Más Allá de Einstein: Holografía

César Gómez

Uno de los primeros amores intelectuales de Einstein, aun antes de sus famosos artículos del "annus mirabilis" cuyo centenario celebramos este año, fue la termodinámica y lo que hoy en día conocemos como física estadística a la que contribuyo de manera significativa, pero poco conocida, en dos artículos de 1903[1]. Estos dos artículos fueron simultáneos e independientes a los mejor conocidos de Gibbs y son parte del bagaje con el que Einstein se enfrentó en el 1905 al problema de la radiación del cuerpo negro y a la hipótesis de Planck de los cuantos de energía. El nacimiento de la física moderna en los albores del siglo pasado tiene como uno de sus ejes conceptuales el problema de la termodinámica de la radiación electromagnética. La aplicación de la interpretación estadística del concepto de entropía al problema de la determinación de la distribución de equilibrio de radiación electromagnética dentro de una cavidad, lleva, primero a Planck y mas tarde a Einstein, al descubrimiento del cuanto.

Al final del siglo XIX uno de los problemas fundamentales de la física es el de dilucidar la naturaleza del segundo principio de la termodinámica o de manera más concreta el sentido de la irreversibilidad de los procesos en los que la entropía aumente. Después de la derivación del teorema H de Boltzmann, la discusión suscitada por el comentario de Zérmelo que hace referencia a la existencia de recurrencias de Poincaré en cualquier sistema mecánico con un número finito de grados de libertad[2], inclina claramente la balanza hacia una interpretación probabilística del segundo principio. Este punto de vista no es completamente aceptado por Planck cuyo sueño, en aquellos momentos, es el de derivar a partir de principios mecánicos el segundo principio. Este objetivo de Planck es relevante en su posterior desarrollo intelectual. En primer lugar en el año 1896 Planck sospecha que la crítica de Zérmelo no es aplicable a sistemas continuos, una intuición en el fondo correcta[3]. Posteriormente concluye que en el caso que a él le interesaba, el equilibrio de radiación electromagnética en cavidades, el fenómeno básico, involucrado en el proceso de equilibrio, que no es otro sino el de emisión y absorción de radiación por resonadores, era posiblemente unidireccional.

Quizás uno de los resultados más fundamentales de la física del último siglo, al menos en lo que se refiere a sus implicaciones sobre la imagen que tenemos del universo en el que vivimos, es el del descubrimiento de la expansión del universo, resultado que deriva de esa joya del pensamiento que debemos a Einstein y que es la Teoría General de la Relatividad. La expansión del universo nos ha hecho conscientes de un universo con historia, de un universo que varía como un sistema físico más, quizás el más especial, que tiene un origen que denotamos como Big Bang y del que empezamos a descubrir que posiblemente se encuentre en un momento de expansión acelerada cuyo misteriosa causa denotamos energía oscura, y cuya naturaleza desconocemos aunque suponga casi el 75% del contenido del universo. En mi opinión esta nueva imagen de la ciencia de un universo con pasado, que cambia, y cuya historia podemos fotografiar gracias a sondas de luz y posiblemente en el futuro de sondas de neutrinos o hasta gravitacionales, supone una revolución en nuestra imagen de la realidad solo comparable a la que supuso la idea de la evolución de Darwin. Pero un universo como un sistema físico que evoluciona en el tiempo nos devuelve de una manera inesperada a las viejas discusiones de finales del XIX, en las que se forjo el pensamiento tanto de Planck como de Einstein, sobre la naturaleza del segundo principio. No es extraño así, que en este mismo momento en el que estamos viviendo, haya renacido la vieja discusión de Zérmelo sobre las recurrencias de Poincaré[4], pero ahora para el universo como un todo, y como consecuencia de ello la discusión sobre la naturaleza objetiva o probabilística de la flecha del tiempo[5]. Un concepto de probabilidad donde necesariamente ahora deberemos de considerar conjuntos de universos[6].

