

Del vacío clásico al vacío cuántico

From classic vacuum to quantum vacuum

RAFAEL A. ALEMAÑ BERENGUER
Universidad de Alicante

Recibido: 11/02/2013 Aceptado: 30/09/2013

RESUMEN

El anuncio en julio de 2012 de los primeros indicios experimentales sobre la existencia del bosón de Higgs, reavivó el interés del secular debate sobre el significado de conceptos como el vacío y los campos físicos. La evolución de sus interpretaciones revela mutaciones profundas en el trasfondo filosófico de nuestra visión de la naturaleza. Especialmente por cuanto el controvertido papel de las rupturas de simetría se ha añadido a las discusiones sobre las teorías de unificación y la estructura fundamental de la materia.

PALABRAS CLAVE

ESPACIO, ÉTER, VACÍO, CAMPO, SIMETRÍA

ABSTRACT

The announcement in July 2012 of the first experimental evidence about the Higgs boson existence, intensified interest in the secular debate on the meaning of concepts such as vacuum and physical fields. The evolution of their interpretations reveals profound changes in the philosophical background of our view of nature. Especially since the controversial role of symmetry breaking has been added to the discussions on unification theories and the fundamental structure of matter.

KEYWORDS

SPACE, ETHER, VACUUM, FIELD, SYMMETRY

I. INTRODUCCIÓN

UNA DE LAS PRIMERAS CATEGORÍAS intelectuales que el ser humano aprende a concebir, es la de espacio. Más intuitivo aún que el tiempo, debido a su componente visual, la existencia del espacio se impone al observador como una realidad ligada a la noción de lugar de un objeto material. Si el concepto de espacio es tan diverso en la tradición filosófica, es precisamente por la imposibilidad de su percepción directa: a este respecto, baste como ejemplo comparar la intuición del concepto a que se llegaría por la vista y por el tacto. El espacio de la ciencia es producto de concepciones, no de percepciones. Las sensaciones visuales que recibimos del entorno se correlacionan coherentemente con otras sensaciones, como las auditivas, por ejemplo. Los sonidos lejanos tardan más en llegar a nosotros que los cercanos. Y también notamos al tacto las cosas que vemos más próximas, antes que las más alejadas.¹ Todo ello nos reafirma en la convicción de que el espacio se corresponde con algo real en el mundo externo, cuya existencia y propiedades deben ser explicadas.

Para Kant el espacio no era algo real y objetivo, ni una sustancia o un accidente, ni una relación. Bien al contrario, se trataría de algo subjetivo e ideal, debido a la naturaleza de la mente humana que de acuerdo con una ley constante genera un esquema para organizar todo lo que nos llega a través de los sentidos desde el mundo externo (Guyver 2006). Esta suposición no deja de suscitar los típicos problemas filosóficos ligados al concepto del espacio. ¿Es el espacio real, o es ideal en algún sentido?; ¿es una sustancia o el accidente de alguna sustancia?; ¿depende o no de las relaciones entre los objetos materiales?; ¿cuál es la conexión entre el espacio y la mente del observador?, ¿y cómo se entrecruzan todas estas cuestiones entre sí?

La pretensión de considerar el espacio como una sustancia resulta problemática por cuanto parece ser causalmente inerte –sus propiedades no se alteran al interaccionar con cualquier otra sustancia– e inaccesible a la percepción directa. Además, el atributo de infinitud, muy a menudo adjudicado al espacio, hace sospechoso su carácter sustancial. Por otra parte, tampoco es fácil pensar en el espacio como el accidente de una sustancia, pues entonces podría dejar de existir según las contingencias de la sustancia de la que dependiese. Por eso no faltaron autores que lo consideraron el accidente de una sustancia necesaria, es decir, de la divinidad (Janiak, 2008).

Aun así, quedan interrogantes sin resolver al respecto. Si el espacio no es directamente accesible a la percepción, ¿cómo podemos construir una representación mental suya? Desde el siglo XVII en adelante, el debate filosófico derivó hacia dos posiciones enfrentadas (DiSalle 2006), como eran el absolutismo –el

1 El tacto era una facultad sensorial muy importante en la filosofía espacial cartesiana (Wolf-Devine 1993, Gaukroger 2002).

espacio existen con independencia de los objetos materiales y sus posibles relaciones mutuas— y el relacionismo —que sostiene justamente lo contrario. La relatividad general hizo pensar en sus comienzos que el relacionismo se había alzado finalmente con el triunfo, pero asuntos espinosos como la índole física de la constante cosmológica mantuvieron abierta la controversia (Friedman 1991).

El vacío, la ausencia de cualquier cosa concebible, parece ser el estado físico más simple susceptible de describirse, por el simple hecho de que su propia definición implica que nada hay que describir. Sin embargo, el origen psicológico del concepto de espacio también es un asunto delicado (Einstein 1984, pp. 120–121):

El concepto de espacio viene [...] sugerido por determinadas experiencias primitivas. Imaginemos que fabricamos una caja. Dentro de ella se pueden alojar objetos en determinada disposición, de manera que la caja se llene. La posibilidad de semejantes disposiciones es una propiedad del objeto corpóreo caja, algo que viene dado con la caja, el «espacio comprendido» en la caja. Es algo que difiere según las cajas, algo que con toda naturalidad se lo imagina uno independiente, de si hay o no objetos en ellas. Cuando no hay objetos en la caja, su espacio aparece «vacío».

Hasta aquí nuestro concepto de espacio va ligado a la caja. Sin embargo, se comprueba que las posibilidades de alojamiento que constituyen el espacio de la caja son independientes de qué grosor tengan las paredes. ¿No se puede hacer que el grosor descienda a cero sin que al mismo tiempo se eche a perder el «espacio»? La naturalidad de este proceso de paso al límite es evidente, subsistiendo ahora en nuestro pensamiento el espacio sin caja, una cosa independiente que, sin embargo, parece tan irreal cuando se olvida la procedencia del concepto.

Cuando la teoría cuántica entró en escena a principios del siglo XX, las sacudidas provocadas en el conjunto de nuestro conocimiento del mundo físico no dejaron indiferente ni siquiera al apacible vacío. Desde entonces lo que aparentaba no contener cosa alguna se convirtió en un bullicioso torbellino de partículas virtuales, apareciendo y desapareciendo sin cesar. O esa es, al menos, la imagen que nos transmite la mayoría de los manuales de divulgación cuando abordan este tema.

Buena parte de razón no les falta, porque se trata de una imagen que seduce nuestra imaginación sin estar demasiado lejos de la realidad. No obstante, son también muchas las imprecisiones que se suelen mezclar con las exposiciones al uso de las propiedades cuánticas del vacío. El motivo de tales confusiones, sin duda, estriba en que el vacío cuántico es un estado físico peculiar, lleno de sutilezas y complejidades que ni siquiera los expertos dominan por completo.

