que el experimento restringe la libertad de los modelos invisibles.

Lo hace.

Pero los experimentos son mediciones, y las mediciones pueden ser erróneas.

Un modelo puede, por tanto, modificarse en respuesta a una evidencia que después cambia.

Eso no vuelve opcional el experimento.

Significa que la propia restricción tiene una historia.

Lo que siguió siendo valioso

El modelo de quinta potencia no quedó científicamente vacío porque la relación con la temperatura que lo motivó fuera inexacta.

Su tratabilidad matemática generó resultados cinéticos importantes.

Se convirtió en una interacción idealizada muy productiva.

Un modelo puede, por tanto, adquirir valor por razones distintas de la razón empírica que originalmente lo seleccionó.

De nuevo, las capas se separan.

Maxwell revisa su propia derivación

Como señaló el capítulo 7, el artículo de 1867 vuelve a la distribución de velocidades y al supuesto anterior de independencia de Maxwell, que ahora afirma que «puede parecer precario».

Ofrece otra ruta hacia la distribución.

La distribución permanece.

Su justificación cambia.

Clausius como crítico

Clausius había proporcionado uno de los fundamentos de la teoría mediante los recorridos libres medios y las colisiones.

También criticó el tratamiento de Maxwell de la conducción del calor.

Maxwell lo reconoce directamente en 1867:

«había varios errores en mi teoría de la conducción del calor en los gases que M. Clausius ha señalado en una elaborada memoria sobre el asunto.»

Clausius sigue siendo, por tanto, un control, no simplemente un predecesor abandonado una vez que Maxwell entra en la historia.

El problema de los calores específicos

Una dificultad más profunda resistió a los cambios en la ley de colisión.

La mecánica clásica sugería que los modos independientes de movimiento disponibles debían participar en el reparto de energía.

Para moléculas capaces de algo más que traslación simple, esto generaba predicciones sobre capacidades caloríficas.

Los gases observados no cooperaban.

Maxwell ya había encontrado el problema en 1860.

Persistió.

En 1875 lo llamó:

«la mayor dificultad encontrada hasta ahora por la teoría molecular.»

La frase es una de las afirmaciones antitriunfalistas más fuertes de su trabajo cinético.

La sugerencia alternativa de Boltzmann

Boltzmann fue uno de quienes intentaron comprender la dificultad. Maxwell informó de la sugerencia de Boltzmann de que la explicación podía residir en la acción mutua entre las moléculas y el medio etéreo que las rodeaba.

Esa propuesta no proporcionó la solución cuántica posterior.

Su importancia aquí es comparativa.

El fracaso era visible.

Diferentes físicos proponían mecanismos distintos.

Ninguno poseía la respuesta del siglo XX.

Ningún rescate cuántico anticipado

La teoría cuántica posterior transformaría el problema de los calores específicos cambiando los supuestos que gobiernan los grados internos de libertad.

Ese conocimiento no debe insertarse en el razonamiento de Maxwell.

Para Maxwell, la discrepancia quedó sin resolver.

Podía identificar el fracaso.

No podía saber por qué la equipartición clásica acabaría dejando de aplicarse del modo esperado.

Éxito y fracaso coexisten

A finales de la década de 1860, la teoría cinética contiene, por tanto, varias capas con destinos probatorios diferentes.

La distribución de velocidades: conservada.

La independencia de la viscosidad respecto de la densidad: cada vez más apoyada.

La interacción de esferas duras: abandonada.

La proporcionalidad con la temperatura: aceptada provisionalmente, debilitada después.

La ley de quinta potencia inversa: productiva, pero históricamente ligada a una relación empírica inexacta.

El tratamiento de la conducción térmica: corregido tras la crítica de Clausius.

El calor específico: problema serio y no resuelto.

Ninguna etiqueta única, éxito o fracaso, captura la teoría.

Una teoría puede equivocarse por razones productivas

La lección más importante no es que Maxwell cometiera errores.

Todos los científicos los cometen.

Es que una restricción empírica equivocada podía generar un modelo que siguiera siendo matemáticamente productivo.

Ese hecho complica los relatos retrospectivos de racionalidad científica.

Las teorías no siempre mejoran acercándose monótonamente a la verdad en cada paso intermedio.

A veces una medición incorrecta desvía una teoría hacia una representación que, aun así, expone estructura útil.

Supervivencia selectiva de nuevo

La historia cinética se vuelve ahora genuinamente paralela al electromagnetismo en un nivel.

En electromagnetismo, desaparece la maquinaria detallada de vórtices mientras sobreviven el desplazamiento y las relaciones de onda.

En teoría cinética, desaparece la interacción de esferas duras mientras sobrevive la distribución.

Después una ley de fuerza substitutiva adquiere su propia historia mixta.

El paralelismo es documental.

Que Maxwell entendiera conscientemente ambos episodios mediante una sola filosofía sigue sin demostrarse.

Lo que enseña el fracaso

Los mecanismos invisibles están subdeterminados precisamente porque muchos mecanismos pueden reproducir algunos hechos observados.

El experimento elimina ciertas posibilidades.

Experimentos posteriores pueden reabrirlos.

Una teoría exitosa de lo invisible debe, por tanto, sobrevivir no a una prueba única, sino a una red evolutiva de restricciones.

La teoría cinética de Maxwell no alcanzó su importancia evitando el fracaso.

Se volvió importante mientras transportaba el fracaso dentro de sí.

Capítulo 14

Estabilidad, reguladores y ley estadística

Una máquina de vapor puede funcionar demasiado rápido.

Si disminuye la carga mientras se mantiene la potencia motriz, su velocidad aumenta.

Un regulador detecta el cambio y modifica el suministro.

La corrección puede restablecer el movimiento deseado.

O puede llegar demasiado tarde.

Puede ser demasiado intensa.

El sistema puede sobrepasar el valor deseado.

Una segunda corrección puede sobrepasarlo en la dirección opuesta.

Un dispositivo diseñado para regular puede convertirse él mismo en una fuente de oscilación.

En 1868 Maxwell dio a este problema una forma matemática general.

No fue la primera matemática de los reguladores

No inauguró el tema.

George Biddell Airy ya había analizado matemáticamente el comportamiento de los reguladores en 1840.

Y las cuestiones generales de estabilidad algebraica estimuladas por el artículo de Maxwell serían llevadas posteriormente más lejos por Edward Routh, cuyo trabajo para el Adams Prize de 1877 proporcionó un criterio general de estabilidad.

Maxwell forma parte de ese desarrollo, no está fuera de él.

Su contribución fue formular el problema de regulación con suficiente generalidad para que la estabilidad de la respuesta dinámica completa se convirtiera en objeto de análisis.

El regulador que Maxwell ya conocía

Los mecanismos de regulación ya formaban parte del vocabulario técnico de Maxwell.

En *On Physical Lines of Force* de 1861 se refirió al regulador de Siemens al explicar ruedas locas cuyos centros podían desplazarse.

Eso establece familiaridad.

No establece una ruta causal del electromagnetismo a la teoría de control.

Siete años más tarde, la propia regulación se convirtió en el tema.

Casi uniforme

Maxwell comienza *On Governors* definiendo un regulador como:

«una parte de una máquina por medio de la cual la velocidad de la máquina se mantiene casi uniforme, a pesar de las variaciones en la fuerza motriz o en la resistencia.»

La palabra casi importa.

Se permite que el sistema se aparte de su condición nominal.

La pregunta es qué ocurre después.

Retroalimentación, retrospectivamente

La teoría moderna de control llama retroalimentación al bucle subyacente.

Ese es nuestro término posterior.

La estructura básica está, no obstante, presente:

el estado de la máquina afecta al regulador;

el regulador modifica la acción motriz;

la acción modificada vuelve a cambiar el estado.

Que el bucle estabilice o no el sistema depende de la dinámica de toda la conexión.

La estabilidad trata de la respuesta

Una condición de funcionamiento en equilibrio no basta.

Un sistema puede poseer un equilibrio y seguir siendo inutilizable porque pequeñas perturbaciones crezcan.

La pregunta clave es dinámica:

¿la desviación decae,

persiste,

oscila,

o aumenta?

Esto conecta estructuralmente los reguladores con el trabajo anterior de Maxwell sobre la estabilidad de Saturno.

Pero estructura no es genealogía.

Saturno no «enseñó» teoría de control

Saturno y los reguladores implican ambos perturbaciones.

Eso no demuestra que Maxwell transfiriera conscientemente un método de un problema al otro.

La afirmación documentada es más limitada.

En dominios distintos, Maxwell analizó si las desviaciones respecto de un estado nominal disminuyen o se amplifican.

Ese patrón es visible en las matemáticas.

No hace falta ningún puente mental oculto.

El demonio entra antes de *Theory of Heat*

El 11 de diciembre de 1867 Maxwell escribió a Peter Guthrie Tait acerca de un ser hipotético capaz de observar y clasificar moléculas.

En la carta, el ser se describe mediante capacidades extraordinarias de observación y manipulación.

Cuando Maxwell presentó más tarde la idea en *Theory of Heat* en 1871, describió:

«un ser cuyas facultades están tan agudizadas que puede seguir cada molécula en su recorrido».

La palabra demonio no fue la etiqueta original de Maxwell.

William Thomson puso por escrito «los demonios inteligentes de Maxwell» en 1874.

Lo que muestra el ser

El experimento mental servía para mostrar que conclusiones aplicables de forma fiable a poblaciones inmensas de moléculas no tienen por qué operar como restricciones mecánicamente inviolables sobre cada molécula individual.

Un ser suficientemente discriminante podría clasificar movimientos moleculares de maneras que los procesos macroscópicos ordinarios no pueden realizar.

El punto concierne al carácter estadístico de la regularidad termodinámica.

No es necesario reconstruirlo como un «propósito» privado no documentado de Maxwell más allá de lo que sostiene su tratamiento publicado.

Una ley de multitudes

La segunda ley difiere, por tanto, de una prohibición elemental incorporada a cada colisión.

Su abrumadora fiabilidad pertenece a sistemas que contienen cantidades inmensas de partículas.

