El efecto Casimir

El efecto Casimir es la manifestación más palpable que se conoce de las fluctuaciones de energía que se producen en el estado vacío de un sistema cuántico por la acción de condiciones externas

Emilio Elizalde

El efecto Casimir ha estado siempre rodeado de un halo de misterio porque designa una fuerza que surge del vacío, de la nada. Y sin embargo, es medible experimentalmente. Vamos a ver cómo es posible algo así.

Del principio de incertidumbre

El estado de mínima energía de un sistema cuántico recibe el nombre de "estado vacío". Para salir del mismo se requiere un aporte de energía. ¿Cómo puede, pues, haber fluctuaciones en dicho estado? Las fluctuaciones del estado vacío vienen habilitadas por el principio de incertidumbre (o de indeterminación) de Heisenberg, uno de los pilares del mundo cuántico, que establece la imposibilidad intrínseca de determinar a la vez dos magnitudes observables y complementarias del sistema, como lo son las parejas posición-velocidad o energía-tiempo.

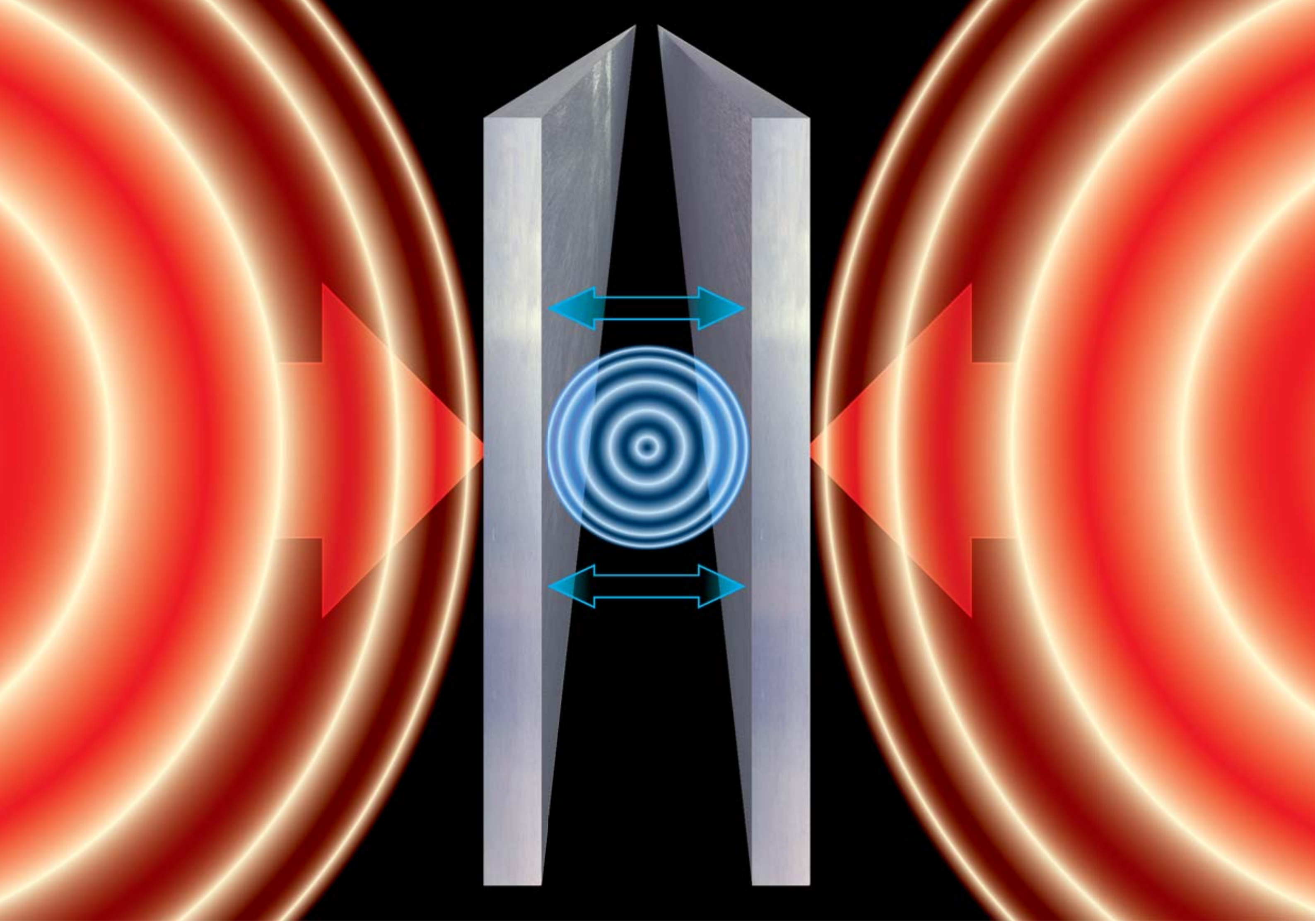
Veámoslo con un ejemplo sencillo: el oscilador armónico unidimensional. En este sistema físico, una partícula, que sólo se puede mover hacia delante o hacia atrás a lo largo de una línea recta, experimenta una atracción hacia un punto de esa recta con una fuerza proporcional a su alejamiento del punto. Si a la partícula se le imparte una velocidad en dirección opuesta al punto de atracción, el movimiento resultante será una oscilación alrededor de este punto con una frecuencia determinada.

Este sistema clásico tiene una versión cuántica, donde la energía de la partícula sólo puede tomar una cantidad numerable de valores. En concreto, el valor enésimo de la energía será proporcional a la frecuencia de oscilación multiplicada por $(n + 1/2)$. Aquí el valor más bajo de la energía, el correspondiente a $n = 0$, no es nulo, como ocurriría en el caso clásico, sino proporcional a la mitad de la frecuencia. Esa energía es la mínima compatible con el principio de incertidumbre. La energía clásica del oscilador, a partir de la cual se define la cuántica, depende del cuadrado de su distancia al centro, parte que corresponde a la energía potencial, y del cuadrado de su velocidad, la parte de la energía cinética. El principio de incertidumbre de Heisenberg impone un límite mínimo universal al producto de la incertidumbre de ambas magnitudes. De ahí, en pocos pasos, se sigue esa energía mínima del oscilador de medio cuanto de energía.

En un oscilador clásico, para una frecuencia de oscilación dada, una mayor energía equivale a una amplitud —una máxima separación del centro de atracción— mayor. En un mundo cuántico, equivale a la adición de cuantos de energía de una misma magnitud, proporcional a la frecuencia. La probabilidad de encontrar la partícula a una distancia del centro viene dada en el nivel n de energía por una distribución de probabilidad que se divide en $n + 1$ paquetes acampanados, separados por nodos de probabilidad nula. En el estado de mínima energía, hay una sola campana de probabilidad, centrada en el origen. Los resultados de repetidas mediciones de la posición de una oscilador de una energía dada, pues, se concentrarían alrededor de ciertos puntos: lo que clásicamente es oscilante y continuo, cuánticamente parece "corpuscular", con un número de corpúsculos mayor cuanto mayor sea la energía. Es como un camino de ida y vuelta: la mecánica cuántica sustituye la partícula puntual del oscilador clásico por una onda, pero esta onda, a su vez, lleva de nuevo a pensar en "partículas". Este es

CONCEPTOS BASICOS

- El vacío cuántico tiene fluctuaciones de energía, que en determinadas circunstancias actúan sobre objetos materiales ordinarios. Así ocurre en el ejemplo del efecto Casimir: dos placas metálicas paralelas, a las que las fluctuaciones del vacío, por la diferente presión que ejercen sobre su anverso y su reverso, tienden a acercar entre sí.
- El cálculo de esa fuerza de aproximación encierra infinitos domeñables: tras un proceso de renormalización se convierten en magnitudes finitas, medibles en experimentos reales.
- Es una situación común en la teoría cuántica de campos. La función zeta de Riemann se usa en algunos de esos procedimientos regularizadores, que preceden a la renormalización.



el fundamento de la versión cuántica de los campos de fuerza clásicos; enseguida hablaremos más de ello.

