

GOTAS DE AGUA Y NÚCLEOS ATÓMICOS

ARTURO MENCHACA ROCHA

George Gamow (1904-1968) fue un científico multifacético y gran divulgador de la física. A través de un peculiar personaje llamado el señor Tompkins, Gamow explicaba con didáctica extraordinaria la teoría de la relatividad, la fenomenología cuántica, la estructura nuclear y cómo ésta permite entender la energía de las estrellas. Estos son temas en los que él desarrolló modelos matemáticos pioneros.

Aquí me quiero referir a la teoría nuclear de Gamow (ver: *Proceedings of the Royal Society A126(803)632*, publicado en 1930) inspirada en el comportamiento de las gotas. El lector sabrá por experiencia que las gotas en estado de equilibrio son esféricas. El físicoquímico le dirá que eso se debe a la "tensión superficial". Se trata de un fenómeno asociado con la intensidad con que las moléculas del líquido se atraen entre sí. Ni el hielo, ni el vapor, forman estructuras esféricas. Sólo en su estado líquida el agua produce gotas. Al interior de una de ellas, las moléculas se atraen de tal manera que se mantienen juntas, pero no al grado de impedir que se desplacen. Al interior de la gota ese movimiento es aleatorio, pues no existe una dirección privilegiada. Sin embargo, aquellas moléculas que se acercan a la superficie de la gota sienten una fuerza neta que las regresa hacia el interior. Ésta es debida al potencial atractivo que generan sus compañeras en el interior, y a la ausencia de moléculas de agua más allá de la superficie exterior. Por otra parte, el llamado principio de mínima energía, consecuencia de la segunda ley de la termodinámica, dice que los sistemas físicos en equilibrio tienden a estar en su estado de mínima energía. En el caso de las gotas, la energía asociada al potencial atractivo antes mencionado es proporcional a la superficie de la gota. Cuando esta se encuentra en equilibrio la figura geométrica que adopta es aquella que minimiza la superficie, es decir, la esfera.

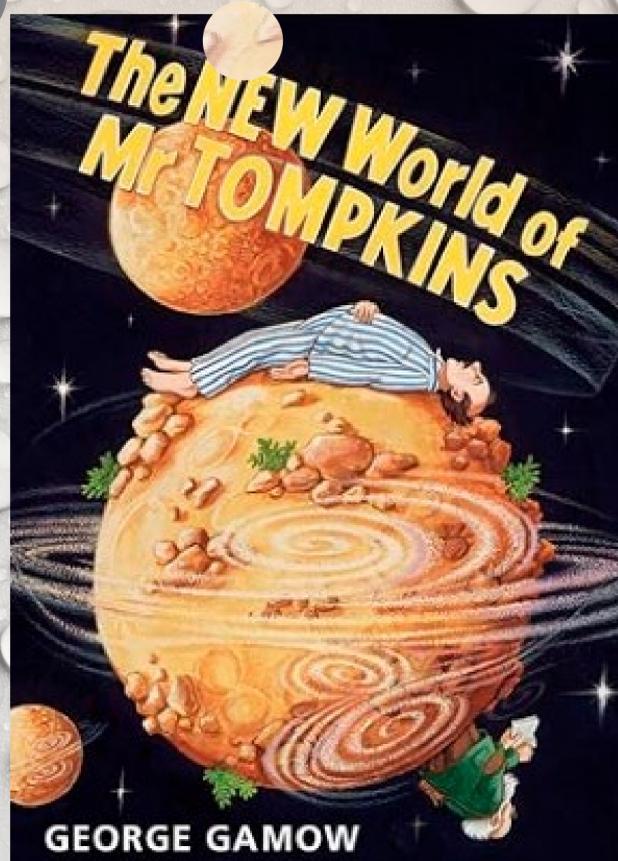


Fig. 1 Portada del libro *The NEW World of Mr. Tompkins*, de G. Gamow y R. Stannard, Cambridge University Press, 1999.



