

EL Orden SECRETO DEL Desorden

Cómo las fluctuaciones gobiernan
la materia

Néstor Manuel de los Santos López

Marco Antonio Ramírez Guízar

El mundo nunca está quieto: desde la brisa que cambia de dirección hasta las partículas que vibran en un líquido, todo fluctúa.

En el vacío cuántico, esas variaciones generan la sorprendente fuerza de Casimir. A escalas mayores, en los coloides las fluctuaciones del fluido también inducen atracciones entre partículas, con aplicaciones prácticas como la purificación de líquidos.

Las fluctuaciones, lejos de ser ruido, son un motor oculto de organización en la naturaleza.

Suele decirse que el mundo está en *constante cambio*.

Si uno se detiene en un campo abierto, puede sentir que no hay viento o que sopla en una dirección fija. Sin embargo, de repente aparece una brisa en otra dirección, y luego otra más.

Estos pequeños cambios respecto a lo “normal” o “promedio” se llaman **fluctuaciones**: variaciones temporales alrededor de un valor esperado.

Así como las percibimos en la vida cotidiana, las fluctuaciones también gobiernan el mundo microscópico. Y en esas escalas pueden generar fuerzas sorprendentes.

En el reino cuántico existe un fenómeno famoso:

E F E C T O C a s i m i r

El vacío, lejos de ser un espacio vacío, está lleno de fluctuaciones cuánticas. Si colocamos dos placas metálicas muy cercanas en este vacío, estas fluctuaciones ya no pueden manifestarse libremente: las placas imponen condiciones muy estrictas, obligando a que el campo electromagnético entre ellas solo pueda vibrar en ciertos modos o frecuencias.

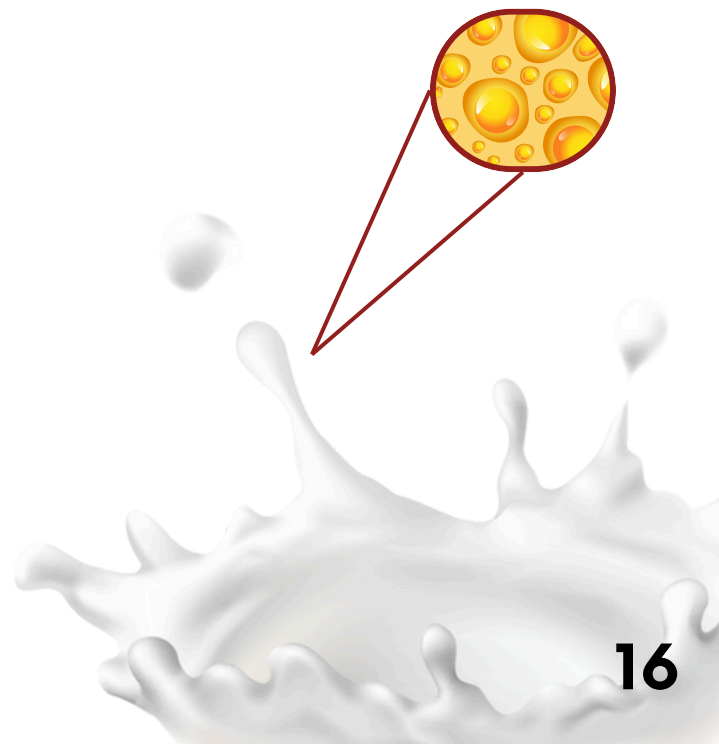
En otras palabras, el vacío que parecía fluctuar sin restricciones se ve de repente “organizado” por la presencia de las placas. El resultado es sorprendente: aparece una fuerza de atracción entre ellas, una fuerza que nace, literalmente, de la nada.

Pero, **¿Ocurren fuerzas similares fuera del mundo cuántico?**

La respuesta es **sí**, y la encontramos en la escala micrométrica, miles de veces más pequeña que un milímetro.

