

Los aportes a la ciencia realizados por Stephen Hawking: un ensayo en su memoria y legado

Stephen Hawking's contributions to science: an essay in his memory and legacy

Autores:

Alejandro Pérez¹ y Oscar Reula²

¹Profesor, Aix-Marseille Université, miembro del Intitut Universitaire de France.

²Profesor Titular, Universidad Nacional de Córdoba, Investigador Principal, CONICET.

REVISTA
DE
ENSEÑANZA
DE LA
FÍSICA

En esta nota queremos ahondar en las contribuciones científicas de Hawking, aunque, de manera ineludible, la misma estará permeada por su singular existencia.

La obra de Hawking ha sido vasta, contando alrededor de un centenar de trabajos de investigación, así como también libros y artículos de divulgación. La mayoría de sus trabajos son de gran importancia y han influido en la comunidad, pero por razones de espacio y tiempo, solo nos detendremos en los que, a nuestro criterio, han sido los más influyentes.

Quizá la serie de trabajos de mayor influencia hayan sido aquellos de su primera época, cuando estudió las condiciones bajo las cuales los espacio tiempos evolucionan hacia una singularidad. En los sesenta la visión que se tenía del universo distaba mucho de la actual, todavía se pensaba en uno inmutable, que había existido por siempre y así seguiría. En él, los agujeros negros no tenían mucha cabida, eran solo una especulación teórica. Esa visión estaba en pleno cambio, por un lado ya era un hecho la ley de Hubble por la cual los objetos se están distanciando unos de otros, así como también la explicación de la abundancia de elementos basada en la nucleosíntesis. Ya se entendía que la dinámica de las grandes escalas del universo estaba dictada por la gravedad. Por el otro, a escalas espaciales mucho menores, la teoría del colapso gravitatorio de estrellas masivas también apuntaba a darle un rol central a la gravitación. Una vez que las densidades se hacían muy grandes, dicha fuerza se tornaba insuperable y un colapso sin fin ocurría.

Fue el momento preciso donde una generación de grandes físicos inauguró una nueva rama de la física, la gravitación tal como la conocemos hoy. Uno de los líderes de esa generación fue Hawking. Junto con Penrose y Geroch comenzaron a generar los primeros teoremas demostrando que bajo ciertas condiciones genéricas la evolución gravitatoria inevitablemente genera singularidades. Vieron que esto sucedía con el colapso gravitatorio de cuerpos muy densos bajo condiciones genéricas (sin simetrías simplificadoras) y con el universo completo si evolucionamos hacia el pasado, es decir, dieron la base matemática al *big bang*. En pocos años habían cambiado el foco de todo un campo de la física, incorporando herramientas y visiones novedosas

Su trabajo no terminó allí: junto con Ellis escribió un libro de texto, *La estructura a gran escala del espacio-tiempo* por el cual estas nuevas ideas fueron diseminadas en las universidades de todo el mundo. Con base en el mismo, los primeros estudiantes de relatividad de nuestro país pudimos acceder a estos conocimientos. Fue un libro novedoso, que aún conserva la fresca mezcla con el rigor matemático. Como único autor, escribió un libro de divulgación, *Una breve historia del tiempo*, en el cual llevó sus resultados a un nivel donde sus consecuencias podían ser entendidas por todos. Dicho libro ha sido la fuente de inspiración de generaciones de futuros científicos, transformando además a su autor en la figura pública que conocemos.

Volviendo a sus trabajos, la contribución de Hawking que, en retrospectiva, aparece como tal vez su mayor legado al futuro de la física son aquellos resultados que marcan una transición hacia los aspectos cuánticos de la gravedad. El primer resultado en esta dirección es el famoso teorema de unicidad de los agujeros negros estacionarios. El teorema (completamente clásico) dice que, independientemente de las condiciones que dieron lugar a su formación, un agujero negro está caracterizado solamente por dos cantidades: su masa y su cantidad de momento angular. Este último se construye con los aportes de Hawking y de otros relativistas como Israel, Carter y Robinson a finales de los sesenta y principios de los setenta.