Deberíamos analizar, pues, con sumo cuidado las interpretaciones que con el transcurso de los siglos la comunidad científica y filosófica han ido destilando sobre estos conceptos fundamentales. La génesis y el desarrollo de conceptos como el de espacio, campo o vacío, han de contemplarse desde diversas perspectivas –epistemológica, física e incluso fisiológica– si deseamos aproximarnos a un cabal entendimiento de sus mutuas conexiones.

II. VACÍO Y ÉTER

Con su parábola del bastón, el griego Arquitas creía haber demostrado la infinitud del espacio mediante una recursividad infinita (Benítez y Robles 2000, De Mora-Charles 2009), mientras la escuela atomista añadía a esa infinitud la posibilidad del vacío. Aristóteles rechazó la existencia en el mundo real del vacío absoluto –la completa ausencia de cualquier cosa– razonando por reducción al absurdo sobre la base de su propia concepción del movimiento físico. Para el filósofo griego una mera observación de los hechos cotidianos probaba que la velocidad de los cuerpos impulsados por una fuerza determinada, dependía de la resistencia del medio en el que se desplazasen. Aristóteles dedujo así que un objeto sobre el que actúa una fuerza cualquiera, de hallarse en el vacío absoluto, no encontraría oposición alguna a su avance y alcanzaría una velocidad infinita. Los filósofos griegos repudiaban el infinito y, si bien no habían hallado una escapatoria lógicamente consistente para la infinitud espacial, este argumento le pareció a Aristóteles una buena justificación para concluir la inexistencia del vacío.

Los estoicos siguieron a Aristóteles en su rechazo del vacío en el mundo sublunar, aun cuando admitían la existencia de un vacío absoluto que rodease el cosmos. Herón de Alejandría, por su parte, sostuvo que el vacío no lo creaba la naturaleza por sí misma, sino ciertos procesos mecánicos artificialmente diseñados por el hombre. De esta convicción nació la idea del «horror al vacío» (el *horror vacuum* de los clásicos) que de forma tan natural explicaba numerosas observaciones de la vida diaria, como el efecto de los sifones neumáticos. La condena eclesiástica promulgada en 1277 contra algunas tesis aristotélicas obligó a los escolásticos cristianos a admitir de nuevo la posibilidad del vacío, pues lo contrario hubiese significado una inadmisibles limitación a la omnipotencia divina.

El debate sobre el vacío se prolongó hasta el siglo XVII, con el enfrentamiento entre las escuelas cartesiana y newtoniana. Descartes (1596–1650) afirmaba que, desde los espacios entre cuerpos celestes hasta los huecos entre las partes más pequeñas de cualquier objeto, todo se hallaba permeado por un fluido sutil que –siguiendo la tradición griega– llamaba «éter». Los vórtices y remolinos en el éter explicaban, por ejemplo, el movimiento incesante de los astros. Por el contrario, Newton (1643–1727) sí admitía la posibilidad de un

vacío perfecto en el cual se moviesen los cuerpos físicos bajo la acción de las fuerzas contempladas en sus leyes del movimiento. No había en la mecánica de Newton impedimento alguno para que un objeto sometido a una fuerza constante acelerase hasta una velocidad infinita, aunque para ello necesitase también un tiempo infinito; el límite de la velocidad de la luz aún quedaba lejos en el horizonte histórico.

Pese a ello, el científico británico fracasó en la búsqueda de un proceso físico que explicase la propagación de la fuerza gravitatoria entre cuerpos, como los celestes, sin contacto mutuo. Las bolas de billar entrechocando sobre un tablero constituían un magnífico ejemplo de sus otras leyes dinámicas, pero nada había que explicase la atracción de la gravedad a distancia a través del espacio vacío entre estrellas y planetas. Así que finalmente incluso Newton hubo de admitir la hipotética presencia de un éter cuyas tensiones internas serían las responsable de producir las atracciones expresadas en su ley de la gravitación universal.

Los avances tecnológicos del siglo XVIII demostraron que el supuesto «horror al vacío» no era tal, sino la manifestación de una propiedad física previamente ignorada, la presión atmosférica. En efecto, el aire, como cualquier sistema material, se ve atraído gravitatoriamente por nuestro planeta, y es el peso de la columna de aire que descansa sobre un determinado punto de la superficie terrestre lo que denominamos presión atmosférica en ese punto. La bomba de vacío puesta a punto durante el Siglo de las Luces, así como los experimentos de Torricelli para estimar la presión atmosférica –empleando columnas de vidrio llenas de mercurio– allanaron el camino para admitir que, después de todo, el vacío sí era un estado físicamente asequible (De Segovia 2010).

La noción del éter como un fluido omnipresente que llenaba el universo hasta sus más íntimos intersticios sobrevivió hasta principios del siglo XX (Lorentz 1927). Nadie dudaba que el éter era un tipo de materia con valores inusitados para las mismas propiedades constitutivas que caracterizaban el resto de materiales –viscosidad, presión, elasticidad, densidad, etc.– y por ello obedecería ecuaciones hidrodinámicas como las de Euler o similares. También en algún momento se dilucidaría su estructura microscópica, y ocuparía su lugar en la tabla periódica de Mendeleiev junto al resto de los elementos químicos.

El éter se había convertido en una de las piedras angulares de la física del siglo XIX, una dovela clave a la que nadie estaba dispuesto a renunciar sin furiosa resistencia. Sólo así cabe entender las categóricas afirmaciones de Lord Kelvin, según una de las cuales el fenómeno de la luz «puede explicarse sin ir más allá de la teoría del sólido elástico» (Kelvin 1904, p.VII). Y más adelante: «Es absolutamente cierto que hay una teoría dinámica definida para la luz, que vendrá a ser enriquecida, no abolida, por la teoría electromagnética» (Ibid., p. 159).

Maxwell, aunque con menos ardor, también profesaba la fe etérea de Kelvin cuando escribía al obispo Ellicott que el éter «es el objeto más grande, más uniforme y en apariencia más permanente que conocemos», el cual, a su juicio, llenaba todo el espacio sideral «sin un resquicio de 1/100.000 de pulgada en todo lugar» (Campbell y Garnett 1892, pp. 392-396). En el artículo dedicado al éter que Maxwell preparó para la Enciclopedia Británica, se decía: «No puede haber duda de que el éter es el cuerpo más extenso del cual tenemos conocimiento» (Maxwell 1890, vol. II, p. 775).

