

Mi clásico favorito

Recordando a Stephen Hawking

por Emilio Elizalde*

Stephen Hawking, cosmólogo, viajero espacial y héroe —según constaba en su página *web*— fue uno de esos escasísimos físicos conocidos por todo el mundo. Quiero aquí recordarlo, como científico y como persona, contando ya de paso algunas de mis vivencias. Como cuando, siendo yo aún estudiante de doctorado, supe de él por uno de sus grandes descubrimientos; o cuando un día tuve el grato placer de comer a su lado.

El día en que murió Stephen Hawking (8/1/1942-14/3/2018) —de ello hace ya más de tres años— me invadió la tristeza. A menudo he recordado, durante el tiempo transcurrido, las diversas ocasiones en que coincidí con él, algunas aderezadas con anécdotas curiosas. Y cada curso le he venido dedicando un seminario, en que he repasado los diversos aspectos de su tan importante legado como científico [1]. Todo ello lo resumo aquí.

Mi primer “encuentro” con Hawking

Mi primer encuentro con Hawking fue de hecho un encuentro virtual. Eso no representaría ahora ninguna novedad, más bien al contrario, ya que hoy día son virtuales, si no todos, la mayoría de los seminarios y conferencias que se imparten por todas partes y a cualquier nivel. Pero estoy hablando del año 1975. Yo estaba por entonces intentando completar mi trabajo de tesis doctoral, que defendí con éxito al año siguiente. Y, como estudiante ya avanzado de postgrado, el Departamento de Física Teórica de la Universidad de Barcelona había accedido a financiar mi participación en la que iba a ser mi primera gran escuela internacional, de dos semanas de duración: las XIV Internationale Universitätswochen für Kernphysik [2]. Tenía lugar en Schladming, bellísima localidad de los Alpes

austriacos, cada par de años, siempre hacia finales del invierno. Llegué allí tras un accidentado viaje en automóvil, pero que a la postre resultó magnífico. Ocurrió que tuvimos que hacer dos noches por el camino, por diversos problemas que sufrimos con el vehículo que habíamos alquilado. Viajaba con un par de colegas de Barcelona, de más edad que yo, y nos lo tomamos con calma, bordeando los espectaculares lagos del norte de Italia y atravesando luego los numerosos túneles que hay bajo el paso del Brennero [3].

No podíamos siquiera imaginar que nos estaba aguardando una conferencia tan extraordinaria; aunque, de hecho, yo en aquellos momentos entendí más bien poco de lo que nos fueron contando todo aquel elenco de ponentes excepcionales. Julian Schwinger, importantísimo premio Nobel de Física, era la máxima estrella, pero también había otros *speakers* de gran categoría. Schwinger había obtenido el Premio diez años atrás, en 1965, compartido con Richard Feynmann y Sin-Itiro Tomonaga, por la cuantización de la electrodinámica. Ahí es nada. Aquello fue el origen de desarrollos importantísimos de la Física. En palabras de Freeman Dyson, la nueva teoría había aportado orden y armonía al dominio de las fuerzas fundamentales intermedias de la naturaleza, quedando fuera ya, tan sólo, la gravitación y las fuerzas nucleares. La manera de Schwinger de atacar el problema era, sin embargo, muy distinta a la de Feynmann, que utilizaba

sus famosos diagramas. Schwinger lo hacía mediante prolongaciones analíticas, una herramienta de gran elegancia matemática que yo mismo usaría más adelante, durante buena parte de mi vida como científico, en el contexto de la famosa función zeta. Pero, en aquellos momentos, yo de todos estos temas aún sabía bastante poco.

Recuerdo que por las noches Schwinger jugaba con nosotros, los más jóvenes, a los bolos austriacos, mucho más pequeños que los de los juegos de bolera ordinarios. Tiraba muy mal y rara vez acertaba; sin embargo, continuaba jugando entusiasmado. Pero —y ahora viene lo del encuentro “virtual”— todos los conferenciantes, incluyendo al propio Schwinger, quedaron eclipsados durante la conferencia por unos resultados que había obtenido Hawking hacía poco, y que iban de boca en boca. Todavía no habían sido publicados, pero todo el mundo hablaba de ellos: en los descansos fuera de las sesiones, a la hora de comer y por las noches. Hawking no estaba presente en Schladming, y a lo que parecía su trabajo era todavía una versión preliminar, lo que denominamos un *preprint* [4]. Y ese era el que tomaban como referencia en sus discusiones los participantes en la Conferencia. El artículo de Hawking fue posteriormente publicado en la prestigiosa revista *Communications in Mathematical Physics* [5]. Puedo asegurar que la emoción que generaban aquellos resultados era fuertemente contagiosa, incluso para mí, que no entendía en detalle de qué iba

* Profesor de Investigación *Ad Honorem*. Instituto de Ciencias del Espacio, ICE-CSIC. Institut d'Estudis Espacials de Catalunya, IEEC.

Figura 1. Imagen de Stephen Hawking, elegido miembro de la Royal Society en 1974. (Cortesía de NASA StarChild. Dominio público).



aquello. Como ya he dicho, el interés crecía cada día que pasaba, en los corrillos que se formaban a todas horas. Yo quedé muy sorprendido por aquella situación, que he recordado siempre —vuelvo a repetir que se trataba de mi primera conferencia internacional, fuera de casa.