Las posibilidades mecánicas microscópicas y las regularidades estadísticas macroscópicas ocupan niveles descriptivos diferentes.

La distinción es exactamente el tipo de razonamiento físico estratificado que había hecho posible la teoría cinética.

Boltzmann como control

El trabajo de Boltzmann de 1868 extendió la distribución de velocidades de Maxwell y comenzó a desarrollar el tratamiento estadístico en direcciones que acabarían siendo centrales para la teoría cinética.

Por tanto, no es simplemente un nombre posterior añadido a la distribución de Maxwell.

Es una voz independiente en desarrollo dentro del mismo problema.

La interpretación estadística de la regularidad macroscópica quedaría cada vez más asociada a esta línea de trabajo Maxwell-Boltzmann, aunque la formulación temprana de ninguno de los dos debe confundirse con el marco maduro del siglo XX.

Puntos singulares

Maxwell también reflexionó directamente sobre la amplificación de causas pequeñas.

En un ensayo para el Eranus Club pronunciado el 11 de febrero de 1873, discutió lo que llamó puntos singulares.

En esos puntos, influencias demasiado pequeñas para que un observador finito pudiera tenerlas en cuenta podían producir consecuencias de gran importancia.

Sus ejemplos incluyen la roca aflojada por la helada y la pequeña chispa que incendia un bosque.

Esto no es teoría moderna del caos.

Pero sí es un reconocimiento documentado de que la predictibilidad puede fallar de manera drástica cerca de configuraciones sensibles incluso cuando las propias leyes físicas permanecen intactas.

Determinismo y conocimiento práctico

Una ecuación determinista no produce automáticamente predictibilidad práctica.

La predicción depende también de la sensibilidad a las condiciones iniciales, de la estabilidad y de la precisión con que puedan conocerse las variables relevantes.

Maxwell no formuló la dinámica no lineal del siglo XX.

Pero había identificado una brecha lógica entre evolución regida por leyes y predicción finita fiable.

Tres problemas de estabilidad

Podemos situar ahora tres episodios uno junto a otro.

Saturno:

¿Qué constituciones posibles sobreviven a una perturbación?

Reguladores:

¿Qué sistemas reguladores suprimen las desviaciones en lugar de amplificarlas?

Física estadística:

¿Qué regularidades macroscópicas siguen siendo fiables a pesar de movimientos microscópicos no controlados?

Los problemas no son idénticos.

Sus lenguajes matemáticos difieren.

Pero cada uno pregunta qué permanece estable cuando el sistema es perturbado.

Un hilo transversal, no un programa oculto

La recurrencia es suficientemente fuerte para ser analíticamente útil.

No establece un método maxwelliano privado único.

Airy, Routh, Clausius y Boltzmann garantizan que la clase comparativa siga visible.

La conclusión defendible es más limitada:

Maxwell trabajó repetidamente con sistemas físicos en los que la respuesta a una perturbación proporcionaba más información que el estado ideal por sí solo.

La estabilidad cambia lo que hay que conocer

No hace falta conocer todos los detalles de un sistema para saber si las perturbaciones decaen.

No hace falta seguir cada molécula para conocer una distribución estadística.

No hace falta reconstruir cada instante del mecanismo de un regulador para derivar una condición de estabilidad.

Las relaciones a nivel de sistema pueden, por tanto, sostener predicciones incluso cuando el conocimiento microscópico es incompleto.

No es un argumento contra el mecanismo.

Es un argumento acerca de niveles de descripción.

Hacia la medición

Un regulador requiere una desviación medible.

Una teoría de gases requiere magnitudes macroscópicas medibles.

Una teoría electromagnética requiere unidades reproducibles.

El siguiente capítulo se ocupa de la infraestructura que permite que esas comparaciones se vuelvan cuantitativas.

La medición no es simplemente el lugar donde se comprueba la teoría.

Ayuda a determinar qué puede significar la teoría.

Capítulo 15

La medición como teoría

Un número no se vuelve físico simplemente porque un instrumento lo muestre.

Necesita una unidad.

La unidad requiere una definición.

La definición requiere una operación reproducible.

Y las magnitudes medidas mediante métodos físicos diferentes solo pueden compararse si se comprende el sistema que preserva esas relaciones.

Para Maxwell, la medición eléctrica no era una contabilidad añadida después de la teoría.

Formaba parte de la arquitectura teórica.

El comité de la British Association

El comité de la British Association sobre patrones eléctricos se constituyó en Manchester en septiembre de 1861.

Maxwell se incorporó en 1862.

El problema inmediato era práctico y científico al mismo tiempo.

Las redes telegráficas necesitaban mediciones de resistencia que pudieran reproducirse entre laboratorios y sistemas de ingeniería.

Un patrón de resistencia debía ser algo más que un aparato local cuyo número casualmente se conociera.

Tenía que pertenecer a un sistema coherente de medición.

El trabajo en Londres

En 1863, un subcomité londinense que incluía a Fleeming Jenkin, Maxwell y Balfour Stewart llevó a cabo trabajos sobre patrones de resistencia en King's College.

Charles Hockin substituyó posteriormente a Stewart en parte del programa experimental.

Había que hacer girar bobinas.

Calibrar galvanómetros.

Controlar temperaturas.

Comprender los contactos.

Las unidades eléctricas reproducibles se construían mediante trabajo teórico y experimental coordinado.

Medición absoluta

La ambición más amplia era relacionar magnitudes eléctricas con patrones mecánicos basados en longitud, masa y tiempo.

Esto favorecía el razonamiento dimensional.

Una magnitud eléctrica derivada podía representarse mediante la forma en que cambiaba su valor numérico cuando cambiaban las unidades mecánicas subyacentes.

La dimensión no era, por tanto, simple notación.

Hacía visibles relaciones estructurales entre sistemas de medición.

Resistencia con dimensiones de velocidad

En el sistema electromagnético, la resistencia tiene dimensiones de velocidad.

Eso no significa que la resistencia sea físicamente movimiento.

Significa que la transformación dimensional de la magnitud eléctrica sigue la misma combinación de longitud y tiempo.

Resultados de este tipo hacían visibles conexiones que, de otro modo, podían permanecer ocultas dentro de las definiciones.

La unidad de resistencia de la British Association se eligió como diez millones de metros por segundo en la representación dimensional pertinente.

Las propias convenciones numéricas pasaron a formar parte del sistema eléctrico en desarrollo.

De vuelta a la velocidad

La relación entre medidas electrostáticas y electromagnéticas ya había entrado en la teoría electromagnética de la luz de Maxwell.

En el capítulo 10 proporcionó una velocidad característica de:

310.740.000 metros por segundo

a partir de Weber y Kohlrausch.

Pero el propio Maxwell había advertido en 1865 que ese valor procedía de:

| «el único conjunto de experimentos que poseemos hasta ahora.»

Esa reserva apunta directamente hacia la siguiente medición.

La comparación de 1868

Maxwell diseñó un experimento para comparar directamente fuerza electrostática y electromagnética.

El artículo apareció en *Philosophical Transactions* en 1868.

La atracción electrostática entre discos cargados se equilibraba frente a fuerzas electromagnéticas producidas por corrientes en bobinas.

La relación teórica entre unidades se había convertido en objeto de un experimento directo.

Una medición colectiva

El experimento no fue Maxwell solo ante un aparato.

John Peter Gassiot proporcionó lo que Maxwell llamó su:

| «magnífica batería de 2600 celdas».

Hockin:

| «asumió todo el trabajo de comparación de las corrientes mediante el galvanómetro y los shunts».

El resultado pertenece, por tanto, a una red de aparatos, calibración y observación especializada.

El resultado: 288 millones

El valor medio comunicado fue aproximadamente:

288.000.000 metros por segundo.

Ese número importa porque el capítulo 10 había dejado abierto el lado eléctrico.

Está aproximadamente un siete por ciento por debajo de los 310.740.000 m/s de Weber y Kohlrausch.

También está aproximadamente un 3,4 por ciento por debajo de los 298.000.000 m/s de Foucault.

La nueva medición no hace, por tanto, simplemente más estrecha la antigua concordancia numérica.

El valor de 1868 queda por debajo de todos los valores ópticos que Maxwell había impreso en 1865, incluido el de Foucault.

Un segundo conjunto eléctrico

En 1865 Maxwell había hablado de la concordancia basada en los únicos experimentos eléctricos entonces disponibles.

En 1868 ayudó él mismo a producir otra determinación.

El resultado difería sustancialmente.

Eso es precisamente lo que significa que una medición ponga a prueba una identificación teórica.

La teoría no se derrumbó porque una relación medida cambiara.

Pero tampoco podía defenderse la identidad citando la casi igualdad original como si la metrología se hubiera detenido en 1856.

La teoría sobrevive a números que se mueven

La teoría electromagnética de la luz ya había adquirido para entonces otro apoyo.

En 1865 Maxwell había derivado la propagación electromagnética a partir de las ecuaciones de campo y no únicamente mediante el mecanismo de celdas vorticiales.

La comparación con la luz pertenecía, por tanto, a una red creciente de relaciones teóricas y experimentales.

Las determinaciones numéricas individuales podían cambiar mientras la estructura más amplia permanecía sometida a prueba.

La nota sobre la luz electromagnética

El artículo de Maxwell de 1868 incluye además una nota explícitamente dedicada a la teoría electromagnética de la luz.

Su presencia importa porque muestra que la medición de la relación no era un ejercicio aislado de metrología.

La determinación seguía ligada a la pregunta planteada en 1861-65: si la velocidad electromagnética característica correspondía a la propagación óptica.

La tecnología no es mera aplicación

La telegrafía creó presión práctica para disponer de patrones eléctricos estables.

El comportamiento de los cables planteó problemas de resistencia, retardo y transmisión de señales.

La física no se limitó a generar primero teoría y entregársela después a la tecnología.

La ingeniería ayudó a determinar qué magnitudes necesitaban mediciones precisas.

La dirección de influencia era recíproca.

Cambridge

En 1871 Maxwell se convirtió en el primer Cavendish Professor of Experimental Physics de Cambridge.