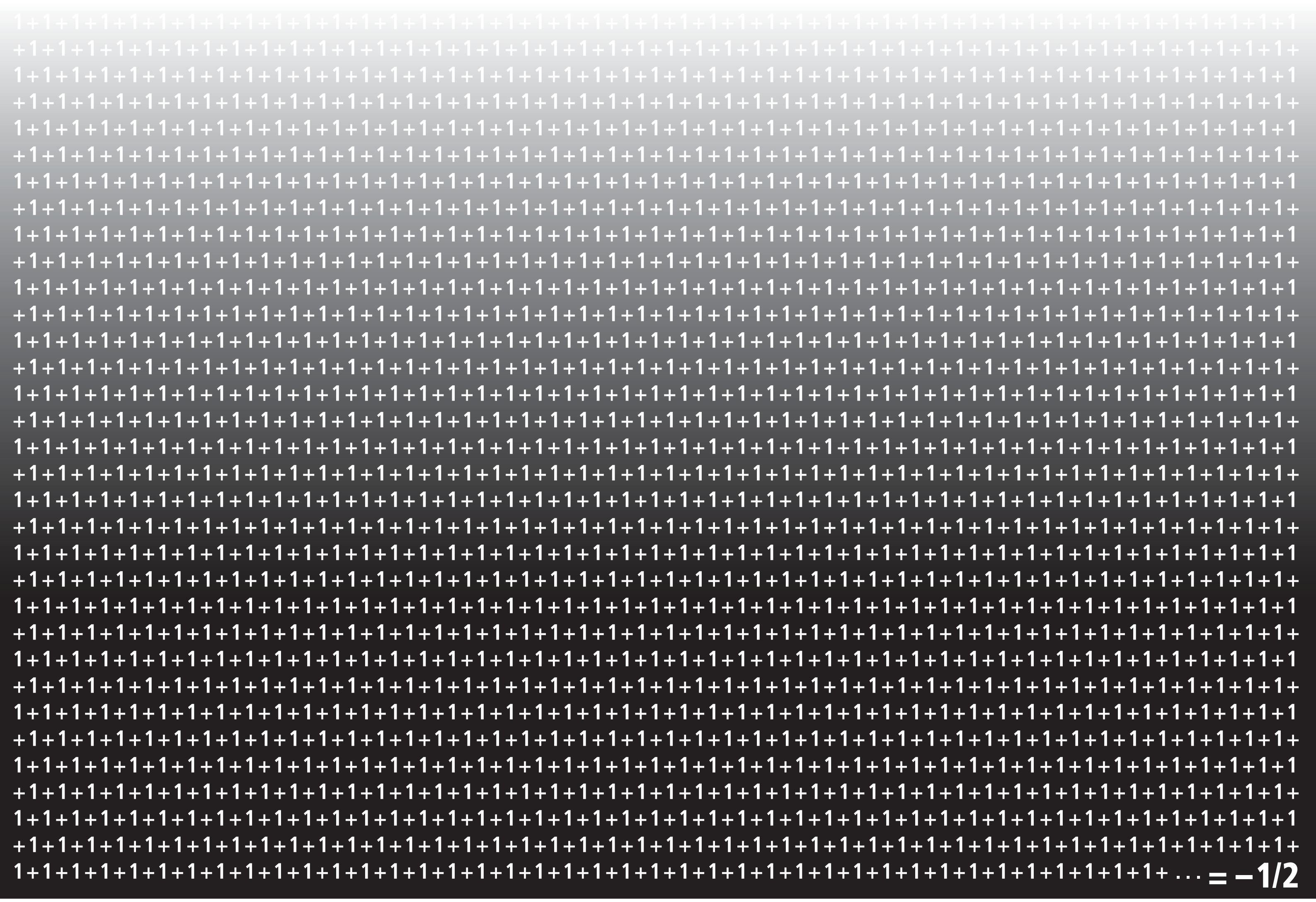
Si el oscilador está encerrado en una cavidad —en nuestro ejemplo, si está encerrado en un segmento de longitud dada—, la frecuencia podrá tomar también sólo ciertos valores. Esta no es una peculiaridad cuántica: es lo que ocurre con una cuerda vibrante clásica, en un instrumento musical por ejemplo, en cuya vibración se superponen una frecuencia fundamental y sus armónicos. La suma de las energías correspondientes a cada una de las frecuencias de oscilación posibles dentro de la cavidad de un oscilador que se halle en su estado de energía más baja, la "energía de punto cero" de ese sistema, resulta ser proporcional a la serie infinita siguiente: $1/2 + 3/2 + 5/2 + 7/2 + \ldots$ Este es sólo un ejemplo del tipo de infinitos con los que la teoría de campos cuánticos ha de lidiar. Ahí entra en funcionamiento el programa de *renormalización*, programas en realidad, pues hay varias maneras diversas de atacar el problema, sobre todo en su primer paso, el denominado de *regularización*, que asigna, con arreglo a cierta prescripción, un valor finito a una serie como la anterior. Detengámonos en el método de *regularización zeta*, que hace uso de la función zeta de Riemann.

Del infinito a la finitud

¿Cuánto vale la suma $1 + 1 + 1 + 1 + 1 + \ldots$? Una primera respuesta sería: infinito. Es correcta, pero escasamente útil. Resulta que las series más importantes que aparecen en las teorías de campos cuánticos desde los años treinta del siglo pasado son divergentes y respuestas como la anterior en nada ayudan a darles sentido. Otra respuesta adecuada sería: vale $-1/2$. Pero, ¿cómo se llega a un tal valor, en apariencia absurdo y contrario a la intuición? Y ¿qué sentido o utilidad puede tener de hecho?

Importantes métodos de sumación de series divergentes fueron construidos a lo largo del tiempo por diversos matemáticos y ahora llevan sus nombres: Euler, Abel, Cesàro, Borel, etc. Pensemos en la serie $1 - 1 + 1 - 1 + \ldots$ Al quitarle el primer término obtenemos la misma serie pero cambiada de signo, es decir, llamando a su suma a, se tiene que $a = 1 - a$, de donde $a = 1/2$, valor muy razonable, pues, al ir añadiendo términos, la serie va oscilando siempre entre 0 y 1. Mas esto no nos sirve para sumar la serie con la que iniciamos la

1. EL VACIO interacciona con la materia. Acercará dos placas metálicas paralelas que estén muy próximas entre sí. Ese es el efecto Casimir.



2. ¿PUEDE HABER algo más evidentemente infinito que la suma de infinitos unos? Sin embargo, en matemáticas hay un procedimiento coherente que asigna el valor – 1/2 a esa suma. En la realidad física sucede algo parecido: sumas que de entrada son infinitas encierran fenómenos finitos mensurables. El efecto Casimir es uno de ellos.

presente disquisición. En efecto, se obtiene $a = 1 + a$, de donde se obtendría que a seguiría valiendo infinito.

Ello nos lleva a considerar otros procedimientos de suma. Reparemos en uno. De nuevo, la historia comienza en Euler y la famosa serie armónica: $1 + 1/2 + 1/3 + 1/4 +\ldots$ Es divergente: quiere decir que, para cualquier número N, por grande que sea, habrá algún número n de términos tal, que su suma será mayor que N; la serie infinita completa será un número infinito. Euler advirtió que, si se eleva cada término a una misma potencia r, siempre que r sea mayor que 1, la serie resultante $1 + 1/2^r + 1/3^r + 1/4^r +\ldots$ será convergente —la suma de los infinitos términos no será infinita— y se dedicó a estudiar su valor y propiedades en función de r.

