

Los fluidos relativistas y la filosofía de la ciencia

Relativistic fluids and the philosophy of science

Dominique Brun-Battistini¹ 

Departamento de Física y Matemáticas, Universidad Iberoamericana,
Ciudad de México, México

Resumen. Se describe el cambio en un paradigma dentro de las investigaciones realizadas en el campo de la hidrodinámica relativista desde el punto de vista de la teoría cinética, referente fundamentalmente al uso de una ecuación constitutiva diferente. Se relata los obstáculos, esto es, la oposición a la novedad en el mundo académico internacional, haciendo notar que los preceptos de la filosofía de la ciencia de Kuhn y Latour, entre otros, están más vigentes que nunca.

Palabras Clave. Relatividad, Filosofía de la Ciencia, Ley de Tolman.

Abstract. The change in a paradigm is described within the investigations carried out in the field of relativistic hydrodynamics from the point of view of kinetic theory, referring mainly to the use of a different constitutive equation. The obstacles, that is, the opposition to the novelty in the international academic world, are reported, noting that the precepts of the philosophy of science of Kuhn and Latour, among others, are more current than ever.

Keywords. Relativity, Philosophy of Science, Tolman's Law.

Como citar. D. Brun-Battistini, "Los fluidos relativistas y la filosofía de la ciencia", *Jou. Cie. Ing.*, vol. 13, no. 2, pp. 24-28, 2021. doi:10.46571/JCI.2021.2.2

Recibido: 04/06/2021 **Revisado:** 11/10/2021 **Aceptado:** 06/12/2021

1. Introducción

El estudio de la dinámica de un fluido relativista² (y de uno clásico) básicamente comprende la solución de un sistema de tres ecuaciones de balance: ecuación de continuidad (no se crean ni se destruyen moléculas de fluido), ecuación de balance de ímpetu y de balance de energía³. Con este sistema de ecuaciones se tienen cinco ecuaciones con seis incógnitas, donde la ecuación adicional necesaria para resolver el sistema es una ecuación de estado. En el caso de un fluido relativista simple (una sola especie), no degenerado (despreciando efectos cuánticos) y con efectos disipativos, se encuentra en la literatura, que al usar incógnitas como la velocidad, la temperatura

¹ e-mail: dominique.brun@ibero.mx

² Aquel cuyas moléculas se mueven a velocidades cercanas a la de la luz; por tanto, se trata de un fluido a alta temperatura (10^6 K).

³ En el caso relativista se tiene la de continuidad y la de balance del tensor energía-momentum, de esta última pueden desprenderse una para el momentum y otra para la energía.

y la densidad de partículas, al menos tres ecuaciones de estado relacionan el flujo de calor con diferentes variables.

En 1940, Eckart propuso el flujo de calor dependiente del gradiente de temperatura y de la aceleración hidrodinámica de las moléculas del fluido [1]. Los cálculos muestran que, al utilizar el flujo de calor de Eckart, las soluciones obtenidas no son estables, esto es, divergen. La termodinámica extendida propone un flujo de calor (Maxwell-Cattaneo) [2] con parámetros ajustables. El flujo de calor de Maxwell-Cattaneo, hereda la problemática de la termodinámica extendida, por cuestiones de espacio no se expone aquí.

El grupo de trabajo formado por científicos de la Universidad Autónoma Metropolitana y de la Universidad Iberoamericana, propone un flujo de calor, completamente deducido de la teoría cinética, acoplado con los gradientes de temperatura y de densidad de partículas. Este flujo de calor denominado “Eckart modificado” conduce a soluciones estables [3,4].

Hasta este punto, todo parece indicar que esta propuesta de ecuación de estado, es a todas luces estable, a diferencia de la que hasta ahora se utilizaba, en términos de la teoría cinética (obtenida de primeros principios). Al presentarlo en eventos académicos, surge la suspicacia ¿Qué sucede entonces? ¿Por qué no empezar a trabajar con ella y estar así más cerca del control de un fluido a alta temperatura (como el que se encuentra en los reactores nucleares)? Cito a Bowler, filósofo de la ciencia “no es válida la afirmación de objetividad total de ningún bando” [5]: Los dos bandos referidos serían el grupo latinoamericano (que fue mencionado como “disidente” en un artículo publicado por N. Andersson, de Gran Bretaña) y la comunidad, especialmente, de físicos que usan la termodinámica extendida. Kuhn [6] reitera esta afirmación: si se le pide a un grupo de personas que, con los mismos criterios (digamos, los fundamentos físicos), identifiquen el paradigma ganador, puede ser que no se decidan por el mismo.