Un artículo de fama merecida

No fue sino más tarde cuando al fin pude comprender que todo aquel interés y expectación que había vivido en Schlading estaban más que justificados: ¿Cómo demonios era posible que un agujero negro fuese capaz de emitir energía? Y también supe luego que algunos colegas más veteranos se habían esforzado mucho, al principio, para probar que tal cosa no podía suceder, de ninguna manera; para demostrar la falsedad de aquella maravillosa expresión universal que Hawking había encontrado para la temperatura, $T_{BH} = \hbar c^3 / 8\pi k G M$, a la que todo agujero negro radía como si se tratase de un cuerpo negro perfecto. Una fórmula sublime, exquisita, que combina de una manera extremadamente sencilla y precisa las más importantes constantes fundamentales de la naturaleza: la constante de Planck, \hbar (de la física cuántica), la velocidad de la luz, c (física relativista), la constante de Boltzmann, k (de la termodinámica), la constante de la gravitación universal, G (física clásica o newtoniana), y el número π (representando a la matemática). Y haciendo que, en definitiva, la temperatura del agujero negro, T_{BH} , dependa tan sólo de su masa, M , de manera inversamente proporcional. ¡Qué maravilla!

En poco tiempo, incluso los críticos más feroces tuvieron que admitir que la fórmula era del todo

correcta, que no le faltaba ni le sobraba nada (ahora hay ya media docena de demostraciones rigurosas de ella, por caminos completamente distintos). Y que, además, abría un nuevo campo, inmenso, de investigación, hasta entonces aún inexplorado, a caballo entre la Relatividad General y la Física Cuántica.

No es de extrañar que aquel artículo de Hawking tenga ahora un número récord de cerca de trece mil citas, lo que es muy excepcional para un trabajo de carácter tan marcadamente matemático.

Uno de los primeros en reconocer, en todo su significado, la extraordinaria importancia del resultado de Hawking fue Paul Davies, que lo extendió a una situación distinta, pero más común y general, si cabe. Davies trabajó también sobre la versión en forma de *preprint*, la misma que ya he mencionado y de que disponían los participantes de Schlading, por las mismas fechas, tal como queda reflejado en la lista de referencias de su trabajo [6]. Un procedimiento análogo al que había sido utilizado por Hawking [5] para demostrar la creación de partículas por agujeros negros, fue aplicado por Davies, directamente, al sistema de coordenadas de Rindler para un espacio-tiempo plano. El resultado fue que un observador sometido a una aceleración uniforme, κ , vería aparentemente a una superficie fija irradiar a una temperatura de $\kappa/2\pi$. En términos sencillos, y desde nuestra presente perspectiva, se puede decir que, mientras el hallazgo de Hawking abrió el camino al concepto de *termodinámica de los agujeros negros*, Davies extendió esta noción a lo que luego se ha denominado la *termodinámica del espacio-tiempo*.

En otro artículo muy influyente, publicado un año más tarde, William Unruh sustituyó el agujero negro por condiciones de frontera específicas en el horizonte pasado del espacio-tiempo; y demostró que, cuando se aceleraba el detector, incluso en un espacio-tiempo plano, se detectarían partículas que habrían sido creadas por el vacío cuántico [7]. De este modo, fue en realidad Unruh quien estableció una conexión enormemente estrecha entre los dos casos considerados en los trabajos de Hawking y de Davies, respectivamente. Siendo más específicos, estableció con rigor la estrecha similitud del caso de un detector acelerado con el comportamiento de un detector cerca del agujero negro, demostrando, en particular, que un detector geodésico cerca del horizonte de sucesos no vería el flujo de partículas de Hawking. En otras palabras, en su artículo Unruh reobtuvo con todo rigor matemático el análisis de Davies sobre el efecto de Hawking en un espacio-tiempo plano. Podríamos decir que puso la guinda al gran descubrimiento de Hawking.

Para terminar este punto y completar así el tema, debo añadir dos cosas. La primera es que estos autores, Davies muy en particular, recono-

cieron la influencia que tuvieron para su trabajo las ideas formuladas (aunque no publicadas) por Bryce DeWitt en 1974. La segunda, que todas las nociones que acabo de exponer han sido luego extraordinariamente fructíferas, y eso que sus últimas consecuencias están aún por dilucidar [3]. La termodinámica del espacio-tiempo, con una fórmula conveniente para la entropía (como la de Wald [8] y sus generalizaciones), constituye hoy en día una base muy sólida que se halla en el origen de conceptos tan importantes como los de gravedad emergente y entrópica (Verlinde [9], Padmanabhan [10]). Y que proponen, en particular, que bien pudiera darse el caso de que la gravedad no sea, de hecho, una fuerza fundamental, sino un fenómeno que emerge de la propia termodinámica del espacio-tiempo [11, 12]. Y que tal vez esté íntimamente relacionado con el entrelazamiento cuántico de grados de libertad, en una descripción no perturbativa de la gravedad cuántica. Pero, en aquellos momentos, en Schlading, todo eso estaba por venir todavía, y yo no me hallaba aún en condiciones de entender la gran trascendencia que iba a tener aquel gran descubrimiento.