¿Esto qué tiene que ver con la forma de los núcleos atómicos? Fue Gamow quien primero se dio cuenta que la atracción entre los componentes de los núcleos, protones y neutrones (denominados genéricamente "nucleones"), se da en condiciones similares a la de las moléculas en las gotas. Es decir, la densidad interna, siendo alta, permite que los nucleones se muevan. Así, por tratarse de sistemas aislados, los núcleos estables también resultan ser esféricos,... o casi. El "casi" se debe a que en el núcleo operan fuerzas "perturbativas" debidas otros factores, entre ellos el hecho de que una fracción de los nucleones posee carga eléctrica positiva (los protones), reduciendo la atracción entre ellos. También influye un efecto cuántico, denominado "apareamiento", cuyo efecto es aumentar la atracción entre nucleones de un mismo tipo (neutrones o protones) cuyas funciones de onda se parezcan. Sin embargo, ignorando tales fuerzas perturbativas, la dinámica de las interacciones entre núcleos muestra similitudes importantes con el de las gotas, como para que el modelaje nuclear hidrodinámico exista como una herramienta valiosa en física nuclear. Cabe mencionar, sin embargo, que la hidrodinámica de colisiones entre gotas (incluso núcleos), es una fenomenología difícil de estudiar por involucrar aspectos turbulentos que escapan al modelaje matemático puramente analítico. Por tal razón, la fenomenología asociada a colisiones de gotas macroscópicas ha servido para visualizar la dinámica de colisiones nucleares. En lo que sigue mostraré algunos ejemplos en que se comparan ambas fenomenologías. Antes de proseguir, se debe aclarar que los expertos en mecánica de los fluidos utilizan variables llamadas "adimensionales" que les permite hacer comparaciones entre sistemas de dimensiones tan enormemente diferentes como lo nuclear y lo macroscópico. Como verán, los resultados resultan sorprendentes.

El llamado principio de mínima energía, consecuencia de la segunda ley de la termodinámica, dice que los sistemas físicos en equilibrio tienden a estar en su estado de mínima energía. En el caso de las gotas, la energía asociada al potencial atractivo antes mencionado es proporcional a la superficie de la gota. Cuando esta se encuentra en equilibrio la figura geométrica que adopta es aquella que minimiza la superficie, es decir, la esfera.



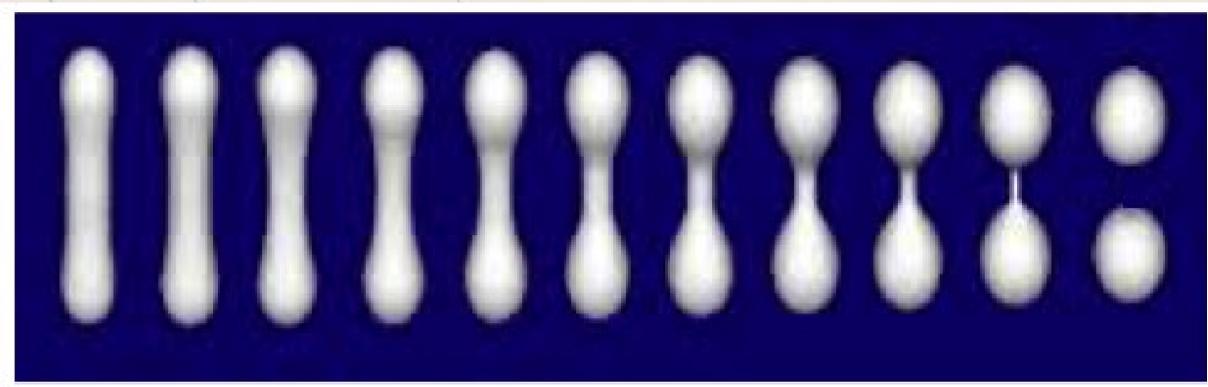


Fig. 2 Etapa final en la fisión de una gota de leche.

Un primer ejemplo es comparar los límites de momento angular que soporta una gota antes de fisionarse. Hemos dicho que una gota estable es esférica. Sin embargo, cuando a una gota se le hace rotar alrededor de un eje que pase sobre su centro, inicialmente sufre una deformación oblata, como una elipse que gira alrededor de su eje menor. Si se incrementa la velocidad de rotación, se rompe esa simetría, dando lugar a una deformación prolata, como una elipse que ahora gira sobre su eje mayor. A mayor velocidad, aparece una cintura en la parte central del prolato, transformándose poco a poco en una mancuerna, es decir, dos masas semiesféricas unidas por un cilindro delgado, que denominaremos el cuello.