Riemann dio un paso fundamental: extendió el dominio de r al plano complejo (llamándola ahora s), y así definió la función de variable compleja $\zeta(s)$, que hoy recibe el nombre de función zeta de Riemann, con aplicaciones en teoría de números, análisis, física matemática, teoría del caos y otros.

La función zeta de Riemann, $\zeta(s)$, se define, pues, mediante la serie $1 + 1/2^s + 1/3^s + 1/4^s +\ldots$ en toda la región del plano complejo s que está a la derecha de la línea vertical de abscisa1 (*véase el recuadro* "Las potencias complejas en la zeta de Riemann"). En ese dominio la serie es convergente y admite una prolongación analítica única a todo el plano complejo: una construcción matemática que crea una función con valores finitos unívocamente determinados que empalma de manera suave con la función original, definida sólo a la derecha de 1. No tiene más que una singularidad, un número para el que la nueva función ampliada no puede ofrecer un valor finito: el punto $s = 1$ (que corresponde a la serie armónica).

Nuestra serie inicial, $1 + 1 + 1 + \ldots$, es la correspondiente a $s = 0$, y se tiene que $\zeta(0) = -1/2$. Del mismo modo podemos razonar que: $1 + 2 + 3 + 4 + 5 + \ldots = \zeta(-1) = -1/12$, pues ése es el valor de la función zeta en $s = -1$; y así con otras muchas series. Para hallar el valor de la serie en una "cavidad" de las energías mínimas del oscilador hay que trabajar un poco más: $1/2 + 3/2 + 5/2 + \ldots = 1/2\,(1 + 3 + 5 + \ldots) = 1/2\,[(1 + 2 + 3 + 4 + 5 + \ldots) -2\,(1 + 2 + 3 + 4 + 5 + \ldots)] = 1/2\,[-1/2 - 2(-1/2)] = 1/4$.

En física se ha construido una refinada teoría para regularizar y luego renormalizar dichas series con un éxito espectacular, que alcanza las 14 cifras decimales de aproximación, al comparar los resultados obtenidos con los de los experimentos en electrodinámica cuántica. Pues bien, en muchos casos estos métodos dan un resultado coincidente en todo con el del procedimiento de continuación analítica aquí esbozado. Uno de los ejemplos más claros y fundamentales lo constituye el efecto Casimir.

Oscilaciones electromagnéticas en el vacío

Cada punto de una cuerda vibrante describe en el tiempo un movimiento constituido por la superposición de una infinidad de movimientos, cada uno equivalente a un oscilador armónico de distinta frecuencia y amplitud. A su vez, entre cada punto de la cuerda será diferente la amplitud de los componentes armónicos de igual frecuencia; en los puntos donde la cuerda se ata a las clavijas del instrumento la amplitud será nula.

De manera similar, en cada punto del espacio vacío el campo electromagnético es una superposición de oscilaciones armónicas —ahora espaciales, en vez de unidimensionales— de frecuencia distinta y de todas las energías posibles para cada frecuencia.

Ya sabemos lo que ocurre cuando se someten los osciladores a la mecánica cuántica:

LAS POTENCIAS COMPLEJAS EN LA ZETA DE RIEMANN

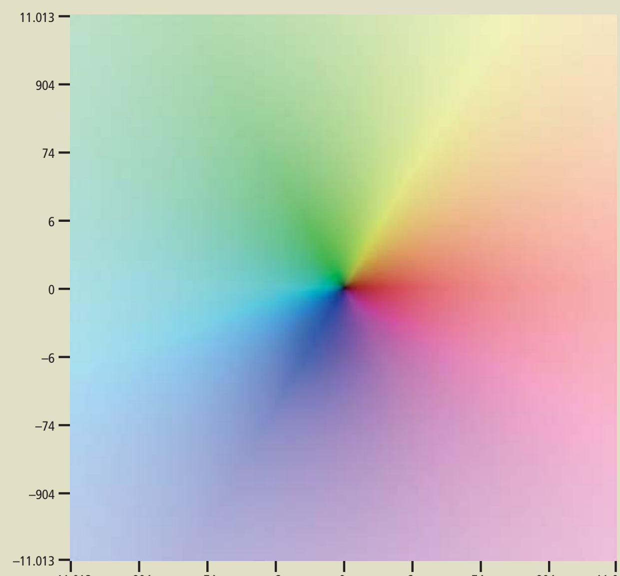
Para entender en qué consiste elevar un número real a un número complejo, hay que tener en cuenta que un número complejo s puede escribirse de la forma $s = a + ib$, con $i^2 = -1$ y a y b números reales, y que e^x puede escribirse como una serie con infinitos términos, una suma de potencias de x sucesivamente mayores multiplicadas por coeficientes, de modo que si en ese desarrollo de e^x se sustituye x por ix, se tendrá una serie igual a la que resulta cuando se suma la correspondiente a la función trigonométrica coseno de x (en radianes) y la correspondiente al seno de x, ésta con cada uno de sus términos multiplicado por i. Por otra parte, cualquier número real, llamémosle q, es igual, por la definición misma de logaritmo natural, a e elevado al logaritmo natural de q. Para elevar una potencia a otra se multiplican los exponentes, y la suma de dos exponentes equivale al producto de las correspondientes potencias. En consecuencia: q elevado al número complejo s, es el número complejo $q^a e^{ib\ln q}$. La parte real es $q^a\cos(b\ln q)$; la imaginaria —la multiplicada por i—, $q^a \mathrm{sen}(b\ln q)$.

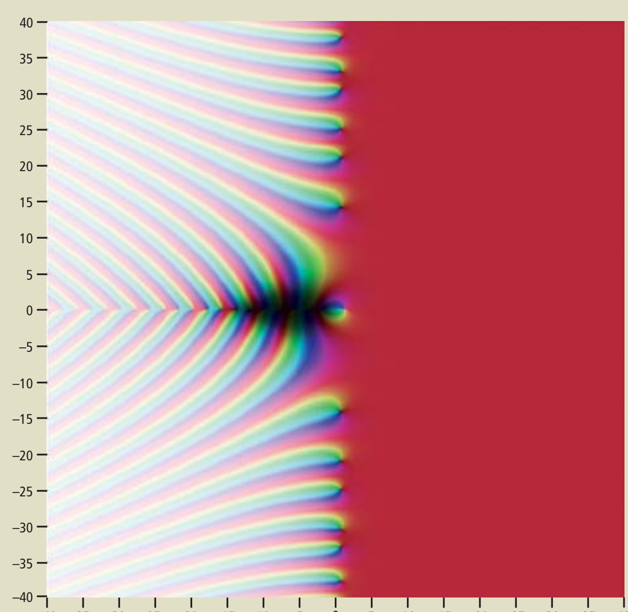
La función zeta de Riemann es una función de términos de esa forma, en los que q va valiendo 1, 1/2, 1/3..., y a vale más de uno (aunque puede extenderse a todo número complejo, salvo $s = 1$).