El teorema de unicidad presenta el primer indicio de una analogía con la termodinámica que se irá volviendo más y más rigurosa gracias a los aportes de varios físicos, pero donde Hawking juega un papel fundamental. Para entender estos resultados es útil pensar en una analogía: Si ponemos un poco de gas en una caja y esperamos el tiempo suficiente hasta llegar al equilibrio termodinámico, el estado final del gas estará caracterizado (a los fines termodinámicos) por solamente tres cantidades: el número de moléculas en el gas, el volumen de la caja, y la energía contenida. Independientemente de cómo pongamos el gas en la caja: de a poco por un orificio en una de las paredes, de repente pinchando un globo que contiene el gas en el centro, etc., el estado final es siempre el mismo. El teorema de unicidad de agujeros negros dice que estos últimos se comportan de manera análoga. El proceso de alcanzar el equilibrio termodinámico para el gas en la caja y el colapso gravitacional que produce un agujero negro se asemejan en que, en ambos casos, se pierde en el estado final la memoria de los detalles de las condiciones iniciales. Esta analogía puede parecerse descabellada, sin embargo, nos conducirá de manera directa a una visión de la frontera de la física fundamental que en gran medida se la debemos a Hawking.

En 1971 (después de interacciones con Roger Penrose) Hawking demuestra la ley de las áreas de agujeros negros que dice que el área de la frontera que define la región de donde nada puede escapar (el horizonte de eventos) solo puede aumentar en cualquier interacción con un agujero negro. La simple ecuación que resume este resultado es:

$$\Delta(\text{AREA}) \geq 0$$

En 1973, junto con Bardeen y Carter, Hawking demuestra que los agujeros negros satisfacen otras leyes de conservación cuando son perturbados. ¡Gran sorpresa! Las leyes se parecen formalmente a las leyes básicas de la termodinámica (la analogía con la caja de gas sigue en pie y de manera más profunda, como veremos).

La importancia de estos resultados para lo que sigue justifica una pequeña descripción de las mismas. Cuando uno manipula cuerpos rígidos, la conservación de la energía tiene una forma simple. Por ejemplo, si levantamos una piedra a una cierta altura, haremos un trabajo, éste será acumulado en energía potencial de la misma. Podemos escribir la ecuación:

$$\Delta(\text{ENERGIA}) = \text{TRABAJO}$$

donde el lado izquierdo denota el cambio de energía. Si la dejamos caer, la piedra devolverá esta energía en energía cinética que podría transformarse en trabajo otra vez. En termodinámica (la física de los gases y de las máquinas térmicas, como los motores de autos y las máquinas de vapor) la conservación es más complicada debido a que la naturaleza atómica o molecular de la materia se vuelve relevante. En termodinámica la ecuación de conservación de la energía es la llamada *primera ley de la termodinámica*

$$\Delta(\text{ENERGIA}) = \underbrace{T \times \Delta(\text{ENTROPIA})}_{\text{CALOR}} + \text{TRABAJO}$$

El trabajo que podemos hacer sobre un gas, presionando por ejemplo un pistón, no se verá acumulado en cambio de energía disponible solamente, una parte del trabajo se ‘pierde’ en el movimiento caótico de las moléculas del gas. Esta parte se la denomina calor y está caracterizada por la temperatura T multiplicada por la denominada *entropía* que es una medida del desorden molecular del gas a nivel microscópico.

La *segunda ley de la termodinámica* dice que la entropía solo puede aumentar ante una intervención de cualquier tipo si uno considera la totalidad de un sistema aislado (el desorden solo puede aumentar debido otra vez a la existencia de grados de libertad microscópicos no accesibles a un agente macroscópico; p. ej. el operador de máquinas de vapor). La ecuación es:

$$\Delta(\text{ENTROPIA}) \geq 0$$

Esta ley es muy intuitiva si la miramos del ángulo correcto. De manera aproximada corresponde a la razón por la cual la casa se llena de polvo y desordena irremediablemente si no intervenimos. La ley va aun más lejos, cuando ordenamos la casa y sacamos el polvo el desorden disminuye y la entropía baja en nuestra casa, pero solamente a costa de un incremento del desorden afuera, que hace que el desorden total del mundo aumente. La analogía aquí de las moléculas son las partículas de polvo y los juguetes de los niños. La razón de la *segunda ley de la termodinámica* es puramente probabilística debido a que la configuración que consideramos como orden (ausencia de polvo y juguetes en sus cajones) es demasiado poco probable entre las muchísimas configuraciones donde el polvo se acomoda de infinitas maneras y los juguetes terminan por todas partes. En el caso termodinámico, los juguetes o el polvo son las moléculas y átomos, y la idea intuitiva aproximada que evocamos aquí se vuelve una ley rigurosa para observadores macroscópicos (aquellos incapaces de manipular molécula por molécula).

