



Ontología Cuántica ¿Cómo es la materia según la física cuántica?

Alberto Clemente de la Torre¹

IFIMAR - CONICET

Las diferentes teorías físicas para describir la realidad han propuesto la existencia de constituyentes básicos con los cuales se construye la realidad macroscópica que percibimos. Estas propuestas han cambiando a lo largo de la historia, desde las cuatro substancias de la antigüedad hasta la teoría de campos cuánticos actual. En esta nota se presentan estas propuestas con especial énfasis en la última ontología... que seguramente es provisoria.

I. Introducción

La palabra *Cuántica* es demasiado atractiva: si se la pone en un buscador de Internet aparecen, además de los sitios donde la palabra es usada correctamente, cientos de alusiones a ella en todo tipo de contextos, la mayoría de los cuales son charlatanerías esotéricas, estafas pseudocientíficas y engaños intelectuales: medicina bio-energética-cuántica, psicología transpersonal cuántica, cuántica espiritual, equipo cuántico magnético, estética cuántica, curación cuántica, sanación cuántica, cirugía cuántica, visualización cuántica, activismo cuántico, política cuántica, metafísica cuántica... y ahora, ontología cuántica. Es entonces importante aclarar que este artículo no es esotérico y pretende reflejar con seriedad la opinión de alguien que ha pasado cincuenta años intentando entender la descripción de la realidad brindada por la física cuántica.

La ontología trata de la existencia de las cosas, de sus características y categorías: pregunta qué es lo que existe ¿en qué modos se presenta la existencia? ¿es la existencia un atributo? ¿cuáles son las entidades básicas fundamentales de la materia? ¿cuáles atributos de las cosas son esenciales o accidentales? ¿cuándo la existencia es necesaria, contingente o imposible? ¿qué es la identidad de un ente? y muchas cosas más que no trataremos en este artículo. Aquí nos limitaremos a considerar la existencia desde el punto de vista de la física, o sea, aquellas cosas cuya existencia es propuesta por las teorías físicas desarrolladas para explicar las observaciones empíricas. Estos entes propuestos no son percibidos directamente, pero son esenciales en la interpretación de las teorías físicas y pretenden dar una explicación más o menos intuitiva de la realidad microscópica, compatible con nuestra observación del mundo.

En este artículo se usa la palabra "ontología" con un significado algo diferente al usual en filosofía pero que se ha instalado en los fundamentos de la física: cuando decimos "una ontología" se está aludiendo a una imagen mental que corresponde a algo que existe en la realidad. Por ejemplo, una ontología es pensar que la realidad está compuesta por átomos con la forma de cuatro poliedros regulares (ésta es la ontología propuesta por Platón).

¹ Electronic address: delatorre@mdp.edu.ar

Es importante reconocer que en las teorías físicas se construyen modelos, más o menos fidedignos para describir la realidad que deberán ser modificados, perfeccionados o abandonados cuando la evidencia empírica lo requiere; por lo tanto, la ontología derivada de la física es cambiante, a veces de manera abrupta o revolucionaria. Posiblemente la física no agota la realidad pero sí pretende acercarse a ella sin límites a través de modelos teóricos con predicciones que pueden ser contrastadas experimentalmente; la historia de la ciencia muestra que esto ha resultado en un espectacular avance en el conocimiento de la naturaleza. En la visión simplificada que la física hace de la realidad se adopta la presencia de energía e impulso, o sea, esa capacidad que tienen los entes de producir cambios y ejercer alguna acción en su entorno, como *criterio suficiente* para la existencia de algo: si algo tiene y transporta energía e impulso, entonces existe.

En este artículo se presentarán las visiones de la realidad brindadas por las diferentes teorías físicas. En todo esto, adoptamos los postulados filosóficos de que la realidad existe independiente del observador y que es conocible mediante la observación y la razón. Para muchos, estos postulados son trivialmente aceptables; sin embargo, estas afirmaciones han sido cuestionadas por varias corrientes filosóficas y debido a que su validez no es demostrable, deben permanecer como postulados.

II. Ontología antigua: el continuo o los átomos

Si consideramos un trozo de materia macroscópica, una piedra, cierto volumen de agua o de gas, inmediatamente y sin hacer profundas elucubraciones, le podemos asignar ciertas características: su forma, el tipo y cantidad de substancia que la compone, su ubicación espacial y temporal, su energía de movimiento y el impulso que puede comunicar a otro cuerpo, la conservación de su identidad, o sea, la piedra es idéntica a sí misma y con el transcurrir del tiempo sigue siendo la misma piedra, etc. Si separamos el objeto en dos partes, notamos que ciertas características son permanentes y otras cambian de manera trivial: la cantidad de materia se divide pero el tipo de substancia permanece, las partes siguen siendo localizables y la suma de la energía e impulso que poseen es igual a la inicial. Podemos pensar en repetir una y otra vez la subdivisión y nos planteamos si se encuentra algún límite o si podemos continuar partiendo la materia indefinidamente. Así surge la hipótesis atomista que niega que la materia pueda ser subdividida infinitas veces. Esta hipótesis fue aceptada en la antigüedad pero fue comprobada solamente veinticuatro siglos después; sin embargo, es interesante notar que, de una manera que precisaremos más adelante, la hipótesis de una substancia continua reaparece en la teoría de campos cuánticos del siglo XX. Los átomos implican una ontología de partículas con características que las identifican, con identidad que perdura en el tiempo (*conatus* en la filosofía antigua), ubicables en el espacio y capaces de transportar energía e impulso. Esta ontología proviene directamente de nuestra percepción sensorial que ha sido extrapolada a una escala microscópica sin ninguna justificación que nos asegure que las partículas básicas que constituyen la materia tengan las mismas características, por ejemplo de localizabilidad, que los objetos macroscópicos. Es sencillamente una suposición bastante sensata, pero sin fundamento; por lo tanto, debemos estar dispuestos a abandonarla si la evidencia empírica lo requiere.