La noble estancia del juez y una comida junto a Hawking

Mi segundo encuentro (de hecho, el primero cara a cara) con Stephen Hawking no tuvo lugar hasta doce años más tarde. Fue en otra conferencia, esta vez en el Imperial College de Londres. Yo ya era, para entonces, un flamante profesor contratado por la Universidad de Barcelona y esta vez me pude financiar, con los fondos de investigación que tenía asignados, el correspondiente viaje y estancia. Me acompañaban dos jóvenes estudiantes de doctorado, Enrique Gaztañaga y Roser Valentí; ambos hicieron luego carreras meteóricas, que los han llevado muy lejos dentro del mundo de la ciencia. Participábamos los tres en la Schrödinger Centenary Conference, en la que presentamos sendos trabajos. Uno de ellos contenía un análisis matemático de la distribución de las galaxias en el universo a gran escala [13], y constituyó la semilla de la tesis doctoral de Enrique.

Fue allí, en Londres, donde un día, a la hora de comer, me senté junto a Stephen Hawking. Por entonces él era ya una persona muy famosa y la enfermedad (aunque menos avanzada que en las imágenes más actuales, que todos recordamos, de la última etapa de su vida) ya le impedía comer solo. Su enfermera se situó al otro lado y, a cucharadas, le iba poniendo la comida en la boca. Pero a mí lo que me admiró mucho fue precisamente el hecho de que Hawking quería seguir siendo uno más, entre sus colegas científicos: mezclarse con todo el mundo, interactuar con los demás, comer a su lado. Y aquella vez me había tocado a mí. No hubo ocasión de hablar durante la comida. Bastante trabajo tenía él con intentar tragarse las cucharadas que su cuidadora (con quien más tarde

se casó) le iba dando, poco a poco. La mitad volvía al plato, una y otra vez, pero él no se inmutaba, en absoluto. No tenía miedo de dar un espectáculo. Al fin y al cabo, no podía hacer nada más, si su condición física era aquella, muy a su pesar. Fue una lección magnífica, de actitud ante la adversidad, de sencillez a la hora de comportarse y de relacionarse con los demás, de franqueza a la hora de mostrar sus graves limitaciones físicas, y de unas cuantas cosas más.

Seminarios en Oxford y Cambridge, y más encuentros

Volví a encontrarme con Hawking ocho años más tarde, en marzo de 1995. Yo estaba exultante al haber sido invitado a dar sendos seminarios en las prestigiosas universidades de Oxford y Cambridge. Esta vez, mis anfitriones me alojaron, en la magnífica “Estancia del Juez” del St. Cross College de Oxford, si la memoria no me falla. Está situada en un ala del College, junto a otras estancias de alto nivel. La que me asignaron era de hecho una *suite*, formada por la estancia del juez, una sala magnífica y ricamente decorada, y la del ayudante del juez, bella también, aunque un poco más pequeña y situada en el vestíbulo de la primera. Estos grandes *colleges* ingleses, así como también el Trinity de Dublín, tienen todos unos edificios espectaculares.

Recuerdo todavía que la primera noche dormí como un ángel. Me despertaron los golpes en la puerta, cada vez más fuertes e insistentes, de una azafata que me preguntaba si deseaba desayunar en la cama. “Tenemos filete, huevos, bacon, salchichas, alubias, queso, tomates, mermeladas a elegir...”, me soltó a toda velocidad, sin siquiera detenerse a respirar. “No, gracias, no tengo tiempo de tomar el desayuno en la cama...”, le respondí, mientras empezaba a vestirme a toda prisa; y añadí: “Por favor, ¿por dónde se va al comedor?” “Veamos. Si esta puerta del fondo del corredor estuviera abierta, podría ir directamente por allí, señor. Pero suele estar cerrada y lo más probable es que tenga usted que salir al patio, luego torcer a la derecha y...”. El comedor era una sala majestuosa, más bien parecía una nave de una catedral gótica, con paredes parcialmente recubiertas de



Figura 2. Stephen Hawking de camino a una conferencia ante estudiantes de secundaria en Jerusalén, el 10 de diciembre de 2006. (Dominio público).

nobles maderas finamente labradas. El sol resplandecía, aquella mañana. Sus rayos atravesaban los vitrales y las mesas y sillones resaltaban con soberbia elegancia. Me sirvieron un desayuno espléndido, pero tuve que apresurarme para no llegar tarde.

Esa misma mañana daba el seminario en Oxford y, dos días más tarde, en el DAMTP de Cambridge. Y ahí fue donde de nuevo me encontré con Hawking, esta vez a la hora del té; ritual exquisito que no solía perderse casi nunca, según me contaron. Otra vez pude apreciar, en persona, que a Hawking le encantaba hacer vida normal, tanto como le era posible. El diálogo con él no era ágil, ya en aquella época, según pude comprobar. Contestaba con gusto cada pregunta que le hacías, pero su respuesta tardaba un buen rato en ser procesada por el ordenador que llevaba en la silla; hasta que por fin la emitía, con una voz que sonaba muy robótica. Lo que de hecho contribuía a que se le calificase de oráculo. Pero eso hacía también que uno se lo pensara dos veces antes de hablar con él. ¿Merecía realmente la pena el comentario o pregunta que le estabas a punto de formular? ¿Era de verdad lo suficientemente importante? Luego, con los años, este aspecto mejoró bastante, así como su voz, cuando le fueron perfeccionando el sistema.