Si de lo que se trata en este artículo es de describir un "mas allá" de Einstein quizás una buena manera de intentarlo es colocarnos frente al mismo tipo de problemas que atra-

[1]Entre los años 1902 al 1904 Einstein publica una serie de tres brillantes artículos en los que sienta las bases de lo que hoy conocemos como conjunto de Gibbs o microcanónico. Los resultados de Gibbs aparecen en su libro Mecánica Estadística de 1902 y son ligeramente menos generales que los de Einstein, pues se aplican a sistemas más restrictivos inspirados fundamentalmente en la teoría de los gases. El lector puede encontrar una descripción bastante completa de los resultados de estos primeros artículos de Einstein en el capítulo VII del magnífico libro de Thomas. S. Khun: "La Teoría del Cuerpo Negro y la Discontinuidad Cuántica: 1894-1912" publicada en español en la colección Alianza Universidad.

[2]En física clásica el teorema de Poincaré establece que para un sistema con un número finito de grados de libertad y aislado, su trayectoria en el espacio de fases será cuasiperiódica. Esto quiere decir que siempre podremos encontrar un tiempo finito T, transcurrido el cual el sistema volverá a pasar por un punto del espacio de fases tan próximo al punto de partida como deseemos. El teorema se puede generalizar al caso cuántico, con el único requisito de que el espectro sea discreto.

[3]Observe el lector que en este momento histórico la hipótesis atómica no estaba completamente establecida.

[4]Esta discusión, aunque a primera vista pueda resultar sorprendente, esta íntimamente ligada al problema de la constante cosmológica. Si como ciertos datos experimentales parecen indicar el universo tiende a una fase en expansión acelerada, la geometría del espacio-tiempo, de la misma manera que en la fase inflacionaria primordial, vendrá dada en primera aproximación por un espacio de tipo de Sitter. La existencia de un horizonte en este tipo de espacios puede hacer plausible pensar en un espectro discreto y en consecuencia en lo inevitable de recurrencias de Poincaré. Vease para una entretenida discusión L.Dixon, M.Kleban y L.Susskind, "Disturbing implications of a cosmological constant", *J. High Energy Phys.* **10** (2002) 011; hep-th/0208013.

[5]Sobre la flecha del tiempo en cosmología existen diferentes posturas. Entre las más conocidas se encuentra la postura de Penrose que intenta visualizar la historia del universo de acuerdo con el segundo principio con un inicio en la singularidad del Big Bang de entropía baja.

[6]La definición de este tipo de conjuntos supone contar con teorías cuyo espacio de soluciones sean universos. Un buen ejemplo es la teoría de supercuerdas y a estos conjuntos se les conoce en la actualidad con el nombre de "landscapes".

jeron su atención en sus primeros años como investigador y que tan fructíferos fueron en la historia de la física, pero esta vez en lugar de concentrarnos sobre la relación entre termodinámica y electromagnetismo lo haremos entre termodinámica y gravitación.

Einstein que murió en los años cincuenta fue testigo de una gran parte de los avances de la física cuántica y de la relatividad general, incluyendo el importantísimo descubrimiento de la expansión del universo. Hay sin embargo dos grandes revoluciones de las que no pudo ser testigo, me refiero a la construcción de las teorías gauge y en este sentido al entendimiento de las interacciones débiles y fuertes y, ya dentro del campo de lo que sin duda es su contribución intelectualmente más importante, la relatividad general, de la física de agujeros negros. El maridaje entre estas dos piezas de física que Einstein no pudo conocer, definen, para mí sin lugar a dudas, el más allá de Einstein. Pero para entrar un poco mas en harina es importante que volvamos a su artículo de 1905 sobre la radiación del cuerpo negro y repasemos el argumento heurístico a partir del cual Einstein dio a luz la hipótesis del fotón.

Hay muchas cosas interesantes en este artículo y en toda la historia que rodea al problema de la radiación del cuerpo negro. Nos centraremos en la estructura lógica del que Einstein calificó como argumento heurístico[7]. En primer lugar Einstein acepta la ley de distribución de Wien o su modificación por parte de Planck como un dato sobre el comportamiento de la radiación en equilibrio en cavidades a frecuencias altas.

