

¿Qué es un campo?

IDE-021 · Ideas fundamentales

Ensayos conceptuales para El universo y sus observadores

Autor: Juan Segurola

Versión: v0.8 ES · 17 de septiembre de 2026

Estado: Versión de publicación

Forma del artículo: Ensayo conceptual

Escala / contexto: Teoría cuántica relativista, de las pruebas de laboratorio al Modelo Estándar

Límite: El campo cuántico: qué es, qué son sus excitaciones y qué contiene su estado fundamental.

La idea organizadora general de campo corresponde a IDE-009, y el concepto de partícula a IDE-020

Trabajos relacionados: IDE-022, IDE-009, IDE-020

Perfil epistémico: Conocimiento establecido con límites interpretativos

Licencia en publicación: Todos los derechos reservados

Resumen del artículo

En la física fundamental actual los objetos básicos no son partículas sino campos, y los campos no son magnitudes clásicas extendidas por el espacio. Un campo cuántico asigna operadores, y no números, a regiones del espaciotiempo, y lo que un detector llama partícula es una excitación de uno de ellos.[1,2] Esa inversión explica cosas que la imagen corpuscular no puede: por qué todos los electrones son exactamente iguales, por qué el número de partículas cambia en las interacciones y por qué el estado fundamental no está vacío en el sentido ordinario. La teoría es además estrictamente local en un sentido técnico preciso que convive con las correlaciones que identificó Bell.[3] Este artículo expone la estructura, la evidencia y el punto en que la pregunta de qué es un campo cuántico deja de tener respuesta asentada.[5]

En 60 segundos

Un campo clásico pone un número en cada punto. Un campo cuántico pone allí un operador, así que los valores del campo no son magnitudes poseídas a la vez; lo que existe es un estado, y el campo es lo que actúa sobre él.[1] Las partículas son excitaciones de esos campos, y todo electrón lleva exactamente las mismas etiquetas de masa y carga: no son copias fabricadas sino excitaciones de una estructura subyacente, que difieren en los estados que ocupan y no en lo que los hace electrones.[1,6] Eso explica también por qué cambia el número de partículas, ya que los operadores que crean y destruyen excitaciones son los objetos naturales de la teoría. El estado fundamental tampoco es nada: tiene estructura con consecuencias medibles, y el ejemplo más limpio es la atracción entre dos placas conductoras sin carga.[4] La localidad sobrevive a todo esto en una forma precisa, porque las medidas en regiones separadas por intervalo espacial conmutan, así que ninguna señal controlable adelanta a la luz aunque las correlaciones que analizó Bell superen lo que permite cualquier modelo clásico local.[2,3]

Por qué importa esta pregunta

Casi todo relato divulgativo de la física fundamental se construye sobre partículas, y casi toda dificultad de esos relatos se disuelve al invertir el orden. Por qué son idénticos los electrones, cómo puede la

energía volverse materia, de qué está hecho el vacío, cómo puede el entrelazamiento ser no local sin permitir señales: parecen paradojas desde el lado corpuscular y consecuencias desde el lado del campo. Acertar con el orden disciplina además el lenguaje, porque deja claro qué enunciados son resultados de una teoría bien contrastada y cuáles son interpretaciones de ella.

1. De números a operadores

Un campo clásico es una asignación de valores a puntos que evoluciona bajo ecuaciones locales. Cuantizarlo sustituye esos valores por operadores: objetos matemáticos que actúan sobre estados en vez de poseer magnitudes definidas propias.[1] Preguntar por el valor de un campo cuántico en un punto es por tanto una pregunta equivocada del mismo modo que preguntar por la posición de un electrón entre medidas.

Lo que la teoría proporciona en su lugar es un estado, junto con operadores asociados a regiones del espaciotiempo cuyos valores esperados y correlaciones son lo que miden los experimentos. En la formulación algebraica esto se toma como primario: el contenido físico es una familia de álgebras de observables adscritas a regiones, y todo lo demás se deriva de cómo encajan esas álgebras.[2]

La construcción no es un adorno opcional. Los requisitos de simetría relativista, causalidad y positividad espectral imponen restricciones fuertes a la forma que puede tomar un campo cuántico, una vez especificados los supuestos adicionales de la construcción elegida, y el desarrollo de Weinberg deriva el formalismo de campos de esos requisitos en vez de postularlo.[1] El resultado es una restricción y no un teorema de unicidad: por eso la teoría de campos es el marco de trabajo, no una prueba de que ninguna teoría cuántica relativista pueda levantarse sobre otros supuestos.

En qué punto estamos

Cuantizar un campo sustituye valores en puntos por operadores que actúan sobre estados, así que no tiene valores poseídos a la vez, y el contenido físico está en los estados y en observables adscritos a regiones. Los requisitos de simetría relativista, causalidad y positividad espectral imponen restricciones fuertes a esa forma, una vez especificados los supuestos adicionales de la construcción elegida. Lo primero que explica son las partículas.

