

¿Qué es la luz? Onda, cuanto y observador

IDE-019 · Ideas fundamentales

Ensayos conceptuales para El universo y sus observadores

Autor: Juan Segurola

Versión: v0.9 ES · 19 de septiembre de 2026

Estado: Versión de publicación

Forma del artículo: Ensayo conceptual

Escala / contexto: De las ondas de radio a los rayos gamma; de experimentos con fotones aislados a la astronomía

Límite: La luz en concreto: cómo una sola teoría produce fenómenos ondulatorios y cuánticos. Qué es una partícula en general corresponde a IDE-020, qué es un campo cuántico corresponde a IDE-021, y la observación como acto epistémico corresponde a IDE-023

Trabajos relacionados: IDE-020, IDE-021, IDE-023

Perfil epistémico: Conocimiento establecido con límites interpretativos

Licencia en publicación: Todos los derechos reservados

Resumen del artículo

La luz no es onda los lunes y partícula los martes. Las ecuaciones de Maxwell la describen como una perturbación que se propaga en el campo electromagnético, y ese relato explica sin resto, dentro de su dominio, la interferencia, la difracción, la polarización y la velocidad finita de propagación.[1] El argumento de Einstein de 1905 añadió algo que el relato clásico no podía dar: la energía se intercambia con la materia en cantidades discretas proporcionales a la frecuencia, algo que Millikan midió después con cuidado suficiente para extraer la constante de Planck.[2,3] La reconciliación no es un compromiso entre dos imágenes sino una sola teoría en la que ambas familias de fenómenos son consecuencias. Este artículo examina también las pruebas no clásicas basadas en estadísticas de fotones, la fuerza probatoria limitada del efecto fotoeléctrico por sí solo y el papel físico de un observador.[4,7]

En 60 segundos

El electromagnetismo clásico acierta con la luz allí donde se aplica: la interferencia y la difracción se siguen de una perturbación de campo que obedece ecuaciones de onda, y la velocidad de propagación sale de dos constantes eléctricas medibles.[1] Lo que no puede hacer es explicar por qué la energía de los fotoelectrones depende de la frecuencia y no de la intensidad. Einstein propuso que la energía se intercambia en cuantos proporcionales a la frecuencia, y Millikan, que partió escéptico, midió la relación con precisión suficiente para determinar con ella la constante de Planck.[2,3] Ahora bien, la discreción del intercambio no es prueba de balas diminutas. El experimento que muestra que la luz no es una onda clásica con tiempos de llegada aleatorios es el antiagrupamiento, en el que un emisor único no puede producir dos detecciones a la vez, comportamiento sin descripción ondulatoria clásica.[4] El entrelazamiento inducido por el entorno suprime la interferencia entre registros macroscópicamente distintos.[5]

Por qué importa esta pregunta

La luz es donde casi todo el mundo se encuentra con la física cuántica, y es donde se instalan las peores formulaciones divulgativas. La dualidad onda-partícula sugiere dos sustancias que se turnan; el efecto del observador sugiere que mirar cambia la realidad; el fotón se imagina como una bolita luminosa con trayectoria. Cada una de esas cosas dificulta aprender física después, porque hay que desaprenderla. Acertar con la luz fija además el vocabulario de los dos artículos siguientes, porque un fotón es el ejemplo más limpio disponible de qué puede y qué no puede significar la palabra partícula.

1. La luz como perturbación de un campo

Las ecuaciones de Maxwell admiten soluciones en las que los campos eléctrico y magnético se sostienen mutuamente y se propagan. La velocidad de esas soluciones queda fijada por dos constantes medibles en un laboratorio sin óptica alguna, y coincidía con la velocidad de la luz medida, razón por la que Maxwell concluyó que la luz es una perturbación electromagnética.[1]

El relato no es una metáfora. Predice cuantitativamente la interferencia y la difracción, explica la polarización como orientación del campo y da la presión de radiación. En su dominio es completo: ningún experimento de interferencia exige añadirle nada, y la teoría clásica sigue siendo la descripción de trabajo en radio, óptica y buena parte de la astronomía.

Lo que no describe es el intercambio de energía entre luz y materia a baja intensidad. Clásicamente, la energía entregada a un electrón debería crecer con el brillo de la iluminación, y una fuente tenue debería sencillamente tardar más en acumular lo que una brillante entrega deprisa. Esa predicción falla, y el fallo no es pequeño.

En qué punto estamos

La descripción de campo de Maxwell explica la interferencia, la difracción, la polarización, la presión de radiación y la velocidad de propagación, y sigue siendo la teoría de trabajo en casi todo el espectro. Su fallo es concreto y está localizado: se equivoca en el intercambio de energía con la materia. Ahí entra el cuanto, y entra como enunciado sobre el intercambio y no sobre la propagación.