Mientras se admitió su existencia, el éter fue considerado la única explicación plausible para justificar la transmisión de ondas electromagnéticas a través del vacío sideral (Maxwell 1890, pp. 763-775; Kelvin 1904). En la física clásica toda onda se entendía como una oscilación en un medio elástico preexistente, ya fuesen olas en el agua o vibraciones en el aire, el sonido. La luz era una onda electromagnética y por tanto parecía obligado buscar un medio que actuase como soporte material de sus vibraciones (Herrero 2012). Para explicar que la luz emitida por el Sol llegase hasta la Tierra, el éter se suponía el mejor candidato disponible; de hecho el único. La relatividad de Einstein lo despojó de su única función, aceptado que las ondas electromagnéticas pueden propagarse en el vacío a diferencia de las ondas elásticas usuales, y el éter se sumió lentamente en el olvido.

III. ESPACIO FÍSICO, GEOMETRÍA Y CONCEPTO DE CAMPO

Durante dos milenios los axiomas de la geometría euclídea se consideraron las genuinas leyes del espacio físico, y no parecía haber razones de peso para dudarlos. La formulación del quinto postulado (la afirmación de que por un punto exterior a una recta sólo podía trazarse una paralela a dicha recta) resultaba tan enrevesada que numerosos autores trataron, infructuosamente, de obtenerla por deducción a partir del resto de premisas. Pero la mayoría pensaba que tan solo era una cuestión técnica que algún talento esclarecido acabaría resolviendo antes o después.

La auténtica e inesperada solución llegó en la primera mitad del siglo XIX, cuando —en una primera fase— el húngaro Janos Bolyai (1802-1860) y el ruso Nikolai Lobachevski (1792-1856) descubrieron que era posible construir una geometría sin contradicciones internas, en la cual por un punto exterior a una recta podía trazarse una infinidad de paralelas a ésta (Boi *et al.* 1992, Gray 1992, 2007; Greenberg 1994). Después surgió la geometría «elíptica» gracias al matemático alemán Bernhard Riemann (1826-1866), en donde no hay rectas paralelas a una dada (Jammer 1994, Tabak 2004, Trudeau 2008).

Sin embargo, el tradicional engarce entre la ciencia natural y la geometría euclídea pareció salir robustecido con la entrada de la noción de campo en la física del siglo XIX. Michael Faraday (1791-1867) visualizaba las atracciones

y repulsiones magnéticas imaginando una serie de «tubos», «hilos» o «tentáculos», invisibles pero materiales en algún sentido, por cuya mediación los objetos imantados se ejercían fuerzas recíprocamente. Esta intuición puramente empírica de Faraday fue posteriormente formalizada por grandes físicos matemáticos como Gauss, Green, Poisson o Maxwell, quienes la extendieron también a las fuerzas eléctricas y gravitatorias. Desde entonces se decidió denominar «campo» en física a una función que asigna a los puntos de una determinada región del espacio ciertas propiedades físicas expresadas mediante las oportunas cantidades matemáticas (escalares, vectores, etc.). La geometría subyacente a esos campos –se daba por descontado– era la de Euclides.

Alentaban esa creencia obras epistemológicas como la de Wilhelm Helmholtz (1821–1894), quien sostenía que la separación espacial, entre otras propiedades perceptibles, se infería a partir de la experiencia y de los rasgos fisiológicos –y por ende, físicos– de nuestros órganos sensoriales. Por eso, a su juicio, el espacio perceptual (es decir, el espacio como construcción intelectual basada en las percepciones) es una abstracción que nuestra mente realiza partiendo de las diversas orientaciones posibles de los objetos en el espacio físico. Deducimos las propiedades generales del espacio al advertir que ciertas características de los cuerpos materiales no cambian cuando estos se desplazan relativamente a nosotros. Cuando Helmholtz se preguntó por los axiomas geométricos más generales compatibles con nuestro conocimiento empírico de los objetos, concluyó inicialmente que eran los de la geometría euclídea. Aunque matizó esa postura con posterioridad (Königsberger 1906, p. 263), nunca dudó seriamente que, si bien era lógicamente posible adjudicar otras geometrías al espacio físico, las evidencias respaldaban a Euclides.

En cierto modo, la nueva mirada de Helmholtz sobre las propiedades geométricas del espacio y su fundamento sensorial descabalgó buena parte de los apriorismos kantianos al respecto (Reichenbach 1920, Schlick 2005). Desde ese punto de vista, la geometría euclídea ya no era una forma ineludible de nuestra intuición sino un producto de la experiencia. Una conclusión similar a la obtenida por Poincaré, donde la diferencia la marcaba el convencionalismo defendido por éste, opinión que Helmholtz no compartía (Heinzmann 2001).

IV. LAS PECULIARIDADES DEL VACÍO CLÁSICO

Para los científicos decimonónicos era obvio que una succión de suficiente potencia podría lograr el vacío absoluto en un recipiente herméticamente cerrado. Se reconocía que quizás no había bombas de extracción tan poderosas como para llegar a ese resultado. Pero también se afirmaba que semejante dificultad era tan solo de carácter técnico, no teórico. No parecía haber un impedimento de principio que impidiese obtener un vacío perfecto. Sin embargo, los avances de la termodinámica aplicados a los primeros modelos atómicos

de la materia revelaron que la temperatura representaba la energía media de vibración de los átomos o las moléculas de un objeto (Channell y Truesdell 1982, Cercignani 2006).

Una escala de temperaturas basada en esta interpretación asignaría el valor cero al estado en que tales componentes microscópicos carecen de todo movimiento. Si los átomos de un material se encuentran en reposo, tanto su energía de vibración como la temperatura a ella asociada se anularán. Semejante escala térmica recibió el nombre de «escala absoluta de temperaturas», o también «escala Kelvin» en honor a William Thomson (1824–1907), Lord Kelvin, el científico británico que la ideó. Posteriores investigaciones realizadas por James Dewar (1842–1923), Walther Nernst (1864–1941) y Max Planck (1858–1947) determinaron la imposibilidad de enfriar cualquier sistema físico hasta el cero absoluto en un número finito de etapas sucesivas. El que más tarde sería conocido como el Tercer Principio de la Termodinámica relegaba el cero absoluto a la condición de estado ideal inalcanzable en la práctica (Müller 2007).

Tal vez no lo pareciese, pero tales cuestiones revestían gran importancia para la discusión sobre la posibilidad física de lograr un vacío perfecto. La teoría electromagnética –cuyos progresos también marcaron el siglo XIX– afirmaba que cualquier cuerpo por encima del cero absoluto emitiría algún tipo de radiación. Por tanto, aunque tomásemos un recipiente y lo vaciásemos por completo de todo su contenido mediante potentísimas bombas de succión, todavía nos quedarían las radiaciones electromagnéticas que penetrasen desde el exterior. Y si consiguiésemos aislarlo de las radiaciones externas, no podemos olvidar que las paredes del contenedor, dado que no podrían enfriarse hasta el cero absoluto, emitirían una cierta radiación que llenaría ese espacio interior supuestamente vacío.