Un número complejo puede escribirse también como el producto de un número real (el módulo) por e elevado a i por un ángulo o "argumento". El módulo será la raíz cuadrada de sumar el cuadrado de la parte real (que en el caso de la función de Riemann será a su vez la suma de las partes reales de todos los términos de la serie) al cuadrado de la parte imaginaria (la suma de las partes imaginarias de todos los términos). El argumento es cualquiera de los ángulos en radianes cuya tangente sea igual al cociente de la parte imaginaria y la real (se sigue de interpretar las partes real e imaginaria del número complejo como las componentes horizontal y vertical de un vector). El resultado no puede representarse en coordenadas cartesianas de manera directa; harían falta cuatro ejes perpendiculares. Una forma de conseguir una representación en el plano es por medio de colores. En el eje horizontal se representa la componente real de s y en el vertical la imaginaria. El tono del color da el argumento de la función de Riemann para s, y la intensidad del color, el módulo, de suerte que, cuanto más intenso sea, menor será el módulo.

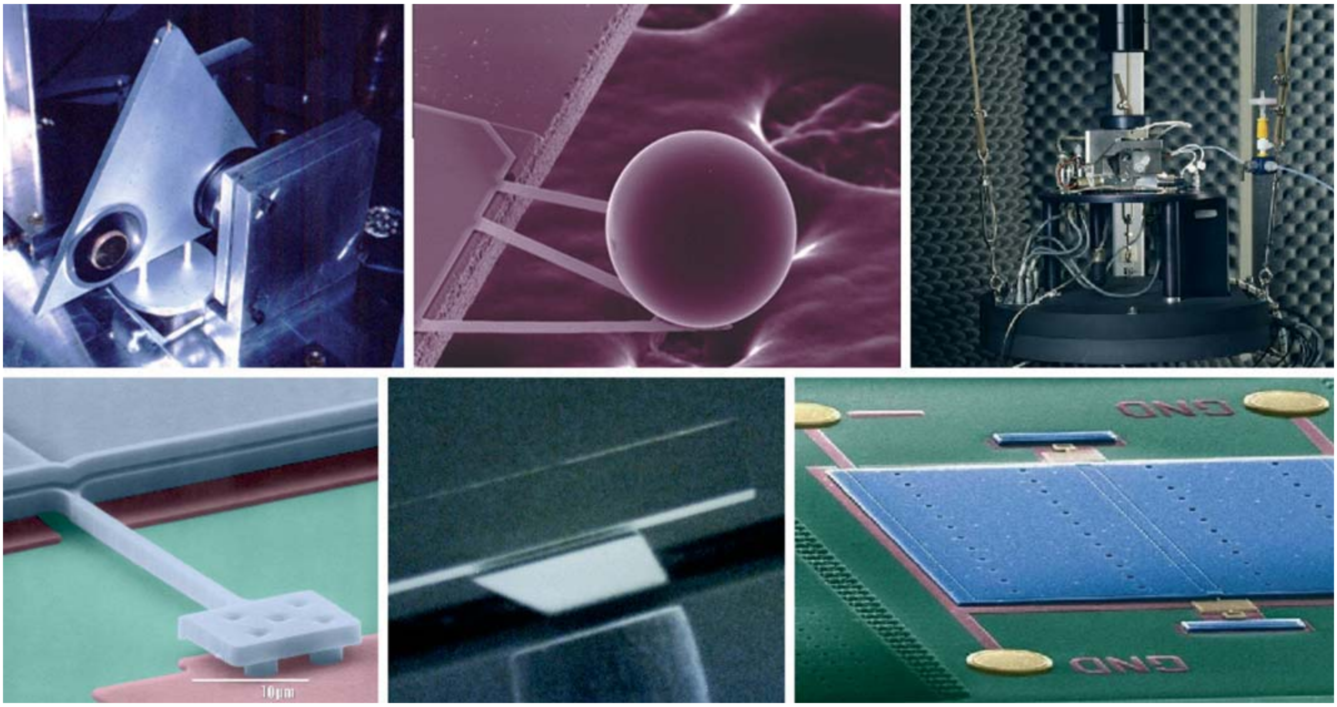
La codificación que en concreto se ha empleado aquí se ve arriba a la derecha. El color rojo indica argumentos casi nulos (los colores van cambiando con el ángulo de giro —el argumento— desde la horizontal, y las intensidades radialmente).

Con este código, la función de Riemann, para una región del plano complejo centrada en el origen y una vez extendida analíticamente —la construcción única que le da valores finitos en todo el plano menos en $s = 1$—, queda como se ve aquí a la derecha.





EMILIO ELIZALDE



3. SEIS DISPOSITIVOS EXPERIMENTALES para la determinación del efecto Casimir. El primero corresponde al experimento de Lamoreaux, publicado en 1997 y que marcó el inicio de las verdaderas comprobaciones experimentales del efecto. Se llevó a cabo en Seattle; los otros cinco, en orden cronológico, en Riverside, Estocolmo, Murray Hill, Padua e Indianápolis.

IMAGEN CORTESIA DE R. ONOFRIO, *New J. Phys.*, n.º 8, Pág. 237; 2006

cada energía posible para una frecuencia dada es una suma de cuantos iguales, de energía proporcional a la frecuencia en cuestión. Cuando se trata de los osciladores que componen el campo electromagnético, se interpreta que sus cuantos de energía son fotones. Hablar de campos electromagnéticos es, en la práctica, hablar de la interacción entre objetos materiales cargados: su interacción consiste en la emisión y absorción de esos fotones. Y como ocurre con los osciladores lineales, mientras que en el vacío libre, sin un sistema material que acote el campo, todas las frecuencias tienen el mismo peso, son igualmente importantes, en el interior de una cavidad, donde el campo se refleja una y otra vez por las placas, la situación es muy diferente. Las frecuencias que "caben" perfectamente dentro de la cavidad son aquellas en que la distancia entre placas es un múltiplo entero de media longitud de onda (las placas han de ser nodos de la vibración); allí amplificadas, constituyen las frecuencias propias, sus "modos resonantes" de vibración, de la "cavidad resonante". Para las demás longitudes de onda, el campo correspondiente queda atenuado. Es decir, las fluctuaciones de vacío resultan unas reforzadas y otras atenuadas y contribuyen de manera diversa a la "presión de radiación" del campo.

También sabemos ya que no hay osciladores cuánticos de energía nula. Por eso, aun sin fuentes materiales —sistemas de partículas con carga eléctrica— que generen el campo, la energía mínima de los osciladores que componen el campo no será nula. De esos estados de energía mínima se dice que son "fluctuaciones del vacío". En principio, parece que cabría pasar por alto su existencia. Al igual que ocurría con el oscilador armónico, libre o encerrado en una cavidad, la primera impresión es que la energía del campo, libre o encerrado, es infinita. Pero se trataría de un infinito sin efecto, por el que no habría que preocuparse. Lo que importa son las diferencias de energía entre estados físicos, no su valor absoluto. Dónde se ponga el cero de energías es una cuestión de mera conveniencia. Bastaría establecer que el cero de energía es la energía del vacío, y ya no habría que pensar más en ella. El mérito de Casimir estriba en haber descubierto que la energía del vacío, en determinadas circunstancias, sí tiene, pese a todo, consecuencias físicas discernibles.

El cálculo de Casimir

Aunque no en su autobiografía, el propio Casimir relató en más de una ocasión el desarrollo de los hechos. Según confesara a Peter Milonni en 1992, Casimir descubrió su efecto como un subproducto de la investigación aplicada que llevaba a cabo para Philips: la estabilidad de las suspensiones coloidales que se empleaban en las películas que se depositaban sobre las lámparas al uso y tubos de rayos catódicos. La teoría que habían desarrollado Overbeek y Verwey, en el mismo laboratorio, sobre la estabilidad de las suspensiones de polvo de cuarzo no parecía ser correcta desde el punto de vista experimental: la interacción entre partículas debía decaer más rápidamente con la distancia, con la potencia r^{-7} en lugar de la r^{-6} de la que se deriva la ecuación de Van der

Waals de las fuerzas intermoleculares. Overbeek había aventurado que ello podía deberse a la velocidad de propagación de la interacción (la de la luz), que es finita. Tal extremo fue confirmado en un primer trabajo teórico de Casimir y Polder, que aún abordaba el problema en el marco tradicional de las fuerzas de Van der Waals.