Aquí viven los coloides: partículas diminutas suspendidas en un líquido, demasiado pequeñas para caer por gravedad.

Un ejemplo cotidiano es la leche, donde gotas microscópicas de grasa flotan en agua. En lugar de hundirse o flotar pasivamente, se desplazan de manera errática en todas direcciones, como si participaran en un baile caótico y eterno



Este movimiento aleatorio de las partículas microscópicas en un fluido recibe el nombre de **Movimiento Browniano**, en honor al botánico Robert Brown, quien en 1827 observó al microscopio cómo granos de polen suspendidos en agua se agitaban sin cesar, sin causa aparente.



Hoy sabemos que esa danza incesante surge porque las diminutas partículas coloidales son golpeadas constantemente por las moléculas del líquido que las rodea. Aunque cada molécula es invisible y ligera, su número es tan grande que el bombardeo nunca se detiene.

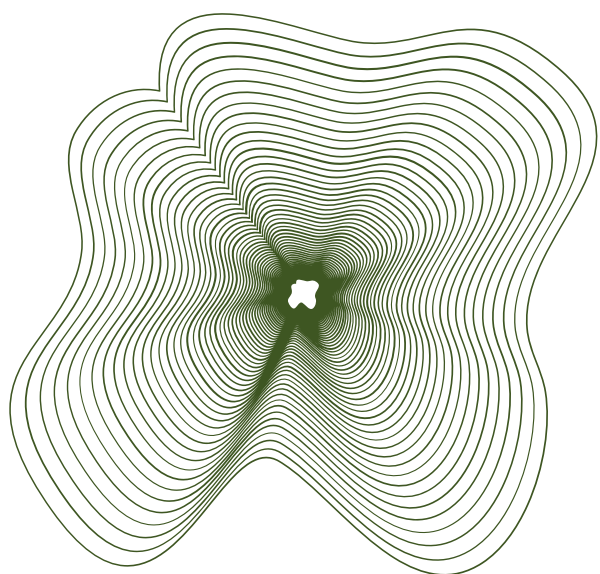
Así, el Movimiento Browniano es una expresión directa de las fluctuaciones térmicas en un fluido. Y justamente esas fluctuaciones, las mismas que en el vacío cuántico generan las fuerzas de Casimir, son las que, en los coloides, pueden dar lugar a interacciones colectivas inesperadas.

Si el líquido es una mezcla de dos componentes, llamémoslos A y B, las partículas coloidales pueden tener afinidad por uno de ellos. Cerca de la superficie de una partícula “amiga” del componente A, la densidad de A será mayor que la de B. Pero esa densidad nunca es fija: fluctúa. Eso sí, fluctúa con restricciones: siempre habrá más A que B.

Una buena analogía es la naturaleza: las flores “atraen” a las abejas. Aunque una abeja podría alejarse y volar en otra dirección, casi siempre la encontraremos alrededor de una flor. Del mismo modo, no veremos muchas abejas en un lugar sin flores. Así, igual que las flores moldean el comportamiento de las abejas, las partículas coloidales moldean las fluctuaciones a su alrededor.

Lo fascinante es que estas restricciones en las fluctuaciones no solo afectan lo que ocurre justo en la superficie de una partícula, sino que también modifican la manera en que las fluctuaciones se propagan por el espacio.