2. Las partículas como excitaciones

Cada especie de partícula corresponde a un campo, y una partícula es una excitación cuantizada de ese campo, en el mismo sentido en que un modo normal de un sistema vibrante transporta cuantos discretos de energía.[1] Los operadores que aparecen en la teoría añaden y quitan esas excitaciones, expresión formal de la creación y la aniquilación.

Las partículas de una especie dada son excitaciones del campo correspondiente, y comparten las etiquetas de masa, carga y espín que definen la especie, mientras que los estados que ocupan pueden diferir. Hay un solo campo del electrón, y las etiquetas que llevan sus excitaciones son propiedades de ese campo, que el Modelo Estándar trata como parámetros que lo caracterizan.[1,6] No hay que invocar ningún proceso de fabricación para explicar la identidad de las etiquetas, y allí donde dos electrones difieren, difieren en el estado que ocupa cada uno y no en lo que los hace electrones.

Fija además el estatuto de las transiciones de vacío a partículas que en divulgación suenan paradójicas. La energía no se convierte en una sustancia llamada materia; un estado con excitaciones de un campo pasa a ser un estado con excitaciones de otros, sujeto a las leyes de conservación. La contabilidad está en los números cuánticos, y es exacta.

En qué punto estamos

Una partícula es una excitación cuantizada de un campo. Todos los electrones llevan las mismas etiquetas de masa, carga y espín que definen la especie, mientras que los estados que ocupan pueden diferir, y la creación y la aniquilación son las operaciones naturales de la teoría. Las excitaciones presuponen un estado fundamental, y ese estado resulta no estar vacío.

3. El estado fundamental no es la nada

El vacío de una teoría cuántica de campos es el estado de energía más baja, y es un estado y no una ausencia. Tiene correlaciones entre regiones, fluctúa en el sentido de que los observables de campo tienen varianza no nula en él, y no es invariante bajo todas las transformaciones que ingenuamente cabría esperar.[1,2,5]

La evidencia más clara es mecánica. Casimir predijo que dos placas conductoras paralelas sin carga en el vacío se atraen, porque las condiciones de contorno que imponen cambian la estructura del campo entre ellas respecto del exterior.[4] La fuerza depende de la separación y no de ninguna carga del material, y se ha medido.

Conviene cuidado con lo que esto autoriza. Que el estado fundamental tenga estructura con consecuencias medibles está bien establecido, y el vacío es el estado fundamental del hamiltoniano del campo y no la nada ni el espacio vacío; formulaciones construidas desde lagrangianos clásicos distintos pueden resultar ser la misma teoría descrita de otra manera.[5] Esas son las afirmaciones que hace esta sección, y son más estrechas que la imagen divulgativa de un caldo hirviendo de partículas que aparecen y desaparecen. A lo que se mide y a lo que se imagina no debe asignárseles el mismo estatuto.

En qué punto estamos

El vacío es el estado de energía mínima y no una ausencia, con correlaciones y varianza no nula en los observables de campo, y la atracción de Casimir entre placas sin carga es evidencia medible de que las condiciones de contorno lo modifican. Cómo es el estado fundamental más allá de lo que esas medidas alcanzan no queda zanjado por ellas. Queda conciliar la localidad con las correlaciones que permiten los estados cuánticos.

4. Localidad, y qué mostró Bell

La teoría cuántica de campos relativista es local en un sentido preciso: los observables asociados a regiones que no pueden conectarse por una señal luminosa conmutan, lo que implica que una medida en una región no puede cambiar la estadística de ninguna medida en la otra.[2] Ninguna influencia controlable adelanta a la luz, y eso es un teorema del marco y no una esperanza.

Bell mostró algo distinto e igual de firme. Las correlaciones entre medidas sobre sistemas entrelazados pueden superar lo que permite cualquier modelo que atribuya valores locales

preexistentes a los sistemas, y la cota que dedujo vuelve esto experimentalmente decidable.[3] La teoría cuántica predice violaciones de esa cota, y los experimentos las encuentran.

Ambos resultados conviven sin tensión porque tratan de cosas distintas. El análisis de Bell descarta una clase de explicación, los modelos locales de variables ocultas; la conmutación a separación espacial descarta una clase de uso, la señalización. Correlaciones más fuertes de lo que permite cualquier modelo clásico local no transmiten por sí mismas nada, porque ninguna de las partes puede dirigir la estadística marginal de la otra.[2,3]

En qué punto estamos

Los observables en regiones separadas por intervalo espacial conmutan, así que ninguna señal controlable adelanta a la luz, mientras que la cota de Bell muestra que las correlaciones superan lo que permiten valores locales preexistentes. Ambos restringen cosas distintas, la explicación y el uso, y por eso coexisten. Queda la pregunta que el formalismo no zanja: qué clase de cosa es un campo cuántico.

5. Qué clase de cosa es un campo cuántico

El éxito predictivo del marco no está en discusión. El momento magnético anómalo del electrón se mide con una precisión de alrededor de una parte en diez mil millones.[6] Esa medida se compara con un cálculo de electrodinámica cuántica, y lo bien que ambos concuerdan depende tanto de la incertidumbre del cálculo como de la de la medida, así que una cifra de concordancia no se lee de la barra de error experimental sola. Aun así, es un observable de la electrodinámica cuántica y no el marco entero, porque las predicciones del sector de interacción fuerte no se contrastan ni de lejos con esa precisión.