Intrigado por la simplicidad del resultado, Casimir se propuso profundizar en el tema. En conversación con Bohr en otoño de 1947, el danés se percató de que allí había algo nuevo y lo relacionó con la energía de punto cero. Puso a Casimir sobre una pista que ya no había de abandonar. Enseguida comprobó que el resultado que había obtenido con Polder podía ser en efecto interpretado como una variación de la energía de punto cero. El 29 de mayo de 1948 presentó su manuscrito "Sobre la atracción de dos placas perfectamente conductoras" a la sesión de la Real Academia Holandesa de Artes y Ciencias. Fue publicado en la revista de la Asociación ese mismo año.

Por aquellas fechas, la observación del desplazamiento de Lamb (una pequeña diferencia de energía entre dos estados del átomo de hidrógeno) había sido interpretada también como un cambio de las fluctuaciones del vacío o energía de punto cero (aunque es una consecuencia de esa energía mucho menos nítida que la que iba a descubrir Casimir). Pero el desarrollo de Casimir fue independiente de tal actividad. Por entonces no conocía semejante interpretación del trabajo de Lamb; su razonamiento original no vino influido por tal teoría, sino por las palabras de Bohr.

En un primer paso, haciendo uso de un método de regularización alternativo al de la *zeta* de Riemann, basado en introducir un corte en las frecuencias, Casimir logró que la energía de las fluctuaciones del vacío tuviese un valor finito, pero no consiguió dar sentido físico a tal valor. Sin otra referencia, lo que se obtiene es simplemente el origen de energías del sistema, que podemos arbitrariamente tomar como cero. Ahora bien, tras pensarlo un poco más, Casimir dio con una idea genial y sencilla a un tiempo. Propuso comparar dos situaciones: la energía de las fluctuaciones del vacío sin más y la correspondiente a las fluctuaciones del vacío en presencia de unas "condiciones de contorno", es decir, cuando el vacío está sometido a ciertos límites, donde las magnitudes físicas han de tomar valores determinados. La diferencia entre ambas energías tiene un valor intrínseco, independiente de donde hayamos colocado el origen de energías.

En concreto, Casimir consideró el caso de dos placas livianas, ideales, perfectamente conductoras y de extensión infinita (todo en aras de simplificar los cálculos) colocadas en el vacío del campo electromagnético (es decir, en ausencia de un campo ordinario, generado por algún sistema material). Todo campo, incluso en su estado vacío, ejerce una presión de radiación que es proporcional a la energía o frecuencia de los distintos modos de vibración. En una cavidad resonante, la presión de radiación es mayor en el interior que en el exterior, por cuya razón los espejos o placas tienden a separarse. Para los modos fuera de resonancia, en cambio, la presión de radiación en el interior es más baja que en el exterior y las placas experimentan una fuerza de atracción. Resultó, en el caso de las dos placas, que los modos que contribuyen a la fuerza atractiva dominan ligeramente sobre los modos resonantes que tienden a separar las placas. Por consiguiente, sumando todos los efectos, las placas tienden a juntarse. Muy pocos físicos lograron entenderlo en aquella época.

Esa fuerza es proporcional al área de las placas e inversamente proporcional a la separación entre las placas elevada a la cuarta potencia, con una constante de proporcionalidad en la que intervienen solamente constantes fundamentales, como la de Planck y la velocidad de la luz. De ahí la universalidad del fenómeno, que no depende de la naturaleza de las placas. Para hacerse una idea de las magnitudes, dos placas de 1 cm^2 de superficie situadas a una distancia de una micra se atraen con una fuerza de 0,013 dinas —unos 10^{-7} Newton, el peso de una cienmillonésima de gramo—. Mediante la fórmula resulta fácil calcular cuál es la fuerza en otras condiciones: mientras que se trata de un valor insignificante para dos placas separadas por metros de distancia, resulta una fuerza muy considerable cuando la separación es de unos pocos nanómetros, que es donde la fuerza de Casimir se convierte en la más importante que actúa entre dos cuerpos neutros. Así, a una separación de 10 nm, cien veces el tamaño de un átomo, el efecto Casimir produce el equivalente a una presión de una atmósfera.

Experimentos recientes

No resultó fácil llevar a cabo en el laboratorio el experimento. Las placas nunca tienen extensión infinita, ni son perfectamente conductoras. Intervienen efectos de temperatura, gravitatorios, de rugosidad de las superficies y otros. Para empezar, hay infinitas distancias entre dos placas paralelas. ¿Cómo determinar que son en efecto paralelas? Las primeras y variadas confirmaciones experimentales del efecto Casimir, llevadas a cabo en los laboratorios de Philips en Eindhoven por Marcus Sparnaay y otros colaboradores, diez años después de la

El mérito de Casimir estriba en haber descubierto que la energía del vacío, en determinadas circunstancias, sí tiene, pese a todo, consecuencias físicas discernibles.

El autor

Emilio Elizalde, físico y matemático, es en la actualidad profesor de investigación del CSIC en el Instituto de Ciencias del Espacio e IEEC, Barcelona. Es uno de los físicos que dieron gran relevancia a las investigaciones sobre el efecto Casimir realizadas en esta ciudad a finales de los años ochenta (con Rolf Tarrach, Enric Verdaguer, Sonia Pabàn, August Romeo, Sergio Leseduarte y Klaus Kirsten). En 2005 organizó en CosmoCaixa, Barcelona, el 7º congreso internacional QFEXT'05, sobre teorías de campos cuánticos con condiciones de contorno, en las que el efecto Casimir desempeña una función determinante. El propio Casimir había participado en el 4º de estos congresos, celebrado en Leipzig. El autor quiere dedicar este artículo al profesor Pedro Pascual de Sans, *in memoriam*.

aparición del artículo, subestimaron los diversos errores que aparecen y hoy en día nadie las considera ya verdaderas comprobaciones. Sparnaay fue cauto al limitarse a afirmar que sus resultados "no contradecían la predicción teórica de Casimir".