El problema no era desdeñable, por cuanto el escocés James Clerk Maxwell (1831–1879) hablaba ya en el tratado que culminó su carrera científica de la presión ejercida sobre una superficie por la radiación electromagnética (Maxwell 1873, p. 391). No cabe duda de la inconveniencia de considerar vacío un recipiente en cuyo interior existe un ente físico, la radiación electromagnética, capaz de ejercer presión sobre sus paredes.

Con todo, los físicos no se desanimaron. Era verdad que ahora sí existía un obstáculo fundamental que imposibilitaba enfriar un sistema hasta el cero absoluto, y que contando con la radiación ambiental ningún recipiente estaría completamente vacío. Pero también resultaba cierto que las leyes naturales permitían una aproximación arbitrariamente cercana a ese vacío ideal. Aunque jamás lo alcanzásemos, el vacío estaría cada vez más y más cerca de nosotros. O eso se suponía hasta la irrupción en el escenario de la teoría cuántica.

V. EL ESPACIO-TIEMPO RELATIVISTA Y LA CONSTANTE COSMOLÓGICA

La gravitación, introducida en la visión científica del mundo mediante la ley newtoniana de atracción universal, se contempla hoy día como un efecto de la curvatura del espacio-tiempo. Las órbitas de los planetas entorno al Sol, antes líneas rectas desviadas por la atracción de la gravedad, ahora resultan ser las trayectorias menos torcidas –las «geodésicas»– sobre un fondo espacio-temporal curvado. Por primera vez el espacio y el tiempo, lejos de ser un mero escenario para las fuerzas y la materia, se convierten en entes dinámicos con una relevancia física propia (Friedman 1991).

La constante cosmológica² Λ aparece en las ecuaciones de la relatividad general ligada a la curvatura intrínseca del espacio-tiempo, en ausencia de la materia y la radiación que llenan el universo (Weinberg 1972, Misner *et al.* 1973). Aun cuando desempeñe un papel comparable al de la densidad energética del vacío en la teoría cuántica, su origen conceptual es radicalmente distinto, y sólo por un abuso de lenguaje equiparamos ambas magnitudes. Si la fuerza gravitatoria desaparece en la imagen relativista sustituida por la geometría espacio-temporal, el concepto de energía gravitatoria también pierde su significado habitual. La energía es una magnitud que se aplica a los campos de fuerzas, y si tales campos quedan reemplazados por otro concepto, la energía a ellos asociada deja de tener sentido. Por eso no es del todo correcto identificar la constante cosmológica, como se hace usualmente, con la densidad de energía del vacío cuántico (Carroll *et al.* 1992, Padmanabhan 2003).

Con frecuencia se utiliza la expresión «energía oscura» como sinónimo de constante cosmológica, lo que denota que se tiene en mente una imagen más bien newtoniana de la expansión del universo. En efecto, en la mecánica clásica a todo movimiento se asocia una energía, y si consideramos que la expansión del universo es uno de tales movimientos, la aceleración de su ritmo ha de deberse a una energía que lo impulsa, la «energía oscura». El origen de esa energía, acto seguido, se busca en la teoría cuántica de campos como la energía del vacío cuántico, y en caso de admitir que los campos que la originan son variables en el espacio-tiempo, llegamos a la noción de «quintaesencia» (que a diferencia de la constante cosmológica, no sería verdaderamente constante). Con todo, son numerosas las discusiones, incluso entre los especialistas, sobre la pertinencia de diversas acepciones atribuidas a estos términos.

Es interesante notar que existen dos actitudes contrapuestas sobre este asunto. Por una parte podemos sostener que al anularse el tensor de masa-energía $T_{\mu\nu}$ en las ecuaciones de Einstein, la igualdad restante, $R_{\mu\nu} = \Lambda g_{\mu\nu}$, es una relación matemática sin sentido físico (Bunge 1982). Alternativamente,

2 Desde el último lustro del siglo XX no hay duda del valor no nulo de la constante cosmológica, y de su influencia en la expansión acelerada del universo (Kowalski *et al.* 2008).

cabe decir que la igualdad anterior desvela que el espacio-tiempo y la materia comparten de una manera antes insospechada la propiedad que llamamos gravitación, detectable mediante la caída libre los cuerpos y la trayectoria de los haces de luz (Eddington 1956).

Interpretando la constante cosmológica en términos de una densidad energética del vacío, las observaciones astronómicas nos dicen que debe ser muy cercana a cero (unos 10^{-29} gramos/cm³) y positiva, ya que el universo parece acelerar su expansión (Nobbenhuis 2006). Ciertamente, para llegar a esas conclusiones, además de los datos empíricos, necesitamos aceptar ciertas hipótesis cosmológicas muy generales y confiar en la pertinencia de la relatividad general. Sea como fuere, el hecho fundamental es que la densidad energética del vacío deducida empleando la gravedad de Einstein ha de ser muy próxima a cero, pues de lo contrario debería haber algo profundamente equivocado en la relatividad general, una teoría que nos ha venido proporcionado algunas de las mejores verificaciones experimentales de la historia de la física (Kragh 1996, Rindler 2001).

Por el contrario, el cálculo de la densidad de energía del vacío a través de la teoría cuántica de campos puede arrojar un resultado nulo, infinito, o finito aunque inmensamente grande, según escojamos las premisas iniciales³ (Birrell y Davies 1982, Aitchinson 1985). La relatividad general suele recordarnos que en todos estos casos estamos olvidando el papel de la gravedad. Es por ello que en muchas ocasiones se prefiere afirmar meramente que la densidad de energía del vacío no está definida, pues una misma teoría nos ofrece tres resultados posibles, y eso omitiendo la influencia de la interacción que posiblemente sea la más importante a escala macroscópica, la gravedad.

VI. EL VACÍO CUÁNTICO

La teoría cuántica concibe los campos de fuerzas como invisibles mallas de osciladores extendidas por todo el espacio. Aplicando esta imagen al electromagnetismo, por ejemplo, las ondas electromagnéticas se explicarían como cambios en las tensiones de esos muelles que se propagan por el espacio obedeciendo una cierta ecuación diferencial. El hecho de que tales osciladores sólo puedan efectuar ciertos tipos de vibración, revela la índole cuántica de este fenómeno.

Basándose en trabajos previos de Max Planck (1900) sobre emisores oscilantes de energía, Otto Stern (1888–1969) y Albert Einstein (1879–1955)

3 No obstante, el problema principal debatido es que la contribución calculada del campo de Higgs (en la mayoría de las teorías cuánticas de campos, ya que existen algunas teorías que incluso requieren valor cero) supera en bastantes órdenes de magnitud al que se esperaría a partir de las recientes observaciones cosmológicas.

dedujeron en 1913 la existencia de una energía residual que todo oscilador cuántico debía poseer incluso aunque estuviese a la temperatura de cero grados Kelvin. Esa «energía del punto cero» (*Nullpunktsenergie* en alemán) era igual a la mitad del producto de la constante de Planck por la frecuencia mínima del oscilador (Einstein y Stern 1913). La constatación de que no parecer haber una frecuencia mínima, si admitimos la continuidad del espacio físico, no hace más que oscurecer el problema.

