

(con biólogos, con otros físicos, con educadores...) y sumar son las dos guías del camino que sugerimos a quien pudiera interesarle. Además de eso, el equipo de este Proyecto pretende abrir una web piloto. Aunque nuestras fuerzas son limitadas, la receptividad a este artículo dará pistas sobre el interés que despierta en nuestro país el problema de las complejas al tiempo que apasionantes relaciones entre Física y Biología, y nos permitirá valorar la pertinencia de las propuestas realizadas.

La frontera entre la Física y la Biología es muy amplia y son múltiples los posibles niveles de actuación para lograr derribar la histórica barrera. Nuestro proyecto es solamente un pequeño grito en el cielo, una llamada a profesores y a estudiantes interesados en esa frontera para explorar la posibilidad de abrir un espacio de diálogo y apoyo mutuo. Y un llamamiento también a responsables institucionales de universidades y sociedades científicas (colegios profesionales de físicos y biólogos, la Real Sociedad Española de Física, las Sociedades Españolas de Biología...) para que tomen iniciativas que ayuden a resolver este importante reto de la Biología (y de la Física) del siglo xxi.

### Agradecimientos

Las propuestas que aquí se hacen han sido elaboradas por un equipo reunido con ese propósito e integrado por tres físicos senior y diez biólogos junior (cinco estudiantes de posgrado y cinco de grado). Nuestras conclusiones previas fueron debatidas con tres biólogos y tres físicos involucrados en la formación de futuros biólogos, ayudándonos a matizarlas: **Jesús Pérez Gil** (bioquímico y biofísico UCM), **Leonardo Cassano Maza** (fisiólogo vegetal UAH), **Begoña Fernández Calvin** (genetista UAM) y los físicos **Fernando Cussó Pérez** (UAM), **Miguel A. Hidalgo Moreno** (UAH) y **M. Cruz de Andrés García** (UCM). A todos ellos agradecemos sus aportaciones y su apoyo al Proyecto. No obstante, lo que aquí proponemos es de nuestra exclusiva responsabilidad.

### Referencias

- [1] H. VARMUS, "The impact of physics on biology and medicine", APS Centennial Meeting, Atlanta. *Physics World*, 12, 9, 27-31, 1999.
- [2] NATIONAL RESEARCH COUNCIL, Bio2010: *Transforming Undergraduate Education for Future Research Biologists* (The National Academies Press, Washington, DC, 2003). [http://www.nap.edu/catalog.php?record\\_id=10497](http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=10497)
- [3] NATIONAL RESEARCH COUNCIL, *A New Biology for the 21st Century* (The National Academies Press, Washington, DC, 2009). <http://www.nap.edu/catalog/12764/a-new-biology-for-the-21st-century>
- [4] CAROL A. BREWER y DIANE SMITH (eds.) *Vision and Change in Undergraduate Biology Education: A Call to Action* (AAAS, Washington DC, 2011). <http://visionandchange.org/finalreport/>
- [5] GORDON RESEARCH CONFERENCE ON PHYSICS RESEARCH AND EDUCATION, *The Complex Intersection of Biology and Physics* (South Hadley, MA, 2014). <https://www.grc.org/programs.aspx?id=12967>
- [6] Conference on Introductory Physics for the Life Sciences Report, AAPT (College Park, MD, 2015). <http://www.compadre.org/IPLS/documents/IPLS-Final-Report.pdf>
- [7] C. H. CROUCH, y K. HELLER, "Introductory physics in biological context: An approach to improve introductory physics for life science students", *Am. J. Phys.* 82, 378-386, 2014.
- [8] A. M. HOSKINSON *et al.*, "Bridging Physics and Biology Teaching through Modeling", *Am. J. Phys.*, 82, 5, 434-441, 2014.
- [9] *The AAPT Recommendations for the Undergraduate Physics Laboratory Curriculum*, 2014, [http://www.aapt.org/Resources/upload/LabGuidlinesDocument\\_EBendorsed\\_nov10.pdf](http://www.aapt.org/Resources/upload/LabGuidlinesDocument_EBendorsed_nov10.pdf)

- 
- [9] *The AAPT Recommendations for the Undergraduate Physics Laboratory Curriculum*, 2014, [http://www.aapt.org/Resources/upload/LabGuidlinesDocument\\_EBendorsed\\_nov10.pdf](http://www.aapt.org/Resources/upload/LabGuidlinesDocument_EBendorsed_nov10.pdf)
- 

## Efecto Leidenfrost en agua

**Carlos Tapia**  
Dpto. de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica II,  
Universidad Complutense de Madrid