III. Ontología clásica: partículas y campos

La ontología de partículas de la antigüedad se trasladó a la mecánica clásica iniciada en el siglo XVII, pero pronto se reconoció la existencia de otro tipo de ente: los campos. El campo eléctrico fue *inventado* por Faraday para describir las fuerzas que aparecen entre las partículas cargadas. Para explicar cómo estas fuerzas actúan a la distancia se supone que en cada punto del espacio alrededor de una carga aparece cierta entidad, que llamamos "campo eléctrico", tal que si en un punto coloco otra carga eléctrica, ésta experimentará una fuerza generada por el campo en ese punto. Dicho campo contiene energía y por lo tanto le podemos asignar existencia ontológica: más que un invento fue entonces un *descubrimiento*. Sin embargo, el campo eléctrico era siempre asociado a partículas con carga y no estaba claro si podía tener existencia independiente.

Algo similar sucedió con el campo magnético que posee energía, pero estaba siempre asociado a imanes o corrientes eléctricas y parecía no poder tener existencia independiente. Estos campos, eléctrico y magnético, parecían ser solamente atributos independientes adosados a las partículas cargadas en movimiento. Esta concepción cambió drásticamente cuando se estableció que estos campos no permanecían invariantes al ser considerados por diferentes observadores en movimiento: parte del campo eléctrico percibido por un observador se transforma en campo magnético para otro. La teoría no puede tolerar dicha violación del principio de relatividad que establece que todos los observadores deben hacer las mismas observaciones de la realidad. La solución del problema requiere reconocer que el campo eléctrico y el magnético no son dos entes separados sino que son diferentes componentes de un mismo campo –el campo electromagnético– que es invariante relativista, como debe requerir toda teoría (sin embargo la invariancia no es frente a las transformaciones de Galileo de la mecánica clásica sino frente a las transformaciones de Poincaré de la relatividad especial de Einstein).

El campo electromagnético tiene entonces las características adecuadas para existir y adquirió estado ontológico pleno cuando se encontró, como consecuencia de las ecuaciones de Maxwell de la electrodinámica, que el campo electromagnético puede también existir independientemente de las cargas y corrientes eléctricas que lo generan. Este campo puede propagarse como una onda que transporta energía e impulso: existe con igual justificación que una piedra que se mueve transportando energía e impulso. La luz es justamente eso: un campo electromagnético que se propaga.

Así como la fuerza eléctrica nos llevó al descubrimiento del campo electromagnético, la fuerza gravitatoria, que liga los planetas y satélites en órbitas y que genera el peso que nos mantiene sobre la tierra, introdujo el campo gravitatorio que también resultó tener existencia objetiva porque posee energía.

Resumiendo, la ontología de la física clásica tiene dos componentes independientes: por un lado consiste en partículas (átomos) localizables en el espacio y en el tiempo con identidad permanente para cada tipo de átomo, y por el otro, los campos electromagnéticos y gravitatorios. Esta ontología es acorde con las teorías dominantes hasta el inicio del siglo XX: la mecánica clásica, la electrodinámica, la mecánica estadística y termodinámica. Estábamos en el mejor de los mundos con teorías exitosas y una ontología clara. Se entendía el mundo excepto por un par de "pequeños problemas" no resueltos. El optimismo duró poco tiempo: de esos pequeños problemas surgieron las grandes revoluciones del siglo XX, la mecánica cuántica y la relatividad especial y general

de Einstein que trajeron nuevas teorías y cambios drásticos en la ontología.

Antes de analizar estos cambios de ontología es conveniente mencionar el papel que juega el espacio y el tiempo en la ontología clásica. Las partículas son entes discretos que se mueven en el espacio y el tiempo, pero no lo afectan: están *en el espacio y tiempo* a igual que los campos que son alguna propiedad extendida en el espacio y el tiempo. En ambos casos el espacio y el tiempo son *a priori*: están dados, son absolutos, inmutables e idénticos para todo observador. En cierta forma, el espacio y el tiempo no son parte de la ontología clásica sino que son condiciones necesarias para la existencia de las cosas: la existencia de los entes físicos sólo se puede dar en el espacio y en el tiempo. Esta concepción kantiana del espacio y tiempo cambiará en la ontología derivada de la relatividad general de Einstein.

IV. Problemas de la ontología clásica

Las teorías físicas llamadas "clásicas", principalmente la mecánica de Galileo y Newton generalizada en los maravillosos formalismos de Lagrange y Hamilton, así como también la electrodinámica de Maxwell, tuvieron espectaculares éxitos en el estudio de sistemas físicos macroscópicos. Sin embargo fracasaron rotundamente cuando se las pretendió aplicar a sistemas microscópicos tales como los átomos o a sistemas con velocidades cercanas a la de la luz.

