

¿Puede el agua caliente congelarse más rápido que el agua fría?

Escrito en Nov, 1998 por Monwhea Jeng (Momo),
Departamento de Física, Universidad de California
Autorización de publicación entregada por Don Koks editor del sitio
<http://hermes.physics.adelaide.edu.au/~dkoks/Faq/>

Sí – una explicación general

El agua caliente puede de hecho congelarse más rápido que agua fría por un amplio rango de condiciones experimentales. Este fenómeno es sumamente contra intuitiva y sorprendente incluso para muchos científicos, pero es un hecho real. Ha sido estudiado en numerosos experimentos. A pesar de que este fenómeno ha sido conocido por siglos y fue descrito por Aristóteles, Bacon y Descartes [1-3], no fue introducido en la comunidad científica moderna hasta el año 1969, por un estudiante de enseñanza superior de Tanzania llamado Mpemba. Tanto la historia científica temprana de este efecto y la historia del redescubrimiento de Mpemba son interesantes por derecho propio – la historia de Mpemba en particular entrega una parábola dramática en contra de hacer juicios previos sobre lo que es imposible. Esto se describe en forma separada.

El fenómeno donde el agua caliente se puede congelar más rápido que el agua fría se llama el efecto Mpemba. Debido a que sin duda muchos lectores están extremadamente escépticos de este punto, debiéramos establecer con precisión el significado del efecto Mpemba. Comenzamos con dos contenedores con agua, los cuales son iguales en forma y contienen cantidades idénticas de agua. La única diferencia entre ellos es que el agua de uno está a una temperatura mayor (uniforme) que el agua del otro contenedor. Ahora enfriamos ambos contenedores, usando exactamente el mismo proceso de enfriamiento para cada contenedor. Bajo ciertas condiciones el agua inicialmente más caliente se va a congelar primero. Si esto ocurre, hemos observado el efecto Mpemba. Por supuesto, el agua inicialmente a mayor temperatura no se va a congelar antes que el agua inicialmente más fría para todas las condiciones iniciales. Si el agua caliente empieza a $99,9^{\circ}\text{C}$ y el agua fría a $0,01^{\circ}\text{C}$, entonces claramente, bajo esas circunstancias, el agua inicialmente más fría se va a congelar primero. Sin embargo, bajo ciertas condiciones el agua inicialmente más caliente se va a congelar primero: si esto ocurre, has presenciado el efecto Mpemba. Pero no vas a observar el efecto Mpemba para cualquier condición de temperaturas iniciales, formas de contenedores o condiciones de enfriamiento.

Parece imposible, ¿cierto? Muchos lectores agudos pueden haber llegado ya con una prueba común de que el efecto Mpemba es imposible. La prueba normalmente se desarrolla como sigue. Digamos que inicialmente el agua más fría parte a 30°C y tarda 10 minutos en congelarse, mientras que el agua más caliente empieza a 70°C . Ahora el agua inicialmente más caliente tiene que gastar algo de tiempo en enfriarse para llegar a los 30°C y luego de eso, le va a tomar 10 minutos en enfriarse. Por lo tanto, dado que el agua inicialmente más caliente tiene que hacer todo lo que el agua inicialmente más fría tiene que hacer, más un poco más, debiera tomarle por lo menos un poco más de tiempo, ¿cierto?, ¿qué puede estar mal en esta prueba?

Lo que está mal con esta prueba es que se asume implícitamente que el agua se caracteriza solo por un número único, su temperatura promedio. Pero si hay otros factores además de la temperatura promedio son importantes, entonces cuando el agua inicialmente más caliente se ha enfriado a una temperatura promedio de 30°C , puede verse muy diferente cuando el agua inicialmente más fría (a 30°C uniforme) comenzó. ¿Por qué?

Porque el agua puede haber cambiado cuando se enfría desde los 70°C uniformes a los 30°C promedio. Puede tener menos masa, menos gas disuelto o se pueden producir corrientes de convección por una distribución no uniforme de la temperatura o puede haber cambiado el ambiente en torno al contenedor dentro del refrigerador. Todos estos cambios son concebiblemente importantes, y cada uno va a ser considerado a continuación. Por lo tanto, la prueba de imposibilidad entregada anteriormente no funciona. Y de hecho el efecto Mpemba ha sido observado en numerosos experimentos controlados. [5,7-14].