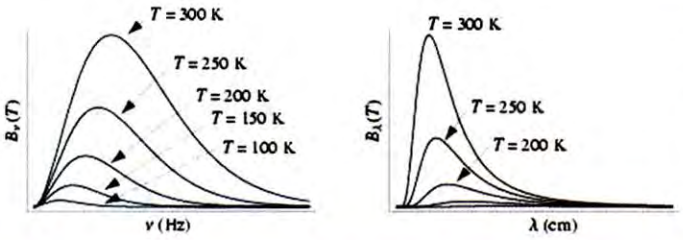

Figura 1. Ley de desplazamiento de Wien

Como se sabe es a frecuencias altas donde la teoría clásica y el experimento divergen de manera infinita, fenómeno que conocemos como catástrofe ultravioleta. La ley de Wien indica claramente a Einstein que la radiación electromagnética no se comporta, a frecuencias altas, a la manera de ondas. A partir de la distribución de Wien-Planck, Einstein deriva una formula para la entropía en función de la energía total E, la frecuencia y el volumen V. A continuación observa la manera en la que la entropía varía, a energía fija, en función del volumen V. Lo que descubre le llama poderosamente la atención. Llamando S_0 a la entropía a volumen V_0 obtiene que

$$S - S_0 = \frac{E}{\hat{a}\acute{i}} \ln\left(\frac{V}{V_0}\right)$$

Ahora utiliza la fórmula de Boltzmann en la forma genérica

$$S - S_0 = \frac{R}{N} \ln W$$

donde W es la probabilidad relativa del estado de entropía S comparado con el estado de entropía S_0. Lo interesante al comparar ambas fórmulas es que la probabilidad W se comporta como V/V_0 que es lo que de manera natural esperaríamos si nos preguntáramos cual es la probabilidad ,para una partícula que tiene probabilidad uno de encontrarse en un volumen V_0, de encontrarla confinada en un volumen V más pequeño. El argumento heurístico consiste en dar aquí el paso a una interpretación partículas, los fotones, de la radiación electromagnética de altas frecuencias. El argumento de Einstein ha consistido en desvelar la naturaleza de la radiación electromagnética a partir de una lectura estadística de la fórmula de la entropía que determinaba como distribución de equilibrio la distribución de Wien-Planck.

Para cualquier lector avezado la trama de este articulito sobre el "mas allá de Einstein" estará en el fondo ya desvelada. Vamos a colocar a un imaginario Einstein joven ante una formula de la entropía ligada de manera esencial al fenómeno gravitacional y vamos a intentar imaginar a donde le hubiera llevado un argumento heurístico del mismo tipo que el desarrollado en 1905.

En el año 1974 Stephen Hawking presentó en la conferencia de Gravitación de Oxford su famoso resultado sobre la radiación cuántica de agujeros negros. Un año antes Bekenstein había formulado su famosa relación entre la entropía de un agujero negro y su área en lo que hoy se conoce como la formula de Bekenstein-Hawking, quizás una de las fórmulas más bellas de toda la física. La fórmula nos dice que la entropía de un agujero negro estacionario con un horizonte de área A viene dada por

$$S = \frac{kAc^3}{(4\hbar G)}$$

donde c es la velocidad de la luz, k es la constante de Boltzmann, $\hbar$ es la constante de Planck y G la constante de Newton[8]. Una formula termodinámica en la que todas las constantes de la naturaleza que conocemos quedan involucradas. Una fórmula, por otra parte, altamente misteriosa en la que la parte de la derecha parece tener un significado claramente objetivo y geométrico mientras que la parte de la izquierda, la entropía, hace referencia a algo que tradicionalmente definimos sobre la base de un subjetivo concepto de "coarse-graining". ¿Qué significa en el fondo esta misteriosa fórmula?. Ésta es una pregunta que seguramente hubiera fascinado a un Einstein joven, y quizás no hace falta grandes dotes de vidente para apostar que su argumento heurístico le hubiera llevado, de manera natural, al principio holográfico[9].