Frente a un conflicto entre la realidad física percibida empíricamente y las teorías desarrolladas para describirla, es obvio que debemos modificar las teorías. Sin embargo es interesante comparar este conflicto con otros conflictos que se pueden presentar en las ciencias sociales donde la "realidad" de la sociedad no es absoluta e inmutable como sucede con la realidad física, sino que es construida. En el contexto social tienen sentido frases como la de Herbert Marcuse que expresó que "si la realidad no se adecua a la teoría... lo lamento por la realidad". En las ciencias humanas la teoría puede tener prioridad sobre la realidad: "*Ohne Theorie, keine Revolution*" (K.M.), pero en las ciencias físicas sucede lo contrario (a pesar de ciertas aberraciones constructivistas posmodernas). En el siglo XX aparecieron entonces teorías superadoras –la mecánica cuántica y la relatividad– que lograron una descripción de los sistemas microscópicos y de alta velocidad acorde con los experimentos.

Con estas nuevas teorías se intentó inicialmente mantener la ontología de partículas y campos, pero importantes cambios en nuestra imagen de la realidad fueron necesarios. La relatividad especial de Einstein no modificó la ontología de partículas y campos pero introdujo cambios importantes en nuestros conceptos de espacio y tiempo. En esta nueva concepción, el espacio y el tiempo ya no son totalmente independientes: si consideramos las medidas de intervalos espaciales y duraciones temporales que hacen diferentes observadores encontramos que estas se mezclan o se enredan de forma tal que es más adecuado pensar en un espacio-tiempo en vez de un espacio y un tiempo. Una consecuencia del enredo de espacio y tiempo es que la *simultaneidad* deja de ser un absoluto: dos eventos simultáneos para un observador dejan de serlo para otro en movimiento con respecto al primero; para éste, un evento sucede antes y el otro después y la relación antes-después puede aparecer invertida para un tercer observador.

Además de esta asombrosa mezcla del espacio y el tiempo, la relatividad muestra que la longitud espacial de un objeto en movimiento es contraída y la duración temporal de un proceso es dilatada por el movimiento, o sea, *en reposo las longitudes son*

máximas y las duraciones son mínimas. Las medidas del espacio y el tiempo dejan de ser absolutos e iguales para todos los observadores.

La separación temporal entre los eventos que ya no son simultáneos es extremadamente pequeña; también la contracción de las longitudes y dilataciones de los tiempos son ínfimas. Por eso no las percibimos antes y tuvimos que esperar hasta el siglo XX en que el genio de Einstein la descubrió.

V. Ontología cuántica no relativista

En la mecánica cuántica no relativista también se consideran partículas y campos que se propagan como ondas, pero aparecen efectos muy extraños para nuestra percepción sensorial: en algunas situaciones las partículas se comportan como si fueran ondas y las ondas se comportan como partículas. Por ejemplo, cuando electrones pasan por finas rendijas se produce una difracción como si fuera una onda lo que está atravesando las rendijas y cuando la luz, que era aceptada como una onda, incide sobre un átomo lo perturba como si fuera una partícula que hace impacto frontal con él. Algo fallaba en la ontología separada de partículas y campos y aparecieron propuestas abstractas que le asignan a las cosas una *dualidad onda-partícula*. La complementariedad sugiere una ontología extraña con perspectivas opuestas de manera tal que el mismo ente, por ejemplo, esa cosa que designamos con el nombre "electrón" tiene en ciertas condiciones características de partícula, pero en otras parece ser una onda. Muchas veces designaremos con el nombre "partícula" a estos entes que describe la mecánica cuántica, pero no se los debe confundir con el concepto de partícula usado en la ontología clásica (existe la propuesta de designarlas "ondículas").

Los entes que describe la mecánica cuántica –síntesis de campo y partícula– poseen además una indefinición o indeterminación ontológica en sus propiedades: el valor que asumen los observables del sistema no está determinado con exactitud sino que es difuso. Por ejemplo, la posición de una partícula no es un valor exacto sino que está distribuida en una región del espacio de extensión variable. Sólo en algunos estados particulares, dicha extensión se hace infinitamente pequeña y la partícula queda localizada. Justamente, cuando las partículas de la mecánica cuántica están en estados no localizables en el espacio, se manifiestan como campos. Lo mismo sucede con todos los observables: toman valores difusos y solamente en casos especiales tienen valores exactos. Ésta es una de las características más asombrosas de la mecánica cuántica y se debe mencionar que existen propuestas de la existencia de variables ocultas en la realidad que permite asignar valores exactos a todos los observables. Sin embargo estas propuestas, además de implicar que la realidad es en cierto aspecto inconoscible (las *variables ocultas*, más que ocultas deben ser *indescubribles*) tienen otra característica –la contextualidad– muy difícil de aceptar, por lo cual han sido descartadas por muchos expertos en los fundamentos de la mecánica cuántica.