Todavía no se sabe exactamente por qué sucede. Se han propuesto numerosas explicaciones para este efecto, pero hasta ahora los experimentos no han mostrado claramente cuál, si es alguno, de los mecanismos propuestos es el más importante. Si bien se oye a menudo afirmaciones confiadas que dicen que X es la causa del efecto Mpemba, estas afirmaciones usualmente se basan en conjeturas o solo tomar en cuenta la evidencia de unas pocas publicaciones e ignoran las demás. Por supuesto, no hay nada malo con las conjeturas teóricas informadas o ser selectivo en cuáles resultados experimentales confías; el problema es que personas diferentes hacen diferentes afirmaciones de lo que es X.

¿Por qué la ciencia moderna no ha contestado esta aparentemente simple pregunta sobre el enfriamiento del agua? El problema principal es que el tiempo que toma el agua en enfriarse es altamente sensible a numerosos detalles en la configuración del experimento, como la forma y tamaño del contenedor, la forma y tamaño de la unidad de refrigeración, el contenido de gas e impurezas que contiene el agua, cómo se define el tiempo de congelamiento, etc. Debido a esta sensibilidad, mientras que los experimentos han acordado en general que el efecto Mpemba ocurre, hay desacuerdo bajo qué condiciones esto ocurre, y por lo tanto sobre por qué ocurre. Como escribió Firth [7] “Hay una riqueza tal de variaciones experimentales en el problema que cualquier laboratorio que emprenda estas investigaciones tiene garantía de resultados diferentes a todos los demás”.

Por lo tanto el número limitado de experimentos realizados, frecuentemente bajo condiciones muy diferentes, ninguno de los mecanismos propuestos puede ser confiadamente proclamado como “el” mecanismo. Anteriormente describimos cuatro formas en que el agua inicialmente más caliente puede haber cambiado hasta enfriarse a la temperatura del agua inicialmente más fría. Lo que sigue a continuación es una descripción corta de los cuatro mecanismos que se han sugerido para explicar el efecto Mpemba. Los lectores más ambiciosos pueden seguir leyendo explicaciones más completas de los mecanismos, así como de contraargumentos y experimentos que los mecanismos no puede explicar. Parece que no hay un mecanismo que explique el efecto Mpemba para todas las circunstancias, pero que diferentes mecanismos son importantes bajo diferentes condiciones.

1. **Evaporación** – Como el agua inicialmente más caliente se enfría hasta la temperatura inicial del agua inicialmente más fría, puede perder una cantidad significativa de agua por evaporación. La masa reducida va a hacer más fácil que el agua se enfríe y se congele. Por lo tanto el agua inicialmente más caliente se puede congelar antes que el agua inicialmente más fría, pero va a hacer menos hielo. Cálculos teóricos han mostrado que la evaporación puede explicar el efecto Mpemba si asumes que el agua pierde calor solo a través de la evaporación [11]. Esta explicación es sólida, intuitiva y la evaporación es indudablemente importante en la mayoría de las situaciones. Sin embargo, no es el único mecanismo. La evaporación no explica experimentos hechos en contenedores cerrados, donde no se pierde masa producto de la evaporación [12]. Y muchos científicos han afirmado que solo la evaporación es insuficiente para explicar sus resultados. [5, 9, 12].
2. **Gases Disueltos** – El agua caliente puede mantener menos gas disuelto que el agua fría, y largas cantidades de gas escapan al hervir. Por lo tanto el agua inicialmente más caliente puede tener menos

gas disuelto que el agua inicialmente más fría. Se ha especulado que estos cambios de propiedades en el agua de alguna forma, quizás haciendo más fácil el desarrollo de corrientes convectivas (y por lo tanto haciendo más fácil que se enfríe), o disminuyendo la cantidad de calor requerido para congelar una unidad de masa de agua, o cambia el punto de ebullición. Hay algunos experimentos a favor de esta explicación [10, 14], pero no soporte de cálculos teóricos.