2. Desarrollo

Al presentar la nueva ecuación constitutiva en foros académicos, de manera sistemática se hacían tres preguntas: ¿Qué sucede con la causalidad? ¿Se produce entropía? ¿Qué sucede con la ley de Tolman? Preguntas que se fueron respondiendo con publicaciones científicas de alto impacto.

La causalidad (o principio de antecendencia) establece que las causas siempre anteceden a los efectos. Al nivel del régimen de Euler se demuestra mediante un cálculo algebraico, que el sistema de ecuaciones linealizadas ⁴ se comporta de manera hiperbólica, esto es, el fenómeno se propaga con una velocidad finita. Para esto resulta clave no despreciar las fluctuaciones en la velocidad [8]. En la ecuación (1) se aprecia la ecuación (hiperbólica) para las fluctuaciones en densidad, este resultado es análogo al de las fluctuaciones en temperatura y en la divergencia de la velocidad:

$$\frac{\partial^2 (\delta n)}{\partial t^2} - \frac{n_0 k_B T_0}{\tilde{p}_0} \left(\frac{k_B}{c_v} + 1 \right) \nabla^2 (\delta n) \quad (1)$$

Con la finalidad de analizar la causalidad en el caso del régimen de Navier Stokes, se hace uso del espectro de Rayleigh-Brillouin (ver figura 1). Este espectro -no relativista- fue predicho por primera vez en 1934 [9] y observado experimentalmente en 1966 [10]. Consiste en un pico central (el pico de Rayleigh) y dos picos secundarios (los picos de Brillouin) que se forman debido a un efecto Doppler que tiene lugar en la luz dispersada de los modos acústicos.

A través de la ecuación de dispersión, se observa que el fenómeno se propaga con una velocidad finita menor o igual a la de la luz (c), lo que se puede visualizar como un cono de luz que restringe estos valores permitidos, esto se puede representar como un cono de luz en el dominio de la frecuencia, con regiones permitidas y prohibidas, las permitidas son aquellas que derivan

⁴ El sistema de ecuaciones se conforma por la ecuación de continuidad, la de balance de ímpetu y la de conservación de la energía.

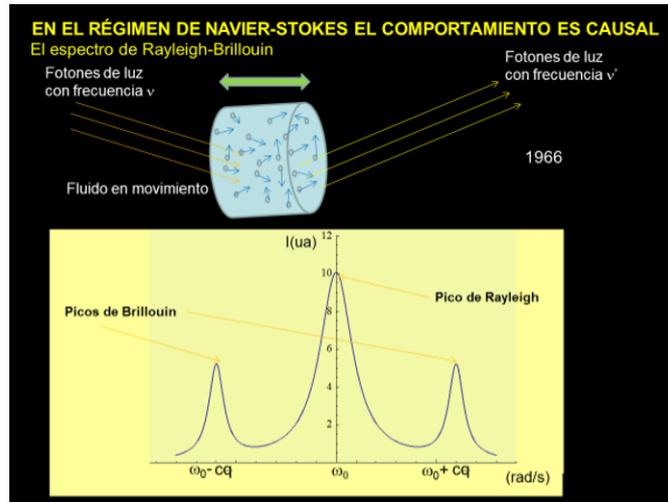


Figura 1: El espectro de Rayleigh-Brillouin.

de una rapidez de propagación menor a c ; es decir, si $v > 2cq$ (con q el número de onda) implica que la rapidez de propagación de la fluctuación es mayor la rapidez de la luz, las frecuencias permitidas deberán estar contenidas en el cono [11] (véase figura 2). Si se usa el flujo de calor de Eckart no modificado se presentan soluciones no causales, aún más, el formalismo de Eckart no predice la generación del espectro de Rayleigh-Brillouin.