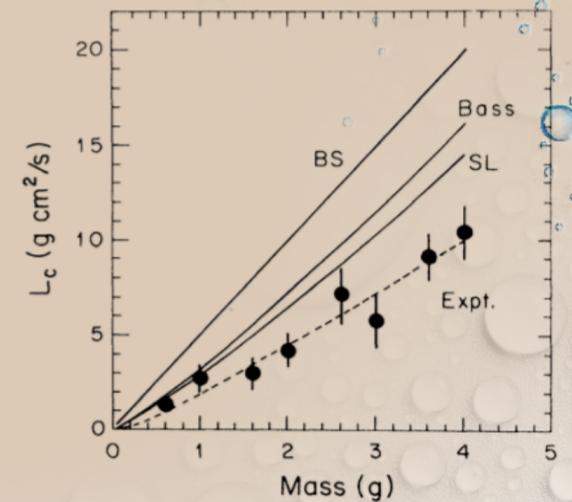
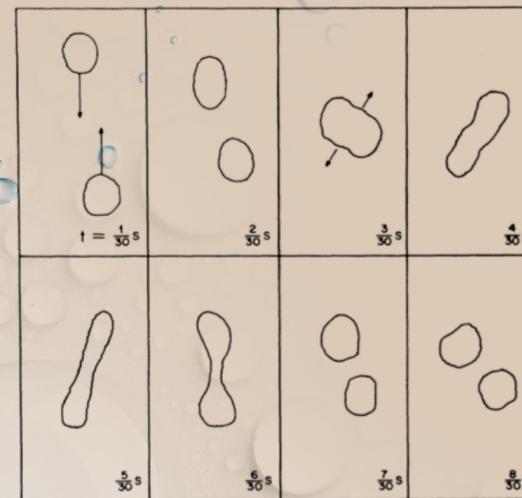
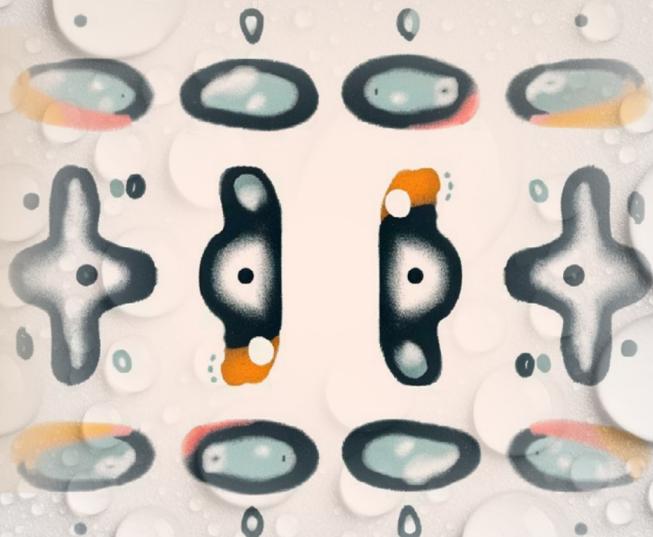


Fig. 3 Izquierda: Evolución del perfil de gotas de mercurio en colisión. Derecha: Momento angular límite L_c para la fisión de gotas, comparado con predicciones de modelos hidrodinámicos nucleares. Ver: A. Menchaca-Rocha et al. Physical Review E47(1993)1433.

En el límite, el cuello se adelgaza hasta que se rompe, liberando las masas. Ese límite, depende de las propiedades físicas del líquido: la densidad, la viscosidad y el coeficiente de tensión superficial. Cuando esas características son expresadas en términos de variables adimensionales, los límites de momento angular de una gota y de un núcleo deberían coincidir. Tal ejercicio fue realizado observando el colacionar de gotas de mercurio, y comparado con el reportando para materia nuclear, resultado la siguiente gráfica. (Figura 3)