La pregunta interpretativa es otra y sigue abierta. Si las entidades fundamentales son campos, o partículas, o las álgebras locales de la formulación algebraica, o ninguna de esas cosas, se sigue discutiendo; formulaciones distintas de la misma física sostienen lecturas distintas, y la matemática no lo decide.[2,5] La defensa de Wallace de tomar en serio la formulación lagrangiana de trabajo como descripción, y no como recurso de cálculo a la espera de ser sustituido, es una posición en un debate vivo y no un consenso.[5]

Así que el artículo se detiene donde se detiene la evidencia. Los campos, en el sentido de las estructuras de operadores del Modelo Estándar, organizan todo lo que se ha medido sobre la materia elemental, y las partículas son sus excitaciones. Qué son en último término esas estructuras no lo responde ese éxito, y la versión honesta de este asunto lo dice.

En qué punto estamos

Un observable de la electrodinámica cuántica, el momento magnético anómalo del electrón, se mide con una precisión de una parte en diez mil millones, mientras que qué es en último término un campo cuántico sigue siendo una pregunta interpretativa abierta que la matemática no zanja. Un éxito predictivo de esa clase restringe descripciones sin seleccionar una. IDE-022 recoge una propiedad que llevan esas excitaciones y que se describe mal de forma rutinaria: la masa.

Lo que sabemos y cómo lo sabemos

- La cuantización sustituye los valores del campo en puntos por operadores que actúan sobre estados, y los requisitos de simetría relativista, causalidad y positividad espectral imponen

restricciones fuertes a la forma que pueden tomar esos campos, una vez especificados los supuestos adicionales de la construcción elegida.[1]

- Las partículas son excitaciones cuantizadas de campos, todas las excitaciones de un campo dado llevan idénticas etiquetas de masa, carga y espín mientras que los estados que ocupan pueden diferir, y el número de partículas cambia en las interacciones.[1,6]
- El vacío es el estado de energía más baja y no una ausencia, y tiene estructura con consecuencias medibles, de las que la atracción de Casimir entre placas conductoras sin carga es la más clara.[1,4,5]
- Los observables en regiones separadas por intervalo espacial conmutan, así que ninguna señal controlable adelanta a la luz, mientras que la cota de Bell muestra correlaciones que superan lo que permiten valores locales preexistentes.[2,3]

Lo que todavía no sabemos

- Cuáles son las entidades fundamentales de la teoría, con campos, partículas y álgebras locales defendidos y un formalismo que no determina la elección.[2,5]
- Cómo formular con pleno rigor matemático teorías cuánticas de campos con interacción en cuatro dimensiones espaciotemporales, cuestión abierta pese al éxito predictivo del marco.
- Cómo combinar la descripción de campos con la gravitación, que es donde se espera que el marco necesite sustitución y no extensión.

Qué podría hacernos cambiar de opinión

- Una demostración reproducible de señalización controlable entre regiones separadas por intervalo espacial contradiría la estructura de conmutación sobre la que se construye la teoría cuántica de campos relativista.[2]
- Una fuerza de Casimir medida que difiriera de la predicción para una geometría y conductividad bien caracterizadas, más allá de las correcciones conocidas por conductividad finita, rugosidad y temperatura, socavaría el relato estructural del vacío.[4]
- Una discrepancia confirmada entre el momento magnético anómalo del electrón calculado y medido, mayor que las incertidumbres teórica y experimental combinadas, indicaría que el marco es incompleto a energías accesibles.[6]

Si solo recuerdas una cosa

Un campo cuántico es una estructura de operadores cuyas excitaciones son partículas, todos los electrones llevan las mismas etiquetas de especie, y el vacío es un estado, no una ausencia.

Artículos relacionados

- IDE-022 — ¿Qué significa la masa?
- IDE-009 — Campo
- IDE-020 — ¿Qué es una partícula?

Referencias

[1] Steven Weinberg. The Quantum Theory of Fields, Volume I: Foundations. Cambridge University Press (1995).

- [2] Rudolf Haag. Local Quantum Physics: Fields, Particles, Algebras, 2nd edition. Springer (1996).
- [3] John S. Bell. On the Einstein Podolsky Rosen Paradox. Physics Physique Fizika 1(3), 195-200 (1964). DOI 10.1103/PhysicsPhysiqueFizika.1.195.
- [4] H. B. G. Casimir. On the Attraction Between Two Perfectly Conducting Plates. Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen 51, 793-795 (1948).
- [5] David Wallace. In Defence of Naiveté: The Conceptual Status of Lagrangian Quantum Field Theory. Synthese 151(1), 33-80 (2006). DOI 10.1007/s11229-004-6248-9.
- [6] F. Takahashi et al. (Particle Data Group). Review of Particle Physics. International Journal of Modern Physics A 41, 2630011 (2026). DOI 10.1142/S0217751X26300115.