3. **Convección** – A medida que el agua se enfría va a eventualmente desarrollar corrientes convectivas y una distribución de temperatura no uniforme. A la mayoría de las temperaturas, la densidad decrece con el aumento de la temperatura, por lo tanto la superficie del agua va a estar más caliente que la parte inferior: esto se ha llamado “hot top” (superior caliente). Ahora, si el agua pierde calor primero a través de la superficie, entonces el agua con “hot top” va a perder calor más rápido de lo que se espera en su temperatura promedio. Cuando el agua inicialmente más caliente se ha enfriado a una temperatura promedio igual a la temperatura inicial del agua más fría, va a tener un “hot top”, y por lo tanto su tasa de enfriamiento va a ser más rápida que la tasa de enfriamiento del agua inicialmente más fría con la misma temperatura promedio. ¿Captaste todo eso? Puedes querer leer este párrafo de nuevo, prestando especial distinción a la diferencia entre temperatura inicial, temperatura promedio y temperatura. Mientras que algunos experimentos han observado el “hot top” y corrientes de convección relacionadas, se desconoce si la convección puede explicar por sí sola el efecto Mpemba.
4. **Entorno** – Una diferencia final entre el enfriamiento de dos contenedores no se relaciona con el agua en sí, pero sí con el ambiente circundante. El agua inicialmente más caliente puede cambiar el ambiente que la rodea de una forma compleja y por lo tanto afectar el proceso de enfriamiento. Por ejemplo, si el contenedor está sobre una capa de escarcha que conduce el calor pobremente, el agua caliente va a derretir la capa de escarcha y por lo tanto establecer un sistema de enfriamiento mejor en el largo plazo. Obviamente las explicaciones como éstas no son muy generales, dado que la mayoría de los experimentos no están hechos con contenedores ubicados en capas de escarcha.

Finalmente el **superenfriamiento** puede ser importante en este efecto. El superenfriamiento ocurre cuando el agua no se congela a 0°C si no que a una temperatura algo menor. Un experimento [12] encontró que su agua inicialmente caliente se podía congelar primero porque se puede congelar a una temperatura mayor que el agua inicialmente más fría. De ser cierto, esto no explicaría completamente el efecto Mpemba, porque todavía necesitaríamos explicar por qué el agua más caliente se superenfriaba menos que el agua inicialmente más fría.

En resumen, el agua caliente se enfría más rápido que el agua fría bajo un amplio rango de circunstancias. No es imposible y se ha visto que ocurre en numerosos experimentos. Sin embargo, pese a las afirmaciones hechas a menudo por una fuente u otra, no hay una explicación acordada de cómo ocurre este fenómeno. Se han propuesto diferentes mecanismos, pero la evidencia experimental es inconclusa. Para aquellos que desean leer más del tema, el artículo de Jearl Walker en la Scientific American [13] sencillo de leer y tiene sugerencias de cómo llevar a cabo experimentos caseros del efecto Mpemba, mientras que los artículos de Auerbach [12] y Wojciechowski [14] son publicaciones más modernas del efecto.

Historia del Efecto Mpemba

El hecho de que el agua caliente se enfría más rápido que el agua fría se ha sabido por muchos siglos. La referencia más antigua de este fenómeno es de Aristóteles en el 300 AC. El fenómeno se discutió después en la era medieval cuando los físicos europeos luchaban para llegar a la teoría del calor. Pero en el siglo 20 el fenómeno se conocía solo como parte del folklore hasta que fue reintroducido a la comunidad científica en 1969 por Mpemba, un estudiante de enseñanza superior de Tanzania. Desde entonces, numerosos experimentos han confirmado la existencia del “Efecto Mpemba”, pero no han establecido una explicación única.

La referencia más antigua de este fenómeno hecha por Aristóteles, quien escribió: “El hecho que el agua haya sido calentada previamente contribuye a que se congele más rápidamente; por lo tanto se enfría más rápido. De ahí que muchas personas, cuando quieren enfriar agua de manera más rápida, comienzan colocándola al sol...” [1, 4]

Escribió estas palabras con la idea equivocada que llamó antiperístasis. La antiperístasis se define como “el supuesto incremento de la intensidad de una cualidad como resultado de estar rodeado por su cualidad contraria, por ejemplo, el calentamiento repentino de un cuerpo tibio cuando está rodeado de frío” [4].

Los medievales creían en la teoría de Aristóteles de antiperístasis, y también buscaron explicarla. No es sorprendente que científicos en el 1400s tuvieran problemas en explicar cómo funcionada, y ni siquiera sabían (como Aristóteles afirmaba en apoyo de la antiperístasis), si los cuerpos humanos y cuerpos de agua estaban más calientes en invierno que en verano [4]. Alrededor del 1461, el físico Giovanni Marliani, en un debate sobre cómo se enfrían los objetos, dijo que había confirmado que el agua caliente se congela más rápido que el frío. Dijo que había tomado cuatro onzas de agua hirviendo y cuatro onzas de agua sin calentar, colocadas afuera en contenedores similares en un día frío de invierno, y observó que el agua hervida se congelaba primero. Sin embargo, Marliani no fue capaz de explicar este fenómeno [4]. Después, en los 1600s, era aparentemente común el conocimiento de que el agua caliente se congelaría más rápido que el agua fría. En 1620 Bacon escribió “el agua levemente más tibia es más fácil de congelar que el agua algo fría” [2], mientras que un poco después Descartes afirmó “la experiencia muestra que el agua que se ha mantenido por un largo tiempo al fuego se congela más rápido que otras aguas” [3].