[7]Aconsejo encarecidamente al lector que se entretenga en la lectura del artículo original de Einstein, principalmente las secciones 6 y 7. Son en mi opinión una verdadera joya de simplicidad y buena física.

[8]Como es bien conocido en la distribución de Wien aparecen dos constantes fundamentales además de la velocidad de la luz, que en ese momento histórico no se consideraba como una constante de la naturaleza. Fue Planck el primero en darse cuenta que estas constante que aparecían en una fórmula fenomenológica, eran realmente constantes de la naturaleza y pudo rescribirlas en términos de la constante de Boltzmann y de la constante h de Planck. La fórmula de Bekenstein-Hawking, incluye una más, la constante de Newton.

[9]El desarrollo de este argumento fue llevado por primera vez a cabo por G. 't Hooft en el año 1996. La popularización de la idea bajo el nombre de principio holográfico se debe a L. Susskind.

Vamos a intentar colocarnos en una posición parecida a la que se encontraba el propio Einstein al estudiar el problema de la radiación electromagnética de equilibrio en una cavidad. Pensemos ahora, siguiendo un ejemplo propuesto por Hawking en 1976, en un volumen V con paredes perfectamente reflectoras y donde tenemos una energía E de algún tipo. Dejemos la caja de volumen V sin perturbar y esperemos que se dé la configuración de equilibrio. Si utilizamos ahora la fórmula anterior la configuración de equilibrio, es decir de máxima entropía, consistirá en un agujero negro en equilibrio con radiación térmica. Veámoslo con un poco más de detalle. Para ello mantengamos fija la energía E y procedamos a variar el volumen haciéndolo cada vez mas pequeño. Esto es equivalente a variar la temperatura. Para cada valor de V supongamos mentalmente que dividimos el contenido de la caja en un agujero negro de masa m y un resto en forma de radiación. Utilizando la fórmula de Bekenstein-Hawking obtenemos de esta manera una función $S(m)$ como las que se representan en la figura 2.

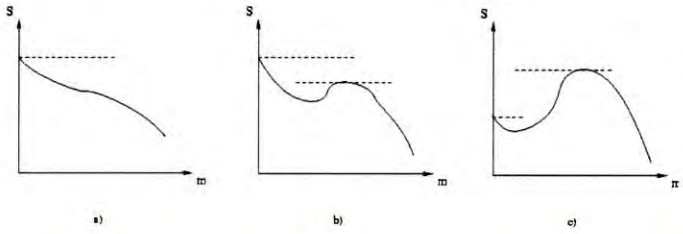

Figura 2. Gráfico de la entropía, S, frente a la masa, m, contenida en un agujero negro, para una energía total E en una caja de volumen V.

Nos encontramos así con una historia térmica bastante interesante y rica. A temperaturas bajas el máximo de la entropía esta en el valor $m = 0$ lo que significa que la situación de equilibrio viene dada por radiación. A medida que aumentamos la temperatura (figura 2.b) aparece un máximo local en un cierto valor de m lo que significa que un agujero negro se ha nucleado a partir de la energía contenida en la caja, sin embargo la situación de máxima entropía sigue siendo el estado de pura radiación. Esta situación cambia cuando superamos una cierta temperatura crítica y nos encontramos con la situación representada en la figura 2.c donde el máximo de la entropía está en un valor de m bastante próximo ya al valor total de la energía contenida en la caja. La situación de equilibrio es la de un agujero negro grande en equilibrio con un resto de radiación. Si procediéramos a disminuir el volumen un poco mas el sistema colapsaría al ser el tamaño de la caja menor que el radio de Schwarzschild correspondiente a la energía E.

