

# EL UNIVERSO EN UNA TAZA DE CAFÉ: ¡A SU SALUD MR. HAWKING!

*Stephen Hawking iluminó los agujeros negros. Un agujero negro no es tan negro, es similar a una taza de café.*

• **Cristián Erices**

*Dr. en Ciencias Físicas*



Cuando Albert Einstein completó su teoría de la Relatividad General en 1915, jamás dimensionó el gran impacto que tendría en los años venideros. Esta teoría predice la existencia de uno de los objetos más fascinantes de nuestro Universo: los agujeros negros. Existe una evidencia abrumadora que confirma su existencia. Hace un par de años se tomó literalmente la primera fotografía, esto es, la primera imagen de la "sombra" de un agujero negro en la galaxia M87 [1,2]. El año pasado parte del premio Nobel de física fue entregado por "el descubrimiento de un objeto compacto supermasivo en el centro de nuestra galaxia". Sí, al centro de nuestra Vía Láctea, a una distancia que la luz le tomaría 26.600 años en llegar, se detectó un agujero negro [3]. Mientras tanto en la Tierra, miro la taza de café sobre el escritorio y mi vista se pierde en el oscuro café. Me deleita saber que algo tan lejano es al mismo tiempo tan similar a algo tan terrenal. Los agujeros negros después de todo, no son tan negros como podríamos pensar. Son como una taza de café.

Un agujero negro es el estado final de una estrella que al agotar su combustible nuclear que les da estabilidad, colapsa, cayendo sobre sí misma por los efectos de la gravedad hasta transformarse en un objeto infinitamente pequeño, de densidad infinita. Es lo que en física llamamos una singularidad. Alrededor de ésta se forma un horizonte de eventos, una región del espacio con la curiosa propiedad de que si algo la traspasa con rumbo hacia la singularidad, no podrá salir jamás. Ni siquiera la luz. De ahí la negrura de estos objetos.

A principios del siglo XIX comienzan a desarrollarse las primeras nociones de la termodinámica. La revolución industrial demandaba mejorar los motores a vapor y para eso necesitábamos comprender el comportamiento de los gases y líquidos. Esta disciplina estudia sistemas con una enorme cantidad de constituyentes de los que solo son relevantes las cantidades macroscópicas. La taza de café contiene una enorme cantidad de moléculas cuyas posiciones y velocidades individuales no son relevantes. Más bien, nos resulta más práctico estudiar algunas magnitudes macroscópicas como el volumen, la presión, temperatura o energía. Relaciones simples entre estas magnitudes constituyen las leyes de la termodinámica. El desarrollo de la termodinámica dio origen a la Mecánica Estadística. En ella, las propiedades individuales de las partículas del sistema pueden ser relacionadas con las cantidades termodinámicas. En la Mecánica Estadística una cantidad fundamental es la "entropía". La entropía cuantifica

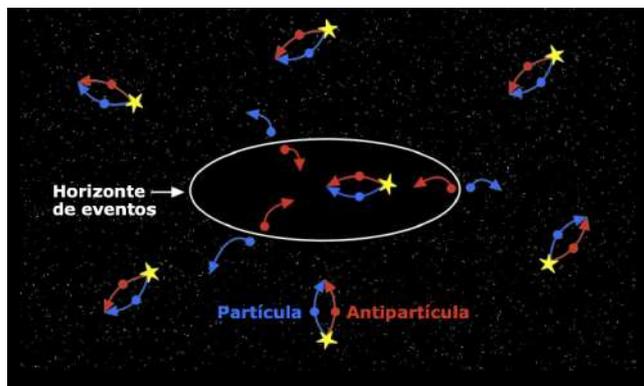
el número de estados de las partículas microscópicas de un sistema que da lugar a los mismos valores de las magnitudes macroscópicas. Las moléculas de la taza de café pueden ubicarse dentro de la taza o repartir su energía de distintas maneras, y aún así a nivel macroscópico dar origen a idénticas tazas de café con el mismo volumen, la misma presión y la misma temperatura. Según la segunda ley de la termodinámica la entropía siempre aumenta, es decir, las variables termodinámicas tienden a tomar valores que maximizan el número de posibles configuraciones microscópicas. Si a la taza de café le echamos leche, probablemente los dos líquidos formarán una solución homogénea. La cantidad de estados microscópicos que producen esta mezcla es inmensamente mayor, es decir tiene mayor entropía, que aquellos donde la leche y el café quedan completamente separados, los cuales constituyen estados de menor entropía. Podemos entender entonces a la entropía como una medida del grado de desorden de un estado.