Con el tiempo, se desarrollo una teoría de calor moderna y las antiguas observaciones de Aristóteles, Marliani y otros se olvidaron, quizás debido a que parecían tan contradictorias con los conceptos modernos de calor. Sin embargo, es todavía conocido como un hecho folklórico entre muchos no científicos en Canadá [11], Inglaterra [15-21], la industria de proceso de alimentos [23] y otros lugares.

No fue introducido a la comunidad científica hasta 1969, 500 años después del experimento de Marliani, y más de dos milenios después del “Meteorologica I” [1]. La historia de su redescubrimiento por un alumno de enseñanza superior de Tanzania llamado Mpemba está escrita en el New Scientist [4]. La historia entrega una parábola dramática advirtiendo a científicos y profesores contra menospreciar las observaciones de no científicos y en contra de hacer juicios precipitados sobre lo que es imposible.

En 1963, Mpemba estaba haciendo helado en su colegio, lo cual hacía mezclando leche hirviendo con azúcar. Se suponía que debía esperar que la leche se enfriara antes de ponerla en el refrigerador, pero en el apuro de conseguir un espacio en el refrigerador que era escaso, puso su leche sin enfriarla. Para su sorpresa, descubrió que su leche caliente se convirtió en helado antes que la de sus otros compañeros. Le preguntó a su profesor una explicación, pero le dijeron que se debe haber confundido, dado que su observación era imposible.

Mpemba le creyó a su profesor en ese momento. Pero más tarde ese mismo año se encontró con un amigo que hacía helados sólidos en el pueblo de tanga. Su amigo le contó que cuando hacía los helados, colocaba los líquidos calientes en el refrigerador para que se congelaran antes. Mpemba descubrió que otro vendedor de helados en tanga hacía lo mismo.

Más adelante en la escuela superior, Mpemba aprendió la ley de Newton del enfriamiento, que describe cómo cuerpos calientes se supone que se enfrían (bajo ciertos supuestos simplificadores). Mpemba preguntó a su profesor por qué la leche caliente se congelaba antes que la leche fría cuando la colocaba en el freezer. El profesor le contestó a Mpemba que estaba confundido. Cuando Mpemba siguió argumentando, el profesor le dijo “todo lo que puedo decir es que es la física de Mpemba y no la física universal” y desde entonces, el profesor y la clase comenzaron a criticar los errores que cometía Mpemba en matemáticas y física diciendo “Esa es la matemáticas de Mpemba” o “Esa es la física de Mpemba”.

Pero cuando Mpemba intentó después el experimento con agua caliente y fría en el laboratorio de biología de su clase, encontró nuevamente que el agua caliente se enfriaba más rápido.

Antes el Dr. Osborne, profesor de física había visitado el colegio de Mpemba. Mpemba le había pedido que le explicara por qué el agua caliente se congelaba antes que el agua fría. El Dr. Osborne dijo que no podía pensar en ninguna explicación, pero que iba a probar el experimento más tarde. Cuando volvió a su laboratorio le pidió a su joven técnico que probara la afirmación de Mpemba. El técnico le reportó posteriormente que el agua caliente se había congelado antes, y agregó “pero vamos a repetir el experimento hasta que obtengamos los resultados correctos”. Sin embargo, repetidas pruebas entregaron el mismo resultado y en 1969 Mpemba y Osborne escribieron sobre sus resultados [5].

En el mismo año, en una de las coincidencias comunes en ciencias, el Dr. Kell de forma independiente escribió un paper sobre que el agua caliente se congelaba más rápido que el agua fría. Kell demostró que si uno asume que el agua se enfriaba primero por evaporación y mantenía una temperatura uniforme, el agua caliente perdería la masa suficiente como para congelarse primero [11]. Kell por lo tanto argumentó que el fenómeno (entonces una leyenda urbana en Canadá) era real y se podía explicar por evaporación. Sin embargo, no estaba al tanto de los experimentos de Osborne, los cuales medían la masa perdida por evaporación y encontraron que era insuficiente para explicar el efecto.

Se llevaron a cabo experimentos posteriores con agua en contenedores cerrados, eliminando el efecto de la evaporación y aún se encontraba que el agua caliente se congelaba primero [14].