Aún vi a Hawking unas cuantas veces más, cuando menos cinco o seis, que ahora recuerde, la mitad de ellas en Barcelona. Una vez estuvo en la presentación de uno de sus libros en un CosmoCaixa repleto de entusiastas asistentes. En otra ocasión pidió expresamente dar un seminario a los estudiantes de la Universidad de Barcelona, que abarrotaron la mayor aula de la Facultad de Física, en la que yo mismo había impartido clases, poco tiempo atrás, a mis más de trescientos estudiantes de Métodos Matemáticos II. Fueron siempre lecciones sencillas pero excepcionales, repletas de contenido y de sugerencias. El año 2016 recibió el Premio BBVA Fronteras del Conocimiento, que agradeció desde el Centro de Estudios Matemá-

ticos de la Universidad de Cambridge, con fondo una pizarra repleta de ecuaciones (REF 32-2, p. 24).

La última vez que estuve con Hawking fue ese mismo año 2016 en Tenerife, en el *III Starmus International Festival*. Un encuentro de carácter divulgativo, de muy alto nivel, orientado a celebrar la astronomía, la exploración espacial, la música, el arte, y algunas ciencias afines, como la biología y la química. Hawking era uno de los oradores distinguidos, junto a media docena de astronautas, alguno de los cuales había pisado la Luna, y a una docena de importantes premios Nobel, como David Gross, Kip Thorne, Barry Barish, Adam Riess, Brian Schmidt, Robert Wilson, Joseph Stiglitz, etc.; y a otros colegas de muy alto nivel, que aún no lo tenían en sus manos, pero que iban a recibirlo posteriormente, como Roger Penrose. Y entre los músicos: Brian Eno, Brian May y Sarah Brightman.

Un año más tarde sus condiciones físicas habían empeorado y ya no le concedieron permiso para viajar a Trondheim, en Noruega, donde debía participar en el IV Starmus; ni siquiera le autorizaron a ir por mar, en un camarote con todas las atenciones posibles. Hay que recordar aquí que a él siempre le había encantado viajar. Yo había tenido la intención de ir a verle de nuevo, aprovechando que casualmente aquel verano estaba realizando una estancia en la NTNU, prestigiosa universidad noruega en la que tengo fieles colaboradores desde hace años.

El legado de Hawking: breve currículum con sus contribuciones más importantes

Dejando ya de lado las vivencias personales, todas ellas de muy grato recuerdo, resumiré ahora las contribuciones más importantes de Hawking a la física fundamental y a la cosmología.

Fue director de Investigación en el Departamento de Matemática Aplicada y Física Teórica (DAMTP) de la Universidad de Cambridge. Fundador del Centro de Cosmología Teórica (CTC) de la misma Universidad de Cambridge, director durante más de treinta años del Grupo de Relatividad General del DAMTP, e investigador principal de COSMOS, el National Cosmology Supercomputer de la Gran Bretaña (de 1997 a 2018). Fue también, como es bien sabido, profesor lucasiano en Cambridge, cargo que habían ocupado antes científicos de la talla de Isaac Newton y Paul Dirac.

En su página *web*, Hawking se definía a sí mismo como “cosmólogo, viajero espacial y héroe”. Nada más, pero nada menos. Trabajó toda su vida en las leyes básicas que gobiernan el Universo. Y él mismo dejaba meridianamente claro, en dicha página, cuáles habían sido sus tres descubrimientos principales.

1. Con Roger Penrose, demostró que la teoría de la Relatividad General de Einstein implica que el espacio y el tiempo han tenido su origen en el Big Bang y alcanzan su final en cada uno de los agujeros negros que se forman en el Universo.

Figura 3. Stephen Hawking (en el centro) disfruta de gravedad cero durante un vuelo a bordo de un avión Boeing 727 modificado, propiedad de Zero Gravity Corp. (Zero G). Hawking, quien sufría de esclerosis lateral amiotrófica (también conocida como la enfermedad de Lou Gehrig) está siendo rotado en el aire por Peter Diamandis (a la derecha), fundador de Zero G Corp., y Byron Lichtenberg (a la izquierda), antiguo especialista en carga útil del transbordador y ahora presidente de Zero G. Arrodillada debajo de Hawking está Nicola O'Brien, una enfermera practicante que era su asistente. Fecha: 26 de abril de 2007. (Cortesía de Jim Campbell/Aero-News Network. Dominio público).



Son las singularidades que aparecen necesariamente en la teoría de la Relatividad General de Einstein, como ambos demostraron. Esos resultados indicaron que era absolutamente preciso unificar dicha teoría con la Física Cuántica, eso es, interconectar las dos grandes revoluciones de la Física de la primera mitad del siglo xx.