El nombramiento representaba tanto un desarrollo institucional como personal.

Cambridge poseía una formidable tradición matemática.

El nuevo programa de laboratorio convirtió el trabajo experimental de precisión en una parte más sistemática de la física universitaria.

El Cavendish Laboratory

El laboratorio se construyó alrededor de aparatos, reproducibilidad y medición.

Los estudiantes debían aprender no solo ecuaciones, sino cómo las magnitudes físicas se convertían en números fiables.

La física experimental requería instrumentos, procedimientos, patrones y culturas de calibración.

Los conceptos teóricos entraban en la práctica material.

Henry Cavendish

En julio de 1874 Maxwell obtuvo acceso a los manuscritos eléctricos inéditos de Henry Cavendish.

Dedicó años a reconstruirlos y editarlos.

El resultado, *Electrical Researches of the Honourable Henry Cavendish*, apareció en octubre de 1879, solo un mes antes de la muerte de Maxwell.

No era un trabajo de anticuario separado de la ciencia contemporánea.

Los experimentos antiguos todavía podían restringir teorías vivas.

Una prueba nula de la ley del inverso del cuadrado

Cavendish había utilizado un método nulo para investigar la ley del inverso del cuadrado de la fuerza eléctrica.

Maxwell y Donald MacAlister repitieron y refinaron el experimento.

Si la fuerza sigue una ley exacta del inverso del cuadrado, un determinado efecto eléctrico interior debería anularse.

Buscaron la desviación.

No la detectaron.

La cota resultante sobre el exponente fue aproximadamente:

$\pm 1/21.600$

frente al valor aproximado de Cavendish:

$\pm 1/50$.

La mejora fue aproximadamente de un factor cuatrocientos.

La medición como ausencia restringida

Que no ocurra nada visible puede constituir un resultado poderoso cuando el experimento especifica qué debería haber ocurrido bajo una ley alternativa.

Esta es la lógica de una prueba nula.

La ausencia no está vacía.

Excluye posibilidades.

La misma estructura ha aparecido en otros lugares:

la persistencia de Saturno descartaba constituciones inestables.

Una igualación cromática fallida revelaba diferencias entre observadores.

Los calores específicos actuaban contra partes de la teoría cinética.

Un efecto eléctrico nulo restringía la ley de fuerza.

El *Treatise* comienza por la medición

El *Treatise on Electricity and Magnetism* de Maxwell de 1873 comienza:

| «SOBRE LA MEDICIÓN DE MAGNITUDES.»

Ese orden no debe transformarse en una filosofía completa a partir de un único encabezamiento.

Pero demuestra la importancia que Maxwell concedía a la medición al presentar el electromagnetismo maduro.

Antes de que la teoría pueda comparar magnitudes, debe decir qué significan sus números.

La medición realiza trabajo teórico

La medición desempeña, por tanto, varias funciones.

Crea patrones reproducibles.

Revela relaciones dimensionales.

Permite comparar procesos físicos independientes.

Expone desacuerdos entre magnitudes teóricas y experimentales.

Puede restringir leyes mediante resultados nulos.

Y sus propios valores pueden cambiar.

Una teoría que depende de mediciones tiene que sobrevivir a ese movimiento.

Hacia la reconstrucción

A la muerte de Maxwell, el electromagnetismo era mucho más que un conjunto de ecuaciones.

Estaba integrado en laboratorios de patrones, ingeniería telegráfica, aparatos de precisión, el Cavendish Laboratory, un gran *Treatise* y una comunidad internacional de investigación.

La siguiente generación no se limitó a aceptar esta herencia.

La reescribió.

Capítulo 16

Reconstruir a Maxwell

Las ecuaciones que hoy llamamos ecuaciones de Maxwell no son simplemente las ecuaciones que Maxwell escribió.

La frase resulta sorprendente porque la reconstrucción posterior tuvo un éxito extraordinario.

La teoría de Maxwell era matemáticamente rica, conceptualmente estratificada y difícil en su notación.

Los físicos posteriores seleccionaron, comprimieron y reformularon esa teoría.

Para comprender qué heredaron, necesitamos distinguir lo que aportó el propio Maxwell de lo que construyeron sus sucesores.

Veinte ecuaciones

En el artículo de 1865 Maxwell organizó:

veinte magnitudes variables

y

veinte ecuaciones

en ocho grupos.

La presentación vectorial moderna mediante cuatro ecuaciones no estaba ya presente de esa forma.

La compresión llegó después.

Hamilton antes de Maxwell

Las palabras escalar y vector fueron introducidas por William Rowan Hamilton durante el desarrollo de los cuaterniones en la década de 1840.

Maxwell heredó ese vocabulario matemático.

No lo inventó.

Pero se convirtió en un participante importante en la adaptación del lenguaje vectorial a la física.

El potencial vector de Maxwell

Maxwell no se limitó a utilizar una magnitud sin nombre que generaciones posteriores llamarían potencial vector.

Él mismo utilizó repetidamente el término:

| «potencial vector».

El *Treatise* habla del potencial vector de la inducción magnética y de la corriente eléctrica.

Esto forma parte de la propia autoría matemática de Maxwell.

Curl

Maxwell también aportó terminología que ha sobrevivido directamente.

En un artículo leído el 9 de marzo de 1871, publicado en *Proceedings of the London Mathematical Society* con el título *Remarks on the Mathematical Classification of Physical Quantities*, Maxwell propuso el término *curl* para una operación vectorial rotacional.

La atribución histórica corresponde a Maxwell.

Esto produce una paradoja útil.

Maxwell suministró piezas del vocabulario vectorial posterior.

Y, aun así, no escribió cálculo vectorial moderno.

Gibbs

J. Willard Gibbs desarrolló un análisis vectorial más económico, en parte como respuesta al mundo matemático de los cuaterniones a través del cual había encontrado a Maxwell.

Su *Elements of Vector Analysis*, distribuido privadamente desde 1881 y de nuevo en 1884, ayudó a separar las operaciones de producto escalar y vectorial del marco completo de los cuaterniones.

El lenguaje matemático cambió.

Heaviside

Oliver Heaviside comenzó a reformular el electromagnetismo en lenguaje vectorial a partir de 1884 en *The Electrician*.

La transformación fue radical.

El amplio conjunto de relaciones por componentes de Maxwell podía representarse mediante cuatro ecuaciones vectoriales compactas.

No era simplemente una abreviatura tipográfica.

Una nueva notación reorganizaba qué rasgos estructurales se hacían inmediatamente visibles.

Lo que elimina la compresión

Las ecuaciones modernas ya no muestran el recorrido histórico a través de:

vórtices,

ruedas locas,

celdas dieléctricas elásticas,

construcciones mecánicas de tensiones,

o los cambios sucesivos de representación de Maxwell.

Un lector que solo encuentra las ecuaciones vectoriales finales puede imaginar fácilmente que la teoría surgió de esa forma.

No fue así.

Lo que conserva la compresión

La teoría reformulada conserva relaciones que implican:

campos eléctricos y magnéticos;

inducción electromagnética;
desplazamiento eléctrico cambiante;
inducción magnética sin fuentes, expresada mediante divergencia nula;
y la estructura necesaria para la propagación electromagnética.
La forma cambia.
El núcleo relacional sobrevive.

Hertz define a Maxwell mediante ecuaciones

Heinrich Hertz ofreció después una descripción reveladora de la reconstrucción.

En la edición inglesa de 1893 de *Electric Waves* escribió:

| «La teoría de Maxwell es el sistema de ecuaciones de Maxwell.»

La afirmación procede de un físico que estaba reconstruyendo activamente la teoría.

Su significado es enorme.

La teoría se identifica menos con las imágenes del éter mecánico de Maxwell y más con un sistema matemático que los propios sucesores han reorganizado.

Los experimentos de Hertz

Hertz llevó después la propagación electromagnética al laboratorio a finales de la década de 1880.

Generó y detectó perturbaciones eléctricas oscilatorias.

Reflexión, interferencia y otros fenómenos ondulatorios proporcionaron una poderosa evidencia experimental de propagación electromagnética por el espacio.

Pero el camino hacia la concordancia no fue perfectamente limpio.

Problemas a lo largo de los conductores

Algunas mediciones de Hertz sugerían que la propagación por conductores variaba con la longitud de onda y difería de la propagación a través del aire.

Esos resultados no encajaban inicialmente de forma limpia con las expectativas maxwellianas.

Experimentos posteriores de Édouard Sarasin y Lucien de la Rive obtuvieron un comportamiento más próximo al requerido por la teoría.

La resolución histórica final fue técnicamente compleja.

Aquí basta con el punto importante:

«Hertz confirmó a Maxwell» es cierto solo en un nivel muy general.

El programa experimental real contenía desacuerdo, reinterpretación y nuevas mediciones.

De onda inferida a objeto de laboratorio

No obstante, fue una transformación epistémica enorme.

Maxwell había inferido teóricamente la propagación electromagnética.

Hertz podía generar perturbaciones, detectarlas en otro lugar y manipular su comportamiento ondulatorio.

La onda electromagnética se convirtió en objeto experimental, no simplemente en un modo permitido por la teoría.

La radio llega después

La existencia de ondas electromagnéticas acabaría sustentando la comunicación inalámbrica.

Pero Maxwell no estaba prediciendo la radio moderna como tecnología.

El propio Hertz perseguía preguntas físicas, no estaba implementando los sistemas de comunicación que ingenieros posteriores construirían.

Posibilidad científica y trayectoria tecnológica deben mantenerse separadas.

Los maxwellianos

En Gran Bretaña, figuras como Heaviside, George Francis FitzGerald y Oliver Lodge formaron parte de lo que los historiadores han denominado tradición maxwelliana.

Desarrollaron la teoría de Maxwell en lugar de limitarse a repetirla.

Lorentz pertenece a una reconstrucción continental relacionada pero distinta.

La vida internacional posterior de la teoría no debe aplanarse hasta convertirla en una sola escuela.

Autoría y herencia

La teoría moderna contiene contribuciones procedentes de múltiples etapas.