En la hasta cierto punto elemental historia anterior hay, sin embargo, bastantes cosas misteriosas. Hemos utilizado la formula de Bekenstein-Hawking de la que en el fondo no tenemos una interpretación estadística concreta, por otra parte al hablar de agujeros negros en equilibrio con radiación estamos ya asumiendo el resultado fundamental de Hawking sobre la radiación de agujeros negros, algo que depende de manera crucial de la especial geometría espacio temporal definida por el mismo. Más aún, nos hemos encontrado con una historia térmica donde tiene lugar alguna forma de transición de fase, transición de fase en la que pasamos de una situación de equilibrio correspondiente a pura radiación a otra donde la caja esta casi en su totalidad llena por un agujero negro, una transición de fase, en suma, que conlleva de alguna manera un cambio drástico en la geometría del espacio-tiempo. Más aún observamos un fenómeno claramente gravitacional. Al contrario que un gas donde el sistema al evolucionar hacia el equilibrio tiende a una distribución uniforme de las moléculas del gas en el interior de la caja, ahora, y como consecuencia de la formula de Bekenstrein-Hawking, son conglomerados de materia en forma de agujeros negros los más favorecidos desde un punto de vista entrópico.

Al igual que hiciera Einstein al partir de la distribución de Wien y de la correspondiente fórmula de la entropía para desvelar la naturaleza de la radiación electromagnética en el ultravioleta, podemos intentar partir de las graficas de $S(m)$ anteriores y sobre la base de las mismas intentar desvelar la naturaleza del contenido de nuestra caja alrededor de puntos de equilibrio correspondientes a máximos de la entropía $S(m)$ para m no nulo. De nuevo al igual que hiciera Einstein podemos preguntarnos por como la entropía alrededor de estos puntos de equilibrio depende del volumen V. La sorpresa es que la variación de la entropía viene dada en primera aproximación no por el $\log V/V_0$ como en el ejemplo del 1905 sino por algo del tipo $\log A/A_0$ donde A y A_0 representan esencialmente el área de una superficie que encerrara un volumen V y V_0 respectivamente. Aunque esta es una primera y muy burda aproximación que ignora detalles importantes, nos sirve para lo que aquí pretendemos que es la elaboración de un simple argumento heurístico. La sorprendente conclusión del mismo argumento que llevara a cabo Einstein para el caso de la radiación electromagnética en una cavidad, le hubiera llevado a desvelar que la naturaleza del sistema gravitacional contenido en la caja cuando entramos en el régimen en el que la nucleación de agujeros negros esta favorecida, es la de un sistema de partículas pero esta vez con una sorpresa adicional la de ser partículas que viven en un espacio de dimensión menor y que en algún sentido, que es necesario precisar, actúa como la frontera del espacio que estábamos considerando. Al igual que en el ejemplo del 1905 el análisis de la entropía de radiación revela un comportamiento corpuscular. En el caso de la entropía de un sistema gravitacional en una caja, la formula de la entropía nos esta desvelando un comportamiento holográfico.

Quizás las analogías entre el problema de 1905 y este problema suscitado por el ejemplo de Hawking de 1976 vayan aún un poco mas lejos. En el caso de la radiación electromagnética en cavidades la distribución de Wien resuelve la aparente paradoja de la imagen clásica en la zona de la catástrofe ultravioleta. En nuestro caso el análogo de la catástrofe ultravioleta es la formación de agujeros negros (algo que incidentalmente debemos esperar en la zona profundamente ultravioleta donde acumulamos enorme cantidad de energía en regiones pequeñas). La formula de Bekenstein-Hawking al igual que la de Wien nos dan una descripción nueva de esa zona. De la de Wien, Einstein concluye el comportamiento corpuscular de la luz, de la Bekenstein-Hawking derivamos el comportamiento holográfico. La fórmula de Wien contiene dos constantes fenomenológicas que fue Planck el primero en transformar en constantes fundamentales, la constante k de Boltzmann y la pro-

pia constante h de Planck. En el caso de la fórmula de Bekenstein-Hawking, si la tomamos como una fórmula fenomenológica, hay una constante que podríamos también entender como fenomenológica, nos referimos, naturalmente, a la propia constante G de Newton. No sería pues descabellado esperar, llevando la analogía un poco más lejos, que el entendimiento dinámico de la holografía, al igual que lo fue el entendimiento mecano cuántico de la física de los resonadores de Planck, nos llevara a traducir G en términos de una nueva constante fundamental, para la que desde luego ya tenemos un candidato provisional, la tensión de la supercuerda. Pero para entender mejor este último comentario deberemos avanzar un poco más.