**Juan P. G. Villaluenga**  
Dpto. de Física Aplicada I,  
Universidad Complutense de Madrid



Este trabajo presenta un experimento de física básica donde se muestran los distintos tipos de ebullición del agua a diferentes temperaturas de una forma muy sencilla, y fácilmente realizable en un laboratorio medio. El estudio se ha centrado en el efecto Leidenfrost que se produce cuando la temperatura de la placa donde se deposita el agua supera los 193°C. Este efecto está dominado por la formación de un colchón de vapor que suspende el agua y evita que se produzca una evaporación instantánea. El experimento se ha grabado en alta definición y se ha dejado en la red como recurso educativo.

### Introducción

¿Quién no recuerda esas imágenes de algunas fiestas populares en las que se ve cómo personas descalzas caminan sobre carbones ardientes sin quemarse los pies? ¿Quién no recuerda la novela de Julio Verne en la que Miguel Strogoff conserva la vista a pesar de que sus párpados han sufrido aparentes quemaduras al entrar en contacto con el sable caliente al rojo vivo? ¿Quién no recuerda haberse humedecido con saliva los dedos antes de tratar de apagar con ellos la llama de una vela? ¿Quién no ha visto el episodio de la serie *Cazadores de mitos* en el que Jamie y Adam, después de sumergir sus manos en agua fría, introducen rápidamente sus dedos en plomo fundido sin sufrir quemaduras?

Estos y otros muchos fenómenos pueden ser relacionados con el comportamiento de los líquidos calientes aislados por una capa de vapor, en concreto, con el denominado efecto Leidenfrost. Una búsqueda en fuentes bibliográficas especializadas nos muestra que la primera reseña científica de este efecto data del año 1732 y en ella el científico holandés Herman Boerhaave describe un experimento en el que una gota de alcohol flota sobre una plancha caliente de hierro. La explicación en términos científicos a este experimento fue dada por el médico y teólogo alemán Johann Gottlob Leidenfrost

en 1756 en el artículo *A Tract About Some Qualities of Common Water*. En palabras sencillas, podemos afirmar que el efecto Leidenfrost hace referencia al fenómeno físico en el que un líquido, al entrar en contacto con una superficie caliente a temperatura superior a la temperatura de ebullición del líquido, se genera una capa de vapor entre el líquido y la superficie que evita que el líquido se evapore instantáneamente, de manera que no se produce casi fricción entre ambas.

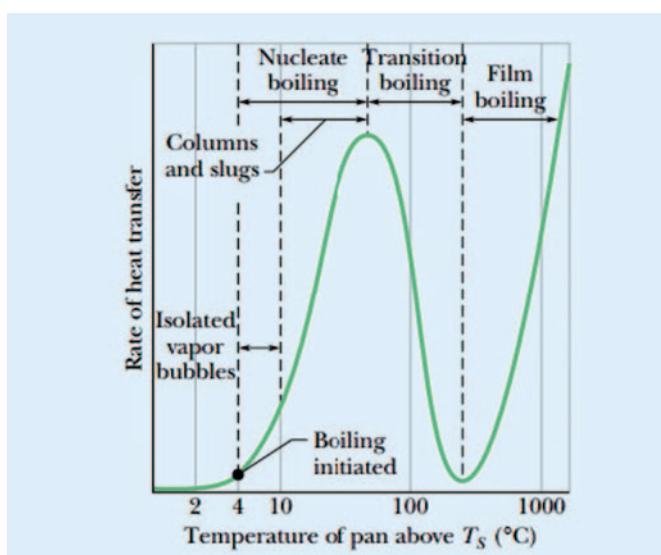
Actualmente, el efecto Leidenfrost está presente en los motores de combustión interna y en los reactores nucleares. Se investiga su uso para reducir la fricción mediante levitación en ciertos vehículos y, casi dentro de la ciencia-ficción, se propone su aplicación para disponer de una nueva fuente de energía que use el hielo seco como combustible reutilizable.

El efecto Leidenfrost puede tratar de observarse en nuestra cocina si disponemos de una sartén, una jeringuilla y agua. Se coloca la sartén vacía sobre la placa vitrocerámica o similar de nuestra cocina y comenzamos a calentarla. Cuando la sartén esté caliente, si depositamos sobre ella pequeñas gotas de agua con la ayuda de la jeringuilla, veremos que el agua se irá evaporando poco a poco hasta desaparecer. Si la sartén está suficientemente caliente como para que el agua rompa a hervir, las gotas que depositemos se evaporarán instantáneamente. Si dispusiéramos del equipamiento necesario y pudiéramos hacer que la temperatura de la sartén aumentara aún más y superase los 200°C, observaríamos que las gotas no se evaporarían inmediatamente, si no que permanecerían relativamente estables, adoptando una forma prácticamente esférica, llegando a moverse por la sartén o incluso a flotar sobre ella.