Las famosas desigualdades de Heisenberg también aparecen aquí para justificar esta energía remanente señalando que si uno de esos osciladores estuviese en reposo podrían determinarse a la vez con absoluta precisión su posición (en el punto de equilibrio) y su velocidad (igual a cero). Una situación tal se halla completamente prohibida por las desigualdades de Heisenberg, de modo que incluso en el cero absoluto el oscilador debe tener una distribución de posición y de impulso (el producto de su masa por su velocidad) que satisfaga dichas desigualdades. Eso mismo implica que la energía del sistema también debe ser mayor que cero. En consecuencia, la física cuántica ni siquiera permite –como sí hacía la clásica– un acercamiento arbitrario al cero absoluto, y por tanto tampoco al vacío absoluto.

Forzando la imaginación, podemos admitir osciladores en los que siempre queda un residuo energético imposible de extraer, pero la situación empeora cuando nos referimos al espacio vacío. El motivo es que nunca está realmente vacío, según las denominadas «relaciones de incertidumbre energía-tiempo». En la mayoría de los manuales de divulgación al uso se explica que las desigualdades de Heisenberg se aplican también a la energía de un sistema y al tiempo que la posee. Por este procedimiento, un objeto puede obtener energía de la nada a condición de que la devuelva en un tiempo tan breve que el universo no se dé por enterado.

En realidad no sucede así, si bien la metáfora del préstamo cuya cuantía es inversamente proporcional a su duración, resulta muy fácil de exponer ante el público general. De hecho la teoría cuántica sí respeta la conservación de la energía, como se demostró tras la disputa entre Einstein y Bohr sobre el llamado efecto BKS,⁴ ocasión en la que Bohr salió derrotado (Pais 1984, pp. 418-424).

La metáfora que identifica las partículas virtuales con un crédito fugaz concedido por el vacío, parte de la idea del vacío clásico como algo ya establecido. Tenemos un vacío total perfectamente bien definido donde se respeta la conservación de la energía; y si aparecen de la nada parejas partícula-antipartícula, aunque luego se aniquilen, es porque dicha conservación se ha infringido. Pero tal infracción sólo parece serlo cuando olvidamos que el vacío clásico,

4 Se trataba de determinar si un cierto fenómeno atómico probaba que la conservación de la energía sólo se cumplía en sentido estadístico.

con sus características bien determinadas, simplemente no existe. Lo que realmente existe es ese vacío cuántico con una rica estructura, que de ningún modo debe considerarse como una alteración estrafalaria del vacío clásico. En el vacío clásico –esa ficción inexistente en la realidad– para cualquier campo de fuerzas se anula tanto su valor medio como su desviación cuadrática media. El vacío cuántico, por el contrario, sólo admite la anulación del valor medio de los campos; su desviación cuadrática media permanece distinta de cero.

Tampoco cabe aislar una región del espacio eliminado de su interior todos los campos hasta llegar a una total ausencia de cualquier ente físico. Las partículas cuánticas se hallan deslocalizadas, y nunca podemos asegurar que no haya una cierta probabilidad de presencia suya en un lugar cualquiera. Estas partículas cuánticas, o «cuantones»(Levy-Leblond 1973), también suelen hallarse en una combinación de estados de energía, que nos dará un valor promedio en torno al cual pueden darse desviaciones como sucede con cualquier magnitud estadística. Estas desviaciones serán tanto menos frecuentes cuanto más se aparten de la media. Y esa es la explicación que justifica el surgimiento de partículas virtuales en el vacío cuántico (Bunge 1982, p. 45), no una fantasmagórica cesión de energía desde la nada.

En términos de la teoría cuántica de campos, una región del espacio se considera en estado de vacío cuando en promedio se halla en su estado de menor energía. Podríamos intentar el cálculo de esa energía mínima simplemente sumando las energías residuales («energías del punto cero») de toda la red de osciladores que en nuestro modelo representan los diversos campos cuánticos. Pero como las frecuencias con menor longitud de onda –es decir, una frecuencia más alta– poseen mayor energía, si suponemos que el espacio es continuo, no hay límite a la pequeñez de las longitudes de onda posibles, y la suma de energías se hace infinita (Rugh y Zinkernagel 2002).

Una posible respuesta consistiría en admitir que no sabemos si el espacio es realmente continuo, por lo cual sólo sumamos las energías remanentes de las vibraciones con una longitud de onda mayor que –por ejemplo– la longitud de Planck (unos 10^{-35} metros), lo que nos daría una densidad de energía finita pero enorme para el vacío; el equivalente a más de un kilogramo en cada centímetro cúbico. Sin embargo, a lo largo de todo este procedimiento estamos olvidando que el tratamiento de los campos cuánticos como redes de osciladores en vibración, únicamente sirve para campos libres –aquellos que no interactúan con ningún otro campo– lo que en verdad no es muy realista (Alemañ 2011).

El valor energético no nulo del vacío cuántico posee repercusiones medibles –efecto Lamb, Casimir, etc.– sobre diversos sistemas físicos, lo que constituye una contrastación empírica de su realidad⁵ (Saunders y Brown 1991,

5 Dados estos efectos (i.e.: la energía de Casimir no depende del *cut-off*) y pese a las

Milonni 1994, Cook 2001). Pese a todo, como la teoría cuántica de campos sólo se ocupa de *variaciones* de energía (la diferencia de un valor con respecto a otro cualquiera que tomamos de referencia), podemos añadir cualquier cantidad constante a la densidad de energía que hayamos definido sin alterar las predicciones teóricas sobre cualquier magnitud medible. Aprovechándonos de esta ventaja, tenemos entera libertad para redefinir la densidad de energía del vacío restándole una cantidad constante igual a la energía del punto cero. Con ello conseguimos que la energía del vacío sea finalmente nula, salvo las fluctuaciones cuánticas, obviamente.

Parece haber indicios de que tales fluctuaciones cuánticas del vacío vendrían a alterar de forma no despreciable la métrica del espacio-tiempo (Lima y Vanzella, 2010), haciendo imposible la suposición de un fondo de espacio-tiempo clásico e indispensable la cuantización de la gravedad. Aunque permanecen sin aclarar las repercusiones observables en astrofísica, es obvio que con ello se cuestiona el límite de aplicabilidad de las teorías cuánticas de campos incluso con la consideración de espacios curvos. En la misma línea, ha habido publicaciones que han intentado comprender la razón del fracaso de las predicciones basadas en campos cuánticos, introduciendo analogías con los condensados Bose-Einstein. No obstante, se pone de manifiesto también por este camino la inconveniencia de usar teorías de campo semi-clásicas (Finazzi *et al.*, 2012).