Otra de las características asombrosas de la mecánica cuántica, que nadie entiende realmente, es que las indeterminaciones de ciertos pares de observables están relacionadas de manera tal que si la indeterminación de uno de ellos se hace muy pequeña, obligatoriamente la del otro observable se debe hacer muy grande. Este es el famoso principio de incertidumbre de Heisenberg que impide que la indeterminación en la posición y en la velocidad de una partícula puedan hacerse simultáneamente pequeños: si la velocidad está muy precisamente fijada, entonces la posición es muy difusa y viceversa,

si la partícula está muy bien localizada entonces su velocidad es inexacta. También aparecen relaciones de indeterminación entre la energía de un sistema y su tiempo característico de evolución. Esto es muy interesante porque permite una violación del principio de conservación de la energía durante tiempos suficientemente cortos. Mientras mayor es la indeterminación de la energía, más corto es el "tiempo de gracia" en que se la permite. Con la mecánica cuántica, las leyes de conservación se hacen "tolerantes".

Además de enredar partículas y campos, la ontología de la mecánica cuántica requiere *enredar la identidad* de los entes. La pérdida de la identidad es posiblemente la característica más revolucionaria de esta teoría, pero esto no ha sido suficientemente resaltada. Esta propiedad asignada a la realidad es también muy abstracta y difícil de aceptar para nuestra intuición educada por los sistemas físicos macroscópicos. Intentemos explicarlo: muchos sistemas físicos clásicos pueden ser idénticos entre sí, pero existe siempre la posibilidad de asignarle a cada uno de ellos una identidad permanente que los diferencie, un nombre, un número, un DNI, que es invariante durante su evolución temporal. Esto es, si identificamos inicialmente cada elemento de un conjunto de sistemas idénticos, esa identificación permanece invariante. Por ejemplo pensemos en todos los automóviles de cierto tipo y modelo con idéntico color. Cuando salen de la fábrica pueden ser considerados como sistemas idénticos, pero podemos asignarles un número de identificación (la patente) que conservarán para siempre. Los seres humanos son "todos iguales" pero tenemos DNI. Extrapolemos esto a átomos clásicos: estos no tienen nada que los diferencie, son todos idénticos, pero podemos pensar en numerarlos (les damos un DNI) y conservamos esa numeración a lo largo de sus trayectorias que podemos determinar con exactitud. Un conjunto de cinco átomos clásicos son contables (cinco en total) y numerables (el 1, el 2...).

La mecánica cuántica exige abandonar la posibilidad de numerar los sistemas idénticos porque no es posible mantener la identidad asignada, debido a que ya no son exactamente localizables y todos sus observables son difusos. Un conjunto de cinco átomos cuánticos es contable (cinco en total) pero no son numerables ya que no tengo forma de *saber* si el que le asignaron en un instante el DNI número 1 sigue siendo 1 después de cruzarse con el 2, pero es importante notar en esto que "saber" no es relevante ya que el efecto es ontológico y nada importa si *yo sé*, o no, cuál es cuál: es la *partícula* la que no tiene identidad definida. La mecánica cuántica hace perder la individualidad de las partículas idénticas: un electrón es uno y todos a la vez.

La importancia de la indistinguibilidad de las partículas idénticas en la mecánica cuántica se presenta en la estadística y termodinámica con consecuencias experimentales que han sido corroboradas con certeza. En un conjunto de partículas idénticas, éstas pueden estar en un gran número de estados diferentes, pero eso no las hace diferenciables; en ese caso, no se puede determinar *cuál* partícula está en cada uno de los estados diferentes. Cada estado es ocupado por una partícula pero no se puede determinar cuál, o sea, es como si todas a la vez ocupan ese estado.

Para nuestra intuición clásica es difícil comprender la pérdida de individualidad. Pensemos en una sociedad de seres humanos idénticos. En esa sociedad podría haber diferentes estados con diferente grados de riqueza, de poder, de felicidad, de edad, de sufrimiento, pero si no existiese individualidad, o sea, si fuesen indistinguibles como sucede en la mecánica cuántica, el poder, riqueza, edad, felicidad o sufrimiento de cada hombre lo sería simultáneamente el de todos. (Algo de eso sucede cuando, a pesar de nuestro bienestar personal, sentimos dolor por un niño desprotegido en la calle.) El enredo

de identidad aparece como elemento fantástico y asombroso en varios cuentos de Julio Cortázar tales como *Lejana*, en *La noche boca arriba*, o en *Axolotl*; en la realidad física microscópica, exitosamente descrita por la mecánica cuántica, es una característica esencial.

La mecánica cuántica no propone una ontología clara y precisa porque el elemento esencial de la teoría es un ente matemático, llamado *función de onda*, o *estado cuántico*, que no está en el espacio físico sino que pertenece a un espacio matemático abstracto llamado espacio de Hilbert. El conocimiento matemático del estado permite calcular los posibles resultados de todas las observaciones experimentales que podemos hacer sobre el sistema y, hasta ahora, estas predicciones han resultado espectacularmente corroboradas. La teoría no habla de las cosas que existen en el espacio físico sino de los resultados experimentales. Por ejemplo, la teoría no dice "el electrón está en tal lugar" sino que dice "si mido la posición obtendré tal resultado con tal probabilidad". A partir de la mecánica cuántica es muy difícil imaginar cómo son las cosas que existen en el espacio físico porque, de cierta manera, el espacio físico no es parte permanente de la teoría y sólo aparece cuando se hace una medición de la posición... que puede ser incompatible con otras propiedades, por ejemplo, la velocidad: si mido la velocidad, entonces no puedo decir nada referido a la posición.