Hawking junto a Bardeen y Carter descubrieron que cuando uno perturba o interactúa con agujeros negros, la conservación de la energía (que se deduce rigurosamente de las ecuaciones de Einstein) toma una forma sorprendentemente similar a la de la primera ley de la termodinámica. Para agujeros negros tenemos la *primera ley de agujeros negros*:

$$\Delta(\text{MASA}) = \underbrace{\frac{g_{AN}}{8\pi} \times \Delta(\text{AREA})}_{\text{CALOR?}} + \text{TRABAJO}$$

Donde g_{AN} es una medida de la aceleración de la gravedad en la frontera del agujero negro (denominada gravedad de superficie), el ÁREA es el área de la frontera que define la zona de donde nada puede escapar en el agujero negro, el llamado horizonte de eventos y la $MASAc^2$ es estrictamente una medida de la energía contenida en el sistema (recordar la célebre fórmula de Einstein $E = mc^2$). La primera ley de Hawking-Bardeen-Carter nos dice que cuando interactuamos con un agujero negro haciendo algún trabajo (esencialmente en este caso arrojando materia en el mismo) el trabajo o aporte de energía de esta materia no es equivalente al cambio de energía del sistema, es decir, el cambio de su masa gravitatoria. Como en termodinámica hay una tercera cantidad que juega el papel análogo del calor, una parte de la energía está caracterizada por el cambio del ÁREA del agujero negro multiplicado por el valor de la aceleración de la gravedad en su superficie.

Notar ahora que la analogía termodinámica es aun más fuerte en el contexto de la ley de las áreas de Hawking, *segunda ley de los agujeros negros* que evocamos más arriba:

$$\Delta(\text{AREA}) \geq 0$$

Esta última, y bajo la luz de la primera ley, sugiere la identificación de $\text{ÁREA}=\text{ENTROPÍA}$ (desorden, pero ¿desorden de qué?) y g_{AN} con una especie de temperatura. La analogía fue tomada muy en serio por Jacob Bekenstein quien postula en el mismo año en que aparece el trabajo citado, que los agujeros negros poseen una entropía y da argumentos heurísticos para justificar que esta debe ser proporcional al ÁREA del horizonte de eventos. Si bien esta posibilidad es implícitamente sugerida en el artículo de Hawking con Bardeen y Carter, cuando sale el artículo de Bekenstein, Hawking es uno de sus críticos más fuertes. Las leyes de los agujeros negros son consecuencia de las ecuaciones de Einstein en el vacío y el vacío no puede tener propiedades térmicas, la única temperatura que podemos asociar a un agujero negro es cero absoluto, argumenta Hawking.

Es notable que poco tiempo después Hawking deberá contradecir su posición con un resultado que quizás sea el más espectacular de su carrera por las perspectivas que abrió para la física fundamental. La clave está en que el vacío no es completamente vacío cuando uno tiene en cuenta la mecánica cuántica. Debido a fluctuaciones cuánticas, pares partícula-antipartícula aparecen espontáneamente para destruirse poco tiempo después al volverse a encontrar. En la ausencia de campos gravitacionales, esta aparición-desaparición de materia es tal que, en promedio (y en el estado de vacío), la cantidad de materia es nula. Hawking se da cuenta que, en la presencia del fuerte campo gravitacional de un agujero negro, esta última conclusión puede cambiar. De hecho, mediante un cálculo preciso, donde el genio matemático de Hawking (ya demostrado en sus trabajos sobre singularidades y agujeros negros clásicos) se combina a la intuición física remarcable, Hawking demuestra que un agujero negro emite partículas (creadas por el campo gravitatorio a partir del vacío) en un espectro que corresponde exactamente al de un cuerpo negro a temperatura