VII. EL BOSÓN DE HIGGS Y LA RUPTURA DE SIMETRÍA

Diversos autores, entre los cuales el más célebre es Peter Higgs (1964), propusieron la existencia de una nueva partícula que se conocería en adelante como el bosón de Higgs. Se trataba de encontrar un camino hacia la unificación del electromagnetismo y la fuerza nuclear débil, para lo cual era necesario explicar la gran disparidad existente entre la masa del fotón, cuantón asociado al campo electromagnético, y los bosones W^+ , W^- y Z^0 , propios de la fuerza nuclear débil. Higgs y sus colegas (Guralnik *et al.* 1964, Kibble 1967) propusieron la existencia de una nueva partícula, un nuevo campo cuántico⁶ universal extendido por todo el espacio, que al interactuar con las partículas conocidas explicaría los valores de sus masas, bien medidos experimentalmente pero sin justificación teórica.

De ahí nació la metáfora del sombrero mejicano, donde los sistemas físicos han de optar entre una situación de elevada simetría energéticamente inestable,

manipulaciones para las sumas divergentes e integrales, las largas longitudes siguen afectadas por las condiciones de contorno.

6 Es conveniente distinguir entre campo y bosón de Higgs, ya que el segundo es el cuanto o excitación elemental del primero (como lo es el fotón para el campo electromagnético).

y otra con menos energía, mayor estabilidad, y menos simetría. La situación altamente simétrica representaba el caso en el que la fuerza nuclear débil y el electromagnetismo se hallaban unificados (todos los bosones carecían de masa, como el fotón), mientras que la pérdida de simetría indicaba la ruptura de dicha unificación para llegar al estado actual. De acuerdo con esta metáfora, merece señalarse que la cantidad a estimar (y en lo que se yerra hoy por hoy) es la diferencia entre las densidades de energía en el ala (verdadero vacío, simetría rota) y de la cúspide (con simetría e inestabilidad).

Resultaba, pues, que además del esquema de osciladores invisibles impuesto en todas partes por la teoría cuántica de campos como modelo para el vacío cuántico, ahora teníamos un campo adicional que llenaba todo el espacio como el desaparecido éter del siglo XIX. Era una razón más para no considerar «vacío» el vacío, en especial porque a diferencia de los campos cuánticos usuales el bosón de Higgs posee un valor medio distinto de cero en el vacío, en todo lugar y en todo instante. Esto no es un efecto residual o remanente, achacable a la dispersión de ciertas magnitudes físicas sometidas a las desigualdades de Heisenberg.

El campo de Higgs aspira a ser considerado una pieza omnipresente en la arquitectura básica del cosmos, sin la cual el resto de partículas elementales no podría dar cuenta del valor que tienen sus masas. No es de extrañar que la búsqueda de este singular bosón se convirtiese en uno de los principales objetivos de la física experimental de altas energías a comienzos del siglo XXI, hasta su aparente detección, hecha pública el 4 de julio de 2012. El hecho es que el nuevo vacío no vacío (correspondiente con una componente con valor constante no nulo cuando el campo escalar de espín cero o campo de Higgs, en su estado de mínima energía, ha roto la simetría gauge), es denominado por algunos como «éter moderno» (invariante general relativista, a diferencia de su predecesor clásico). También las teorías de «quintaesencia» suelen recuperar ese lenguaje. No obstante, las diferencias con el éter decimonónico también son notables. Ni se piensa ya en un medio material con una composición definible en términos de elementos ubicables en la tabla periódica de la química, ni se le atribuyen propiedades mecánicas tan clásicas como la presión, la viscosidad, la fricción, u otras semejantes. Tampoco puede emplearse este nuevo «éter» como un sistema de referencia absoluto –en el sentido de la relatividad especial– salvo en un sentido enteramente forzado.

¿Qué dificultades hay con el bosón de Higgs? Lo cierto es que ya contamos con gran cantidad de indicios experimentales que aseguran la existencia de un cuantón como el conjeturado por Higgs; otra cosa es que este cuantón desempeñe el papel que Higgs y sus colegas le atribuyen. Si lo pensamos bien, el modelo del sombrero mejicano es tan solo lo que los anglosajones llaman *a just-so story*, un relato de algo que simplemente «es así». Ocurre que los grados

de libertad gauge no son grados de libertad genuinamente físicos, por cuanto son tan solo variables redundantes que toman parte en nuestra descripción de ciertas interacciones físicas. En ese sentido, una simetría gauge no puede ser rota ni por el vacío ni por cualquier otro estado permitido por la teoría.

No obstante, se suele aceptar la noción de ruptura de simetría gauge en el mismo sentido en que se entiende la ruptura de simetría de los dominios magnéticos en un material cuando se aplica sobre él un campo magnético externo (lo que sí constituye una verdadera ruptura de simetría física). En el caso concreto de la unificación electrodébil la simetría gauge local es la simetría no abeliana $SU(2) \times U(1)$. El campo de Higgs no la rompe por completo, sino que deja una simetría residual $U(1)$ que coincide con la simetría típica del electromagnetismo.

El principal problema con que nos encontramos aquí es la existencia de un teorema que prohíbe las rupturas espontáneas de simetría gauge en las condiciones establecidas por el marco actualmente más exitoso de cuantización de las teorías gauge, como es la cuantización reticular (*lattice quantization*). Se trata del teorema de Elitzur, según el cual las simetrías gauge locales no pueden romperse espontáneamente en absoluto en una teoría gauge de campo cuántico, por cuanto las combinaciones arbitrarias y dependientes del gauge de los campos deben tener valores esperados iguales a cero (Elitzur 1975, De Angelis *et al.* 1978). De acuerdo con ello, el valor esperado en el vacío del campo de Higgs habría de anularse, si bien es cierto que este teorema sólo rige rigurosamente en el ámbito de las teorías gauge reticulares (Fradkin y Shenker 1979) y podría perder su validez en una reformulación basada en el continuo.

En cualquier caso, todas las características físicas asociadas con el mecanismo de Higgs –como generador de la masa de los bosones débiles– pueden describirse en términos de valores esperados de combinaciones tan solo de campos invariantes de gauge (Fröhlich *et al.* 1981, Struyve 2011). Ahora bien, mientras la simetría gauge local en sí misma no puede romperse espontáneamente, según nuestra versión más manejable de la teoría cuántica de campos, sí puede ocurrir una ruptura de las simetrías gauge globales que quedan tras lo que se denomina «fijar el gauge» (es decir, en el formalismo de las integrales de camino de Feynman, integrar únicamente sobre una subclase restringida de las configuraciones de los campos).