## Fundamento físico

La experiencia muestra que si se deposita una gota de agua sobre una placa, al calentar dicha placa de forma progresiva, se observa que la gota de agua se va evaporando lentamente, aun sin haber sobrepasado la temperatura de ebullición normal del agua,  $T_S$ . El punto o temperatura de ebullición normal del agua es 99.97°C.

En la figura 1 se muestra que la ebullición del agua presenta distintas fases en función de la temperatura de la placa



**Figura 1.** Transferencia de calor en función de la temperatura de la placa sobre el punto de ebullición del agua. Créditos: Jear Walker, Fundamentals of Physics, octubre de 2014.

con la que entra en contacto. Si la temperatura de la placa es entre 4 y 10°C mayor que la temperatura de ebullición  $T_S$ , se produce un burbujeo aislado. Si se calienta aún más la placa, la temperatura de la misma aumenta, produciéndose una ebullición por nucleación. Se produce el burbujeo clásico, producto de una lenta evaporación, debido a la interferencia entre las burbujas. Cuando superamos la temperatura  $T_S$  en 30°C la pendiente en la transferencia de calor cambia, se hace negativa, y entramos en la región de transición en la que se condensan burbujas de vapor en el interior de la gota de agua, lo que hace que su ebullición sea violenta. Esta ebullición violenta se debe a que la gota de agua está superpoblada de burbujas de vapor que rompen el límite elástico de la superficie. Este proceso se detiene cuando se llega al punto de Leidenfrost. En este punto se produce una capa de vapor entre la gota de agua y la placa caliente, la cual reduce significativamente la transferencia de calor de la placa, ya que ésta se produce por radiación y conducción y, por tanto, cesa el proceso de ebullición.

La aparición del punto de Leidenfrost está relacionada con el hecho de que las burbujas de vapor que antes estaban en el interior de la gota, se unen para formar columnas de vapor. Estas columnas de vapor aparecen cuando pequeñas oscilaciones en la interfase entre dos fluidos son amplificadas, es decir, las columnas de vapor se distorsionan y forman un colchón que impide que la gota de agua entre en contacto con la superficie de la placa. Este punto es relativamente estable, la gota puede permanecer por tiempo indeterminado (utilizando superficies superhidrofóbicas), sin embargo, en condiciones normales, es muy sensible a perturbaciones exteriores, que harán que el colchón de vapor colapse y la gota se evapore de forma instantánea.

El cálculo del punto de Leidenfrost puede realizarse mediante diversos modelos que tienen en cuenta las propiedades físicas de la superficie caliente, las impurezas del líquido, la tensión superficial del líquido y la presión atmosférica, entre otras variables. Para el caso que nos ocupa, el punto de Leidenfrost es aproximadamente 193°C.

## Montaje experimental y resultados

Para el montaje experimental se han utilizado una placa de aluminio con regulador de temperatura, un termómetro sin contacto para el control de la temperatura en cada punto de la placa y una cámara reflex con objetivo macro para grabar el fenómeno.

La deposición de las gotas de agua sobre la placa metálica se ha realizado empleando una aguja transdérmica que asegura que las gotas no superen un milímetro de diámetro. De esta forma se pueden descartar fenómenos externos y se presenta el efecto Leidenfrost en todo su esplendor.

Se verificó experimentalmente que la placa metálica estuviese totalmente limpia de posibles manchas de grasa superficial o de polvo, para que las gotas de agua no se difundiesen por su superficie. Además, antes de comenzar el experimento, se examinó que zonas de la placa estaban más o menos calientes y se analizaron sus ciclos de calentamiento-enfriamiento. De esta manera, se pudo realizar el experimento rápidamente, observando todos los fenómenos en el menor tiempo posible y, por tanto, con unas condiciones ambientales muy aproximadas de comienzo a fin. Para tener



**Figura 2.** Gota de agua a temperatura ambiente.



**Figura 3.** Gota de agua entre 104°C y 110°C.

constancia de todas las fases de ebullición del proceso, se procedió a su grabación en alta resolución.