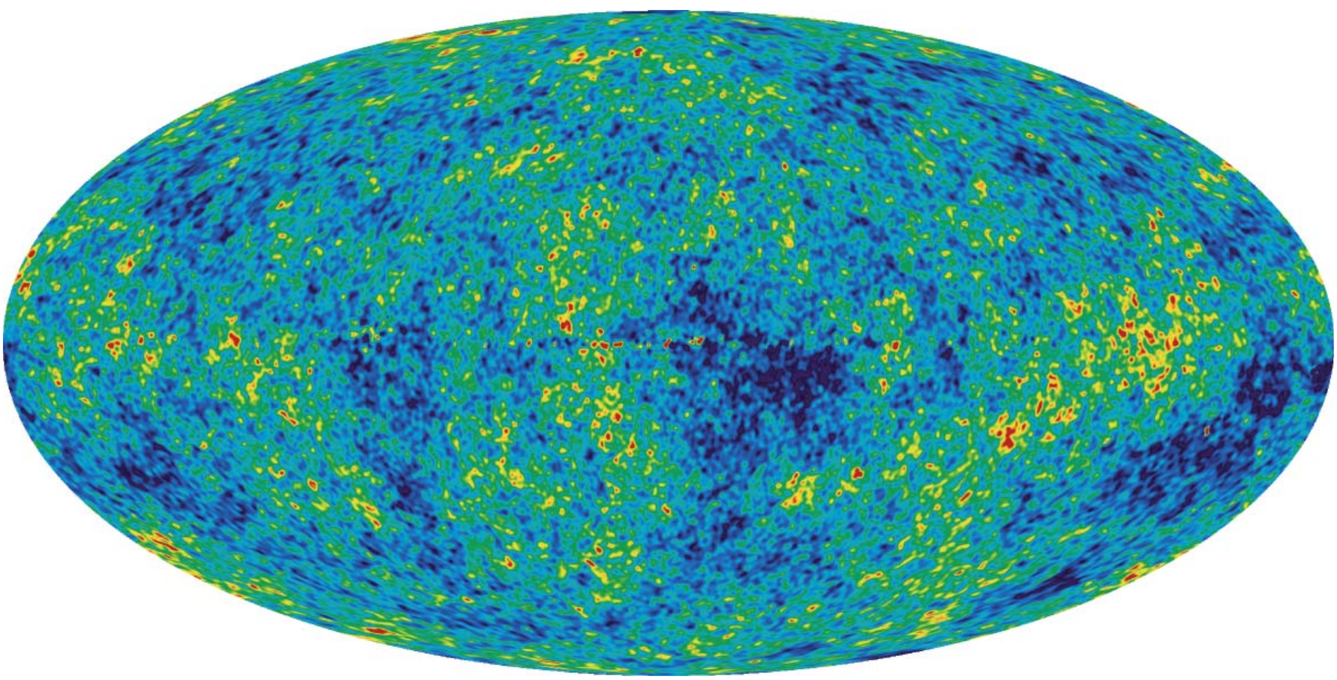
Desde entonces se ha avanzado mucho en la detección del efecto. Transcurrieron, sin embargo, 50 años desde la propuesta de Casimir hasta que, en 1997, Steven Lamoreaux, a la sazón en la Universidad de Washington en Seattle, acometiese un experimento concluyente. Midió la fuerza de Casimir entre una lente esférica de cuatro centímetros de diámetro y una placa de cuarzo óptico de dos centímetros y medio en diagonal, ambas con un recubrimiento de cobre y oro, conectadas a un péndulo de torsión en el vacío. Al acercar los dos objetos a una distancia de pocas micras, Lamoreaux observó que se atraían con la fuerza predicha. La medición efectuada con el péndulo de torsión reprodujo el resultado de Casimir para esta configuración, estimándose el error en un 5 %. El de Lamoreaux fue el punto de partida de varios experimentos aún más precisos que han rebajado el margen de error al 1 % . Ahora no cabe la menor duda de que los cálculos de Casimir eran correctos.

Merecen destacarse los experimentos de Umar Mohideen y colaboradores en la Universidad de California en Riverside. Colocaron una esfera de poliestireno de 200 micras de diámetro sobre la punta de un microscopio de fuerzas atómicas. Aproximando la esfera, recubierta de aluminio u oro, hasta una distancia de una décima de micra de un disco plano, recubierto de estos metales, observaron la atracción predicha por Casimir, monitorizándola con gran precisión mediante las desviaciones experimentadas por un rayo láser.

Thomas Ederth, del Real Instituto de Tecnología de Estocolmo, llevó a cabo otro experimento, también con un microscopio de fuerzas atómicas, en el que situaba dos cilindros recubiertos de oro en posiciones perpendiculares entre sí y separados por tan sólo 20 nanómetros (eso es, dos cienmillonésimas de metro). En todos estos casos se obtuvieron precisiones del 3-5 %.

Hay que tener en cuenta que esos experimentos no se llevaron a cabo con placas paralelas, según la propuesta original de Casimir, dada la dificultad de controlar con precisión la distancia entre dos placas. Es mucho más sencillo determinar la de una superficie esférica y una placa, que queda definida por la distancia entre los puntos más próximos entre un objeto y el otro. Sin embargo, los cálculos matemáticos que hay que llevar a cabo en este caso son mucho más farragosos e introducen también un pequeño error teórico (que puede controlarse para que quede por debajo del 1 % experimental). El error del único experimento llevado a cabo con dos placas, por parte del grupo de G. Bressi, el año 2002, en la Universidad de Padua, con separaciones entre placas de entre 0,5 y 3 micras, no pudo bajarse del 15 %.

Hay otras causas de error. Que los espejos reales no sean idealmente lisos es una de ellas: las irregularidades, que llegan a los 50 nanómetros, son de la misma magnitud que la separación que hay que medir. Por otra parte, algunas frecuencias se reflejan del todo,



4. LAS FLUCTUACIONES DEL VACIO no sólo se manifiestan a pequeña escala, entre unas placas metálicas en el pequeño mundo de un laboratorio. Según los modelos inflacionarios del origen del universo, las pequeñas diferencias de temperatura que se reflejan en la radiación de fondo de microondas que baña el universo derivan de las fluctuaciones del vacío del campo que impulsó la fase de inflación —expansión exponencialmente acelerada— del universo en los primeros momentos de su existencia (las regiones más azules son las más frías en este mapa de la radiación de microondas de los cielos).

NASA/WMAP SCIENCE TEAM, FIVE YEAR MICROWAVE SKY IMAGE otras bastante bien, otras mal y otras no son reflejadas en absoluto por los espejos reales, transparentes para frecuencias muy altas. La dependencia en la frecuencia del coeficiente de reflexión del espejo debe ser tenida en cuenta a la hora de efectuar una medición real, según apuntó ya Evgeny Lifshitz en los años cincuenta.

Y los experimentos nunca se llevan a cabo en el cero absoluto de temperatura, sino a temperatura ambiente: las fluctuaciones térmicas compiten con las propias del vacío cuántico y enmascaran el resultado. Aunque el efecto térmico resulta irrelevante para separaciones inferiores a la micra (ya que entonces la longitud de onda de la radiación térmica es superior a la distancia entre placas y no "cabe" entre ellas una onda térmica), se ha calculado que es del mismo orden que la propia fuerza de Casimir a distancias superiores a las 7 micras. El debate sobre la contribución de los efectos de temperatura a la fuerza de Casimir prosigue.

La fuerza de Casimir se manifiesta también sin necesidad de realizar experimentos específicos para detectarla. En algunos dispositivos micro y nanoelectromecánicos las fuerzas de Casimir no sólo se manifiestan a diario, sino que llegan a constituir un verdadero engorro, ya que pegan las plaquitas y ocasionan el mal funcionamiento de las nanomáquinas.

Casimir y Van der Waals

Hasta ahora hemos expuesto la interpretación "ortodoxa" del efecto, la que parte de la existencia real de las fluctuaciones del vacío cuántico y las trata como a otras fluctuaciones conocidas. Sin embargo, el propio Casimir era consciente de la posibilidad de otras interpretaciones. De entrada, la que dio en su trabajo con Polder en términos de fuerzas de Van der Waals entre las moléculas dieléctricas del material de las placas. En esencia, no hay tanta diferencia entre las dos aproximaciones, pues las fuerzas de Van der Waals vendrían a ser fuerzas efectivas residuales de interacciones más fundamentales de naturaleza cuántica (lo que en la época de Van der Waals era del todo desconocido; su fórmula tenía un carácter fenomenológico). Sin embargo, las fuerzas de Van der Waals tienen un radio de acción más pequeño que la fuerza de Casimir.

Según el propio Casimir, en el interior del metal que forma las placas hay fuerzas de cohesión, que cuando uno presiona las placas, juntándolas, comienzan a actuar. Si se empieza a separarlas, o mejor aún, si tomamos simplemente una de las placas y la partimos en dos, primero hay que vencer los enlaces químicos entre las moléculas, luego las fuerzas residuales de cohesión de Van der Waals entre los dos trozos aún muy próximos y, si hay que seguir separando los trozos todavía más, quedará una fuerza remanente, una suerte de cola de la interacción, que se resiste a desaparecer. La fuerza de Casimir sería la última, y la más elegante, de todas esas energías de cohesión.