2. El cuanto de intercambio

El artículo de Einstein de 1905 se titula como un punto de vista heurístico, y su propuesta es precisa: en los procesos de emisión y absorción, la luz se comporta como si su energía estuviera distribuida en cuantos localizados proporcionales a la frecuencia.[2] Aplicado al efecto fotoeléctrico predice que la energía cinética máxima de los electrones arrancados crece linealmente con la frecuencia, con pendiente igual a la constante de Planck, y no depende de la intensidad.

Millikan dedicó una década a ponerlo a prueba, y fue explícito en que esperaba que la hipótesis fallara. Sus medidas de 1916 confirmaron la relación lineal y dieron un valor de la constante de Planck a partir de la pendiente, que es una forma fuerte de confirmación: la predicción era cuantitativa y la constante obtenida concordaba con valores determinados por vías no relacionadas.[3]

Conviene notar qué establece el resultado y qué no. Establece que la energía se intercambia en cantidades discretas fijadas por la frecuencia. No establece que la luz viaje como un chorro de objetos pequeños, y que el propio Einstein lo presentara como heurístico refleja que el argumento trataba de la estadística del intercambio y no de una imagen de la propagación.

En qué punto estamos

Einstein propuso que la luz intercambia energía en cuantos proporcionales a la frecuencia, y Millikan midió la relación lineal resultante con precisión suficiente para extraer de su pendiente la constante de Planck. El resultado trata del intercambio, no de una imagen de qué viaja. Establecer que la luz no es en absoluto una onda clásica exigió otro experimento posterior.

3. Qué no es un fotón

El efecto fotoeléctrico admite un tratamiento semiclásico con un campo electromagnético clásico acoplado a materia cuantizada; por tanto, estadísticas fotoeléctricas importantes no requieren por sí solas cuantización del campo.[7] Inferencia: el efecto fotoeléctrico aislado constituye, en consecuencia, evidencia más débil de los fotones que una prueba óptica plenamente no clásica.

Kimble, Dagenais y Mandel observaron antiagrupamiento en la fluorescencia de un átomo único: tras una detección, la probabilidad de una segunda detección inmediata cae por debajo de lo que permite cualquier descripción ondulatoria clásica.[4] Un emisor único que acaba de emitir debe reexcitarse antes de volver a emitir, así que su salida no puede dar dos detecciones simultáneas, y ningún campo clásico, con cualquier perfil de fluctuación de intensidad, reproduce eso.

Esto autoriza la palabra fotón y a la vez la restringe. El antiagrupamiento en la fluorescencia de un emisor único viola un límite de campo clásico y respalda una descripción de campo cuantizado. [4,7] No muestra que un fotón tenga posición entre emisión y absorción, ni trayectoria, ni tamaño; y los experimentos de interferencia que la teoría clásica explica tan bien siguen siendo válidos, lo que significa que, sea lo que sea un fotón, no es un objeto pequeño que sigue un camino.

En qué punto estamos

El antiagrupamiento en la fluorescencia de un emisor único viola un límite de campo clásico y respalda una descripción de campo cuantizado.[4] Queda qué hace un detector cuando registra uno.

4. El observador es una interacción

La expresión efecto del observador invita a leer que un acto consciente cambia el resultado. Lo que ocurre físicamente es que un detector interactúa con el sistema y su estado queda correlacionado con lo que detectó, proceso físico que involucra muchos grados de libertad.

La decoherencia describe la consecuencia. El entrelazamiento inducido por el entorno suprime la interferencia entre registros macroscópicamente distintos.[5]

Lo que ese resultado cubre conviene enunciarlo con exactitud, porque es más estrecho que la versión divulgativa. La decoherencia explica la supresión de la interferencia y la emergencia de un conjunto preferente de estados estables, que es lo que hace que los registros macroscópicos se comporten clásicamente respecto de la interferencia; la pregunta de por qué se experimenta un resultado y no otro sigue abierta y se interpreta de manera distinta en las lecturas principales de la teoría cuántica.[5,8] El artículo hace la primera afirmación y declina la segunda.

En qué punto estamos

La decoherencia no zanja por qué se experimenta un resultado concreto, y ese límite es deliberado. Queda enunciar cómo una sola teoría entrega ambas familias de fenómenos.

5. Una teoría, dos familias de fenómenos

La electrodinámica cuántica es una sola teoría del campo electromagnético y de su interacción con la materia cargada, y tanto los fenómenos ondulatorios como los cuánticos son consecuencias suyas. La presentación de Feynman deja la estructura inusualmente clara: se asignan amplitudes a las maneras alternativas en que podría ocurrir un resultado, y esas amplitudes se suman antes de tomar la probabilidad.[6]

La interferencia no es entonces un fenómeno ondulatorio que compite con una imagen corpuscular. Es lo que ocurre cuando varias alternativas aportan amplitudes al mismo suceso de detección, y por eso fotones enviados de uno en uno a través de dos rendijas construyen igualmente un patrón de interferencia a lo largo de muchos sucesos. La discreción tampoco compite: cada suceso es una detección, y el patrón está en la distribución de muchas.