Esas simetrías remanentes sí resultan susceptibles de ruptura, aunque tampoco parece seguro que nos aclaren algo profundo sobre la naturaleza física del mecanismo de Higgs. La razón es doble: por una parte la ruptura de las simetrías remanentes en general no tiene consecuencias físicas directas (Earman 2004), y por otra parte esta noción de ruptura es ambigua ya que su acaecimiento depende de una elección arbitraria del gauge (Caudy y Greensite 2008). Lo cierto es que parece haber algún ingrediente global cuando tratamos de explicar cómo logró la simetría electro-débil romperse de manera idéntica

en todos los puntos del universo (Smeenk 2006). Es decir, ¿por qué los fotones que recibimos desde la galaxia de Andrómeda tienen exactamente las mismas propiedades que los procedentes de nuestro Sol? En principio no tendría por qué ser así, pero de hecho así es, y la familiaridad con este dato ha oscurecido con frecuencia el misterio de su origen.

Quizás el aspecto más inquietante del bosón de Higgs es que pretende explicar el valor de las masas de las partículas elementales, y las masas –por el principio de equivalencia– también constituyen la fuente de la gravedad. Pero la gravedad es una interacción no renormalizable, lo que impide su cuantización por cualquiera de los procedimientos hasta ahora conocidos. A este respecto, se debe insistir en señalar la necesidad de una teoría cuántica de la gravedad, cuya carencia es probablemente la causante de la mayor parte de los problemas ya expuestos. Sin duda queda mucho por esclarecer todavía en torno al bosón de Higgs y a su mecanismo de generación de masa.

VIII. CONCLUSIONES

El vacío cuántico se nos ha revelado como un tema de investigación asombroso y prometedor. Lejos de la idea popular de una especie de «nada» carente de todo interés, la riqueza de sus estructuras, la distancia que separa sus propiedades de nuestras intuiciones ordinarias y la complejidad de los fenómenos que lo caracterizan, seguirán dando material de trabajo a los investigadores durante mucho tiempo.

La búsqueda del vacío perfecto se ha aferrado a la historia humana no con tanta popularidad pero sí con la misma intensidad que muchos otros ideales quiméricos. Al final, el vacío absoluto se difuminó junto con la velocidad infinita o el movimiento continuo en el viejo baúl de imposibilidades físicas que durante mucho tiempo desvelaron los sueños de los intelectos más inquietos. Para sustituirlo llegó un reemplazo no menos fascinante, el vacío cuántico, con un cortejo de paradojas, confusiones y nuevos horizontes científicos.

A comienzos del siglo XXI un nuevo actor del vacío saltó a la palestra en la forma del campo de Higgs. Su presencia pretendía justificar inicialmente el corto alcance de la fuerza nuclear débil, y más tarde los valores de las masas de todas las partículas elementales. Sin embargo, al analizarlo de cerca el mecanismo de Higgs, basado en la ruptura espontánea de simetrías gauge locales con repercusiones empíricas directas, resulta ser mucho menos transparente de lo que sus divulgadores intentan hacernos admitir. Y éste sigue siendo un asunto epistemológico capital pendiente de esclarecimiento.

Gracias a este nuevo reto sabemos que para llegar a buen puerto en cualquier excursión al mundo cuántico, basta con pertrecharnos de una buena dosis de respeto por los datos experimentales, coherencia en nuestros argumentos

y una consideración cuidadosa de los conceptos empleados. No es una tarea menor, pero sin duda la recompensa vale la pena.

AGRADECIMIENTOS

El autor desea manifestar públicamente su gratitud a las innumerables personas que le han ayudado, en condiciones harto difíciles, durante la elaboración de este artículo. Y en especial, para el profesor Adriano Campo-Bagatín, de la Universidad de Alicante, sin cuyo apoyo material este trabajo no hubiese podido completarse.

BIBLIOGRAFÍA

- AITCHISON, I.J.R. (1985) «Nothing's plenty. The vacuum in modern quantum field theory», *Contemporary Physics*, vol. 26, pp. 333-391.
- ALEMAÑ-BERENGUER, R.A. 2011: «El significado filosófico de la teoría cuántica de campos», *Contrastes. Revista Internacional de Filosofía*, vol. XVI, pp. 27-47.
- BENITEZ, L., ROBLES, J.A. 2000: *El Espacio y el Infinito en la Modernidad*. Méjico: Publicaciones Cruz O., S.A.
- BIRRELL, N.D. and DAVIES, P.C.W. 1982: *Quantum Fields in Curved Space* Cambridge (U.K.): Cambridge University Press.
- BOI, L., FLAMENT, D., SALANSKIS, J.M. (eds.) 1992: *1830 -1930: A Century of Geometry. Epistemology, History and Mathematics*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag.
- BUNGE, M.1982: *Controversias en Física*. Madrid: Tecnos.
- CAMPBELL, L., GARNETT, W. 1892: *The Life of James Clerk Maxwell*, London: Macmillan.
- CARROLL, S.M, PRESS W.H., TURNER, E.L. 1992: «The Cosmological Constant», *Ann.Rev.Astron.Astrophys.* 30, 499-542.
- CAUDY, W., GREENSITE, J. 2008: «Ambiguity of spontaneously broken gauge symmetry», *Physical Review D*, vol. 78, 025018.
- CERCIGNANI, C. 2006: *Ludwig Boltzmann. The man who trusted atoms*. New York: Oxford University Press.
- CHANNELL, D. F. TRUESDELL, C. 1982: «The Tragicomical History of Thermodynamics, 1822-1854», *Technology and Culture*, vol. 23 (1), pp. 104–106.
- COOK, N. 2001: *The Hunt for Zero Point*. London: Century Books.
- DE ANGELIS, G.F., DE FALCO, D., GUERRA, F. 1978: «Note on the Abelian Higgs-Kibble model on a lattice: Absence o spontaneous magnetization», *Physical Review D*, vol. 17, pp. 1624-1628.
- DE MORA-CHARLES, M.S. 2009: «Finito o infinito: una cuestión de gusto», *Ontology Studies*, vol. 9, pp. 43-54.
- DE SEGOVIA, J.L. 2010: «Historia del vacío desde Grecia a finales del siglo XIX», *Revista Española de Física*, vol. 24 (2), pp. 58-66.