Hamilton proporcionó la terminología escalar y vector.

Maxwell introdujo el potencial vector y propuso *curl*.

Gibbs desarrolló el análisis vectorial.

Heaviside comprimió radicalmente las ecuaciones.

Hertz definió y puso a prueba la teoría centrada en ecuaciones.

Lorentz reconstruiría la materia electromagnética.

Un nombre puede señalar una genealogía sin implicar autoría exclusiva de cada forma posterior.

Las cuatro ecuaciones modernas

Seguir llamando «ecuaciones de Maxwell» al sistema compacto es históricamente razonable.

Maxwell estableció relaciones esenciales y la arquitectura teórica electromagnética de la que descienden.

Pero la etiqueta no debe ocultar la reconstrucción.

Las cuatro ecuaciones son una herencia histórica.

No una reproducción fotográfica de una página de Maxwell.

Reconstruir como evidencia de fortaleza teórica

Una teoría científica capaz de soportar grandes cambios representacionales sin perder su estructura predictiva posee una forma particular de robustez.

La electrodinámica de Maxwell pudo pasar:

de imágenes mecánicas,

a ecuaciones generales,

a reformulación vectorial,

a física experimental de ondas.

Las transformaciones fueron sustanciales.

La teoría no permaneció idéntica.

Pero tampoco se disolvió.

Lo que sigue sin resolverse

El éter aún sobrevive en muchas versiones de finales del siglo XIX.

Los cuerpos en movimiento siguen creando problemas difíciles.

La relación entre propagación óptica, electrodinámica y movimiento continúa sin resolverse.

Y el propio Maxwell ya había reconocido una forma de esa dificultad antes de morir.

Los capítulos siguientes siguen tanto lo que la teoría conservó como el problema del movimiento que transmitió a sus sucesores.

Capítulo 17

Lo que se conservó, lo que se eliminó y lo que regresó

Una teoría no sobrevive permaneciendo inalterada.

La teoría electromagnética de Maxwell es un caso especialmente claro.

Entre la década de 1860 y los primeros años del siglo XX, la teoría fue reescrita repetidamente. Algunos de sus componentes mecánicos desaparecieron. Algunas relaciones matemáticas sobrevivieron. Algunos conceptos físicos cambiaron de referente. Otros adquirieron nuevos significados experimentales.

El resultado no fue el descubrimiento gradual de una teoría terminada que ya estuviera oculta dentro de los artículos de Maxwell.

Fue una reconstrucción.

1865: la primera eliminación ocurre dentro del propio trabajo de Maxwell

La primera eliminación importante ocurrió antes de la muerte de Maxwell.

En *On Physical Lines of Force*, el medio electromagnético había sido representado mediante vórtices moleculares, partículas intermedias y deformación elástica.

En *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*, recibido en 1864 y publicado en 1865, Maxwell ya no necesitaba esa maquinaria particular.

Dijo explícitamente que ahora evitaba la hipótesis anterior de un movimiento y una deformación particulares. Expresiones mecánicas como momento eléctrico y elasticidad eléctrica debían considerarse:

| «ilustrativas, no explicativas.»

La distinción importa.

El mecanismo vorticial detallado fue retirado de esa derivación.

El medio no.

Maxwell seguía describiendo el campo electromagnético como conteniendo materia en movimiento y se refería a un medio etéreo que llenaba el espacio.

Así, incluso durante la vida de Maxwell, diferentes capas de la representación anterior ya tenían futuros distintos.

Eliminadas: las ruedas locas

El componente más fácil de seguir es el más pintoresco.

Las partículas intermedias o ruedas locas del mecanismo de 1861 no sobreviven en la teoría electromagnética madura.

Su desaparición resulta especialmente instructiva porque Maxwell nunca les había asignado un estatuto probatorio fuerte.

Ya había dicho que no asentaría de buen grado a la conexión propuesta como hipótesis eléctrica.

La teoría posterior podía conservar relaciones que las ruedas locas habían ayudado a volver mecánicamente concebibles sin conservar las propias ruedas.

Eliminados: los vórtices moleculares

Las celdas vorticiales específicas desaparecieron igualmente de la derivación electromagnética principal.

El magnetismo moderno no es la rotación de celdas etéreas maxwellianas.

Pero sería demasiado simple escribir:

vórtices falsos, ecuaciones verdaderas.

Los vórtices habían realizado trabajo histórico.

Ayudaron a Maxwell a construir tensiones, conectar magnetismo con rotación, incorporar desplazamiento dieléctrico y calcular una velocidad de onda transversal.

Una representación posterior pudo realizar esas tareas sin conservar el mecanismo original.

Es un cambio de portador, no evidencia de que el portador hubiera sido inútil.

1871: sobrevive una palabra

La supervivencia representacional puede ocurrir a una escala mucho menor.

En 1871 Maxwell propuso el término *curl* para la operación vectorial rotacional que más tarde se volvería estándar en análisis vectorial.

La notación matemática madura todavía no estaba presente.

Gibbs y Heaviside transformarían posteriormente de forma sustancial el lenguaje.

Pero el término cruzó esa transformación.

Es un ejemplo modesto, precisamente porque puede fecharse.

1873: «potencial vector» ya es término de Maxwell

El *Treatise on Electricity and Magnetism* proporciona otra corrección al lenguaje retrospectivo.

El potencial vector no fue simplemente un nombre posterior aplicado a algo vagamente presente en Maxwell.

El propio Maxwell escribió repetidamente *vector-potential* (potencial vector), incluido el potencial vector de la inducción magnética.

Los físicos posteriores cambiaron su notación, su marco matemático y su interpretación preferida.

No inventaron el término después de Maxwell.

La distinción importa porque la vida posterior de una teoría incluye tanto conservación como redesccripción.

1884: la energía adquiere un flujo direccional

Maxwell ya había asignado energía al campo electromagnético.

En 1884 John Henry Poynting dio a la transferencia de energía electromagnética una formulación local y direccional explícita.

La magnitud posterior que lleva su nombre describe el flujo de energía electromagnética a través del espacio.

No es simplemente una ecuación que Maxwell olvidó escribir.

Es un desarrollo posmaxwelliano construido dentro del marco de campo que su teoría ayudó a establecer.

Lo que sobrevive no es, por tanto, un concepto inalterado de energía de campo.

Es un programa de investigación capaz de una articulación posterior.

Desde 1884: Heaviside cambia la estructura visible de las ecuaciones

A partir de 1884, Oliver Heaviside reformuló la electrodinámica maxwelliana utilizando métodos vectoriales.

Las veinte ecuaciones en veinte variables de la presentación de Maxwell de 1865 fueron reorganizadas en un sistema mucho más compacto.

Esto hizo algo más que ahorrar tinta.

La notación cambia aquello que resulta fácil de ver.

Relaciones que habían estado distribuidas entre componentes pasaron a hacerse visibles como relaciones de divergencia y rotacional.

La teoría electromagnética se parecía cada vez menos a los artículos de los que descendía.

Y, sin embargo, sobrevivía suficiente estructura para que los físicos siguieran llamándola maxwelliana.

1888 y 1890: Hertz convierte la propagación en experimental

Los experimentos de Heinrich Hertz en 1888 y sus publicaciones posteriores alrededor de 1890 transformaron el estatuto probatorio de la propagación electromagnética.

Maxwell había derivado perturbaciones electromagnéticas propagantes.

Hertz las generó y detectó en el laboratorio.

El comportamiento ondulatorio podía estudiarse mediante reflexión, interferencia y sistemas eléctricos resonantes.

El modo teórico se convirtió en un fenómeno manipulable experimentalmente.

Eso no significa que todos los experimentos de Hertz coincidieran de inmediato con las expectativas maxwellianas. Las mediciones de propagación por conductores produjeron dificultades y requirieron trabajo experimental adicional.

La propia confirmación tuvo una historia.

Pero las ondas electromagnéticas ya no pertenecían únicamente a la inferencia.

Desde 1892: Lorentz cambia la arquitectura mientras conserva un éter

La desaparición del éter de Maxwell debe dividirse en etapas.

En su teoría electrónica desde 1892, Hendrik Lorentz conservó un éter.

Pero ya no era el medio mecánico elástico de Maxwell formado por celdas rotatorias, tensiones y movimientos mecánicos internos.

La arquitectura teórica activa se centraba cada vez más en cargas eléctricas y campos electromagnéticos, mientras el éter funcionaba como fondo estacionario.

A mediados de la década de 1890, las propiedades mecánicas detalladas que Maxwell había atribuido al medio ya no realizaban el mismo trabajo explicativo.

Esta es la primera retirada:

la constitución mecánica del éter de Maxwell pierde su función explicativa mientras todavía se conserva un éter.

No debe confundirse con lo que ocurre en 1905.

Materia: la polarización molecular sobrevive transformada

La imagen dieléctrica de Maxwell tiene una vida posterior diferente.

En 1862 había imaginado electricidad desplazada dentro de moléculas, de modo que aparecían estados eléctricos opuestos en lados opuestos.

Las teorías electrónicas posteriores proporcionaron una nueva base microscópica a la polarización material mediante el desplazamiento de constituyentes cargados ligados.

El mecanismo no es el de Maxwell.

Pero la idea física general de que la polarización dieléctrica material corresponde a separación de carga dentro de la materia sobrevive transformada.

La polarización cambiante también contribuye como una corriente real de carga ligada.

Aquí la imagen del siglo XIX no fue simplemente borrada.

Fue reconstruida alrededor de nuevas entidades microscópicas.

Vacío: el desplazamiento pierde su portador mecánico

El desplazamiento eléctrico en espacio aparentemente vacío sigue otra trayectoria.

Para Maxwell, el espacio no estaba vacío en el sentido moderno.

El medio electromagnético lo llenaba.

El desplazamiento pertenecía, por tanto, a un medio.

Cuando el éter mecánico dejó de portar la teoría electromagnética, el término correspondiente en las ecuaciones de campo sobrevivió sin requerir el desplazamiento de un sustrato material maxwelliano.