Una vez que todo el dispositivo experimental se encuentra en condiciones controladas, se procedió a ir echando gotas de agua a distintas temperaturas. En la Figura 2, se puede ver una gota de agua cuando la temperatura de la placa es aun menor que la temperatura normal de ebullición  $T_s$ . Esto nos sirve para comprobar que, efectivamente, la placa estaba limpia. Se observa que la gota adopta una forma esférica debido a su tensión superficial.

Comenzamos a calentar la placa y, tal y como se ha explicado en la sección anterior, cuando la temperatura está entre 104°C y 110°C, se observa un burbujeo aislado, como se muestra en el fotograma de la Figura 3. Cuando la temperatura de la placa está comprendida entre 110°C y 130°C la ebullición ocurre por nucleación, formándose burbujas de gran tamaño que comienzan a interferir entre ellas, como se observa en la Figura 4.

Con el termómetro sin contacto se comprueba que la placa ya ha superado el punto de transición en la ebullición (130°C) y entramos en la zona de ebullición violenta. La grabación de esta fase resultó difícil debido al movimiento errático que las gotas de agua realizan por toda la superficie de la placa. Durante esta fase, al evaporarse las gotas tan rápidamente, se depositaban inmediatamente los residuos que contiene el agua, mayormente cal, dejando una pequeña mancha en la superficie. La fase de ebullición violenta se extiende hasta que la temperatura de la placa es de 190C aproximadamente.

Para asegurarnos que habíamos llegado a la fase de ebullición sobre un colchón de vapor, región de Leidenfrost, y



**Figura 4.** Gota de agua en la fase de ebullición por nucleación.



**Figura 5.** Gota de agua en la fase de ebullición violenta.

dado que no se estaba utilizando agua destilada, si no del grifo, se esperó a que la placa superase los 240°C. A esa temperatura la gota de agua permanecía perfectamente estable y con forma lenticular, en algunos casos durante mas de medio minuto. Debido a su pequeño tamaño y la alta temperatura, las columnas de vapor llegan a un punto en que se vuelven inestables y hacen vibrar la gota de agua. A medida que aumenta esta inestabilidad, empiezan a formarse armónicos. Se puede ver como la gota vibra en su armónico fundamental, en este punto el colchón ya es totalmente inestable, y la gota se desplaza rápidamente y sin apenas fricción por la superficie de la placa.

### Conclusiones

En este trabajo se ha puesto de manifiesto que no existe un único tipo de ebullición para el agua, si no que depende de la temperatura a la que ocurre el proceso. La ebullición clásica se observa cuando la temperatura de la placa metálica sobre la que se depositan gotas de agua está comprendida



**Figura 6.** Gota de agua por encima del punto de Leidenfrost.

entre 104°C y 130°C. Cuando la temperatura de la placa está entre 130°C y 190°C, se observa una ebullición violenta, en la que el agua expelle gotitas en todas direcciones. Cuando la temperatura de la placa es superior a 193°C (punto de Leidenfrost del agua) comienza una fase de ebullición de notable belleza. La ebullición de las gotas de agua tiene lugar sobre una fina capa de vapor, las gotas de agua se vuelven bolitas lenticulares y, contra nuestra intuición, no se evapan inmediatamente.

El experimento completo se ha grabado en vídeo y se ha publicado en YouTube para que puede ser empleado como recurso educativo. La dirección es: <https://youtu.be/MkoqN6hOzfI>

## Referencias

- [1] H. THIMBLEDY, "The Leidenfrost Phenomenon", *Phys. Educ.* 24, 300-303 (1989).
- [2] G. G. LAVALLE, P. CARRICA, V. GAREA y M. JAIME, "A boiling heat transfer paradox", *Am. J. Phys.* 60, 593- 597 (1992).
- [3] J. R. WELTY, C. E. WICKS, R. E. WILSON y G. L. RORER, *Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer* (John Wiley and Sons, Hoboken, Nueva Jersey, 2008).
- [4] A. HASHMI, Y. XU, B. CODER, J. SPAFFORD, G. E. MICHAEL, G. Yu y J. Xu, "Leidenfrost levitation: beyond droplets", *Sci. Rep.* 2, 797 (2012).
- [5] J. WALKER, *Fundamentals of Physics* (John Wiley and Sons, Hoboken, Nueva Jersey, 2014).

## Algunas reflexiones curiosas en el aula sobre equilibrio químico de una reacción

Con este breve artículo quiero compartir la respuesta que propongo a un conjunto de preguntas planteadas por curiosos alumnos de algunos de los cursos que he impartido de Termodinámica y Termodinámica Química.