Resumiendo, la ontología sugerida por la mecánica cuántica es bastante indefinida y anti-intuitiva: los observables físicos de los entes descritos por la mecánica cuántica (posición, impulso, energía, y otros) no siempre poseen valores exactos sino que son indeterminados o difusos. Estas indeterminaciones son ontológicas, o sea, no se trata de un problema del conocimiento de la realidad sino que están en la realidad misma. Para ciertos pares de observables existen relaciones de indeterminación que impiden que éstas se hagan despreciables simultáneamente. El mismo objeto, en diferentes estados, se puede manifestar exhibiendo características incompatibles... pero complementarias. Los sistemas idénticos son indistinguibles en todo aspecto y pierden la individualidad.

Tan extraña resulta esta ontología que algunos físicos renunciaron a ella y adoptaron posturas positivistas en que no se hace mención a ninguna ontología y se limitan a relacionar de manera coherente los datos experimentales, pero no pretenden, a través de la física, aprender algo sobre la realidad microscópica. La ontología de la mecánica cuántica no relativista resulta extraña porque en ella no se describen cosas en el espacio físico sino que se predicen los resultados de todos los posibles experimentos. Veremos que el campo cuántico sugiere una resurrección de la ontología en que se vuelve a postular la existencia de entes en el espacio físico.

VI. Problemas de la física cuántica no relativista

Además de los aspectos anti-intuitivos y oscuros que tiene la ontología sugerida por la mecánica cuántica, la teoría que la genera tiene inconvenientes y debe ser considerada como una aproximación, que puede ser muy precisa y exitosa, pero seguramente no brinda una descripción acabada y totalmente satisfactoria de la realidad y debe ser reemplazada por una teoría superadora –la teoría de campos cuánticos– que veremos más adelante.

El primer inconveniente de esta teoría es que viola la causalidad relativista que prohíbe la propagación de cualquier acción a una velocidad mayor que un límite dado por la velocidad de la luz, y que cuenta con una abrumadora evidencia empírica. En efecto, si

en un instante dado una partícula está localizada en un lugar, la teoría predice que en instantes posteriores hay una probabilidad de detectarla a distancias tales que solamente viajando a mayor velocidad que la luz podrían ser alcanzadas. La mecánica cuántica no relativista es muy exitosa en muchos aspectos, pero no es una teoría aceptable definitivamente debido a esta violación de la causalidad.

Otro inconveniente de la mecánica cuántica es que en ella el número de partículas involucrado es constante. La teoría funciona muy bien en las predicciones para sistemas físicos con una partícula o con dos, o con un número cualquiera pero constante y entero de partículas. Sin embargo, en la realidad de la naturaleza el número de partículas no es una cantidad constante. Por ejemplo, cuando dos partículas con mucha energía entran en colisión, como sucede en los aceleradores de partículas, la energía disponible en el choque se materializa en un gran número de partículas, a veces cientos de ellas. En consecuencia, la teoría debería tener la posibilidad de cambiar el número de partículas y permitir su creación y aniquilación, cosa ausente en la mecánica cuántica. Otra consideración que requiere la creación de partículas aparece cuando consideramos una partícula en un estado localizado en una región extremadamente pequeña, llamada longitud de Compton. La indeterminación en el impulso y energía en este estado es muy grande y sería suficiente para crear otra partícula. Por lo tanto, en ese estado, el número de partículas no puede ser constante sino que debe fluctuar y estar indeterminado.

En la mecánica cuántica no relativista, las partículas y los campos se mezclan en una entidad (esquizofrénica) muy lejana de la ontología clásica y difícil de imaginar, pero algunas características de la física clásica permanecieron en la mecánica cuántica. En esta teoría se mantiene el mismo concepto de las fuerzas externas y de las interacciones entre las partículas que aparecía en las teorías clásicas: la fuerza eléctrica que actúa entre dos cargas sigue siendo descrita por un campo eléctrico que no es alterado por la teoría. Este vestigio remanente de la física clásica sugiere que la revolución de la mecánica cuántica no relativista se quedó a mitad del camino.

VII. Teoría de campos cuánticos y la ontología actual

La teoría de campos cuánticos resuelve todas las dificultades encontradas en la mecánica cuántica no relativista y conserva todos sus éxitos: es una teoría superadora que contiene a la mecánica cuántica como un límite o caso especial de baja velocidad y energía. Sin embargo, propone una ontología nueva y diferente de la anterior que incluye la creación y aniquilación continuada de partículas cuyo número será entonces fluctuante. En esta nueva ontología se recupera el espacio físico como estrato donde ubicar los entes o las cosas de la realidad. Lo que existe en el espacio ya no son partículas que a veces se comportan como campos o campos que a veces actúan como partículas sino una nueva cualidad: el campo cuántico.

Para satisfacer el requerimiento de causalidad relativista, o sea, que no exista propagación del campo a velocidades mayores que la luz, es necesario introducir en el campo cuántico una nueva cualidad: el campo que representa cierto tipo de partícula también debe representar otra partícula, idéntica pero con todas las cargas (la eléctrica y otras similares) opuestas, o sea, la *antimateria* que ha sido detectada experimentalmente. Esta predicción de la teoría de campos cuánticos es uno de sus principales logros.