Casi 50 años después de completar la Relatividad General, cuando se pensaba que los agujeros negros eran solamente un constructo teórico, vivíamos una época efervescente en la física gravitacional. Nuestros más brillantes físicos teóricos de la época, descubrían propiedades termodinámicas de los agujeros negros [4]. Curiosamente, el área de la región del espacio donde nada puede escapar, el área del horizonte de eventos de un agujero negro, siempre crece cada vez que el agujero negro "traga" materia (estrellas, polvo, etc.). Stephen Hawking demostró este resultado en toda su generalidad. Incluso en procesos más exóticos donde la masa del agujero negro puede disminuir, el área del horizonte de eventos siempre aumenta. Lo que para Hawking era solamente una mera analogía, para Jacob Bekenstein era algo más profundo: Los agujeros negros tendrían entropía y esta sería proporcional al área del horizonte de eventos. Él demostró que en todos los ejemplos que aparentemente contradecían a la segunda ley, la incorporación de la entropía del agujero negro salvaba el cálculo. A Hawking le parecía absurda esta idea. Si los agujeros negros tuviesen entropía, estos serían sistemas termodinámicos y por tanto, deberían ser objetos compuestos de constituyentes microscópicos y estar provistos de temperatura. Cualquier objeto que tenga cierta temperatura, incluso un cubo de hielo, inevitablemente emite radiación. La radiación generada por un cubo de hielo no la podemos ver a simple vista pero en algunos casos más calientes sí. Un agujero negro en cambio, en su concepción original, debiese tener temperatura cero porque no emite nada, ni siquiera luz.

Bekenstein había evadido la cuestión de la temperatura. Para él los agujeros negros debían ser fríos y la temperatura que su propia teoría parecía implicar debía ser irrelevante [5]. Un artificio teórico en su artículo de 1972. Sin embargo, en agosto de 1975 Stephen Hawking mostró una propiedad asombrosa de los agujeros negros. Estudiando las propiedades cuánticas del vacío en las inmediaciones del horizonte de eventos, demostró que éstos emiten radiación, tal cual como si tuvieran temperatura, hoy llamada “radiación de Hawking” [6]. Hawking demostró que al emitir radiación los agujeros negros van perdiendo masa y al mismo tiempo van aumentando su temperatura hasta que el agujero negro termina su vida evaporándose violentamente, tal como una gota de agua lo hace sobre un sartén caliente. Entonces, ¿por qué un agujero negro emite radiación si nada puede escapar de él?!

Poco más de cinco años después de la Relatividad General nació la Mecánica Cuántica: La física del mundo atómico y subatómico. Una de las predicciones más profundas de esta disciplina es que el vacío, la ausencia absoluta de materia y energía, la nada misma, es inquieta. Esto se entiende debido al “principio de incertidumbre” de Werner Heisenberg, según el cual no es posible determinar con precisión absoluta la energía de un sistema y el instante en que acontece. Aún con el instrumento más preciso, nunca podríamos evitar el principio de incertidumbre. Es una restricción de la Naturaleza. La propia indeterminación de la energía, permite que la ley de conservación de la energía se declare sin jurisdicción en el mundo de lo muy pequeño. En consecuencia, en un instante suficientemente pequeño de tiempo, casi instantáneamente, un par de partículas, digamos un electrón y -su antipartícula, de igual masa y carga eléctrica opuesta- un positrón, pueden crearse y aniquilarse entre ellos, sin violar en el proceso ninguna ley física. Esto ocurre continua y aleatoriamente en cualquier parte del espacio. Hawking mostró que si este proceso cuántico ocurre en las inmediaciones del horizonte de un agujero negro, podría ocurrir que uno de los pares no pueda volver a aniquilarse, puesto que una de las partículas podría caer al interior del agujero negro, mientras que la otra quede afuera, alejándose. Si bien es cierto, la creación y destrucción de pares de partículas ocurre aquí y allá, lejos del agujero o en su interior, es sólo en el horizonte de eventos donde este proceso es relevante para el fenómeno de la radiación de Hawking. En este caso, el par perderá contacto para siempre porque la partícula que cae jamás podrá salir. La partícula exterior en cambio, podrá escapar a la atracción gravitacional y ser detectada lejos del agujero negro. Un observador distante podrá detectar un flujo de partículas provenientes del horizonte de eventos del agujero negro. El cálculo detallado que Hawking realizó, mostraba que esta radiación tenía exactamente la forma que uno esperaría de un cuerpo caliente como la taza de café.