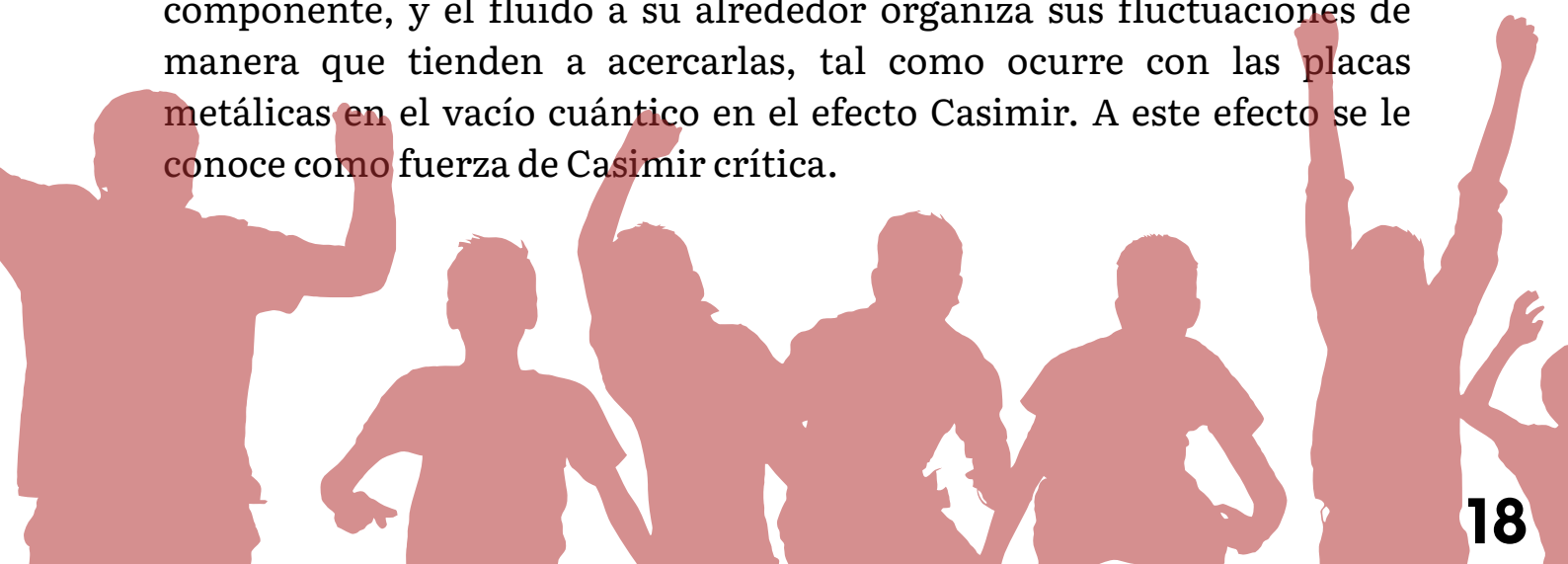


Imaginemos una partícula que tiene afinidad por el componente A de la mezcla. En su vecindad inmediata se acumula más A de lo normal. Ahora bien, esa acumulación local no ocurre en el vacío: como la cantidad total de A y B es finita, si en una región aumenta la concentración de A, en otra necesariamente disminuye. Por lo tanto, la fluctuación inicial genera una especie de “onda” que se transmite hacia afuera, debilitándose poco a poco hasta apagarse.

Para entender este efecto, necesitamos una idea clave: la correlación entre fluctuaciones. Imaginemos un estadio de fútbol. En un momento del partido, un grupo de personas decide levantarse y alzar los brazos para iniciar una ola.

Los espectadores cercanos responden y hacen lo mismo, y luego los que están junto a ellos, y así sucesivamente. El movimiento se transmite como una señal colectiva que viaja por todo el estadio. Sin embargo, llega un punto en que la ola se detiene: quizá porque el público más lejano no quiso participar o perdió el ritmo. Este ejemplo ilustra lo que llamamos correlación: lo que ocurre en un lugar influye en lo que sucede más lejos, hasta que el efecto se apaga.

Lo interesante sucede cuando hay otra partícula afín al componente A en las cercanías. La fluctuación inducida por la primera partícula “viaja” y alcanza a la segunda. Entonces, en torno a esta segunda partícula también se refuerza la acumulación de A. En términos simples, ambas partículas “coinciden” en preferir el mismo componente, y el fluido a su alrededor organiza sus fluctuaciones de manera que tienden a acercarlas, tal como ocurre con las placas metálicas en el vacío cuántico en el efecto Casimir. A este efecto se le conoce como fuerza de Casimir crítica.