Las subsiguientes discusiones del efecto han sido inconclusas. Mientras que unos pocos experimentos han replicado el efecto [4, 6-13], no ha habido consenso en qué causa el efecto. Se discutieron las posibles explicaciones en la sección anterior. El efecto ha sido un tópico de calor repetidamente discutido en el “New Scientist”, una revista de ciencias popular. Las cartas han revelado que el efecto era conocido por la gente de todo el mundo desde 1969. Hasta el día de hoy no hay una explicación de consenso del efecto Mpemba.

Explicaciones Más Detalladas

1. **Evaporación** – Una explicación del efecto es que a medida que el agua caliente se enfría, pierde masa debido a la evaporación. Con menos masa, el líquido tiene que perder menos calor para enfriarse, por lo tanto se enfría más rápido. Con esta explicación, el agua caliente se congela primero, pero solo porque hay menos de ella para congelar. Los cálculos hechos por Kell en 1969 [11] mostró que si el agua se enfriaba solo por evaporación y mantenía una temperatura uniforme, el agua más caliente se congelaba antes que el agua más fría.

Esta explicación es sólida, intuitiva y sin duda alguna contribuye al efecto Mpemba en la mayoría de las situaciones físicas. Sin embargo, muchas personas han asumido incorrectamente que esta es entonces “la” explicación para el efecto Mpemba. Es decir, asumen que la única razón para que el agua caliente se enfría más rápido que el agua fría es por evaporación y que todos los resultados experimentales se pueden explicar por los cálculos en el artículo de Kell. Sin embargo, los experimentos actuales no sostienen esta creencia. Si bien los experimentos muestran que la evaporación es importante [13], ellos no muestran que sea el único mecanismo detrás del efecto Mpemba. Numerosos experimentos han argumentado que la evaporación por sí sola es insuficiente para explicar sus resultados [5,9,12]; en particular, el experimento original de Mpemba y Osborne mide la masa perdida debido a la evaporación, y encontraron sustancialmente menor la cantidad predicha por los cálculos de Kell [5,9]. Y de forma más convincente, un experimento de Wojciechowski observó el efecto Mpemba en un contenedor cerrado, donde no hubo pérdida de masa debido a la evaporación.

2. **Gases Disueltos** – otra explicación argumenta que el gas disuelto usualmente presente en el agua es expulsado del agua inicialmente caliente y que esto cambia las propiedades del agua de alguna forma que explica el efecto. Se ha argumentado que la falta de gas disuelto puede cambiar la habilidad del agua para conducir calor, o cambiar el punto de congelamiento del agua en una cantidad significativa. Es ciertamente verdad que el agua caliente mantiene menos gas disuelto que el agua fría, y que el agua hirviendo expulsa la mayor parte del gas disuelto. La pregunta es si esto puede afectar significativamente las propiedades del agua de una forma que explique el efecto Mpemba. Hasta lo que yo sé, no hay trabajo teórico que soporte esta explicación para efecto Mpemba.

Se puede encontrar soporte indirecto en dos experimentos que observaron el efecto Mpemba en agua común que contenía gases disueltos, pero no lo observaron cuando usaban agua desgasificada [10,14]. Sin embargo, un intento para medir la dependencia de la entalpía de congelamiento en la temperatura inicial y el contenido del gas en el agua fue inconclusa [14].

Un problema de esta explicación es que muchos experimentos hervían previamente tanto el agua inicialmente caliente como la inicialmente fría, precisamente para eliminar el efecto de los gases disueltos y aún así todavía observaban el efecto [5, 13]. Dos experimentos algo asistemáticos encontraron que variar el contenido de gas en el agua no generaba una diferencia sustancial en el efecto Mpemba [9,12].

3. **Entorno** – también se ha propuesto que el efecto Mpemba se puede explicar por el hecho que la temperatura en el agua pasa a ser no uniforme. A medida que el agua se enfría, se van a desarrollar los gradientes y corrientes de convección. Para la mayoría de las temperaturas, la densidad del agua disminuye cuando la temperatura aumenta. Por lo tanto en el tiempo, a medida que el agua se enfría vamos a desarrollar un “hot top” – la superficie del agua va a estar más caliente que la temperatura

promedio del agua, o el agua en la parte inferior del contenedor. Si el agua pierde calor principalmente a través de la superficie, entonces esto significa que el agua debiera perder calor más rápido de lo que uno esperaría basándose en solo tomar en cuenta la temperatura promedio del agua. Y para una temperatura promedio dada, la pérdida de calor va a ser mayor mientras menos homogénea sea la distribución de temperatura (es decir, a mayor rango de temperaturas observadas yendo desde arriba hasta abajo).

