

Fuerzas inducidas por fluctuaciones en sistemas fuera del equilibrio

José María Ortiz de Zárate*
 Departamento de Física Aplicada I
 Universidad Complutense
 28040-Madrid

Fuerzas inducidas por fluctuaciones son comunes en la naturaleza¹. Prototipo de ellas es la bien conocida fuerza de Casimir, que aparece entre placas conductoras de la electricidad debido a las fluctuaciones cuánticas del campo electromagnético² (EM). En este caso, la escala de energía está dada por la constante de Planck, \hbar , y la fuerza por unidad de área, o presión, es

$$p_{EM} = -\frac{\pi^2 \hbar c}{240L^4}, \quad (1)$$

donde L es la distancia entre placas, c la velocidad de la luz, y donde el signo menos indica que la fuerza es atractiva. Otro tipo relativamente conocido son las fuerzas inducidas por fluctuaciones térmicas, para las que la escala de energía es $k_B T$, con k_B la constante de Boltzmann y T la temperatura¹. Estas fuerzas de origen térmico son importantes cuando las fluctuaciones poseen correlaciones espaciales de largo alcance, lo que hace que su intensidad dependa del tamaño del sistema. El primer ejemplo de este tipo de fuerzas fue descrito por Fisher y de Gennes, al estudiar correcciones de tamaño finito a la energía libre de un fluido cerca de su punto crítico³. En ese caso, se encuentra una fuerza por unidad de área, a la que se suele denominar presión de Casimir crítica, p_c , que viene dada por⁴

$$p_c = \frac{k_B T}{L^3} \Theta(L/\xi), \quad (2)$$

con $\Theta(x)$ es una función de escala y ξ la longitud de correlación. Para predicciones concretas se define una amplitud de Casimir, $\Delta = \lim_{x \rightarrow 0} \Theta(x)$, que para la clase de universalidad de Ising varía desde -0.01 hasta $+2$ dependiendo de las condiciones de contorno⁵. Nótese que para L suficientemente grande, $|p_c| > |p_{EM}|$. Asimismo, fuerzas inducidas por fluctuaciones térmicas se han predicho en sistemas en equilibrio más complejos, en los que existen modos Goldstein, como el helio superfluido o los cristales líquidos¹. También en fluidos confinados, donde la función de correlación de las fluctuaciones de la velocidad depende del tamaño del sistema⁶.

Está hoy en día bien establecido que, debido a efectos de acoplamiento entre modos, las fluctuaciones térmicas en fluidos fuera del equilibrio poseen correlaciones de largo alcance espacial, lo que hace que su intensidad dependa del tamaño del sistema. El problema más estudiado es el de un fluido en reposo sometido a un gradiente uniforme de temperaturas⁷, ∇T . Los efectos de tamaño finito, cuando el gradiente se establece confinando el fluido entre dos placas a distinta temperatura separadas una distancia L , han sido tratados en detalle⁸.

Recientemente⁹, en colaboración con otros colegas, hemos demostrado que el largo alcance espacial de las fluctuaciones de no-equilibrio induciría presiones de tipo Casimir, que dependen del tamaño L de confinamiento. Específicamente, para el caso de condiciones de contorno *free-slip*, obtuvimos una expresión analítica para la presión media generada por las fluctuaciones de no-equilibrio, en el orden más bajo⁹

$$p_{NE} = \frac{c_p k_B T^2 (\gamma - 1)}{96\pi D_T (\nu + D_T)} L \left(\frac{\nabla T}{T} \right)^2. \quad (3)$$

Aquí c_p es el calor específico isobárico, γ el índice adiabático, α el coeficiente de expansión térmica, ν la viscosidad cinemática y D_T la difusividad térmica. Se observa que esta presión inducida aumenta proporcionalmente a L , un comportamiento anómalo debido al extremadamente largo alcance espacial de las fluctuaciones de no-equilibrio. Si se fija la diferencia de temperatura ΔT entre placas, la presión inducida disminuye como L^{-1} . En cualquier caso, para L suficientemente grande, p_{NE} podría ser más importante que p_{EM} o p_c .

Najafi y Golestanian¹⁰ han estudiado presiones inducidas de no-equilibrio, pero sólo considerando ruido inhomogéneo, no acoplamiento de modos. Wada y Sasa¹¹ presiones anómalas en el caso de un fluido isoterma que está fuera de equilibrio por flujo.

* jmortizz@fis.ucm.es

¹ M. Kardar, R. Golestanian, Rev. Mod. Phys. **71**, 1233 (1999).

² H.B.G. Casimir, Koninklijke Nederlandse Akad. Wetenschappen **851**, 793 (1948).

³ M.E. Fisher and P.G. de Gennes, C.R. Acad. Sc. Paris B **287**, 207 (1978).

⁴ A. Gambassi, C. Hertlein, L. Heiden, S. Dietrich, and C. Bechinger, Europhysics News **40**, 18 (2009).

⁵ M. Krech, J. Phys. Condens. Matter **11**, R391 (1999).

⁶ R.B. Jones, Physica **105A**, 395–146 (1981)

⁷ T.R. Kirkpatrick, E.G.D. Cohen, and J.R. Dorfman, Phys. Rev. A **26**, 995 (1982). D. Ronis and I. Procaccia, Phys. Rev. A **26**, 1812 (1982).

⁸ J.M. Ortiz de Zárate, R. Pérez Cordón, and J.V. Sengers, Physica A **291**, 113 (2001). J.M. Ortiz de Zárate and J.V. Sengers, Hydrodynamic Fluctuations in Fluids and Fluid Mixtures (Elsevier, Amsterdam, 2006).

⁹ T.R. Kirkpatrick, J.M. Ortiz de Zárate and J.V. Sengers, Phys. Rev. Lett. **110**, 235902 (2013). See also: <http://arxiv.org/abs/1401.1339>

¹⁰ A. Najafi and R. Golestanian, Europhys. Lett. **68**, 776 (2004).

¹¹ H. Wada and S. Sasa, Phys. Rev. E **67**, 065302(R) (2003)