- DISALLE, R. 2006: *Understanding Space-time: the philosophical development of physics from Newton to Einstein*. Cambridge: Cambridge University Press.
- EARMAN, J. 2004: «Laws, symmetry and symmetry breaking: Invariance, conservation principles and objectivity», *Philosophy of Science*, vol. 71, pp. 1227-1241.
- EDDINGTON, A. 1956: *La expansión del universo*. Buenos Aires: Leviatán.
- EINSTEIN, A. 1984: *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*. Madrid: Alianza
- EINSTEIN, A., STERN, O. 1913: «Einige Argumente für die Annahme einer molekularen Agitation beim absoluten Nullpunkt», *Annalen der Physik*, vol. 40 (3), pp. 551-559.
- ELITZUR, S. 1975: «Impossibility of spontaneously breaking local symmetries», *Physical Review D*, vol. 12, pp. 3978-3982.
- FINAZZI, S., LIBERATI, S., SINDONI, L. 2012: «Cosmological constant: A lesson from bose-einstein condensates», *Physical Review Letters*, vol. 108, 071101.
- FRADKIN, E., SHENKER, S.H. 1979: «Phase diagrams of lattice gauge theories with Higgs fields», *Physical Review D*, vol. 19, pp.3628-3697.
- FRIEDMAN, M. 1991: *Fundamentos de las teorías del espacio-tiempo*. Madrid: Alianza Universidad.
- FRÖHLICH, J., MORCHIO, G., STROCCHI, F. 1981: «Higgs phenomenon without symmetry breaking order parameter», *Nuclear Physics B*, vol. 190, pp. 553-582.
- GAUKROGER, S. 2002: *Descartes' System of Natural Philosophy*. Cambridge (U.K.): Cambridge University Press.
- GRAY, J. 1992: *Ideas de Espacio*. Madrid: Mondadori.
- , 2007: *Worlds Out of Nothing. A Course in the History of Geometry in the 19th Century*. London: Spinger-Verlag.
- GREENBERG, M. J. 1994: *Euclidean & Non-Euclidean Geometry: Development and History* (Third Edition). New York: Freeman.
- GURALNIK, G.S., HAGEN, C.R., KIBBLE, T.W.B. 1964: «Global conservation laws and massless particles», *Physical Review Letters*, vol. 13, pp.585-587.
- GUYVER, P. (ed.) 2006: *Kant and Modern Philosophy*. Cambridge: Cambridge University Press.
- HEINZMANN, G. 2001: «The foundations of geometry and the concept of motion: Helmholtz and Poincaré», *Science in Context*, vol. 14 (3), pp. 457-470.
- HERRERO, M.A. 2012: «Instrumentalismo y realismo en la física de James C. Maxwell», *Naturaleza y Libertad*, vol. 9, pp. 77-138.
- HIGGS, P.W. 1964: «Broken symmetries and the masses of gauge bosons», *Physical Review Letters*, vol. 13, pp. 508-509.
- JAMMER, M. 1994: *Concepts of Space: The History of Theories of Space in Physics*. New York: Dover Publications.
- JANIÁK, A. 2008: *Newton as Philosopher*. Cambridge: Cambridge University Press.
- KELVIN, 1904: *Baltimore Lectures*. Baltimore: Publication Agency of Johns Hopkins University.
- KIBBLE, T.W.B. 1967: «Symmetry breaking in non-abelian gauge theories», *Physical Review*, vol. 155, pp. 1554-1561.

- KÖNIGSBERGER, L. 1906: *Hermann von Helmholtz*. Oxford: Clarendon press.
- KOWALSKI, M. *et al.* 2008: «Improved Cosmological Constraints from New, Old and Combined Supernova Datasets», *Astrophysical Journal*, vol. 686, pp. 749-778.
- KRAGH, H. 1996: *Cosmology and Controversy*. Princeton: Princeton University Press.
- LIMA, W.C.C, VANZELLA, D.A.T. 2010: «Gravity-Induced Vacuum Dominance», *Physical Review Letters*, vol. 104, 161102 (2010).
- LÉVY-LEBLOND, J.-M. 1973: «Les inegalites de Heisenberg», *Encart Pedagogique du Bulletin de la Société Française de Physique*, vol. I, pp. 7 – 15.
- LORENTZ, H.A. 1927: *Aether theories and aether models (Lectures on Theoretical Physics vol. I)*. London: MacMillan and Co. Ltd.
- MAXWELL, J.C. 1873: *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Oxford: Clarendon Press.
- , 1890: *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell* (W.D. Niven, ed.). Cambridge (U.K.): Cambridge University Press.
- MILONNI, P. W. 1994: *The Quantum Vacuum: an Introduction to Quantum Electrodynamics*. New York: Academic Press.
- MISNER, C., THORNE, K., WHEELER, J.A. 1973: *Gravitation*. New York: Freeman.
- MÜLLER, I. 2007: *A history of thermodynamics. The doctrine of energy and entropy*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag.
- NOBBENHUIS, S. 2006: «Categorizing Different Approaches to the Cosmological Constant Problem», *Foundations of Physics*, vol. 36, pp. 613-680.
- PADMANABHAN, T. 2003: «Cosmological constant – the weight of the vacuum», *Physics Reports*, vol. 380, pp. 235–320.
- PAIS, A. 1984: *El Señor es sutil... La ciencia y la vida de Albert Einstein*. Barcelona: Ariel.
- PLANCK, M. 1900: «Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum», *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, vol. 2, pp. 237–245.
- REICHENBACH, H. 1920: *Relativitätstheorie und Erkenntnis Apriori*. Berlin: Springer.
- RINDLER, W. 2001: *Relativity: Special, General, and Cosmological*. New York: Oxford University Press.
- RUGH, S. E. ZINKERNAGEL, H. 2002: «The Quantum Vacuum and the Cosmological Constant Problem», *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, vol. 33 (4), pp. 663–705.
- SAUNDERS, S., BROWN, H.R. (eds.) 1991: *The Philosophy of Vacuum*. Oxford: Clarendon Press.
- SCHLICK, M. 2005: *Space and Time in Contemporary Physics. An Introduction to the Theory of Relativity and Gravitation*. New York: Dover.
- SMEENK, C. 2006: «The elusive Higgs mechanism», *Philosophy of Science*, vol. 73, pp. 487-499.
- STRUYVE, W. 2011: «Gauge invariant accounts of the Higgs mechanism», *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, vol. 42, pp. 226-236.
- TABAK, J. 2004: *Geometry: The Language of Space and Form*. New York: Facts on File.

- TRUDEAU, R. J. 2008: *The Non-Euclidean Revolution*. Boston: Birkhäuser.
WEINBERG, S. 1972: *Gravitation and Cosmology*. New York: Wiley & Sons.
WOLF-DEVINE, C. 1993: *Descartes on Seeing. Epistemology and Visual Perception*.
Carbondale: Southern Illinois University Press.

RAFAEL ANDRÉS ALEMAÑ BERENGUER es miembro del Instituto de Física Aplicada a las Ciencias y la Tecnología de la Universidad de Alicante.

Línea de investigación

Compatibilidad entre la física cuántica y la relatividad, epistemología de la evolución biológica y filosofía de la mente.

Publicaciones recientes

Alemañ, R. (2012), «La relación mente-materia y el monismo neutral», *Naturaleza y Libertad. Revista de filosofía y estudios interdisciplinarios*, nº 1, pp. 16-50.

Alemañ, R. (2012), «Conventionality and Relativity in Relativistic Space-time», *Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia*, vol. XII, nº 24, pp. 31-45.

Dirección electrónica: raalbe.autor@gmail.com