¿Cómo explica esto el efecto Mpemba? Bueno, inicialmente el agua caliente se va a enfriar rápidamente, y va a desarrollar rápidamente corrientes de convección por lo tanto la temperatura del agua va a variar enormemente desde arriba del agua hasta abajo. Por otro lado, el agua inicialmente fría va a tener una tasa de enfriamiento más lenta y por lo tanto va a desarrollar más lentamente corrientes convectivas significantes. Por lo tanto, si comparamos el agua inicialmente caliente y el agua inicialmente fría con la misma temperatura promedio, parece razonable creer que el agua inicialmente caliente va a tener corrientes de convección mayores y por lo tanto una tasa más rápida de enfriamiento. Para considerar un ejemplo concreto, supongamos que el agua inicialmente caliente empieza a 70°C y que el agua inicialmente fría comienza a 30°C. Cuando el agua inicialmente está a una temperatura promedio de 30°C también tiene una temperatura uniforme de 30°C. Sin embargo, cuando el agua inicialmente caliente alcanza el promedio de 30°C, la superficie del agua está probablemente mucho más caliente que 30°C, y por lo tanto va a perder calor más rápido que el agua inicialmente fría para la misma temperatura promedio. ¿Se entiende? Esta explicación es algo confusa, por lo que puedes querer volver atrás y leer los dos párrafos de nuevo, prestando especial atención a la diferencia entre temperatura inicial, temperatura promedio y temperatura superficial.

A cualquier tasa, si el argumento anterior es correcto, entonces cuando graficamos la temperatura promedio versus tiempo para ambos el agua inicialmente caliente e inicialmente fría, entonces para algunas temperaturas promedio el agua inicialmente caliente se va a enfriar más rápido que el agua inicialmente fría. Por lo tanto la curva de enfriamiento del agua inicialmente caliente no va a reproducir la curva de enfriamiento del agua inicialmente fría, si no que va a caer más rápidamente que el agua inicialmente fría en el mismo rango de temperatura.

Esto muestra que el agua inicialmente caliente va más rápido pero por supuesto también tiene que ir más lejos. Por lo tanto si realmente termina primero (es decir alcanza los 0°C primero), no queda claro de la discusión anterior. Para saber cuál termina primero requiere de modelos teóricos de las corrientes convectivas (ojalá para un rango de contenedores en distintas formas y tamaños), lo cual no se ha hecho. Por lo tanto la sola convección puede ser capaz de explicar el efecto Mpemba, pero si realmente lo hace no se sabe actualmente. Los experimentos del efecto Mpemba se reportan a menudo como “hot top”, como era de esperar. Se han hecho experimentos que buscan corrientes de convección de agua congelándose [27,28], pero sus implicancias en el efecto Mpemba no están completamente claras.

Cabe señalar que la densidad del agua alcanza su máximo a 4°C. Por lo tanto bajo los 4°C, la densidad del agua disminuye a medida que disminuye la temperatura, y tendremos entonces un “cold top” (superior frío). Esto hace que esta situación sea aún más complicada.

4. **Entorno** – El agua inicialmente caliente puede cambiar el ambiente que la rodea de una forma tal que haga que se enfríe más rápido después. Un experimento reportó cambios significativos en los datos simplemente con el cambio de tamaño del freezer en que colocaron los contenedores [7]. Por lo tanto concebiblemente es importante no solo saber sobre el agua y el contenedor, si no que también el

ambiente que lo rodea. Por ejemplo, una explicación del efecto Mpemba es que si los contenedores se dejan sobre una fina capa de hielo, mientras el contenedor que tiene el agua fría va a simplemente quedarse en la superficie helada el contenedor que el agua caliente va a derretir el hielo, y luego se va a asentar en el fondo del freezer. El agua caliente va a tener entonces un contacto térmico mejor con los sistemas de enfriamiento. Si el hielo derretido se congela nuevamente creando un puente de hielo entre el freezer y el contenedor, el contacto térmico puede ser aún mejor.

Obviamente, aunque este argumento sea cierto, tiene una utilidad bastante limitada, dado que la mayoría de los experimentos científicos tiene el cuidado suficiente para no dejar los contenedores en capas de hielo en el freezer, en cambio colocan el contenedor en aislantes térmicos o baños de frío. Por lo tanto este mecanismo propuesto puede tener o no algo de relevancia en algunos experimentos caseros, es irrelevante en la mayoría de los resultados publicados.