Puede ser el ejemplo más claro del libro de una relación matemática que sobrevive a su primer referente mecánico.

La misma palabra cruza la transición.

La ontología no.

1905: Einstein hace innecesario el éter para su formulación

El artículo de Einstein de 1905 marca una segunda etapa distinta.

No informó de que unos experimentos hubieran demostrado de repente que no existía ningún éter.

Su afirmación era teórica: la introducción de un éter luminífero resultaría superflua porque la nueva formulación no requería ni un espacio absolutamente estacionario dotado de propiedades especiales ni una velocidad asignada al espacio vacío.

La distinción importa.

Lorentz podía conservar un éter mientras eliminaba la mayor parte del trabajo mecánico maxwelliano que este realizaba.

Einstein podía formular la electrodinámica sin necesitar el éter en absoluto.

Y la aceptación de esa conclusión por parte de la comunidad física no fue instantánea.

El registro de supervivencia debe conservar esas fechas separadas.

Conservada: la propagación electromagnética

La propagación sobrevive a todos los grandes cambios representacionales considerados aquí.

En 1862 es una vibración mecánica transversal de un medio electromagnético elástico.

En 1865 Maxwell deriva una perturbación electromagnética mediante las ecuaciones de campo mientras conserva un éter.

En 1888 y 1890 Hertz convierte esas perturbaciones en fenómenos experimentales.

En 1905 la electrodinámica ya no requiere un portador mecánico luminífero en la formulación de Einstein.

La onda sobrevive.

Cambia aquello *en* lo que una onda debe propagarse.

Conservadas: las relaciones de campo

Las relaciones de los campos eléctrico y magnético sobreviven, aunque ampliamente reconstruidas.

Cambia su notación.

Cambia su agrupación.

Cambian las variables preferidas por distintos autores.

Cambia su interpretación.

Y, sin embargo, la red que conecta cambio eléctrico, cambio magnético, inducción, carga y propagación se vuelve cada vez más estable.

Esto es históricamente más fuerte que decir «sobrevivieron las ecuaciones de Maxwell».

Especifica qué tipo de continuidad ocurrió.

Cambiado: qué cuenta como ecuaciones de Maxwell

Los sistemas originales de ecuaciones de Maxwell no eran cuatro expresiones vectoriales compactas.

Gibbs proporcionó parte del lenguaje matemático.

Heaviside reorganizó las ecuaciones electromagnéticas desde 1884 en adelante.

En la edición inglesa de 1893 de *Electric Waves*, la introducción de Hertz afirma:

«La teoría de Maxwell es el sistema de ecuaciones de Maxwell.»

La frase es históricamente reveladora precisamente porque el sistema que Hertz tenía en mente ya había sido reconstruido.

Una teoría puede adquirir una forma canónica que su principal creador nunca escribió.

Cambiado: el potencial vector

El potencial vector sobrevivió, pero cambió de estatuto repetidamente.

Maxwell lo nombró.

Formulaciones posteriores trataron a veces los potenciales como auxiliares matemáticos convenientes detrás de los campos eléctrico y magnético.

Esa jerarquía no permanecería fija.

Como mirada deliberadamente marcada más allá del horizonte principal de 1905 de este libro, Aharonov y Bohm en 1959 predijeron fenómenos cuánticos en los que los potenciales electromagnéticos no pueden descartarse simplemente como notación clásica redundante.

Eso no es Maxwell regresando sin cambios.

Es una teoría posterior que asigna nueva significación física a un objeto matemático con historia maxwelliana.

El registro, fechado

En 1865 la hipótesis detallada de vórtices había sido eliminada de la derivación electromagnética principal de Maxwell.

En 1871 y 1873 Maxwell proporcionó terminología, entre ella *curl* y *vector-potential*, que sobrevivió a la reconstrucción matemática posterior.

En 1884 Poynting dio a la transferencia de energía electromagnética una formulación local direccional explícita.

Desde 1884 Heaviside reorganizó la electrodinámica maxwelliana en forma vectorial.

En 1888 y 1890 Hertz hizo experimentalmente accesible la propagación electromagnética y desarrolló el programa de ondas electromagnéticas.

Desde 1892 hasta mediados de la década de 1890 Lorentz conservó un éter mientras eliminaba la necesidad de la constitución mecánica detallada que Maxwell había atribuido a ese éter.

En 1905 Einstein declaró superflua la introducción de un éter luminífero para su formulación de la electrodinámica.

En 1959, muy más allá del horizonte cronológico de la propia teoría de Maxwell, Aharonov y Bohm proporcionaron un nuevo contexto cuántico en el que los potenciales electromagnéticos adquirieron una significación física renovada.

La secuencia no es una sola eliminación.

Es una sucesión de cambios representacionales.

¿Qué cuenta como la misma teoría?

Esto crea un auténtico problema histórico.

Si cambian el mecanismo, la notación, la ontología e incluso las variables preferidas, ¿qué legitima el nombre *maxwelliana*?

No la identidad textual.

No la conservación de todos los objetos que Maxwell creía que existían.

La continuidad reside, en cambio, en una red heredada de problemas, ecuaciones, relaciones experimentalmente contrastables y transformaciones.

El nombre marca genealogía.

No implica invariancia.

Lo que se conservó

Los elementos más duraderos no fueron, en general, los más pintorescos mecánicamente.

Persistieron las relaciones eléctricas y magnéticas.

Persistió el desplazamiento, de manera distinta en materia y vacío.

Persistió la propagación electromagnética.

La energía asociada al campo persistió y fue ampliada.

El potencial vector persistió a través de interpretaciones cambiantes.

Lo que se eliminó

Desaparecieron las ruedas locas.

Los vórtices moleculares desaparecieron de la derivación electromagnética principal.

La constitución celular elástica del éter electromagnético desapareció de la electrodinámica posterior.

Finalmente, el propio éter se volvió innecesario para una formulación importante de la electrodinámica.

Lo que regresó

«Regresar» debe utilizarse con cautela.

El potencial vector adquiere una importancia renovada en la física cuántica del siglo XX.

La polarización microscópica reaparece en una forma basada en constituyentes cargados y no en la electricidad molecular de Maxwell.

Son continuidades genealógicas, no resurrecciones de los objetos originales de Maxwell.

La respuesta no es «Maxwell tenía razón»

El registro de supervivencia se resiste a un juicio binario.

Las ruedas locas no eran una conexión eléctrica natural; Maxwell nunca había afirmado que lo fueran.

No tenía razón acerca de las celdas vorticiales moleculares como constitución del medio electromagnético.

La física posterior no conservó su éter mecánico.

Y, sin embargo, las estructuras teóricas desarrolladas mediante esas representaciones ayudaron a generar relaciones que sobrevivieron a reformulaciones y experimentos cada vez más severos.

El éxito científico ocurrió en capas diferentes.

Una teoría puede morir mecánicamente y sobrevivir estructuralmente

Esta es la conclusión más fuerte que puede sostener el capítulo 17.

La ontología detallada de una teoría puede ser eliminada mientras las relaciones que ayudó a exponer siguen siendo productivas.

Pero esas relaciones no pasan intactas de un siglo a otro.

Se reescriben, vuelven a medirse, se incorporan a nuevas teorías y reciben nuevos significados.

La supervivencia no es, por tanto, permanencia.

Es transformación restringida.

El capítulo final pregunta ahora cómo esta herencia maxwelliana transformada entró en el problema de los cuerpos en movimiento y la relatividad.

Capítulo 18

De Maxwell al problema de la relatividad

Maxwell murió en 1879.

Einstein nació ese mismo año.

La coincidencia es memorable y casi inútil.

No hubo un relevo intelectual directo de Maxwell a Einstein.

Sí hubo, sin embargo, una conexión mucho más precisa entre el trabajo final de Maxwell y uno de los problemas experimentales que más tarde entraron en la historia de la relatividad.

Comienza en el último año de Maxwell.

Marzo de 1879: Maxwell pregunta cómo podría detectarse el movimiento a través del éter

El 19 de marzo de 1879 Maxwell escribió a David Peck Todd, de la American Nautical Almanac Office.

El problema era el movimiento del Sistema Solar respecto al éter luminífero.

Si la luz se propagaba a través de un éter, el movimiento respecto a ese medio podría, en principio, ser medible.

Pero Maxwell identificó una dificultad experimental.

En las mediciones terrestres de la velocidad de la luz, el haz normalmente recorría un trayecto de ida y vuelta por el mismo camino.

El efecto del movimiento de la Tierra sobre el recorrido completo sobreviviría, por tanto, solo en segundo orden.

Maxwell señaló que el cambio resultante dependía del cuadrado de la razón entre la velocidad de la Tierra y la velocidad de la luz y era:

«demasiado pequeño para poder observarse».

No era una declaración de que la deriva del éter careciera de significado.

Era una estimación de accesibilidad experimental.

Una vía astronómica

Maxwell consideró por ello un método astronómico.

Propuso observaciones relacionadas con los eclipses de los satélites de Júpiter como posible forma de estimar la dirección y la magnitud del movimiento del Sol respecto al medio luminífero.

Lo describió como «el único método, hasta donde yo sé».

Maxwell murió antes de que la idea pudiera convertirse en parte de un programa sostenido por él mismo.

La carta se publicó póstumamente en 1880.

Entonces alguien la leyó.

Michelson parte de Maxwell

El artículo de Albert A. Michelson de 1881, *The Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether*, plantea explícitamente su problema experimental a partir de la carta de Maxwell.

Michelson escribe que Maxwell había señalado el método astronómico y la dificultad de las mediciones terrestres de ida y vuelta.

Después discrepa de la conclusión práctica de Maxwell.

Utilizando la interferencia y la longitud de onda de la luz como patrón, sostiene que el efecto de segundo orden, si existe, debería ser medible.

Esta es una cadena documental auténtica:

Maxwell, 19 de marzo de 1879.

Publicación póstuma, 1880.

Michelson cita a Maxwell, 1881.

No es necesario inventar una genealogía más amplia cuando esta conexión más estrecha puede verse directamente.

Michelson toma de todos modos la vía terrestre

La ironía es instructiva.