Visto así, parecería que el signo de la fuerza de Casimir no puede ser más que atractivo. Por eso causó enorme impacto el resultado de Timothy Boyer, publicado en 1968, de que si en lugar de dos placas tuviéramos una cápsula esférica cerrada, ésta experimentaría una presión hacia afuera debida a una fuerza de Casimir de signo contrario al habitual. Pero es muy difícil llevar a cabo el experimento, ya que el resultado es topológico: dos casquetes semiesféricos se atraerán siempre y sólo cuando se tocasen cerrando una esfera debería observarse la repulsión. Además, la esfera debe ser perfecta, pues para cualquier deformación elipsoidal el resultado ya no está claro; depende del corte introducido para regularizar el valor infinito que aparece. Hay otros trabajos para el caso de pistones y otras configuraciones cerradas en que se obtienen fuerzas repulsivas bajo ciertas condiciones. Se está trabajando con diversos materiales que podrían repelerse por acción de las fluctuaciones del vacío. Y la fuerza repulsiva es crucial (a la vez que difícil de obtener) en las aplicaciones del efecto Casimir en cosmología.

¿Se ha observado realmente la energía del vacío?

La gran precisión y belleza formal de los resultados precedentes no aporta, según algunos, pruebas definitivas sobre la existencia real de la energía del vacío. Refutadas las objeciones sobre una posible confusión de la fuerza de Casimir con las fuerzas de Van der Waals entre las moléculas de las placas, han surgido otras nuevas que no tienen que ver ya con atracciones alternativas entre las placas, sino con la propia interacción de las fluctuaciones del vacío cuántico con cada una de ellas. En lo que sigue nos ceñiremos a una sola placa situada en el vacío del campo electromagnético (o de otro campo cualquiera).

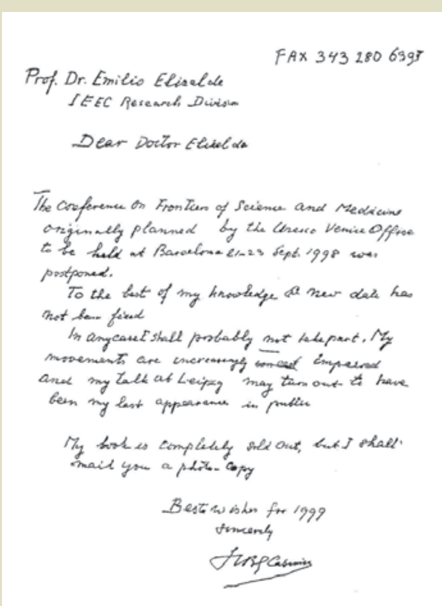
El efecto Casimir se establece como diferencia entre la energía del vacío con la placa y la energía del mismo vacío sin la placa. Desde el punto de vista teórico, del cálculo, la presencia de la placa se traduce en la simple imposición de una determinada condición de contorno sobre el campo. Para simplificar el argumento, pensemos en términos de un campo escalar con una condición de contorno, la más simple posible, que consiste en imponer que dicho

Casimir consideró el caso de dos placas livianas, ideales, perfectamente conductoras y de extensión infinita (todo en aras de simplificar los cálculos) colocadas en el vacío del campo electromagnético

HENDRIK CASIMIR

EN 1979, Casimir fue uno de los conferenciantes principales en la celebración del 25 aniversario del CERN, el Centro Europeo de Investigación Nuclear.

Hendrik Brugt Gerhard Casimir nació en La Haya el 15 de julio de 1909. Casimir estuvo un tiempo en Copenhague, con Niels Bohr. Cuenta en su autobiografía la anécdota de que, a fin de convencer a sus padres en Holanda de que Bohr era una persona importante, les dijo que al escribirle a Dinamarca bastaba con que pusieran en el sobre "Hendrik Casimir c/o Niels Bohr", sin más dirección o seña. Así lo hicieron y la carta llegó puntualmente desde Holanda a manos de Casimir, y en muy pocos días. Tal era la influencia de los físicos en aquella época. Tras doctorarse, Casimir trabajó como asistente de Wolfgang Pauli en Zúrich. Y en 1938 se convirtió en profesor de física de la Universidad de Leiden. En 1942 se trasladó a los Laboratorios de Investigación de la empresa Philips en Eindhoven. Allí siguió ejerciendo como científico activo y en 1945 escribió un trabajo que se hizo famoso sobre el principio de Onsager de la reversibilidad microscópica. En 1946 se convirtió en codirector de los Laboratorios de Investigación de Philips y en miembro de su cuerpo de directores en 1956. Falleció el 4 de marzo de 2000.



FAX 343 280 6393

Prof. Dr. Emilio Elizalde
IEEC Research Division

Dear Doctor Elizalde

The Conference on Frontiers of Science and Medicine originally planned by the Unesco Venice Office to be held at Barcelona 21–23 Sept. 1998 was postponed.

To the best of my knowledge a new date has not been fixed.

In any case I shall probably not take part. My movements are increasingly ~~[illegible]~~ impaired and my talk at Leipzig may turn out to have been my last appearance in public.

My book is completely sold out, but I shall mail you a photo-copy

Best wishes for 1999
Sincerely
H.B.G. Casimir

CARTA MANUSCRITA DE CASIMIR, donde responde a una invitación que le había cursado para visitar el Instituto ICE/IEEC, en Barcelona, en 1999. Por desgracia, la visita ya no pudo tener lugar. Casimir afirma en la carta que una conferencia que había impartido en Leipzig quizás iba a ser su última aparición en público.

Resulta curioso que en su autobiografía Casimir apenas haga referencia al efecto que lleva su nombre. Se limita a decir que el fenómeno "es mencionado a veces con el nombre de efecto Casimir", que su existencia "se ha comprobado experimentalmente" y que "sus generalizaciones han resultado tener cierta importancia teórica". En 1951, hallándose con Pauli participando en una conferencia en Heidelberg, trató de hacerle entender a éste la realidad de dicho efecto. Pauli no dejaba de plantearle objeción tras objeción, hasta que, por fin, viendo que Casimir seguía empecinado en sus argumentos, Pauli le llamó, y por varias veces, *Stehaufmanderl*, acepción fuerte de terco o cabezota en el alemán de Suiza y que literalmente significa tentetieso. Baste esa anécdota para poner de manifiesto que no resulta nada sencillo comprender el efecto Casimir.

campo se anule sobre todos los puntos del espacio donde está la placa.

Obsérvese la diferencia entre teoría (modelo) y experimento (realidad material). Un campo escalar es una simple función, $\varphi(x)$, que toma un valor numérico en cada punto (un campo de números, como una sopa de números: en cada punto del plato tenemos un número). Imponer que se anule sobre una superficie (la de la placa), se hace fácilmente: basta escribir que $\varphi(s) = 0$, para todo punto s de la superficie. El cálculo subsiguiente de energías es también sencillo: se calcula la diferencia y se obtiene la perturbación de la energía del vacío producida por la placa. Aquí el vacío permanece inalterado, pues nos hemos limitado a imponer una simple condición de contorno sobre el campo. Y ahora viene la objeción, debida a Robert Jaffe y colaboradores, del Instituto de Tecnología de Massachusetts.

Desde el punto de vista de la teoría de campos cuánticos, la única manera de lograr en la realidad experimental que el campo φ se anule sobre una superficie S es por imposición sobre dicha superficie de otro campo que aniquile todos los modos del primero, correspondientes a sus infinitas frecuencias. Planteado así, resulta imposible: sólo conseguiremos anular frecuencias hasta un cierto valor. Hasta aquí ello sólo significa que cometeremos un error que habrá que tener en cuenta en el resultado final. Pero queda la segunda y demoledora objeción: al introducir un nuevo campo para aniquilar los modos de φ sobre S, estamos perturbando el vacío correspondiente a φ.