Juan Casado Cordón  
Catedrático de Química Física,  
Dpto. de Química Física ,  
Universidad de Málaga



**E**n nuestros actuales Grados de Química y de Física se enseña la variación de la energía libre de Gibbs ( $\Delta G$ ) para una reacción química que progresó desde los reactivos puros en dirección a los productos puros, o viceversa, en función del denominado grado de avance de la reacción ( $\epsilon$ ). A presión y temperatura constantes,  $\Delta G < 0$  representa el sentido de la fuerza motriz de avance de la reacción hasta alcanzar el estado de equilibrio químico donde  $\Delta G = 0$ .

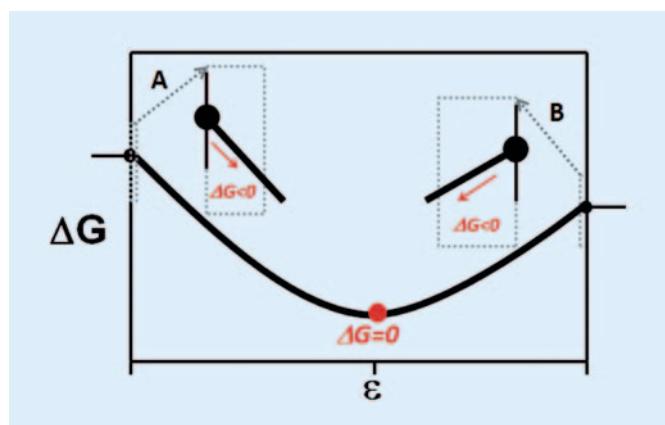
Este mínimo,  $\Delta G = 0$  a T y P constantes, para cualquier reacción química siempre se localiza en una proporción dada entre los reactivos puros y los productos puros. Es decir, a un grado de avance intermedio. Si  $\epsilon$  se expresa en términos relativos,  $0 < \epsilon < 1$ , nunca el equilibrio se situaría en unos u otros puros.

**El planteamiento de los alumnos es:** "Como  $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ , sea una reacción química imaginaria exotérmica ( $\Delta H^{\circ} < 0$ ) y supongamos que  $\Delta H$  también es negativa para cualquier grado de avance ( $\epsilon$ ),  $\Delta H < 0$ . Supongamos eso mismo para la variación de entropía, es decir,  $\Delta S^{\circ} > 0$ , por ejemplo, dicen los alumnos, para una reacción que produzca un incremento del número total de moles ( $\Delta n > 0$ ), y supongamos, insisten los alumnos, que  $\Delta S > 0$  también para cualquier proporción."

**Los alumnos concluyen:** "Bajo estas circunstancias, para cualquier valor de  $\epsilon$ ,  $\Delta G < 0$ , y entonces la reacción química progresaría hasta la conversión completa, absoluta, de todas las moléculas de reactivos en productos, es decir, el equilibrio químico se situaría en la conversión total, negando la enseñanza descrita en el primer párrafo."

Rememorando expresiones del profesor Carlos Sieiro del Nido (Catedrático de Química Física de la Universidad Autónoma de Madrid): "Esto es una tragedia". Y si nos guiamos por la conclusión de los alumnos, efectivamente lo sería, pues si desaparecen todos los reactivos, en ese momento la constante termodinámica de equilibrio (K) queda indefinida y la propiedad termodinámica más relevante del mismo quedaría sin ningún significado físico. Esto es lo que nombro en el título del artículo como *paradoja* y que no es más que la propia conclusión de los alumnos afanados en poner a prueba la solidez de la teoría y del profesor que la enseña.

En la resolución de la paradoja, hay que aclarar primariamente la diferencia entre  $\Delta H^{\circ}$  y  $\Delta S^{\circ}$ , por un lado, y  $\Delta H$  y  $\Delta S$  por otro. Mientras que las primeros toman valores únicos (en el caso particular de  $\Delta H^{\circ}$ , o calor de reacción,  $\Delta H^{\circ}$  define el concepto de exotérmico y endotérmico) y están tabulados, las segundas son dependientes del tipo de reacción, de la proporción relativa de reactivos y productos presentes en cada momento en el transcurso de la mismas (son funciones extensivas).



Representación de  $\Delta G$  frente a  $\epsilon$ . Los casos A y B son ampliaciones de la curva de  $\Delta G$  en las cercanías de reactivos y productos puros respectivamente.

Refiriéndome directamente a la solución de la paradoja, cabe indicar que su solución no es más que la demostración de que la típica gráfica de  $\Delta G - \epsilon$  siempre (en todos los ca-