Uno de los resultados básicos de la física de los últimos cincuenta años, resultado íntimamente ligado al premio Nóbel de Física de 2004 es la idea de libertad asintótica. La razón por la que este descubrimiento es importante es por dotarnos de la única teoría conocida de la que sabemos "ab initio" que es completa, en el sentido de que por pequeñas que sean las distancias a las que tengamos acceso, es decir por mayor que sea la energía de nuestras pruebas, nada nuevo debemos esperar dentro de dicha teoría. Este no es por ejemplo el caso en teorías como el modelo estándar. Otra de las características de una teoría asintóticamente libre es el llamado fenómeno de confinamiento. Supongamos que consideramos una de estas teorías a temperatura finita. Si definimos un parámetro de orden que llamaremos $p=<P>$ y una acción efectiva $S_{eff}(p)$ como función de p nos encontraremos que, a medida que variemos la temperatura, las gráficas de $S_{eff}(p)$ son muy similares a las gráficas de $S(m)$ que habíamos encontrado en el ejemplo de nuestra caja. La analogía nos lleva así a relacionar dos fenómenos aparentemente muy distintos como son la nucleación de agujeros negros y el fenómeno de desconfinamiento.

El parámetro de orden p se conoce como el lazo de Polyakov y no es sino el mejor conocido como lazo de Wilson[10] pero cuando el lazo está sobre la dirección temporal en signatura euclidea y compactada a un círculo de radio igual al inverso de la temperatura a la que estemos trabajando. Si p es igual a cero diremos que el sistema está en la fase confinada, mientras que si p es diferente de cero diremos que el sistema esta desconfinado.

La analogía se puede llevar aún más lejos, pero para que los gráficos de $S(m)$ y $S_{eff}(p)$ puedan ponerse en correspondencia es necesario introducir algunas mejoras en el ejemplo de la caja del que habíamos partido. Necesitamos un caja gravitacional parte ella misma del espacio-tiempo. Esto no es difícil de conseguir. Algo que hace los efectos de una caja es el espacio de Anti de Sitter[11]. Como se ve en el gráfico de Penrose (figura 3) las trayectorias de tipo de partículas masivas están confinadas al interior de una caja efectiva del orden del radio de curvatura del espacio de Anti de Sitter. Si ahora consideramos $S(m)$ para esta situación, pensando en una distribución de energía en el interior de este espacio-tiempo-caja, nos encontraremos con la gráfica de $S_{eff}(p)$ pero donde esta segunda gráfica es la derivada para una teoría en una dimensión menor que vive en la frontera de Penrose[12] (zona II de la figura 3) del espacio-tiempo-caja. Esto es lo que entendemos por holografía es decir un modelo mecano cuántico en una dimensión menor de la fórmula de la entropía del sistema gravitacional. Pero para terminar el trabajo deberemos relacionar la constante de gravitación G que usamos en la construcción de $S(m)$ con alguna propiedad de la teoría gauge, en particular con el rango del grupo. Un primer paso hacia la traducción de constantes que habíamos anunciado al hablar de la analogía con la visión de Planck de la distribución de Wien.

La serie de pasos, fundamentalmente heurísticos, que hemos ido dando nos ha llevado a una conexión bastante sorprendente entre el parámetro de orden p del fenómeno de confinamiento y el valor m del agujero negro nucleado en la caja en una situación de equilibrio. ¿Tiene algún sentido esta conexión?, ¿qué podemos aprender de ella?. Esta es una pregunta que nos llevaría bastante mas lejos de lo que se pretende con este pequeño artículo. Daremos por lo tanto una idea muy superficial de la posible respuesta.