2. Como resultado de la búsqueda de una tal unificación, Hawking descubrió que los agujeros negros no pueden ser negros del todo, sino que emiten radiación; y así, finalmente, se evaporan y desaparecen. (Este descubrimiento es lo que causó tanta sensación cuando yo estaba en Schlading.)
3. Y otra conjetura, esta vez obtenida en trabajo conjunto con James Hartle, fue que el Universo no tiene de hecho ni bordes ni fronteras, si el tiempo es imaginario. Lo que implicaría que la forma en que el Universo comenzó estaría determinada por completo por las leyes de la Ciencia.

Como se puede observar, se trata de un currículum de menos de media página; tan corto como extraordinarios son estos tres descubrimientos. He aquí una gran lección que deberíamos aprender: desconfiemos siempre de los currículos muy largos, de decenas de ítems, con los que algunos pretenden dejarnos boquiabiertos. Cuanto más importante es el científico (o científica) tanto más breve es su CV.

La radiación de Hawking

Posiblemente, el más relevante de los descubrimientos de Hawking es el segundo. De hecho, ya he hablado de él con cierto detenimiento al principio de este escrito. Se trata de la evaporación de los agujeros negros, conocida también como la *radiación de Hawking*, que descubrió en 1974:

Todo agujero negro de Schwarzschild, de masa M , emite radiación electromagnética como si fuera un cuerpo negro a temperatura:

$$T_{BH} = \frac{\hbar c^3}{8\pi k G M}.$$

En su famosísimo libro *A Brief History of Time* (Bantam Books, 1988), Hawking escribió sobre ese resultado:

Mi trabajo tuvo su origen en una visita que hice a Moscú, en 1973, donde los científicos soviéticos Yakov Zeldovich y Alexei Starobinsky me sugirieron que, de acuerdo con el principio de incertidumbre de la mecánica cuántica, los agujeros negros en rotación deberían necesariamente crear y emitir partículas.

Del dicho al hecho, sin embargo, a veces hay un abismo. Y éste es el que Hawking fue capaz de superar, en este caso, y de una manera muy brillante, dando una demostración técnicamente impecable, bellísima y cuantitativa de aquella predicción.



Figura 4. Stephen Hawking presenta al público el Corpus Clock, en la Biblioteca Taylor, Corpus Christi College, Cambridge. Fecha: 19 de septiembre de 2008. (CC BY-SA 2.0).

Hay que añadir también que su trabajo complementó y fundamentó, de una manera magistral, un resultado previo debido a Jacob Bekenstein [14]:

Todo agujero negro tiene una entropía, $S_{BH} = \frac{c^3 A}{4\hbar G}$, finita y no nula. Como también lo debería ser su correspondiente temperatura.

Aquí A es el área del horizonte de sucesos del agujero negro. Dejando de lado las constantes universales, esta fórmula nos dice que la entropía de un agujero negro es igual a una cuarta parte de su área. El hecho de que la entropía de un agujero negro sea proporcional al área y no al volumen del mismo (como sería el caso clásico) trae como consecuencia que la información cuántica puede medirse a partir de la geometría en una dimensión menos, eso es, en términos holográficos. Ello ha dado origen a importantísimos desarrollos en física teórica, los cuales han producido ya algunos resultados brillantes, conectando teorías que no parecía que tuviesen nada que ver unas con otras. La holografía proporciona una conexión no trivial entre las teorías de campos y partículas de la física cuántica convencional y las propuestas de teorías cuánticas de la gravedad. Como ejemplo, se intenta comprender, con su uso, la superconductividad de altas temperaturas y propiedades de los superconductores muy difíciles de estudiar con los enfoques convencionales.

Volviendo a la fórmula de Hawking, entre las consecuencias directas de la misma están las siguientes:

- La radiación de Hawking emitida por un agujero negro sería una emisión de cuerpo negro perfecto.

Figura 5. Stephen Hawking el 28 de agosto de 2013. (CC A-S A 2.0 G).



- Los agujeros negros microscópicos emitirían muchísima más radiación y, en consecuencia, desaparecerían muy rápidamente.
- Si las teorías de dimensiones adicionales son correctas, el laboratorio LHC del CERN podría llegar a crear agujeros negros microscópicos. De hecho, hay proyectos que intentan conseguirlo (https://en.wikipedia.org/wiki/Micro_black_hole; <https://home.cern/science/physics/extradimensions-gravitons-and-tiny-black-holes>).

Listado de sus últimos trabajos de investigación

Quede claro que esta lista la he tenido que completar personalmente, buscando en internet sus últimas publicaciones. Hawking había mantenido siempre actualizada su página *web*, mientras vivió, pero a su muerte parece que esto ya no se llevó a cabo.

1. “Black Hole Entropy and Soft Hair”, S. HACO, S. W. HAWKING, M. J. PERRY y A. STROMINGER. 3 de oct de 2018. 14 pp, *J. High Energy Phys* 12, 98, 2018.
2. “Should China Build the Great Collider?” S. W. HAWKING y G. KANE, 2 de abril de 2018. 8 pp, arXiv: 1804.00682 [physics.soc-ph].
3. “A Smooth Exit from Eternal Inflation” S. W. HAWKING y T. HERTOGE. 24 de julio de 2017, rev 20 de abril de 2018. 14 pp, *J. High Energy Phys* 04 147, 2018.
4. “The Conformal BMS Group”, S. J. HACO, S. W. HAWKING, M. J. PERRY y J. L. BOURJAILLY, 27 de enero de 2017. 16 pp, *J. High Energy Phys* 11, 012, 2017.
5. “Superrotation Charge and Supertranslation Hair on Black Holes”, S. W. HAWKING, M. J. PERRY y A. STROMINGER, *J. High Energy Phys.* 05, 161, 2017. DOI:10.1007/JHEP05(2017)161.
6. “Black holes: The Reith Lectures”, S. W. HAWKING, mayo de 2016, ISBN-13:978-0857503572.
7. “Soft Hair on Black Holes”, S. W. HAWKING, M. J. PERRY y A. STROMINGER, 5 de enero de 2016.