Maxwell había concluido que el efecto terrestre era demasiado pequeño para los métodos disponibles.

La contribución de Michelson consistió en concebir un método destinado precisamente a hacer observable una diferencia tan pequeña.

La interferometría modificó lo que contaba como experimentalmente accesible.

Este es otro ejemplo de cómo la medición altera la frontera entre posibilidad teórica y prueba empírica.

1881 no fue el experimento definitivo

El primer experimento de Michelson no puso fin a la cuestión del éter.

El aparato y el cálculo serían reconsiderados.

En 1887 Michelson y Edward Morley realizaron el experimento interferométrico más famoso.

Su resultado no reveló la deriva del éter esperada.

Pero la historia convencional según la cual un único resultado nulo destruye el éter y produce directamente la relatividad especial comprime décadas de trabajo teórico en una cadena falsa.

El resultado nulo se convirtió en una restricción entre varias.

Lorentz modifica el éter antes de que Einstein elimine la necesidad de recurrir a él

Hendrik Lorentz desarrolló la teoría del electrón durante la década de 1890.

El éter permanecía.

Pero ya no era el medio mecánico elástico de Maxwell formado por celdas, tensiones y vórtices.

La materia se representaba mediante constituyentes cargados.

El campo electromagnético obedecía sus ecuaciones en un éter inmóvil.

La arquitectura mecánica del éter de Maxwell había desaparecido en gran medida, aunque permaneciera la palabra éter.

Esta distinción ya era importante en el capítulo 17.

Aquí se vuelve esencial.

El éter no pasó directamente de los vórtices de Maxwell al rechazo de Einstein.

Cambió antes de volverse innecesario.

La polarización cambia con él

Lorentz proporcionó también un nuevo lenguaje microscópico para la materia.

La polarización dieléctrica podía representarse mediante el desplazamiento de cargas eléctricas dentro de átomos o moléculas.

Esto dio una vida posterior transformada a una parte de la imagen dieléctrica de Maxwell.

El medio material contenía cargas que podían moverse realmente unas respecto a otras.

Al mismo tiempo, el sustrato elástico universal que Maxwell había utilizado para transportar el desplazamiento a través del espacio aparentemente vacío estaba perdiendo su función mecánica.

Las transformaciones se desarrollan antes de Einstein

La prehistoria matemática de la relatividad estuvo igualmente poblada.

Voigt obtuvo en 1887 una transformación relacionada con la ecuación de ondas.

Lorentz desarrolló versiones del tiempo local y de transformaciones de coordenadas en trabajos de 1892, 1895, 1899 y 1904.

Larmor desarrolló transformaciones relacionadas en 1897 y 1900.

Poincaré analizó la sincronización de relojes en 1900 y reforzó el principio de relatividad en 1904.

El 5 de junio de 1905, antes de que el artículo de Einstein fuera recibido más tarde ese mismo mes, Poincaré nombró explícitamente las transformaciones de Lorentz y afirmó que formaban un grupo.

Ninguno de esos resultados es simplemente la relatividad especial de Einstein por anticipado.

En conjunto impiden una reconstrucción basada en un genio solitario.

El Maxwell de Einstein ya había sido reconstruido

El artículo de Einstein de 1905 no parte de los vórtices de Maxwell de 1861, ni siquiera directamente de la notación de 1865.

Comienza con:

«tal como se entiende habitualmente en la actualidad».

Esa precisión es históricamente importante.

La teoría que heredó ya había pasado por Hertz, Heaviside, Lorentz y otros.

En el mismo artículo de 1905 Einstein se refiere a las ecuaciones de Maxwell-Hertz.

El Maxwell al que se enfrentaba Einstein era, por tanto, un Maxwell heredado y reconstruido.

El imán y el conductor

Einstein comienza con una conocida asimetría electromagnética.

Un imán que se mueve respecto a un conductor y un conductor que se mueve respecto a un imán pueden producir la misma corriente observable.

Sin embargo, la descripción teórica convencional asigna mecanismos diferentes dependiendo de cuál de los dos objetos se diga que se mueve.

Einstein interpreta esta asimetría como indicio de que la distinción no debería pertenecer a los propios fenómenos.

El problema surge dentro de una electrodinámica madura.

No demuestra que Maxwell hubiera anticipado la relatividad.

Una nueva cinemática del espacio y el tiempo

La solución de Einstein reorganiza los conceptos de espacio, tiempo y simultaneidad alrededor de dos principios:

el principio de relatividad,

y la constancia de la velocidad de la luz.

En 1905 esto debe describirse propiamente como una nueva cinemática del espacio y el tiempo.

La formulación geométrica posterior del espacio-tiempo pertenece especialmente al trabajo de Minkowski después de 1905.

Esta distinción evita otro pequeño pero persistente error retrospectivo.

El éter se vuelve superfluo

La afirmación de Einstein es también más precisa que el eslogan «el éter fue refutado».

Escribe que:

| «La introducción de un “éter luminífero” resultará superflua».

La afirmación se refiere a la necesidad teórica.

Su formulación no requiere un espacio absolutamente estacionario portador de propiedades mecánicas especiales.

No equivale a informar de que un experimento hubiera observado directamente la ausencia de éter.

Maxwell no predijo esto

Maxwell conservó un éter.

Lo consideró físicamente significativo.

Incluso en 1879, su carta a Todd pregunta por el movimiento respecto al medio luminífero.

Por tanto, presentarlo como si ya sostuviera la posición de Einstein invertiría la evidencia histórica.

Lo que Maxwell proporcionó no fue la solución posterior.

Ayudó a crear la estructura electromagnética dentro de la cual el problema de los cuerpos en movimiento se volvió agudo.

Pero Maxwell sí vio el problema experimental

La afirmación opuesta también sería incorrecta.

La carta a Todd muestra que el propio Maxwell consideró si el movimiento respecto al éter podía detectarse.

Comprendió que los métodos terrestres de ida y vuelta producían solo un efecto de segundo orden.

Propuso una alternativa.

Michelson retomó explícitamente el problema.

Esta es una afirmación histórica más fuerte que decir vagamente que «Maxwell preparó el camino para Michelson».

La conexión documental existe.

El resultado nulo no actúa solo

Los experimentos de Michelson importan porque interactuaron con la teoría.

Hipótesis de contracción de Lorentz.

Teoría del electrón.

El principio de relatividad.

Las propiedades de transformación de la electrodinámica maxwelliana.

El problema de sincronizar relojes.

El estatus del éter.

Ningún dato experimental seleccionó automáticamente la reconstrucción conceptual de Einstein.

La causalidad histórica no es implicación matemática.

El Maxwell retrospectivo de Einstein

Hay otro Maxwell que ahora debemos distinguir del histórico.

En 1931, con motivo del centenario del nacimiento de Maxwell, Einstein describió la obra de Faraday y Maxwell como una gran transformación en la concepción de la realidad física. En la traducción inglesa reunida posteriormente en *Ideas and Opinions*, su contraste retrospectivo pasa de la imagen newtoniana de puntos materiales y fuerzas hacia «campos continuos, no explicables mecánicamente».

No es evidencia contemporánea de lo que Maxwell pensaba que estaba haciendo.

Es evidencia del Maxwell de Einstein.

Lo que comprime la narración retrospectiva de Einstein

El relato del centenario de Einstein se trata aquí como recepción retrospectiva y no como evidencia de los propios compromisos decimonónicos de Maxwell.

Visto desde 1931, ese contraste resulta inteligible.

Visto desde 1865, comprime compromisos intermedios importantes.

El propio campo electromagnético de Maxwell seguía asociado con:

materia en movimiento,

un medio etéreo,

elasticidad,

energía,

y continuos intentos de inteligibilidad mecánica.

Al mismo tiempo, retiró explícitamente mecanismos concretos y afirmó que ciertos términos mecánicos eran «ilustrativos, no explicativos».

La transición histórica no fue, por tanto:

partículas newtonianas, campo no mecánico de Maxwell.

Transcurrió a través de combinaciones intermedias.

Verdad retrospectiva y secuencia histórica

El contraste retrospectivo de Einstein capta algo real acerca de la transformación de la física a largo plazo.

Los campos sí llegaron a convertirse en objetos centrales no reducibles a los modelos de éter mecánico de Maxwell.

Pero esa formulación retrospectiva pertenece a 1931.

Describe la historia desde el otro lado de Lorentz, Hertz, la relatividad y la teoría cuántica.

Utilizarla como descripción de la propia posición conceptual de Maxwell introduciría el destino en el trayecto.

Ese es precisamente el error retrospectivo que este libro ha intentado evitar.

La herencia real de Maxwell

Lo que llega de Maxwell a Einstein no es, por tanto, una teoría intacta.

Es una red reconstruida:

relaciones del campo electromagnético,

una velocidad característica,

la luz electromagnética,

problemas de cuerpos en movimiento,

cuestiones experimentales sobre el éter,

y ecuaciones matemáticas ya reformuladas por sus sucesores.

La herencia es relacional y problemática.

No mecánica.

Los finales equivocados

Ahora podemos descartar tres conclusiones fáciles.

Maxwell previó a Einstein.

No.

Maxwell hizo inevitable la relatividad.

No.

Einstein simplemente completó a Maxwell.

No.

Cada una elimina el trabajo histórico realizado entre ambos.

Un final más exacto

Maxwell construyó una teoría electromagnética cuyas relaciones exitosas sobrevivieron a cambios sustanciales de mecanismo y representación.

Esas relaciones generaron nuevos problemas al combinarse con los cuerpos en movimiento y la velocidad de la luz.

El propio Maxwell encontró una forma experimental del problema del movimiento respecto al éter en 1879.

Michelson lo retomó directamente.

Lorentz, Larmor y Poincaré modificaron su marco matemático y físico.

Einstein reorganizó la cinemática en 1905.

Esto es influencia sin profecía.

Continuidad sin identidad.

Herencia mediante reconstrucción.

Es una conexión histórica más exigente que la simple afirmación de que un genio anticipó a otro.

Epílogo

Pensar lo invisible

Comenzamos con una desventaja.