Para visualizar p piense el lector en un círculo C en un espacio euclídeo de cuatro dimensiones donde una dimensión la hemos compactado a un círculo. Si el círculo C como es el caso es no contráctil el valor de P, que no es sino la integral del campo gauge sobre el círculo podrá tan solo tomar valores en el centro del grupo gauge es decir ser un elemento de Z_N, donde N es el rango del grupo gauge. Al estar interesados en p, es decir en el valor medio deberemos sumar sobre todas las posibilidades lo que nos dará un resultado nulo. ¿Qué deberemos hacer para obtener un resultado no nulo (que es lo que queremos para encontrar una relación entre p y un valor de m no nulo en una situación de equili-

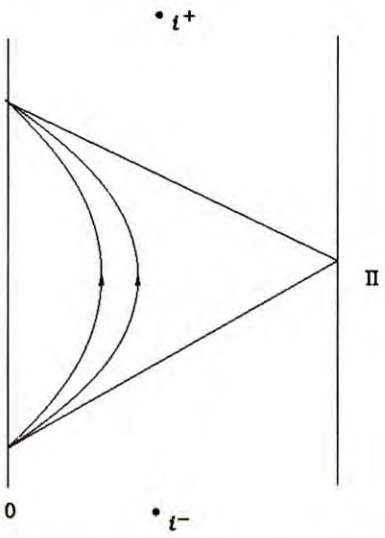

Figura 3. Diagrama de Penrose

[10]El lazo de Wilson fue originariamente introducido por K.Wilson como una manera de medir el potencial estático entre quarks. Para un lazo rectangular donde uno de los lados represente el tiempo T y el otro la distancia L entre los quarks, el lazo de Wilson se comportara como el exponencial de $V(L)\cdot T$ donde $V(L)$ es el potencial estático entre los quarks.

[11]Los argumentos que siguen constituyen una versión en caricatura de algunos de los resultados de los últimos años, surgidos, fundamentalmente, a partir de los trabajos de J. Maldacena y E. Witten.

[12]O frontera conforme.

brio)?. Déjenme que les sugiera como la respuesta más natural el que el lazo C que usamos para definir p sea contráctil. Esto nos supone haber añadido una dimensión mas, la dirección holográfica que andamos buscando, y encontrarnos con una topología como la que representamos en la figura 4. Cualquier lector que se haya entretenido en la sutilezas de la física de agujeros negros reconocerá en la figura lo que se conoce como la sección euclídea de un agujero negro.

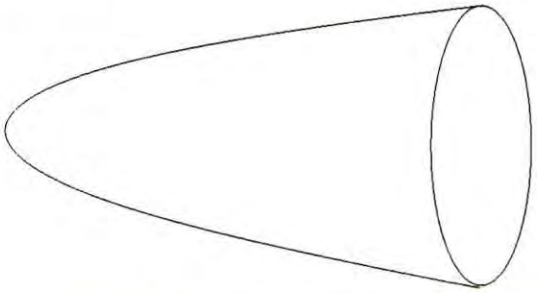

Figura 4. Sección euclídea de un agujero negro

Nos quedan en el tintero varias preguntas fundamentales a las que obviamente este comentario homenaje al "annus mirabilis" que este año celebramos, no pueden dar una respuesta. ¿De dónde ha surgido la nueva dimensión holográfica?. Y quizás de manera aún más fundamental, ¿qué tienen después de todo que ver las teorías gauge y la gravitación?. Daré una indicación sobre la respuesta a la segunda pregunta.

No es difícil, si se estudia la termodinámica de las teorías gauge, por ejemplo en el caso más simple de una caja –con un grupo gauge de rango suficientemente grande (lo que se conoce como límite de "large-N") para así contar con suficientes grados de libertad para que una estructura de fases no trivial tenga sentido– encontrarse con la llamada temperatura de Hagedorn. Esta temperatura que se caracteriza por un crecimiento exponencial en el espectro, ha llevado a muchos a pensar en un comportamiento cuerdístico de la teoría gauge. El crecimiento exponencial de Hagedorn es un fenómeno natural cuando se trata del espectro de objetos unidimensionalmente extendidos. Este comportamiento cuerdístico (palabra ciertamente detestable en castellano) nos puede dar la clave de la segunda pregunta. La topología de las cuerdas es suficientemente elástica para permitirnos pasar, de manera continua, de un espectro de cuerdas abiertas a uno de cuerdas cerradas, es decir, en la terminología de nuevo cuerdística, para pasar de radiación gauge a gravitacional (ver figura 5). Este simple ejercicio en topología[13] nos descubre que cuando Dios dijo hágase la luz, con el mismo mandato creó la gravedad.