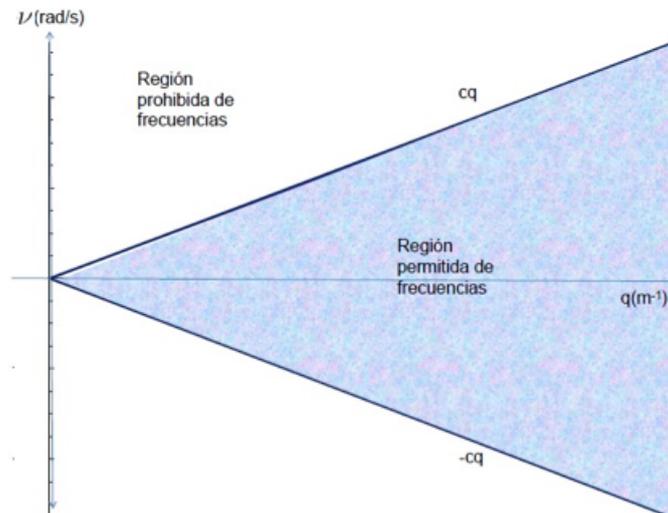


Figura 2: Cono de frecuencias en dos dimensiones, delimitado por la rapidez de la luz, que presenta las regiones de frecuencias prohibidas y permitidas. Si la rapidez de propagación es menor a la rapidez de la luz, la frecuencia asociada está permitida (su valor se encuentra dentro del cono); en caso contrario, se encuentra fuera.

Richard C. Tolman demostró [12], valiéndose de argumentos fenomenológicos y termostáticos, que un campo gravitacional linealizado puede equilibrar un gradiente de temperatura con la finalidad de lograr el equilibrio térmico.

El análisis donde se presenta que el flujo de calor puede generarse por un gradiente de temperatura, igual que en el caso no relativista, pero también por un gradiente de densidad y por

un gradiente de un potencial gravitacional fue reportado en la literatura [13]. La presencia de un campo gravitacional genera un flujo de calor cuando las temperaturas son lo suficientemente altas como para generar efectos relativistas. La ecuación (2) resume este importante resultado:

$$J_{[Q]}^\alpha = -h_\mu^\alpha \left(L_{TT} \frac{T^{,\mu}}{T} + L_{nT} \frac{n^{,\mu}}{T} + L_{gT} g^\mu \right), \quad (2)$$

donde L_{TT} , L_{nT} y L_{gT} son coeficientes que se definen en [13], multiplicados cada uno por los gradientes de la temperatura, de la densidad y del potencial gravitacional.

Finalmente, respondiendo a la pregunta de qué sucede con la producción de entropía, también se demuestra que el campo gravitacional presenta, a su vez, una contribución en ella [14, 15].

Utilizando nuevamente el flujo de calor de Eckart modificado, en el régimen de gravedad linealizada, se encontró que la producción de entropía depende de tres fuerzas termodinámicas: gradiente del potencial gravitacional, de la densidad de partículas y de la temperatura, que se observa en la ecuación (3).

$$\sigma = -k_B J_{[Q]}^l \left[\left(\frac{1}{zc^2 G \left(\frac{1}{2}\right)} \right) \varphi^l - \frac{1}{G \left(\frac{1}{2}\right)} \frac{n_{,l}}{n} + \left(\frac{1}{z} - \frac{1}{G \left(\frac{1}{z}\right)} \right) \frac{T_{,l}}{T} \right] \quad (3)$$

La expresión para las dos primeras fuerzas termodinámicas son efectos relativistas y al tomar el límite clásico, se recupera la tradicional producción de entropía, dependiente del gradiente de la temperatura.

3. Observaciones Finales

Adicional a los casos aquí analizados y reportados en revistas especializadas, se ha dado continuidad al trabajo sobre situaciones y fenómenos bajo esta nueva óptica [16–18], mostrando que el uso de la ecuación constitutiva de flujo de calor “Eckart modificado” conduce a soluciones estables, causales y que predicen situaciones físicas observables o predichas numéricamente. Sin embargo, esto hizo cambiar la perspectiva de unos, pero no la de otros. Se necesitan más que conocimientos científicos para frenar estas barreras. Se necesita desarrollar habilidades de negociación, una característica fundamental para defender posturas (y presupuestos) científicas; es así como cabe recordar el punto de Bruno Latour [19]: “los científicos somos vendedores de ideas”. En esta situación, el grupo de investigación podría seguir las estrategias expuestas por Latour. La primera: “nosotros queremos lo que ustedes quieren”, parece claro que la comunidad científica no solo quiere sino necesita trabajar con ecuaciones que conduzcan a soluciones estables. Puede ser que esta primera estrategia no funcione, entonces Latour nos propone “Nosotros lo queremos, ¿por qué ustedes no?”, esta estrategia podría ser utilizada para atraer a los físicos de la termodinámica extendida que, aparentemente, no enfrentan el problema de la inestabilidad. Existen una serie de estrategias mediadoras que propone Latour, la meta es “volverse indispensable”, llegar a este punto es el ideal, pues el enfoque propuesto se habría vuelto indispensable para el desarrollo de aplicaciones y futuras investigaciones.