El nombre crítico proviene de que esta atracción aparece únicamente cuando el fluido se encuentra cerca de un punto crítico de fase, es decir, en condiciones muy especiales de temperatura y composición donde las fluctuaciones de densidad se hacen enormes y se propagan a larga distancia. En ese estado, el sistema está tan “sensible” que un pequeño cambio local repercute en regiones lejanas, creando correlaciones extendidas. Así, las partículas coloidales no solo sienten a sus vecinas inmediatas, sino que interactúan a través del desorden colectivo del fluido.

Para que esta atracción se manifieste con fuerza, las fluctuaciones deben ser:

1 Grandes: es decir, que la variación en la densidad no sea un simple temblor pasajero, sino un desorden de magnitud considerable.

2 Correlacionadas a larga distancia: lo que sucede en un punto del fluido debe tener repercusión en otro, incluso a cierta distancia. Si las fluctuaciones fueran completamente independientes entre sí, el efecto desaparecería muy rápido y no alcanzaría a conectar a las partículas.

En resumen, las partículas no “se hablan” directamente; es el propio fluido, a través de sus fluctuaciones restringidas y correlacionadas, el que transmite la información y genera la atracción.

Este “orden a partir del desorden” tiene aplicaciones muy prácticas. Muchos contaminantes líquidos están formados por partículas coloidales. Si logramos que estas se atraigan entre sí, podrían agruparse en cúmulos que luego sedimenten y puedan retirarse con facilidad [4]. Así, una fuerza invisible nacida de las fluctuaciones se convierte en una herramienta de purificación. Sin embargo, es interesante explorar la posibilidad de diseñar interacciones controladas a escala microscópica. En nanotecnología, esto permitiría crear materiales donde las partículas se auto organicen de forma precisa. En biomedicina, podría servir para dirigir fármacos, aprovechando las fluctuaciones como herramienta en lugar de verlas solo como ruido.

Todo esto nos lleva a una conclusión sorprendente:

la clave parece estar en el desorden, variaciones que se propagan en todo el espacio pero que deben respetar ciertas restricciones locales.

¿Podrían existir fenómenos semejantes a escalas aún mayores, incluso cósmicas?

Tal vez fluctuaciones en la materia o la energía del universo influyan en cómo se forman cúmulos de galaxias. Es una posibilidad abierta, y una muestra de que las fluctuaciones, lejos de ser un simple ruido, son motor de organización en la naturaleza.



El universo está, y estará siempre, en constante cambio.
Y aunque hoy comprendemos algunos de los efectos que nacen de ese
desorden, muchas preguntas siguen sin respuesta.
Porque, como decía Voltaire:

“La duda no es placentera, pero la certeza es absurda.”



REFERENCIAS

- [1] Hendrik B. G. Casimir. On the attraction between two perfectly conducting plates.
• Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen, 51:793–795, 1948
<https://www.mit.edu/~kardar/research/seminars/Casimir/Casimir1948.pdf>
 - [2] Robert Brown. A brief account of microscopical observations made in the months of june, july and august 1827, on the particles contained in the pollen of plants; and on the generalexistence of active molecules in organic and inorganic bodies. Philosophical Magazine, 4(21):161–173, 1828.
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14786442808674769>
 - [3] C. Hertlein, L. Helden, A. Gambassi, S. Dietrich, and C. Bechinger. Direct measurement of critical casimir forces. Nature, 451:172–175, 2008. <https://www.nature.com/articles/nature06443>
 - [4] José Ramón Villanueva-Valencia, Hongyu Guo, Ramón Castañeda-Priego, and Yun Liu. Concentration and size effects on the size-selective particle purification method using the critical casimir force. Physical Chemistry Chemical Physics, 23(7):4404–4412, 2021.
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2021/cp/d0cp06136k>
- 