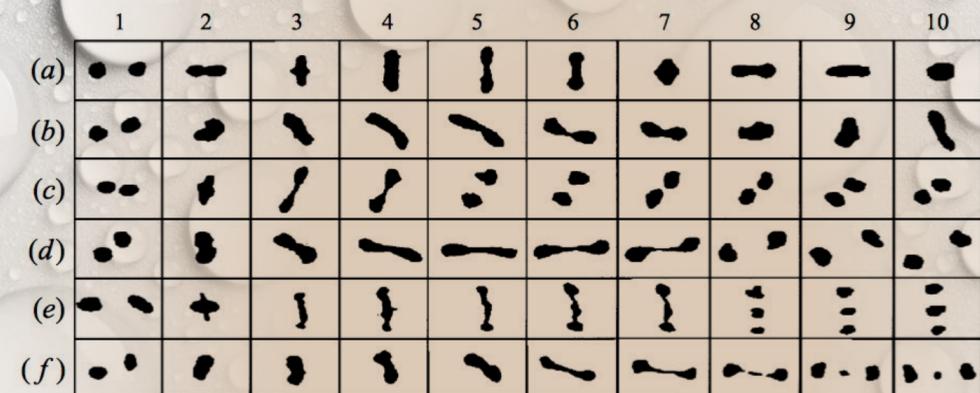


Fig. 4 Evolución de colisiones de gotas de mercurio para diversos parámetros de impacto: (a) colisión central ($L=0$); (b) con $L < L_c$; (c) y (d) con $L > L_c$; fisión ternaria: (e) central, y (f) periférica. Ver A. Menchaca-Rocha et al., Journal of Fluid Mechanics 346(1997)291

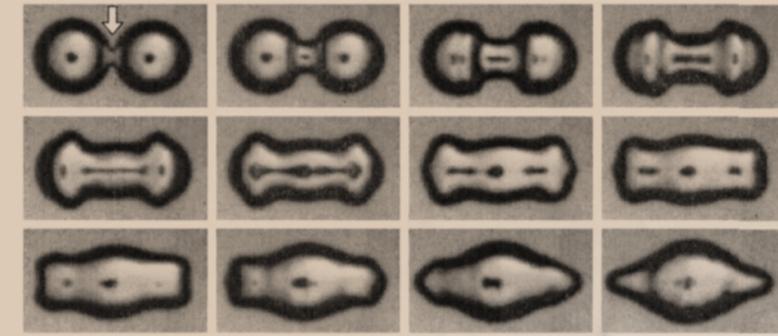




La dinámica involucrada en la fisión inducida por rotación que acabamos de describir permitió entender un fenómeno que en determinadas condiciones ocurre en física nuclear, la llamada fisión ternaria. Se trata de una fisión en que la dinámica deriva en un cuello lo suficientemente masivo como para que se le formen dos cuellos que lo unen con las masas en los extremos, formándose tres masas finales, en lugar de dos. Tal fenómeno, observado a nivel nuclear generó bastante interés hasta que sus descubridores descubrieron una publicación nuestra en que se muestra y analiza la dinámica. Es así como un artículo nuestro en el *Journal of Fluid Mechanics* me-

reció una cita en el *Physical Review C*, la sección de física nuclear de esa prestigiosa revista americana.

En el último ejemplo se estudió la dinámica de coalescencia de dos gotas de mercurio puestas en contacto tan lentamente que la dinámica es gobernada por la tensión superficial. En el caso nuclear, tal fenómeno ocurre para colisiones a energía menor o igual a la barrera coulombiana, en que el acercamiento entre los núcleos sea comparable al alcance de la fuerza fuerte. Este tema resulta importante en la síntesis de los llamados núcleos superpesados, es decir, aquellos con número atómico $Z > 103$ (siendo Z el número de protones). La motivación para su



● Fig. 5. Evolución temporal de la coalescencia de gotas de mercurio a velocidad despreciable. Ver: A. Menchaca-Rocha et al. *Physical Review*, E63(2001)046309.

estudio es la búsqueda de elementos estables con $Z \sim 126$, con el cual se cierra la última capa conocida para neutrones, lo cual ocurre en el ^{208}Pb , el núcleo estable más pesado que se conoce. A la fecha, el núcleo con $Z = 126$ no ha podido ser sintetizado, habiendo predicciones de que el último número mágico para protones sea tan pequeño como 114. Para concluir, este artículo sobre la fusión gobernada por tensión superficial mostró que dinámica involucrada es más compleja de lo predicho por las simulaciones nucleares hidrodinámicas. Esto se debe a la gran perturbación superficial que ocurre cuando dos gotas esféricas se tocan (ver flecha en el primer cuadro de la Fig. 5), pues en el punto de contacto ocurre una singularidad cuya descripción matemática involucra componentes de Fourier de muy alto grado, en principio, infinito. Este artículo también mostró que la fusión y la fisión no son procesos inversos en el tiempo.

Así que, como el lector podrá apreciar, se pueden hacer hallazgos relevantes para la física nuclear, jugando con gotas.



En el último ejemplo se estudió la dinámica de coalescencia de dos gotas de mercurio puestas en contacto tan lentamente que la dinámica es gobernada por la tensión superficial. En el caso nuclear, tal fenómeno ocurre para colisiones a energía menor o igual a la barrera coulombiana, en que el acercamiento entre los núcleos sea comparable al alcance de la fuerza fuerte.