5. **Superenfriamiento** – Finalmente el superenfriamiento puede ser importante para el efecto. El superenfriamiento ocurre cuando el congelamiento del agua no ocurre a 0°C , si no que a una temperatura algo menor. Esto ocurre porque la declaración que “el agua se congela a 0°C ” es una declaración sobre el estado de menor energía del agua: a menos de 0°C las moléculas de agua “quieren” ordenarse como un cristal de hielo. Esto significa que va a dejar de moverse aleatoriamente como un líquido, en cambio va a formar un enrejado de hielo sólido. Sin embargo, ellas no saben cómo formarse a sí mismas en un enrejado de hielo, pero necesitan una pequeña irregularidad o sitio de nucleación que les diga como ordenarse a sí mismas. Algunas veces, cuando el agua se enfría a menos de 0°C , las moléculas no va a ver el sitio de nucleación por un tiempo, por lo tanto el agua se va a enfriar a menos de 0°C sin congelarse. Esto sucede bien a menudo.

Un experimento descubrió que el agua inicialmente caliente se superenfriaría solo un poco (a unos -2°C), mientras que el agua inicialmente fría se superenfriaría a menos (a unos -8°C) [12]. Si fuera cierto, esto podría explicar el efecto Mpemba porque el agua inicialmente fría necesitaría “hacer más trabajo”; es decir, llegar a estar más fría, con el fin de congelarse.

Sin embargo, esto tampoco puede considerarse como “la” única explicación para el efecto Mpemba. Primero que todo, hasta lo que se, este resultado no ha sido confirmado independientemente. El experimento descrito arriba [12] solo tiene un número limitado de pruebas, por lo tanto los resultados encontrados pueden ser estadísticamente un golpe de suerte. Segundo, incluso si los resultados fueran ciertos, no explican por completo el efecto Mpemba, pero reemplazan un misterio con otro. ¿Por qué el agua inicialmente caliente se superenfriaba a una temperatura mayor que la del agua inicialmente fría? Después de todo, una vez que el agua se ha enfriado a la temperatura más baja, uno podría esperar en general que el agua no “recordara” a qué temperatura estaba. Una explicación es que el agua inicialmente caliente tiene menos gas disuelto que el agua inicialmente fría, y que esto afecta las propiedades del superenfriado. El problema con esta explicación es que uno esperaría que dado que el agua tiene menos gas disuelto, por lo tanto menos sitios de nucleación, se superenfriaría a menor temperatura, no más. Otra explicación es cuando el agua inicialmente caliente se ha enfriado a 0°C (o menos), su distribución de temperatura en el contenedor varía más que en el agua inicialmente fría. Dado que la diferente temperatura induce el congelamiento [26], el agua inicialmente caliente se superenfriaba a mayor temperatura y por lo tanto se congela antes.

Tercero, esta explicación no funciona para todos los experimentos, porque muchos de los experimentadores eligen no observar el tiempo que tarde en formar un bloque completo de hielo, si no que parte del agua que alcance los 0°C [7, 10, 13] (o quizás el tiempo para que se forme una fina capa de

hielo en la superficie [17]). Mientras [12] dice que el único “efecto Mpemba verdadero” es cuando el agua caliente se congela completamente primero, otras publicaciones han definido el efecto Mpemba de forma diferente. Dado que el tiempo preciso del superenfriado es inherentemente impredecible (ver ejemplo [26]), muchos experimentos han elegido no medir el tiempo para que la muestra se convierta en hielo si no que el tiempo para el cual el estado base de equilibrio es hielo; esto es, el tiempo para cuando la superficie de la muestra alcanza el 0°C [7, 10, 13]. El argumento del superenfriado no aplica en estos experimentos.

Referencias

Historia

- 1. Aristotle in E. W. Webster, "Meteorologica I", Oxford U. P., Oxford, 1923, pgs 348b—349a
- 2. Bacon F 1620 Novum Organum Vol VIII of "The Works of Francis Bacon" 1869 ed. J. Spedding, R. L. Ellis and D. D. Heath (New York) pp 235, 337, quoted in T.S. Kuhn 1970 "The Structure of Scientific Revolutions" 2nd edn (Chicago: University of Chicago Press), pg 16
- 3. Descartes R 1637, "Les Meteores" 164 published with "Discours de la Methode" (Leyden: Ian Marie) 1637, quoted in "Oeuvres de Descartes" Vol. VI 1902 ed. Adam and Tannery (Paris: Leopold Cerf) pg 238 (trans. F. C. Frank)
- 4. Clagett, Marshall, "Giovanni Marliani and Late Medieval Physics", AMS press, Inc., New York, 1967, pgs 72, 79, 94