Sabemos demasiado.

Sabemos que existen las ondas electromagnéticas.

Sabemos que los vórtices moleculares de Maxwell no sobrevivieron como mecanismo del electromagnetismo.

Sabemos que el éter mecánico acabó dejando de ser necesario para la electrodinámica.

Sabemos que la teoría cinética se desarrolló más allá de Maxwell.

Sabemos que la relatividad cambió la cinemática del espacio y el tiempo.

Sabemos que la teoría cuántica cambió los términos de problemas que Maxwell dejó sin resolver.

Maxwell no conocía ninguno de esos futuros.

El propósito de este libro no ha sido, por tanto, preguntar cuánto se acercó a nosotros.

Ha sido preguntar qué podía inferirse legítimamente cuando el propio mecanismo permanecía oculto, discutido o provisional.

Varias clases de invisible

Lo invisible cambiaba de un problema a otro.

Dentro del vidrio sometido a tensión, el objeto oculto era un estado mecánico inferido a través de consecuencias ópticas.

En el color, la respuesta fisiológica se infería mediante igualaciones reproducibles.

En Saturno, la constitución no observada quedaba restringida por la observación y la estabilidad dinámica.

En los gases, poblaciones enormes de moléculas se representaban estadísticamente porque no podían seguirse las trayectorias individuales.

En electromagnetismo, estados y posibles mecanismos se distribuían por regiones del espacio que no podían inspeccionarse directamente.

Estos problemas no exigían un único método.

Eso ya es importante.

Varias maneras de inferir

El trabajo de Maxwell empleó varias estructuras probatorias.

Observar las consecuencias de una tensión oculta.

Construir equivalencias perceptivas cuantitativas.

Eliminar constituciones dinámicamente imposibles.

Sustituir trayectorias individuales imposibles de seguir por distribuciones estadísticas.

Construir un mecanismo hipotético y calcular sus consecuencias.

Cambiar el mecanismo y observar qué relaciones siguen siendo utilizables.

Comparar magnitudes definidas mediante sistemas de medición independientes.

Utilizar un resultado nulo para restringir una posible ley.

Cualquier unidad en la obra de Maxwell debe, por tanto, sobrevivir a una diversidad metodológica considerable.

No puede consistir simplemente en que hiciera repetidamente lo mismo.

Lo que Maxwell realmente matizó

A través de esa diversidad, Maxwell señaló repetidamente el estatus de las representaciones.

En 1855 su fluido imaginario ni siquiera era un fluido hipotético introducido para explicar fenómenos reales.

En 1860 su gas de partículas elásticas se convertiría en una analogía física solo si sus propiedades correspondían a las de los gases.

En 1861 no asentiría de buen grado a la conexión propuesta mediante ruedas locas como hipótesis eléctrica.

En octubre de 1861 la comparación de velocidades podía proporcionar una razón poderosa para creer en un medio común «sea o no mi teoría un hecho».

En 1862 las relaciones dieléctricas eran independientes de una teoría sobre el mecanismo interno de los dieléctricos.

En esa misma construcción admitió que una acción tangencial necesaria no había sido explicada.

Y en 1864-65 escribió que, en el artículo presente, evitaba la hipótesis anterior de un movimiento y una deformación particulares, mientras que las expresiones mecánicas debían considerarse «ilustrativas, no explicativas».

La última formulación importa.

No anunció que el mecanismo anterior hubiera sido abandonado definitivamente.

Lo evitó en ese artículo.

La proposición candidata

Al comienzo de su prueba, este libro fijó una proposición candidata.

Maxwell parecía utilizar repetidamente mecanismos descritos con riqueza como representaciones de trabajo productivas, mientras evitaba comprometerse por completo con su verdad literal, y conservar relaciones útiles cuando un mecanismo se modificaba o se dejaba de lado.

El libro también estableció condiciones bajo las cuales esa proposición se debilitaría o fracasaría.

Eran las condiciones formuladas en el Prólogo: el patrón candidato se debilitaría o quedaría derrotado si los métodos de Maxwell difirieran fundamentalmente de un dominio a otro, si las mismas prácticas fueran

igualmente características de sus contemporáneos, si su relación con el experimento cambiara radicalmente entre materias, o si la supuesta unidad apareciera solo después de que historiadores posteriores reorganizaran su obra.

Estas condiciones no se inventaron al final para acomodarlas a la evidencia.

Se formularon antes de evaluar los capítulos.

Ahora pueden puntuarse.

Primera condición: ¿diferían fundamentalmente los métodos de Maxwell entre dominios?

No existe un único procedimiento maxwelliano que se mantenga sin cambios desde la geometría hasta el electromagnetismo.

La igualación de colores no es el análisis de estabilidad de Saturno.

La eliminación saturniana no es la estadística cinética.

La estadística cinética no es la metrología eléctrica.

La metrología eléctrica no es la analogía mecánica.

Por tanto, si la proposición exigiera un procedimiento invariable, fracasaría.

Pero esa no era la candidata.

La característica recurrente más estrecha se refiere a cómo se manejaban las representaciones y el compromiso probatorio.

En ese nivel existe una recurrencia auténtica.

Maxwell distingue repetidamente entre lo que una representación puede calcular u organizar y aquello que todavía no ha merecido compromiso físico.

La recurrencia aparece bajo formas técnicas diferentes, no como un algoritmo universal.

Puntuación: la condición afecta parcialmente, pero no destruye por sí sola la proposición más estrecha.

Segunda condición: ¿eran las mismas prácticas características de sus contemporáneos?

Aquí el desafío es mucho mayor.

Rankine y Thomson impiden afirmar que Maxwell inventara el modelado mecánico provisional o la separación entre utilidad matemática y compromiso físico literal.

Thomson

En junio de 1847 William Thomson envió a Faraday una representación mecánica que implicaba una tensión propagada a través de un sólido elástico.

Llamó explícitamente a lo que había escrito:

| «meramente un esbozo de la analogía matemática».

También dijo que no se había atrevido a convertirlo en fundamento de una teoría física.

Sin embargo, escribió que tal teoría «también explicaría, con toda probabilidad, al relacionarse con la teoría ondulatoria de la luz, el efecto del magnetismo sobre la luz polarizada».

Esto ocurre antes del programa electromagnético de Maxwell.

Por tanto, la separación entre una representación productiva y el compromiso con su verdad física literal no puede identificarse como una maniobra exclusivamente maxwelliana.

Rankine

Rankine hace que la prueba sea aún más exigente.

Su *Outlines of the Science of Energetics* fue leído el 2 de mayo de 1855.

Allí sostuvo que una teoría hipotética puede ser necesaria como paso preliminar hacia una teoría abstractiva, insistiendo a la vez en que las relaciones generales deben liberarse de la incertidumbre que sigue asociada incluso a hipótesis mecánicas fuertemente confirmadas.

Durante ese mismo año también desarrollaba activamente su programa de vórtices moleculares.

Su artículo *On the Hypothesis of Molecular Vortices, or Centrifugal Theory of Elasticity, and its Connexion with the Theory of Heat* apareció en noviembre de 1855.

Por tanto, no existe una secuencia justificada en la que Rankine utilizara primero vórtices y después los abandonara en favor de la energética.

Los programas eran simultáneos.

Eso fortalece la comparación.

Una hipótesis mecánica rica y un intento deliberado de independizar las relaciones generales de su incertidumbre coexistían.

Rankine es similar, pero no idéntico

La segunda mitad de la proposición candidata exige, sin embargo, precisión.

Maxwell afirma explícitamente en 1865 que en ese artículo evita la hipótesis mecánica particular anterior, mientras conserva relaciones electromagnéticas desarrolladas mediante aquel programa.

La posición metodológica de Rankine en 1855 es algo diferente.

Buscó hacer que las leyes generales fueran independientes de la incertidumbre de las hipótesis mecánicas mientras seguía desarrollando la propia hipótesis de los vórtices.

Rankine demuestra, por tanto:

mecanismo rico,

compromiso matizado,

y relaciones cuya certeza no tiene por qué depender de ese mecanismo.

Lo que la evidencia no establece es que descartara el mecanismo y después conservara las relaciones tras abandonarlo.

La diferencia es real pero estrecha.

Y el propio Maxwell siguió discutiendo posteriormente explicaciones mediante vórtices, por lo que ni siquiera su historia debería convertirse en una progresión limpia y unidireccional.

El resultado comparativo

La tesis fuerte del carácter distintivo fracasa.

La evidencia respalda el resultado admitido desde el principio: Maxwell no es significativamente distintivo en su tipo una vez que se introduce la clase comparativa adecuada.

Ese es el resultado.

Rankine y Thomson muestran que los recursos metodológicos subyacentes pertenecían a una cultura científica decimonónica más amplia.

Lo que sigue siendo demostrable sin introducir otra comparación no sustentada es esto:

dentro de la propia obra de Maxwell, el patrón reaparece en muchos dominios científicos diferentes.

Esa es una afirmación sobre el corpus de Maxwell.

No lo sitúa por encima de Thomson, Rankine ni de todos los demás físicos del siglo XIX en cuanto a amplitud.

Tercera condición: ¿cambió radicalmente la relación de Maxwell con el experimento entre materias?

La respuesta es: sustancialmente, sí.

Pero no de manera arbitraria.

La forma de restricción empírica cambia con el problema.

En el estudio óptico de sólidos elásticos, la observación controlada pone a prueba cómo aparece la tensión oculta mediante luz polarizada.

En el color, la igualación cuantitativa constituye por sí misma la operación experimental.

Saturno no puede manipularse experimentalmente; la observación restringe constituciones candidatas mientras la dinámica elimina posibilidades inestables.

En teoría cinética, las mediciones de laboratorio de la viscosidad confrontan directamente los modelos moleculares, y una de esas mediciones contribuye a llevar a Maxwell hacia una ley de interacción que la evidencia posterior debilita.

En electromagnetismo, la razón entre unidades eléctricas proporciona una prueba cuantitativa de una velocidad de propagación.

En 1868 Maxwell y Hockin miden directamente esa relación y obtienen un número sustancialmente diferente.