$$T = \frac{g_{AN}}{2\pi}$$

Un imagen física que es correcta en el sentido apropiado es la siguiente. Pares de partícula-antipartículas aparecen y desaparecen como en el caso del vacío en la ausencia de un campo gravitatorio. En la presencia de un agujero negro estos pares pueden ser creados en la vecindad del horizonte de eventos. Un caso especial corresponde a aquel donde una partícula aparece en el exterior del agujero negro mientras que su correspondiente antipartícula lo hace en el interior. Existe una probabilidad que la partícula creada afuera tenga la suficiente energía como para escapar lejos hacia el infinito. Su par, en cambio, por haber aparecido dentro del horizonte no puede escapar y está condenado a caer hacia el interior. Además, se puede mostrar que debido a las extremas condiciones cercanas al horizonte de eventos, cuando una partícula se crea con energía positiva fuera del horizonte su par creado del otro lado del horizonte tendrá una energía negativa de igual magnitud (según la noción de energía correspondiente a los observadores exteriores; la noción de energía es relativa). De esta manera, efectos cuánticos (fluctuaciones de vacío) permiten a una partícula de energía positiva creada justo afuera del horizonte, escapar del agujero negro mientras este absorbe otra partícula de energía negativa. Estrictamente, nada sale del agujero negro, una partícula real es emitida desde el exterior a cambio de alimentar el agujero con su pareja creada dentro con energía negativa. Este mecanismo intuitivo corresponde a un cálculo preciso en el contexto de teoría de campos (mecánica cuántica para partículas fundamentales) y relatividad que permitió a Hawking calcular precisamente la creación de partículas para encontrar que observadores externos percibirán un brillo (flujo de partículas) provenientes del agujero negro con un espectro térmico a la temperatura de Hawking que evocamos más arriba.

El cálculo de Hawking pone entonces en términos sólidos la intuición de Bekenstein. La primera ley de los agujeros negros de Hawking y otros debe ser interpretada como una relación termodinámica. Tenemos entonces:

$$\Delta(\text{MASA}) = \underbrace{\frac{\frac{g_{AN}}{2\pi}}{T} \times \frac{\Delta(\text{AREA})}{4}}_{\text{CALOR!}} + \text{TRABAJO}$$

Pero, entonces, el ÁREA del horizonte dividido 4 (el factor sale de la combinación de la primera ley encontrada por Hawking y su cálculo de la temperatura) debe ser interpretado como una ENTROPÍA asociada al agujero negro. Más naturalmente al horizonte del agujero negro que define la noción geométrica de ÁREA . ¿Que representa esta ENTROPÍA ? Desde el punto de vista termodinámico (que es físicamente el correcto debido precisamente al análisis de Hawking) esta entropía representa una medida de desorden microscópico. Pero, ¿desorden de qué? En los de sistemas termodinámicos usuales como gases la entropía caracteriza el desorden atómico o molecular. En el caso del agujero negro la cosa es menos clara a primera vista. Sobre todo en las unidades en las que los físicos teóricos acostumbran trabajar donde las constantes fundamentales tales como la velocidad de la luz $c=1$, la constante de Newton $G=1$, y la constante de Planck $h=1$. Si reescribimos las ecuaciones incluyendo las constantes fundamentales entonces

$$\text{ENTROPIA} = k_B \frac{\text{AREA}}{4G\hbar/c^3} = k_B \frac{\text{AREA}}{4\ell_p^2}$$

En esta sorprendente fórmula intervienen todas las constantes fundamentales de la física, la de Boltzmann, la gravitacional, la de Planck, y la velocidad de la luz, relacionando la entropía del agujero negro con su área. La combinación de constantes fundamentales tiene unidades de área y se la puede escribir como el cuadrado de una longitud fundamental ℓ_p llamada longitud de Planck.