9 pp. *Phys. Rev. Lett.* 116, n.º 23, 231301, 2016 DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.231301.

8. “The Information Paradox for Black Holes”, S. W. HAWKING, 3 de septiembre de 2015. 3 pp. DAMTP-2015-49. Talk at KTH Royal Institute of Technology, Stockholm; e-Print: arXiv:1509.01147 [hep-th].

Algunas lecciones de Hawking dirigidas al gran público

Dado que el presente es un artículo de carácter general, considero prioritario resaltar aquí —dejando aparte sus libros (que son ya harto conocidos y creo innecesario enumerarlos una vez más)— algunas de las lecciones que impartió [<https://www.hawking.org.uk/in-words/lectures/>], dirigidas todas ellas al gran público. Entre las que destacaría:

- Into a Black Hole, 2008 [<https://www.hawking.org.uk/in-words/lectures/into-a-black-hole>].
- The Origin of the Universe, 2005 [<https://www.hawking.org.uk/in-words/lectures/the-origin-of-the-universe>].
- Gödel and the End of Physics, 2002 [<https://www.hawking.org.uk/in-words/lectures/godel-and-the-end-of-physics>].
- Space and Time Warps, 1999 [<https://www.hawking.org.uk/in-words/lectures/space-and-time-warps>].
- Does God Play Dice?, 1999 [<https://www.hawking.org.uk/in-words/lectures/does-god-play-dice>].
- The Beginning of Time, 1996 [<https://www.hawking.org.uk/in-words/lectures/the-beginning-of-time>].
- Life in the Universe, 1996 [<https://www.hawking.org.uk/in-words/lectures/life-in-the-universe>].

Trabajador hasta el final

Sólo una breve reseña sobre los últimos días de Hawking. Hay testigos que aseguran que estuvo trabajando hasta el final en la conocida como paradoja de la pérdida de información. Aunque he observado también que, en otro artículo publicado póstumamente, esto es, el número 3 de la lista anterior y que tiene por coautor a su colaborador Thomas Hertog, de la Universidad de Lovaina, en Bélgica, la temática es bien distinta. Ello prueba, a mi entender, que Hawking todavía era capaz de dedicarse a varios problemas a la vez, poco antes de morir. En el trabajo con Hertog se reexaminan algunas características teóricas del Big Bang inflacionario mediante nuevas propuestas matemáticas. Su versión final apareció tan sólo diez días antes de la muerte de Hawking.

Sobre la paradoja que tanto le obsesionaba, muy poco antes de su deceso, su colaborador Malcom Perry estaba en Harvard trabajando en la versión preliminar de un artículo, correspondiente a dicho tema de la pérdida de información, conjuntamente con Andrew Strominger. En el artículo también colaboraba Sasha Haco, además del propio Hawking (dio lugar a la primera publicación de la lista

de más arriba). Perry aún no sabía que Hawking estuviese tan grave, y le llamó con la única intención de ponerle personalmente al corriente de los últimos avances que habían estado haciendo. Sin que nadie lo sospechara entonces, este fue ya el último intercambio científico que Hawking mantuvo con sus colegas. Según el testimonio del propio Perry:

Resultó muy difícil que Stephen se comunicase conmigo; yo le hablaba con un altavoz intentando explicarle hasta dónde habíamos llegado. Y cuando finalmente lo entendió, se limitó a esbozar una amplísima sonrisa. Le dije que ya teníamos algo que se estaba concretando. Pudo conocer, pues, buenas noticias, justo antes de morir.

En octubre de 2018 sus colegas Malcolm Perry, Andrew Strominger y Sasha Haco publicaron el que iba a ser su último artículo (el primero de la lista que he dado). Lleva por título “Entropía de los agujeros negros con pelo suave”, y en él se considera la denominada paradoja de la información de los agujeros negros, un rompecabezas al que Hawking dedicó buena parte de su vida. El problema radica en que, a pesar de que él mismo había descubierto que los agujeros negros radiaban y así, en principio y con el tiempo suficiente, se podría llegar a recuperar toda la materia que se habrían tragado previamente, no sucede lo mismo con la *información* que llevaba asociada la materia engullida. Porque resulta que la radiación de Hawking que se emite es de cuerpo negro perfecto, *no* lleva información alguna. Ésta se ha perdido, pues, por completo, tras el horizonte de sucesos del agujero negro. Y eso sería contrario a la Física Cuántica, que tiene entre sus principios fundamentales el de la *unitariedad*, y que conlleva la conservación de la información. He aquí la gran paradoja.