Experimento del Efecto Mpemba

- 5. Mpemba and Osborne, "Cool", Physics Education **4**, pgs 172—5 (1969)
- 6. Ahtee, "Investigation into the Freezing of Liquids", Phys. Educ. **4**, pgs 379—80 (1969)
- 7. I. Firth, "Cooler?", Phys. Educ. **6**, pgs 32—41 (1979)
- 8. E. Deeson, "Cooler—lower down", Phys. Educ. **6**, pgs 42—44 (1971)
- 9. Osborne, "Mind on Ice", Phys. Educ. **14**, pgs 414—17 (1979)
- 10. M. Freeman, "Cooler Still", Phys. Educ. **14**, pgs 417—21 (1979)
- 11. G.S. Kell, "The Freezing of Hot and Cold Water", American Journal of Physics, **37**, #5, pgs 564—5 (May 1969)
- 12. D. Auerbach, "Supercooling and the Mpemba effect: When hot water freezes quicker than cold", American Journal of Physics, **63**, #10, pgs 882—5 (Oct 1995)
- 13. J. Walker, "The Amateur Scientist", Scientific American, **237**, #3, pgs 246—7 (Sept. 1971)
- 14. B. Wojciechowski, "Freezing of Aqueous Solutions Containing Gases", Cryst. Res. Technol., **23**, #7, pgs 843—8 (1988)

Discusión general del Efecto Mpemba

- 15. New Scientist, **42**, #652, 5 June 1969, pg 515
- 16. New Scientist, 2 Dec. 1995, pg 22
- 17. New Scientist, **42**, #654, 19 June 1969, pgs 655—6
- 18. New Scientist, **43**, #657, 10 July 1969, pgs 88—9
- 19. New Scientist, **43**, #658, 17 July 1969, pgs 158—9
- 20. New Scientist, **43**, #658, 25 Sept. 1969, pg 662
- 21. New Scientist, **44**, #672, 23 Oct. 1969, pg 205
- 22. New Scientist, **45**, #684, 15 Jan. 1970, pgs 125—6
- 23. New Scientist, **45**, #686, 29 Jan. 1970, pgs 225—6
- 24. New Scientist, 2 Dec. 1995, pg 57

- 25. New Scientist, 16 Mar. 1996, pg 58

Artículos relacionados

- 26. J. Elsker, "The Freezing of Supercooled Water", Journal of Molecular Structure, **250**, pgs 245—51 (1991)
- 27. R.A. Brewster and B. Gebhart, "An experimental study of natural convection effects on downward freezing of pure water", Int. J. Heat Mass Trans. **31**, #2, pgs 331—48 (1988)
- 28. R.S. Tankin and R. Farhadieh, "Effects of Thermal Convection currents on Formation of Ice", Int. J. Heat Mass Trans., **14**, pgs 953—61 (1971)

Actualmente

La Royal Society of Chemistry (RSC) del Reino Unido convocó un concurso premiando con 1000 libras, a quien fuese capaz de presentar la explicación más original y científicamente válida de este fenómeno. Se recibieron unas 22.000 propuestas de las cuales 11 fueron seleccionadas para la votación final que se celebró el 10 de enero de 2013.

El ganador fue Nikola Bregovic del laboratorio de Química Física del Departamento de Química de la Universidad de Zagreb.

La afirmación entregada por J. D. Brownridge: “el agua caliente se va a congelar antes solo cuando el agua fría se superenfrie y por lo tanto, solo si la temperatura de nucleación del agua fría es varios grados más baja que la del agua caliente. Calentar el agua puede bajar, subir o no cambiar la temperatura de congelamiento espontánea” resumen en gran parte las conclusiones que se pueden sacar de casi todos los datos recolectados por mi y otros presentados antes. Sin embargo, el efecto de la convención, la cual va a aumentar la probabilidad de que el agua más caliente se congele primero debe enfatizarse con el fin de expresar una explicación más completa del efecto.

El hecho de que este efecto no ha sido completamente resuelto hasta el día de hoy es un indicador de que los problemas fundamentales permanecen ocultos, pero aún así no esperaba encontrar que el agua se comportara de formas tan diferentes en condiciones tan similares. Una vez más esta molécula simple y pequeña nos sorprende e intriga con su magia.

Ver esta información completa en

<http://www.rsc.org/mpemba-competition/mpemba-winner.asp>

<http://www.rsc.org/chemistryworld/2013/12/last-retort-mpemba-effect-mystery>