Referencias

- [1] Eckart, C., “The Thermodynamics of Irreversible Processes III: Relativistic Theory of the Simple Fluid”, *Phys. Rev.*, vol. 58, pp. 919–930, 1940.
- [2] D. Jou, J. Casas-Vazquez, G. Lebon; *Extended Irreversible Thermodynamics*, Springer 4th Ed., USA, 2010.
- [3] A. L. García-Perciante, L. S. García-Colín and A. Sandoval-Villalbazo, “Rayleigh-Brillouin spectrum in special relativistic hydrodynamics”, *Phys. Rev. E*, vol. 79, pp.066310, 2009.
- [4] A. Sandoval-Villalbazo, A. L. García-Perciante and L. S. García-Colín, “Relativistic transport theory for simple fluids to first order in the gradients”, *Physica A*, vol. 388, pp. 3765, 2009.
- [5] P. Bowler, Peter I. R. Morus, “Introducción: Ciencia, sociedad e historia”. En: *Panorama general de la ciencia moderna*. Madrid, Crítica: pp.20 - 21, 2007

- [6] T. Kuhn. *The nature and necessity of Scientific Revolutions*. University of Chicago Press, 1962.
- [7] D. Brun-Battistini, *Procesos de transporte vectoriales en la termodinámica irreversible relativista*, tesis doctoral, Universidad Iberoamericana, Ciudad de México, 2014.
- [8] D. Brun-Battistini, A. Sandoval-Villalazo y J. H. Mondragón-Suárez, “El flujo de calor en la Hidrodinámica relativista para gases diluidos: estabilidad y causalidad”, en *Cincuenta años de Física Estadística en México*; García-Colín, L. S. y del Río Correa, J. L., (Coord.), Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa, Colegio Nacional, México: 2011.
- [9] L. Landau y G. Placzek, “Structure of the Unshifted Scattering Line Phys.”, *Phys. Z. Sowjetunion*, vol. 5, p.172, 1934.
- [10] J. P. Boon y S. Yip, *Molecular Hydrodynamics*, Courier Corporation, 1991.
- [11] D. Brun-Battistini y A. Sandoval-Villalazo, “Light Cone analysis of relativistic first-order in the gradients hydrodynamics”. *AIP Conf. Proc.*, no. 1312, pp. 57-63, 2010.
- [12] R. C. Tolman, “On the weight of heat and thermal equilibrium in general relativity”, *Phys. Rev.* vol. 35, pp. 904-924, 1930; “Temperature equilibrium in a static gravitational field”, *Phys. Rev.*, vol. 36, pp. 1791-1798, 1930.
- [13] A., Sandoval-Villalazo, A. L. Garcia-Perciante y D. Brun-Battistini, “Tolman’s law in linear irreversible thermodynamics: a kinetic theory approach”, *Phys. Rev. D*, no. 86, pp.084015, 2012.
- [14] D. Brun-Battistini, A. Sandoval-Villalazo A. L. Garcia-Perciante, “Entropy production in simple relativistic fluids and its relation with Tolman’s law in Newtonian gravity”, *AIP Conf. Proc.* vol. 1578, no. 122 <http://dx.doi.org/10.1063/1.4862457>, 2014.
- [15] D. Brun-Battistini, A. Sandoval-Villalazo A. L. Garcia-Perciante, “Entropy Production in Simple Special Relativistic Fluids”, *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*, 2014.
- [16] A. L. García-Perciante, A. Sandoval-Villalazo L. S. García-Colín, “Benedicks effect in a relativistic simple fluid”, *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*, no. 38, pp.141, 2013.
- [17] J. H. Mondragón-Suárez, A. Sandoval-Villalazo y A. L. García-Perciante, “Structure formation in the presence of relativistic heat conduction: corrections to the Jeans wave number with a stable first order in the gradients formalism”, *Gen. Relativ. Gravit.*, no. 45, pp. 1805-1814, 2013.
- [18] J. H. Mondragon-Suarez y A. Sandoval-Villalazo, “Jeans instability analysis in the presence of heat in Eckart’s frame”, *Gen. Relativ. Gravit.*, no. 44, pp.139-145, 2012.
- [19] B. Latour, *Science in action: How to follow scientists and engineers through society*. Cambridge, Mass., Harvard University Press, 2001.