La idea de la solución propuesta por los cuatro autores en el artículo póstumo mencionado es, a grandes rasgos, la siguiente (los aspectos técnicos no son nada sencillos de explicar). Si el agujero negro tuviese “pelo” (o “cabello”) justo por encima del horizonte, ese “pelo” *podría retener la información* asociada a la materia que cae sobre el agujero, justo antes de que ésta atravesase el horizonte de sucesos. Y, de este modo, ¡la información no se perdería! Quedaría enmarañada en el cabello, retenida por tanto en la parte externa del horizonte de sucesos. Este trabajo se completó, como he dicho, los días previos a la muerte de Hawking. El artículo publicado incluye, además, un homenaje a toda su obra.

Malcolm Perry añade, hablando sobre ese trabajo:

Se trata, sin duda, de un muy buen paso adelante, pero, definitivamente, no contiene todavía



toda la respuesta buscada. Ahora nos queda un poco menos del difícilísimo rompecabezas que teníamos ante nosotros; pero reconozco que persisten todavía algunos problemas que se empeñan en no querer desaparecer.

Desgraciadamente, o quizá afortunadamente—todo depende de cómo se mire— esto suele ser siempre así. Algunas de las más importantes cuestiones abiertas de la ciencia permanecen aún sin resolver cuando fallecen los grandes genios. Por mucho que estos (y éstas) hayan dedicado toda su vida y todas sus energías a intentar responderlas. Y a pesar de que, en el mejor de los casos, hayan conseguido de hecho responder ya unas cuantas por el camino.

Problemas que aún permanecen abiertos y algunas respuestas posibles

1. La paradoja (llamada también catástrofe) de la pérdida de información, al evaporarse los agujeros negros.
2. El problema de las condiciones iniciales del universo.
3. La singularidad del Big Bang.

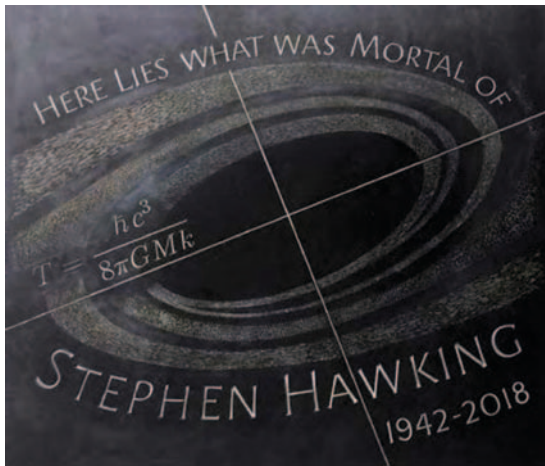
Ya para acabar, resumen de manera telegráfica (para más información se puede consultar mi libro [15]) algunas respuestas posibles a esas grandes cuestiones que todavía permanecen abiertas.

¿Qué hubo antes del Big Bang? (entendido en su significado original como inflación cósmica)

- Nada. Lo cual no tiene sentido físico alguno; ahora postulamos: *casi* nada.
- El (casi-)vacío clásico: solución casi-de Sitter de las ecuaciones de la relatividad general de Einstein.
- El vacío cuántico: fluctuaciones cuánticas del estado vacío (que siempre están ahí, gracias al principio de indeterminación de Heisenberg).
- Un universo previo: modelos cíclicos (*bounce models*).

Figura 6. Depositando la urna con las cenizas de Hawking en su tumba, en la Abadía de Westminster. (Copyright: Decano y Capítulo de Westminster, Londres. Reproducido con permiso).

Figura 7. Lápida de Stephen Hawking situada en la nave de la Abadía de Westminster, Londres, bajo la cual están enterradas sus cenizas, no lejos de las tumbas de Isaac Newton y Charles Darwin. La inscripción es una traducción al inglés de una frase que aparece en latín en la lápida de Newton. La piedra presenta una serie de anillos que rodean una elipse central más oscura. La ecuación de Hawking expresa su idea de que los agujeros negros en el universo no son completamente negros, sino que emiten un resplandor, que se conoce como radiación de Hawking. En esta ecuación, T representa la temperatura del agujero negro; \hbar es la constante de Planck, que aparece en la mecánica cuántica; c la velocidad de la luz; 8π nos indica la naturaleza esférica del agujero; G es la constante de Newton correspondiente a la gravedad; M la masa del agujero negro y k la constante de Boltzmann, que aparece en la expresión de la energía de las partículas de un gas. La piedra de pizarra Caithness fue diseñada y fabricada por John Maine y el cortador de las letras fue Gillian Forbes. (Copyright: Decano y Capítulo de Westminster, Londres. Reproducido con permiso).



¿Cuáles son las condiciones iniciales del universo?

- *No-boundary conditions*: modelo de Hawking y Hartle con tiempo imaginario, que no necesita condiciones de contorno.
- Hay que esperar a la *gravedad cuántica* ¡que todavía no tenemos!
- LQC (*loop quantum cosmology*), la cosmología cuántica de lazos. Avanza, pero despacio.
- O bien, necesitaremos una *nueva teoría* para determinarlas, que todavía no sabemos cuál será.
- No es una pregunta relevante, en las teorías de *multiversos*.