Con MacAlister, un experimento nulo restringe desviaciones de la ley del inverso del cuadrado.

Los reguladores se tratan en gran medida mediante análisis matemático de estabilidad de mecanismos construidos.

Estas relaciones con el experimento no son iguales.

Pero existe una continuidad más débil.

En cada caso Maxwell pregunta qué restricciones observables debe superar una representación.

El tipo de observación cambia porque cambia la evidencia accesible.

Puntuación: esta condición afecta materialmente. Descarta una unidad fuerte del procedimiento experimental, aunque sigue siendo compatible con una unidad más débil en el nivel de la restricción probatoria.

Cuarta condición: ¿es la unidad principalmente una construcción de historiadores posteriores?

Esta es la condición más difícil.

Los vínculos entre vidrio, color, Saturno, moléculas, reguladores y electromagnetismo son reunidos aquí por el autor.

Maxwell nunca escribió un documento diciendo que todos esos episodios ejemplificaran una única filosofía de la representación.

Los capítulos 13 y 14 ya se han negado a inferir un programa oculto de ese tipo.

Esa negativa debe mantenerse.

Existe, por tanto, un riesgo auténtico de que cualquier unidad entre dominios sea producida retrospectivamente.

Pero el caso no es enteramente retrospectivo.

Las matizaciones individuales sobre las que descansa la comparación son de Maxwell.

El gradúa explícitamente el estatus del fluido imaginario.

Condiciona la analogía molecular.

No concede su asentimiento a la conexión de las ruedas locas.

Separa las relaciones dieléctricas del mecanismo interno del dieléctrico.

Distingue el estatus de su lenguaje mecánico ilustrativo de 1865.

El historiador es responsable de colocar estos episodios unos junto a otros.

Las matizaciones no son una invención del historiador.

Puntuación: esta condición afecta parcialmente. No queda demostrada una filosofía maxwelliana unificada. Sí queda demostrado un patrón documental recurrente.

Lo que dejan en pie las cuatro condiciones

La prueba no produce, por tanto, una coronación.

Elimina varias afirmaciones más fuertes.

No hubo un método único idéntico en todas las ciencias de Maxwell.

Su relación con el experimento difería mucho entre problemas.

Formas comparables de modelado provisional existían en Thomson y Rankine.

Y la síntesis entre dominios pertenece en parte al análisis histórico retrospectivo.

Lo que queda es más estrecho:

los documentos conservados de Maxwell lo muestran repetidamente separando, en distintos grados, la utilidad de una representación del estatuto probatorio de su mecanismo subyacente.

Esa afirmación supera la prueba.

Un hallazgo adicional: las relaciones pueden sobrevivir a los mecanismos

La supervivencia de relaciones es importante, pero no era una de las cuatro condiciones originales de fracaso.

Es un resultado separado.

En electromagnetismo, el desplazamiento y la relación de propagación continúan cuando Maxwell evita la maquinaria específica anterior de vórtices.

En teoría cinética, la distribución de velocidades sobrevive a cambios sustanciales en la interacción intermolecular supuesta.

En medición eléctrica, la identidad teórica sometida a prueba sobrevive incluso mientras cambian los sucesivos valores medidos.

Estas supervivencias no demuestran que los mecanismos fueran falsos o irrelevantes en el momento del descubrimiento.

Muestran que distintas capas de una teoría pueden tener vidas históricas diferentes.

Las teorías no fracasan como totalidades indivisibles

La teoría cinética hace esto particularmente visible.

La distribución sobrevive.

Las esferas duras no.

La independencia de la viscosidad respecto de la densidad gana apoyo.

La ley de temperatura medida empuja a Maxwell hacia una interacción de inversa quinta potencia, pero la propia proporcionalidad empírica es debilitada más tarde.

Los calores específicos siguen siendo una gran dificultad sin resolver.

No existe una fecha única en la que «la teoría cinética de Maxwell» pase de incorrecta a correcta.

Sus componentes adquieren historias probatorias diferentes.

El electromagnetismo se comporta de forma semejante

La conexión mediante ruedas locas desaparece.

La maquinaria detallada de vórtices deja de ser necesaria en la derivación de 1865.

El desplazamiento eléctrico permanece.

La conexión entre propagación electromagnética y luz permanece.

La propia evidencia de velocidad cambia.

La comparación casi perfecta comunicada privadamente en 1861 no es la misma comparación impresa en 1862.

La medición posterior de Foucault amplía la discrepancia.

La propia determinación eléctrica de Maxwell de 1868 sitúa el valor eléctrico por debajo de todas las estimaciones ópticas disponibles entonces.

Y, sin embargo, la teoría electromagnética de la luz se fortalece.

La conclusión sobrevive a sus primeros números porque se amplía la red de razones que la sostienen.

La medición participa en la teoría

La medición no es, por tanto, simplemente un juicio emitido después de la teoría.

Los sistemas eléctricos de unidades ayudan a crear la magnitud que llega a compararse con la luz.

La telegrafía genera presión en favor de patrones reproducibles de resistencia.

La comparación de 1868 cambia la evidencia numérica.

Los experimentos nulos restringen posibles leyes al demostrar lo que no aparece.

La medición ayuda a determinar qué relaciones pueden formularse y ponerse a prueba.

La estabilidad proporciona otro tipo de estructura

Saturno, los reguladores y la física estadística producen una recurrencia diferente.

La pregunta central pasa a ser qué ocurre bajo perturbación.

¿Puede persistir la configuración?

¿La corrección amortigua o amplifica la desviación?

¿Puede sobrevivir la regularidad macroscópica a la variabilidad microscópica?

De nuevo, la similitud es analítica, no evidencia de un único programa privado.

Los documentos de Maxwell muestran los casos.

El historiador los coloca juntos.

Kirchhoff señala otra posición posible

Kirchhoff proporciona una comparación límite útil.

En el prefacio de sus lecciones de mecánica de 1876 definió su tarea como describir de la forma más completa y sencilla posible los movimientos que tienen lugar en la naturaleza.

Después aclaró que la tarea consistía en indicar qué fenómenos ocurren, no en determinar sus causas.

Es una posición más restrictiva que la práctica habitual de Maxwell.

Maxwell buscó repetidamente mecanismos físicos incluso cuando evitaba comprometerse plenamente con ellos.

La formulación de Kirchhoff muestra que la física matemática del siglo XIX contenía otras respuestas legítimas a la cuestión de cuánto mecanismo requería la ciencia.

El Maxwell posterior debe seguir siendo posterior

La misma disciplina se aplica a Einstein.

El ensayo de Einstein de 1931 con motivo del centenario se titula, en *Ideas and Opinions*, «Maxwell's Influence on the Evolution of the Idea of Physical Reality».

Pertenece a la historia de la recepción de Maxwell.

No nos dice directamente cómo entendía Maxwell en 1865 el estatus de los campos y del éter.

En 1931, Hertz, Heaviside, Lorentz, la relatividad y la física cuántica se interponían entre Einstein y Maxwell.

El Maxwell retrospectivo tiene importancia histórica.

Pero es retrospectivo.

El observador también pertenece al problema

El color añade una última complicación.

La observación no siempre es transparente.

Los observadores humanos participan en la igualación de colores.

Las diferencias individuales importan.

La objetividad no procede de fingir que el observador está ausente, sino de construir procedimientos mediante los cuales la contribución del observador se vuelve controlada y reproducible.

La estructura oculta puede encontrarse a veces, en parte, del lado observador del experimento.

Invisible no significa sin restricciones

Esta es la conclusión más amplia que permite la evidencia.

Un mecanismo oculto solo se vuelve científicamente productivo mediante restricciones.

Un vórtice sin consecuencias es imaginaria.

Una población molecular sin predicciones es una historia.

Un campo sin relaciones medibles es un nombre.

Una analogía matemática sin correspondencia disciplinada es decoración.

Las representaciones exitosas de Maxwell importaron porque podían enfrentarse a ecuaciones, mediciones y fracasos.

Ni profeta ni formalista

Maxwell no debe convertirse en profeta.

La profecía borra el trabajo probatorio.

Tampoco debe transformarse en un formalista moderno indiferente al mecanismo físico.

Buscó repetidamente inteligibilidad física.

La posición históricamente interesante se encuentra entre esas caricaturas.

Podía trabajar intensamente con un mecanismo sin asignar a cada una de sus partes el mismo estatuto probatorio.

Podía conservar una relación útil cuando cambiaba su representación.

Y podía publicar dificultades que su propia teoría no había resuelto.

La respuesta a la pregunta

El libro comenzó preguntando:

¿Cómo decidió Maxwell qué podía inferir legítimamente la física cuando el mecanismo subyacente permanecía oculto, era objeto de disputa o quizá ni siquiera estaba ahí para ser encontrado?

No hay una única regla en los escritos de Maxwell que responda a esa pregunta en todos los temas.

La evidencia respalda algo más concreto.

Construyó representaciones.

Calculó sus consecuencias.

Comparó esas consecuencias con lo que podía observarse o medirse.

A veces distinguió explícitamente entre el éxito de una relación y la verdad de un mecanismo.

Revisó mecanismos cuando cambiaron las restricciones.

Y distintas partes de una teoría sobrevivieron durante periodos diferentes.

Estas prácticas no eran exclusivas de Maxwell.

Ese es uno de los resultados de la comparación, no una salvedad que deba ocultarse.

Pensar lo invisible

La importancia de Maxwell no requiere un método científico privado e inaccesible para sus contemporáneos.

La evidencia rechaza esa afirmación más fuerte.

Lo que los documentos muestran en cambio es una secuencia extraordinaria de casos en los que estructuras ocultas se hicieron científicamente tratables sin que sus mecanismos subyacentes estuvieran igualmente asegurados.

Lo invisible fue representado.

Calculado.

Comparado.

Medido.

Perturbado.

A veces rechazado.

A veces conservado.

A veces transformado.

Y a veces una relación demostró ser más duradera que el mecanismo utilizado inicialmente para hacerla concebible.

Ese es el significado históricamente defendible de pensar lo invisible.