¿Cómo es el ente que existe en el espacio-tiempo asociado a cierto tipo de "partícula", por ejemplo, un electrón? El concepto de electrón está asociado a una serie de

propiedades: un cierto valor de masa, de carga eléctrica, y de muchas otras propiedades observables. En cada punto del espacio-tiempo, estas propiedades están apareciendo y desapareciendo con una *amplitud* descrita por un número complejo cuyo módulo determina el *peso existencial* del electrón en dicho punto. Este peso existencial es medido en un experimento por la frecuencia de detección del electrón en dicho lugar. La distribución de estas amplitudes y peso existencial corresponde a la "nube de probabilidad" mencionada en la mecánica cuántica no relativista.

Un elemento esencial en el formalismo de la teoría de campos cuánticos son unos operadores que representan la creación y aniquilación de propiedades de partículas en un lugar del espacio y en un instante. Con una superposición de estos operadores en regiones extensas del espacio se construye el campo cuántico asociado a cada tipo de partícula. Este campo evoluciona en el espacio y en el tiempo, transporta energía e impulso (o sea, existe) de acuerdo con ciertas *ecuaciones de movimiento* (algo similar a las ecuaciones de Maxwell para el campo electromagnético clásico).

La construcción del campo cuántico asociado a cierto tipo de partícula con operadores de creación y aniquilación explica fácilmente la pérdida de identidad de las partículas: en el campo cuántico de dos electrones éstos están siendo permanentemente creados y aniquilados en todo tiempo y en todo lugar con cierta intensidad y es imposible determinar cuál es cuál.

La posibilidad de una fluctuación en el valor de la energía, que permite la aparición de una cierta cantidad de energía de la nada durante un tiempo suficientemente corto, junto con la posibilidad de creación y aniquilación de partículas, sugiere una concepción fascinante del vacío. En la física clásica, el vacío se identifica con la nada, o sea, el no ente, la no existencia, pero ahora con los conceptos aportados por la física cuántica debemos concebir al vacío como una permanente y constante creación y aniquilación de pares de partículas y antipartículas de todo tipo. Este asombroso vacío en ebullición tiene manifestaciones observables que han sido detectadas experimentalmente. En la figura 1 está representada la diferencia entre la nada y el vacío de la teoría de campos cuánticos. Debemos imaginar que los puntos de la figura se mueven, chocan, aparecen y desaparecen en permanente agitación indicando la creación y aniquilación de materia y antimateria. Esta diferencia entre el vacío y la nada es similar a la diferencia entre una pantalla de un televisor apagado y la de un televisor prendido pero sintonizado en un canal donde no hay ninguna señal: en este caso se ven puntos luminosos fluctuantes que aparecen y desaparecen al azar simulando el vacío cuántico.

Cuando pensamos en una partícula cuántica, un electrón por ejemplo, la teoría de campos cuánticos sugiere que imaginemos un campo cuántico que es alguna cualidad física que está diseminada en una región del espacio y que se mueve, cambia de forma y se propaga según ecuaciones determinadas. Este campo se expresa por una permanente creación y aniquilación de electrones, designada a veces como *excitaciones del campo*, en cada punto del espacio con un número indefinido de ellos pero con valor promedio correspondiente a un electrón.



Figura 1: La nada y el espacio vacío.

Además, ese campo está en interacción con todas las partículas y antipartículas del vacío: cuando hacemos un experimento en que se manifiesta la masa o la carga eléctrica del electrón, lo que está involucrado es esa compleja interacción del electrón con el vacío y el resultado experimental proviene de infinidad de interacciones puntuales. No es asombroso, entonces, que en esta permanente agitación cuántica se pierda la individualidad del electrón.

Ya mencionamos que la revolución de la mecánica cuántica se quedó a mitad del camino porque sigue describiendo las fuerzas de la misma manera que la física clásica. Todas las fuerzas que existen en la naturaleza se pueden reducir a solamente cuatro: la *electromagnética* y la *gravitatoria* son las más conocidas, pero además están la fuerza *débil* y la *fuerte*. Así como las partículas están descritas por campos cuánticos, las fuerzas también están asociados a campos que, a su vez, se corresponden con nuevas partículas. La fuerza electromagnética queda así asociada con una partícula, el *fotón* y la gravitatoria con otra, el *gravitón* G . La fuerza fuerte corresponde a ocho *gluones* $g_1 \dots g_8$ y la débil a tres partículas intermedias W^+ ; W^- ; Z .

Las interacciones, o fuerzas entre partículas en la teoría de campos cuánticos es explicada por el intercambio de esas partículas intermedias. En cierta manera, la teoría de campos cuánticos brinda una interpretación materialista de las fuerzas: ya no tenemos partículas y fuerzas sino partículas...y partículas. Para describir entonces la interacción entre dos partículas, dos electrones o un electrón y un fotón debemos tener en cuenta los campos cuánticos de ambos, con su creación y aniquilación, y todos los posibles campos de otros tipos de partículas que son los intermediarios de las interacciones. Todos estos cálculos son extremadamente complejos y sólo se pueden realizar mediante técnicas matemáticas muy elaboradas, pero las predicciones de la teoría de campos cuánticos han sido confirmadas experimentalmente con asombrosa precisión.

Para cada tipo de partícula tenemos entonces un campo cuántico que la describe.