Esta objeción cuestiona que los experimentos de las fuerzas de Casimir pongan de manifiesto las fluctuaciones de la energía del vacío cuántico. No se afirma que la energía del vacío no exista; se limita a declarar que los experimentos llevados a cabo hasta la fecha son inadecuados para ponerlas de manifiesto. De hecho, el grupo dirigido por Jaffe ha presentado numerosos trabajos sobre el cálculo del efecto Casimir en muy diversas configuraciones y usando métodos e ideas que han revolucionado la disciplina. Mención especial merecen también las investigaciones anteriores de la escuela rusa de San Petersburgo, las del grupo de Schwinger con sus alumnos Boyer y Milton en EE.UU., las de Barton y colaboradores en el Reino Unido, y muchos más.

Por mor de la exhaustividad deberíamos mencionar algunas escuelas alternativas, en particular la que se originó en torno a Asim O. Barut, que propugnan la no necesidad de la "segunda cuantización" (la de los campos, en este caso el electromagnético, siendo la primera la de las partículas) y, de ahí, la no existencia de fluctuaciones del estado vacío, lo que sustituyen por una electrodinámica no lineal.

El efecto Casimir dinámico

Efectos de tipo Casimir pero con ingredientes adicionales aparecen también cuando se imponen al sistema condiciones de contorno dinámicas, como es el caso de espejos que vibran o de campos gravitacionales (u otros campos de fondo) que varían con el tiempo. Así, el desplazamiento repentino de una placa reflectante no es comunicado a un punto del vacío del campo situado a una distancia r de la placa hasta que transcurre un tiempo r/c (c, velocidad de la luz) y cálculos precisos muestran que se crea una radiación de fotones.

El "efecto Casimir dinámico" fue propuesto por Stephen Fulling y Paul Davies en 1976. Otro efecto de vacío de aproximadamente la misma época es el efecto Unruh-Davies: un detector o átomo desplazándose con aceleración uniforme, a, en el vacío respondería del mismo modo que si se hallase en reposo, pero con un baño térmico a una cierta temperatura, denominada "temperatura de Unruh", proporcional a la aceleración a. En este efecto, las fluctuaciones del vacío cuántico se transforman en fluctuaciones térmicas; una temperatura de un picokelvin (10^{-12} grados) corresponde a una aceleración de 2,5 10^{-8}m/s^2. La detección de este efecto queda fuera del alcance de la técnica actual.

En la proposición original de Davies y Fulling del efecto Casimir dinámico las placas son de nuevo, como en el efecto Casimir ordinario, espejos perfectos; reflejan todas las longitudes de onda incidentes. Aquí, una manifestación adicional de las fluctuaciones del vacío cuántico es la creación de fotones reales, una radiación real emitida por dicho vacío. Aunque este efecto es, como en el caso del efecto Unruh-Davies, muy difícil de medir experimentalmente, Roberto Onofrio y colaboradores, del Colegio Dartmouth, expusieron no hace mucho el diseño de un experimento a llevar a cabo en su laboratorio, que involucraría una amplificación atómica de la señal en 8 o 9 órdenes de magnitud.

Desde el trabajo de Fulling y Davies, numerosos grupos se han ocupado del efecto Casimir dinámico, cuya formulación teórica entrañaba una dificultad notable: el principio fundamental de conservación de la energía no se cumplía durante todo el proceso, aunque sí cuadraba el balance final de energías. La dificultad provenía del tratamiento de los infinitos con la consiguiente renormalización que hay que llevar a cabo. En un trabajo realizado en colaboración con Jaume Haro, de la Universidad Politécnica de Cataluña, publicado en septiembre de 2006, hemos conseguido resolver este problema.

Para probar la teoría, consideramos espejos parcialmente transmisores, transparentes a frecuencias muy elevadas, de manera que la transición del régimen de reflexión al de transparencia fuese infinitamente suave. Así hemos construido una formulación físicamente consistente del efecto Casimir dinámico, una teoría en que los espejos satisfacen condiciones mucho más ajustadas a la realidad.

Casimir y la energía oscura

Desde 1998 se sabe que la expansión del universo se acelera. ¿A qué se debe esta aceleración? Einstein introdujo en sus ecuaciones de la relatividad general un término, la constante cosmológica, para que entre las soluciones estuviese la correspondiente a un universo estacionario. Sin embargo, la constante cosmológica puede también hacer las veces de una fuerza repulsiva que acelere la expansión del universo. En 1968, Zeldovich relacionó la energía de punto cero y la constante cosmológica. Pero la densidad de energía del vacío a escala cosmológica da un valor demasiado grande, 120 órdenes de magnitud superior al deseado para explicar la expansión acelerada. Es la mayor discrepancia en toda la historia de la física: el problema de la constante cosmológica. Para resolverlo, se ha usado todo tipo de argumentos: supersimetría, agujeros de gusano, teoría de cuerdas, compactificaciones y extensiones analíticas diversas. Las explicaciones más plausibles utilizan el *principio antrópico*, lo que a algunos gusta poco.

En nuestro grupo estamos trabajando en dos modelos distintos para explicar esa "energía oscura". Uno es el ya mencionado de constante cosmológica, en el que ésta recibe las contribuciones de las fluctuaciones del vacío cuántico a escala cósmica. Con el signo adecuado podría llegar a explicar la aceleración observada pues, si se consigue resolver la parte *estándar* del problema —la correspondiente a una curvatura nula del universo—, el pequeño valor de la aceleración podría tal vez obtenerse de un efecto Casimir a nivel cosmológico, donde las *placas* serían ahora la curvatura o topología del propio espaciotiempo y la diferencia de energías se establece para los casos con curvatura no nula y curvatura nula. El efecto repulsivo (difícil de obtener) se logra en algunos modelos supersimétricos. La investigación continúa y nos mantendrá ocupados durante los próximos años. De estar en lo cierto, las fluctuaciones del vacío cuántico, tan magistralmente interpretadas por Casimir, podrían ser lo que propulsa a nuestro universo en su expansión acelerada.

Bibliografía complementaria

ESSENTIALS OF THE CASIMIR EFFECT AND ITS COMPUTATION. E. Elizalde y A. Romeo en *American Journal of Physics*, vol. 59, pág. 711; 1991.

THE QUANTUM VACUUM: AN INTRODUCTION TO QUANTUM ELECTRODYNAMICS. Peter W. Milonni. Academic Press; Boston, 1994.

THE CASIMIR EFFECT: PHYSICAL MANIFESTATIONS OF ZERO-POINT ENERGY. K. A. Milton. World Scientific; Singapore, 2001.

NEW DEVELOPMENTS IN THE CASIMIR EFFECT. M. Bordag, U. Mohideen y V. M. Mostepanenko en *Physics Report*, vol. 353, n.º 1-3, págs. 1-205; Elsevier, 2001.

PROCEEDINGS QFEXT'05. Editado por E. Elizalde, S. D. Odintsov en *Journal of Physics A*, vol. 39, n.º 21; mayo, 2006.

HAMILTONIAN APPROACH TO THE DYNAMICAL CASIMIR EFFECT. J. Haro y E. Elizalde en *Physical Review Letters*, vol. 97, pág. 130401; 2006.

MEASURED LONG-RANGE REPULSIVE CASIMIR-LIFSCHITZ FORCES. J. N. Munday, F. Capasso y V. A. Parsegian en *Nature*, vol. 457, pág. 170; 2009.