Las preguntas que se desprenden de tratar de entender la naturaleza fundamental de esta última expresión es quizás el legado más importante del trabajo de Hawking. La fórmula anterior sugiere entonces que la entropía de agujeros negros representa una medida del desorden microscópico a la escala de Planck. Así como la termodinámica ordinaria nos permite inferir a través de sus leyes la existencia de átomos y moléculas que conforman los gases, la termodinámica de agujeros negros nos indica fuertemente que el espacio vacío tendría también una estructura microscópica (¿atomista?) a la escala de Planck. Así como en mecánica cuántica la energía ocurre en paquetes discretos (estas son las partículas fundamentales en teoría de campos) la combinación de la gravedad con la cuántica daría lugar a una discretización de la geometría misma del espacio y el tiempo. El espacio-tiempo estaría compuesto por ladrillos fundamentales de tamaño comparable a la escala de Planck.

Atención, esto último es sugerido por el trabajo de Hawking, pero aún estamos muy lejos de una comprensión clara de la física a estas escalas. La física que debería describir la estructura microscópica del espacio-tiempo a partir de la cual los resultados de Hawking tendrían una explicación fundamental se la llama gravedad cuántica. La construcción de tal teoría permanece como un problema abierto y muy difícil. Sin embargo, el trabajo de Hawking sobre la entropía de agujeros negros es, quizás, el indicio más directo de algunos de sus aspectos; y es por eso que adquiere una gran importancia, un faro en un área donde avanzamos a tientas.

Quizá la razón principal de la dificultad para entender la gravedad cuántica radique en el hecho de la extrema pequeñez de la escala de Planck, que vuelve muy difícil acceder a su fenomenología a través de la experiencia directa en situaciones normales. Concretamente, la longitud de Planck es del orden de 10^{-33} cm. Si pensamos que el espacio que corresponde al área de la hoja de papel donde está escrito este artículo está hecho de elementos fundamentales con área del orden del área de Planck ℓ_p^2 , habría entonces más o menos 10^{69} de tales unidades. En la revista completa hay del orden de 10^{23} átomos, esto significa que por cada pedacito de papel ocupado por un átomo hay del orden de $\approx 10^{45}$ unidades de Planck! Es difícil tener una idea intuitiva de estos números, otra manera de visualizar la escala de Planck es la siguiente: si tuviésemos una lupa hipotética que la agrandase hasta verla de 1m, entonces, con la misma lupa, un protón se vería tan grande como nuestra galaxia (¡100000 años luz de diámetro!).

Sin embargo, esta física microscópica del espacio-tiempo es de fundamental importancia para la comprensión de la física en las situaciones extremas, donde la gravedad se vuelve muy fuerte. En particular, muy cerca de la singularidad del *big bang* (predicha por los teoremas de Hawking) y en el interior de los agujeros negros. En ambos casos el espacio tiempo se contrae en algunas direcciones de manera infinita cuando estudiamos su dinámica usando la relatividad general (estos son los teoremas de singularidad). Cerca de estas singularidades la estructura discreta-atómica a la escala de Planck cobra una importancia fundamental. Pero aún no sabemos describir esta física de manera confiable.

Los trabajos de Hawking dan indicios sólidos sobre algunos aspectos de esta nueva física. Tal vez mucho tiempo nos separe de una teoría de gravedad cuántica, existen diversas propuestas, pero ninguna entre ellas es completamente satisfactoria. Hawking intentó definir una formulación cuántica de la gravedad en términos de ciertas técnicas matemáticas basadas en la continuación analítica de cantidades formales. Su propuesta surgió en los ochenta y se la llamó *gravedad cuántica euclídea*. Lamentablemente, no llegó nunca muy lejos a pesar del gran empuje que los seguidores de Hawking le dieron. En los últimos años Hawking apoyó de manera bastante explícita las formulaciones de las teorías de cuerdas. Muchos de sus últimos trabajos fueron bastante vagos y con poco impacto real entre los expertos.

Sin embargo, existe una sorprendente continuidad en las contribuciones de Hawking que marcan una clara dirección hacia la física de lo cuántico en el contexto gravitacional. Sus resultados abren puertas concretas hacia esa nueva física aún pobremente comprendida. Es por eso que los trabajos de Hawking tendrán un impacto duradero y jugarán un rol importante en el entendimiento de ese siguiente paso en la comprensión de la estructura microscópica y fundamental de la naturaleza. Un paso ciertamente difícil de dar, pero los que quedamos pensando en estas cosas y los que vendrán, tendremos todo el tiempo por delante.