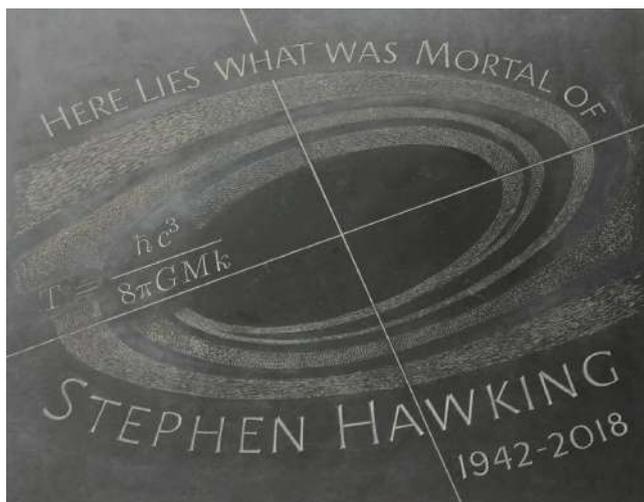
Sabemos que la taza de café está hecha de moléculas de agua moviéndose a gran velocidad, las que en conjunto obedecen las leyes de la termodinámica, pero ¿de qué está hecho un agujero negro para que satisfaga las mismas leyes? Para esto debemos entender la descripción microscópica de un agujero negro, lo que se consigue encontrando una teoría que reconcilie a los dos pilares fundamentales de la física moderna: la Mecánica Cuántica y la Relatividad General. Una gran teoría que unifique a ambas es el santo grial de la física. Estas preguntas y muchos problemas abiertos aún, como la materia y energía oscura, han llevado a modificar la Relatividad General. Actualmente publicamos una investigación en una teoría de gravedad modificada, donde los agujeros negros presentan exóticas e interesantes propiedades termodinámicas. Esta teoría predice la existencia de agujeros negros que pueden convertirse el uno en el otro cuando alcanzan cierta temperatura, tal cual como el agua pasa de un estado a otro a determinadas temperaturas. Al hacer la cuenta, la equivalencia con los estados del agua es notable [7].



**Figura 1**

En las inmediaciones del horizonte de eventos el par partícula-antipartícula no puede aniquilarse. Las partículas que quedan fuera podrán ser detectadas por un observador eventualmente obteniendo una lectura en un termómetro.

La Mecánica Cuántica y la Relatividad General son teorías irreconciliables. Stephen Hawking fue el primero en encontrar un puente de entendimiento entre ambas, puesto que la radiación que lleva su nombre corresponde a un efecto cuántico en un agujero negro. Hawking iluminó la región más oscura de nuestro Universo, y abrió una puerta para seguir desentrañando la naturaleza cuántica de la gravedad. Mientras nuestros humildes esfuerzos por lograrlo aún continúan, embelesado aún mirando la taza sobre el escritorio, veo el legado de Hawking brillando desde la negrura del café. Despierto. ¡A su salud Mr. Hawking!



**Figura 1**

Esta imagen es de la tumba de Stephen Hawking (1942-2018) en la abadía de Westminster. Antes de morir manifestó que su fórmula más conocida apareciera en su tumba. Al lado izquierdo la fórmula de la temperatura de radiación de Hawking representa la temperatura de un agujero negro ( $T$ ) expresada en términos de su masa ( $M$ ), la velocidad de la luz ( $c$ ), la constante de Planck ( $\hbar$ ), la constante de Newton ( $G$ ) y la constante de Boltzmann ( $k$ ). Las constantes de la mecánica cuántica, la gravitación y la termodinámica relacionadas en una sola fórmula.

Fuente imagen: <https://stephenhawkingfoundation.org>

## Referencias

- [1] K. Akiyama et al. (Event Horizon Telescope), *Astrophys. J.* 875, L1 (2019).
- [2] K. Akiyama et al. (Event Horizon Telescope), *Astrophys. J.* 875, L6 (2019).
- [3] R. Genzel et al. *A&A* 615, L15 (2018).
- [4] J. M. Bardeen, B. Carter and S. W. Hawking, *Commun. math. Phys.* 31, 161 (1973).
- [5] J.D. Bekenstein *Lett.Nuovo Cim.* 4, 737 (1972).
- [6] S. W. Hawking, *Commun. math. Phys.* 43, 199 (1975).
- [7] C. Elices, P. Filis, E. Papantonopoulos. [arxiv.org/abs/2104.05644](https://arxiv.org/abs/2104.05644) (2021)