¿Cuántos tipos de partículas diferentes hay en la realidad? Después de una impresionante acumulación de esfuerzos teóricos y experimentales realizados principalmente durante la segunda mitad del siglo XX, se ha establecido el llamado *Modelo Estándar de Partículas* que lista todas las partículas elementales hoy conocidas: existen 6 quarks diferentes designados por (u, d, s, c, t, b) que vienen en tres "colores" distintos (o sea 18 partículas en total), y 6 leptones designados con $(e; \nu_e; \mu; \nu_\mu; \tau; \nu_\tau)$ (el electrón es uno de ellos) y todas las correspondientes antipartículas. Además debemos agregar 13 *Bosones*

Intermediarios (γ ; W^+ ; W^- ; Z ; g_1 ;...; g_8 ; G) cuyo intercambio genera las interacciones entre las partículas: la electromagnética, la débil, la fuerte y la gravitatoria. O sea, en total 37 campos elementales sin contar el bosón de Higgs que ha sido recientemente descubierto y otras partículas que pueden aparecer.

Para muchos, este número es demasiado grande y sugiere que la búsqueda reduccionista hacia las partículas elementales no ha finalizado.

VIII. Imágenes del átomo de hidrógeno en las diferentes ontologías

Para comparar las diferentes ontologías sugeridas por la física para la realidad microscópica, consideremos cómo hemos imaginado un átomo de hidrógeno a lo largo de la historia. Éste es el átomo más sencillo: su núcleo está compuesto por un protón solamente, con carga eléctrica positiva, y un electrón negativo que la cancela. Estas dos partículas están ligadas por la acción de la fuerza electromagnética entre las cargas.

En la antigüedad aún no se había descubierto el hidrógeno, pero hoy sabemos que es un gas y por lo tanto su imagen debería coincidir con el aire, uno de los cuatro elementos de la antigüedad. Platón asignó al aire uno de los poliedros regulares: el octaedro representado en la figura 2.

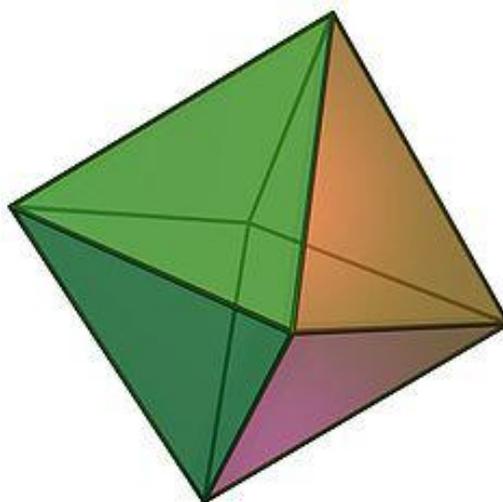


Figura 2: Imagen de un átomo de hidrógeno en la antigüedad.

En la edad media, los átomos eran imaginados como cuerpos con ganchos como en la figura 3. Esta imagen tiene la ventaja de poder explicar la molécula de hidrógeno formada por dos átomos "enganchados" pero sigue siendo una imagen sin valor científico.



Figura 3: Imagen de un átomo de hidrógeno en la edad media.

En el modelo atómico de Rutherford el átomo de hidrógeno, representado en la figura 4, consiste en un protón con carga eléctrica positiva que ejerce una fuerza atractiva sobre el electrón en una trayectoria elíptica a su alrededor. Este modelo atómico correspondiente a la física clásica con su ontología de partículas y campos es interesante por la similitud con las órbitas de los planetas alrededor del sol, pero debió ser abandonado porque, entre otros inconvenientes, es inestable debido a que el electrón caería rápidamente hacia el protón. Todos los intentos de construir un modelo para el átomo, basado en la física clásica de fines del siglo XIX, fracasaron y se generó la necesidad de una nueva teoría.

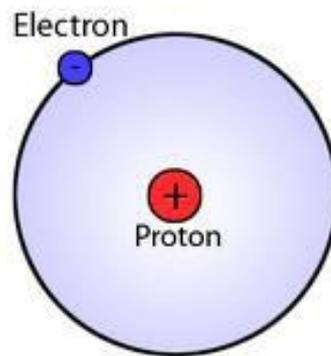


Figura 4: Imagen de un átomo de hidrógeno en la física clásica que incluye partículas, protón y electrón, y el campo eléctrico que genera la atracción entre ellos.

En el modelo de la mecánica cuántica, el electrón ya no tiene una trayectoria bien definida sino que es difuso y está representado por una "nube electrónica" cuya densidad representa el peso existencial de ubicación del electrón ligado al núcleo, o sea, con cuánta intensidad existe el electrón en cada lugar. La densidad de la nube electrónica describe también la densidad de carga eléctrica que está confinada alrededor del protón por la fuerza generada por el campo eléctrico. La forma de la nube es variada y depende de la energía que tiene el átomo. En su estado de mínima energía es una distribución esférica como se ve en la figura 5(a). En la parte (b) de la figura vemos la nube electrónica de un

átomo de hidrógeno excitado, que después de un tiempo decae emitiendo un fotón (o sea, una partícula de luz) y toma nuevamente la forma esférica. En este modelo atómico, el núcleo, o sea el protón, es considerado como una masa puntual sin estructura pero pronto se descubrió que el protón ni es tan simple sino que tiene una muy compleja estructura interna.



Figura 5: átomo de hidrógeno en el estado de menor energía (a) y en un estado excitado (b). La nube electrónica indica la presencia del electrón.