Es tiempo de terminar con este ejercicio de, por una parte, homenaje a Einstein, y por otra, de modesto intento de imaginar lo que Einstein hubiera hecho en nuestros días. El argumento heurístico del 1905, que nos trajo a los fotones, aplicado ahora a la fórmula de Bekenstein-Hawking hubiera seguramente permitido descubrir, a un Einstein en su juventud, los secretos de la holografía, la teoría de cuerdas y el confinamiento.

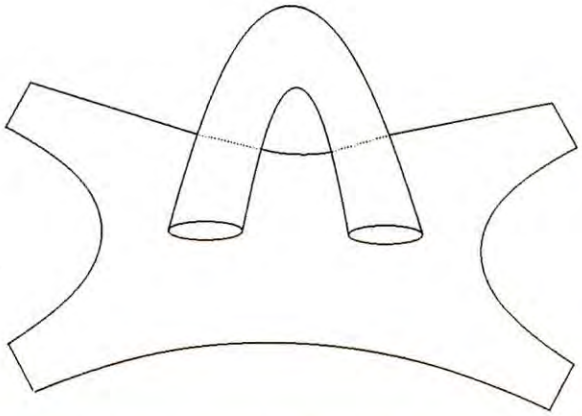

Figura 5. Diagrama a primer orden en la Teoría de Cuerdas

Sintetizando el argumento heurístico de Einstein en forma esquemática:

Catástrofe UV → *Ley de Wien* → *Entropía* → *Fotones* → → *Dualidad (onda-corpúsculo)*

nos encontraríamos con que su versión gravitacional, el más allá de Einstein que hemos intentado imaginar o, si se prefiere, sugerir, quedaría esquematizado como sigue:

Agujeros negros → *Entropía de B-H* → *Holografía* → → *Dualidad (gravedad-gauge)*

Sirva este breve ensayo para que aquellos abrumados por las prédicas catastrofistas de quienes piensan que la física fundamental ha terminado, sepan, que muy probablemente, lo mejor está aún por venir. Ley de vida[14].

César Gómez
está en el Instituto de Física Teórica UAM/CSIC

[13]El resultado de este ejercicio se conoce como conexión abierta-cerrada. La idea está basada simplemente en los siguientes hechos. Cuerdas con topología abierta contienen en su espectro partículas sin masa de spin uno. Estas partículas son típicos cuantos de radiación o si se prefiere de campos gauge. Por otro lado cuerdas con la topología de cuerdas cerradas tienen en su espectro partículas sin masa pero de spin dos, que son el tipo de cuantos que asociaríamos con gravitones. Ahora bien si admitimos fenómenos cuánticos con creación y posterior aniquilación de cuerdas abiertas nos encontraremos con que estos procesos se representan por superficies con agujeros. Lo que esto significa es que siempre tenemos, aunque comencemos con estados asintóticos de tipo abierto, contribuciones de cuerdas cerradas en canales internos. En otras palabras, aplicando unitariedad, nos encontramos, inevitablemente, con gravedad en nuestro espectro. La figura 5 intenta dar una imagen intuitiva de este hecho fundamental derivado del carácter extenso de la cuerda. Es por ello extraordinariamente importante que a partir de la termodinámica de las teorías gauge podamos reconocer efectos (como podría ser la temperatura de Hagedorn) que están íntimamente ligados a la existencia de objetos extensos.

[14]Agradezco al Dr. J.J. Manjarín por su ayuda en la elaboración de esta nota.