El hecho claro es que aún no hemos sido capaces de diseñar un posible universo como el nuestro [15].

Alternativas posibles

- Multiverso (A. Linde, A. Vilenkin...): juega con el azar, el nuestro es sencillamente uno de los muchos universos que podría haber. Pero aún no hay de ello prueba alguna.
- Quizás la gravedad cuántica lo resolverá, u otra teoría que aún no tenemos.
- Geometría cuántica (parece, en principio, más fácil de concretar).
- Modelos antrópicos. Aceptados muy a regañadientes por los científicos.
- No es, hoy en día, una pregunta válida que tenga sentido hacerse, ya que aún no tenemos los medios (la teoría física contrastada, que llegue hasta el nivel de Planck, o casi) para poder contestarla. Todo esto queda, pues, aún pendiente. Pero debería ir terminando.

El epitafio: “Aquí yace la parte mortal de Stephen Hawking (1942-2018)”

Este es el epitafio escrito en la lápida que cubre la urna con sus cenizas (Figuras 6 y 7), enterrada en la nave de la abadía de Westminster, en Londres, cerca de las respectivas tumbas de Newton y Darwin. Personalmente, creo que no se podían haber encontrado palabras más adecuadas para despedir a Hawking. Son muy parecidas, aunque en inglés, a las que hay escritas en latín sobre la tumba de Newton: “Hic depositum est quod mortale fuit Isaaci Newtoni”.

Los hallazgos de Hawking fueron evocados en un servicio conmemorativo que tuvo lugar en junio de 2018, en la misma abadía de Westminster. En el transcurso de éste y por unos minutos, la antena DSA2 de Cebreros (Ávila) envió su voz, envuelta en música del gran Vangelis, hacia el cercano agujero negro 1A 0620–00. Un regalo para otras inteligencias que puedan estar habitando nuestro cosmos.

Lo que Hawking hizo, los grandes descubrimientos que nos dejó como científico—como la bellísima fórmula con la que he empezado este artículo y que ha quedado ahora grabada en su lápida—permanecerán para siempre. Y también, además, como persona, su tan extraordinario ejemplo.

Bibliografía

- [1] https://www.ice.csic.es/personal/elizalde/eli/aascv_230120ar.pdf; https://www.ice.csic.es/personal/elizalde/eli/aascv_170119r.pdf; https://www.ice.csic.es/personal/elizalde/eli/aascv_220218.pdf.
- [2] P. URBAN (Ed.), “Electromagnetic Interactions and Field Theory”, *Proc. of the XIV. Int. Universitätswochen für Kernphysik* (Schladming, Austria, 24 de febrero-7 de marzo de 1975) (Berlín, Springer, 1975).
- [3] E. ELIZALDE, “From the Creation of Particles in the Vacuum by an Accelerated Observer to Space-Time Thermodynamics”, *Journal of Physics. A: Mathematical and Theoretical* 50, 041001, 2017. Viewpoint, by invitation. DOI: 10.1088/1751-8121/50/4/041001.
- [4] E. ELIZALDE, “On How the Cyberspace Arose to Fulfill Theoretical Physicists’ Needs and Eventually Changed the World: Personal Recollections and a Practitioner’s Perspective”, en J. MARTÍN RAMÍREZ y LUIS A. GARCÍA-SEGURA (Eds.), *Cyberspace: Risks and Benefits for Society, Security and Development* (Berlin, Springer, 2017, pp. 3-22).
- [5] S. HAWKING, “Particle Creation by Black Holes”, *Commun. Math. Phys.* 43 199, 1975. [Erratum: *Commun. Math. Phys.* 46, 206, 1976].
- [6] P. C. W. DAVIES, “Scalar Production in Schwarzschild and Rindler Metrics”, *J. Phys. A: Math. Gen.* 8, 609, 1975.
- [7] W. G. UNRUH, “Notes on Black-hole Evaporation”, *Phys. Rev. D* 14, 870, 1976.
- [8] R. M. WALD, “Black Hole Entropy is the Noether Charge”, *Phys. Rev. D* 48, 3427, 1993.
- [9] E. VERLINDE, “On the Origin of Gravity and the Laws of Newton”, *J. High Energ. Phys.* 2011, 29, 2011.
- [10] T. PADMANABHAN, “Thermodynamical Aspects of Gravity: New Insights”, *Rep. Prog. Phys.* 73, 046901, 2010.
- [11] T. JACOBSON, “Thermodynamics of spacetime: the Einstein equation of state”, *Phys. Rev. Lett.* 75, 1260, 1995.
- [12] E. ELIZALDE y P. J. SILVA, “f(R) Gravity Equation of State”, *Phys. Rev. D* 78, 061501, 2008.
- [13] E. ELIZALDE y E. GAZTAÑAGA, “Mathematical Analysis of Galaxy Distributions”, *Proceedings of the Schrödinger Centenary Conference*, Londres, 1.23, 1987.
- [14] J. D. BEKENSTEIN, “Black Holes and Entropy”, *Phys. Rev. D* 7, 2333, 1973.
- [15] E. ELIZALDE, *Cosmología moderna: desde sus orígenes* (Los libros de la Catarata, 2020, ISBN 978-84-1352-125-1).