En el modelo de la teoría de campos cuánticos para el átomo de hidrógeno, la parte externa es el campo del electrón que tiene forma similar a la nube electrónica del modelo anterior. Sin embargo, ahora debemos pensar que esta nube no es estática sino que está fluctuando con una dinámica de creación y aniquilación de electrones y positrones (la antipartícula asociada al electrón). La forma y localización del campo electrónico está determinada por la atracción con el protón que es generada por el campo electromagnético, también en permanente actividad de creación y aniquilación de fotones.

En el centro del campo electrónico, en una región diez mil veces más pequeña, se encuentra el protón, que ya no es considerado como una partícula puntual sino que es un sistema complejo formado por los campos cuánticos asociados a tres quarks, (u ; u ; d) con permanente creación y aniquilación de quarks y antiquarks. La carga eléctrica de estos tres quarks, ($\frac{2}{3}$, $\frac{2}{3}$, $-\frac{1}{3}$) forman la carga eléctrica unitaria del protón que atrae al electrón, pero los quarks tienen además otro tipo de carga, llamada "color", que puede tomar tres valores, *rojo*, *verde* y *azul* (pero que, por supuesto, no tienen nada que ver con nuestra percepción sensorial del color). Los quarks cambian de color al emitir y absorber los gluones ($g_1; \dots; g_8$) y de esta manera se genera la fuerza fuerte que los atrae para mantenerlos unidos.

En la figura 6 se representa *un instante* de esa intensa actividad donde los quarks están representados por regiones coloreadas y los gluones por parejas de diferentes colores. Nuevamente, la figura es estática, pero debemos pensarla en constante agitación: una representación gráfica más fidedigna para el protón sería una película con colores difuminados que aparecen, se desplazan y desaparecen representando los campos de los quarks y gluones. La superposición total de color en el protón resulta neutra indicando que la fuerza fuerte está confinada solamente a la región interna del protón.

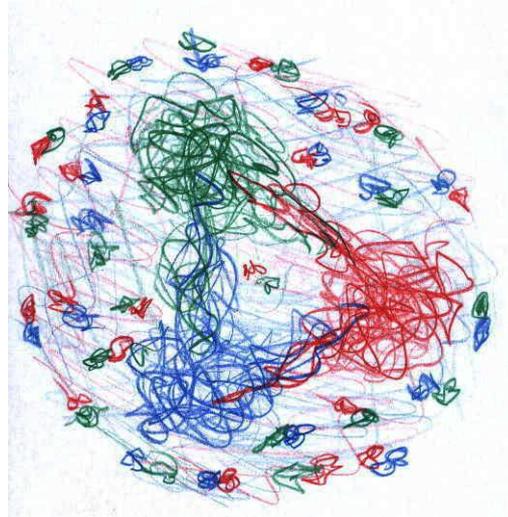


Figura 6: El protón en el centro del átomo de hidrógeno consiste en tres quarks ligados por gluones.

IX. Ontología del futuro

Con los campos cuánticos hemos logrado una ontología bastante abstracta y poco intuitiva pero extremadamente bella y exitosa. ¿Es ésta la ontología definitiva que describe la realidad física en el nivel microscópico? ¡Seguramente no! Hay muchos motivos para pensar que en el futuro tendremos una imagen distinta de los constituyentes básicos de la naturaleza.

El primer motivo para dudar de que ésta sea la ontología definitiva ya fue mencionado y es el excesivo número de entes fundamentales. Aunque aún no hay ninguna evidencia empírica, es posible que en el futuro se descubra algo más fundamental que explique los quarks, leptones y bosones intermediarios en términos de alguna estructura más básica (algunos proponen pequeñas cuerdas en vibración). Tampoco podemos estar seguros de que la teoría de campos cuánticos será la adecuada para describir estos entes.

Hay evidencia empírica de que toda la materia conocida, que es exitosamente descrita por la teoría de campos cuánticos, constituye menos del 5% de la cantidad total de materia que hay en el universo. No sabemos aún qué es el 95% restante ni si su descubrimiento implicará un cambio drástico de ontología.

En las ontologías que hemos presentado, el espacio-tiempo, aun con las modificaciones introducidas por la relatividad especial, sigue siendo externo a la ontología: átomos, partículas, campos, y campos cuánticos están *en el espacio-tiempo* que se comporta como sustento o terreno para la existencia de los entes. En la relatividad general de Einstein el espacio-tiempo se transforma en un ente con propiedades variables (la curvatura, por ejemplo) que dependen de la materia que contiene y que también es descrito por un campo que satisface ecuaciones de evolución. Esto sugiere una nueva ontología globalizadora que integre el espacio-tiempo y la materia. La síntesis entre la relatividad general de Einstein y la teoría de campos cuánticos no ha sido realizada aún y nada garantiza que ésta no requiera un cambio drástico de ontología.

Cuando vemos lo lejos que están las ontologías de la física clásica, con sus átomos y campos, de la ontología de campos cuánticos con su vacío activo y permanente creación y aniquilación de materia y si tenemos en cuenta que hay sobrados motivos para pensar que esta última no es la definitiva, nos invade la curiosidad de saber cuál será la ontología de

los siglos venideros. La pregunta que se plantearon en la filosofía antigua sigue sin respuesta a pesar de los espectaculares progresos realizados.