La dualidad onda-partícula fue un andamio útil mientras se construía la teoría y es una mala descripción de la estructura terminada, porque sugiere dos cosas donde hay una. El resumen honesto es que la luz es una excitación del campo electromagnético, descrita por una teoría cuyas amplitudes interfieren y cuyas interacciones son discretas.

En qué punto estamos

La electrodinámica cuántica produce fenómenos ondulatorios y cuánticos desde una sola estructura, en la que las maneras alternativas de que ocurra un resultado aportan amplitudes que interfieren antes de tomar probabilidades. La dualidad era andamio, no resultado. Como un fotón resulta ser una excitación y no un objeto, IDE-020 pregunta qué puede seguir significando la palabra partícula.

Lo que sabemos y cómo lo sabemos

- El electromagnetismo clásico explica la interferencia, la difracción, la polarización, la presión de radiación y la velocidad de propagación de la luz, y sigue siendo la descripción de trabajo en su dominio.[1]
- La energía se intercambia entre luz y materia en cuantos proporcionales a la frecuencia; la relación fotoeléctrica es lineal en la frecuencia e independiente de la intensidad, y su pendiente da la constante de Planck.[2,3]
- El antiagrupamiento en la fluorescencia de un emisor único viola un límite de campo clásico y respalda una descripción de campo cuantizado.[4,7]

Lo que todavía no sabemos

- Por qué se registra un resultado concreto y no otro en un suceso individual, cuestión que la decoherencia no aborda y que las interpretaciones principales de la teoría cuántica responden de forma distinta.[5]
- Si puede definirse un observable de posición plenamente satisfactorio para un fotón, lo que sigue siendo una dificultad técnica y no una parte asentada de la teoría.
- Cómo describir el campo electromagnético en regímenes de curvatura fuerte del espaciotiempo, cuestión que pertenece a la relación no resuelta entre teoría cuántica de campos y gravitación.

Qué podría hacernos cambiar de opinión

- Una fuente reproducible de luz antiagrupada que pudiera describirse por completo con un campo estocástico clásico, medida correctamente la correlación de segundo orden a retardo cero por debajo de la cota clásica, eliminaría la prueba decisiva de que ninguna descripción de campo clásico da cuenta de la luz.[4]
- Una desviación medida de la dependencia lineal de la energía máxima de los fotoelectrones con la frecuencia, en condiciones donde los efectos de superficie y de carga espacial estén controlados como en las determinaciones clásicas, contradiría el cuanto de intercambio.[2,3]
- Un experimento que recuperara la interferencia entre registros de detector macroscópicamente distintos, tras el entrelazamiento con un entorno de muchos grados de libertad, contradiría el relato de la decoherencia sobre por qué esa interferencia se vuelve inobservable bajo tal acoplamiento, que es lo que ese relato afirma; no afectaría a por qué se obtiene un resultado y no otro, cuestión que el relato no aborda.[5]

Si solo recuerdas una cosa

La luz es una excitación del campo electromagnético cuyas alternativas interfieren y cuyas interacciones son discretas; no es una onda y una partícula que se turnan.

Artículos relacionados

- IDE-020 — ¿Qué es una partícula?
- IDE-021 — ¿Qué es un campo?
- IDE-023 — ¿Qué es la observación?

Referencias

- [1] James Clerk Maxwell. A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field. Philosophical Transactions of the Royal Society of London 155, 459-512 (1865). DOI 10.1098/rstl.1865.0008.
- [2] Albert Einstein. On a Heuristic Point of View Concerning the Production and Transformation of Light. Annalen der Physik 17, 132-148 (1905). DOI 10.1002/andp.19053220607.
- [3] Robert A. Millikan. A Direct Photoelectric Determination of Planck's h . Physical Review 7(3), 355-388 (1916). DOI 10.1103/PhysRev.7.355.
- [4] H. J. Kimble; M. Dagenais; L. Mandel. Photon Antibunching in Resonance Fluorescence. Physical Review Letters 39(11), 691-695 (1977). DOI 10.1103/PhysRevLett.39.691.
- [5] Wojciech H. Zurek. Decoherence, Einselection, and the Quantum Origins of the Classical. Reviews of Modern Physics 75(3), 715-775 (2003). DOI 10.1103/RevModPhys.75.715.
- [6] Richard P. Feynman. QED: The Strange Theory of Light and Matter. Princeton University Press (1985).
- [7] Leonard Mandel; Emil Wolf. Optical Coherence and Quantum Optics. Cambridge University Press (1995), chapter 9.
- [8] Guido Bacciagaluppi. The Role of Decoherence in Quantum Mechanics. The Stanford Encyclopedia of Philosophy, first published 3 November 2003, substantive revision 23 January 2025. <https://plato.stanford.edu/entries/qm-decoherence/>