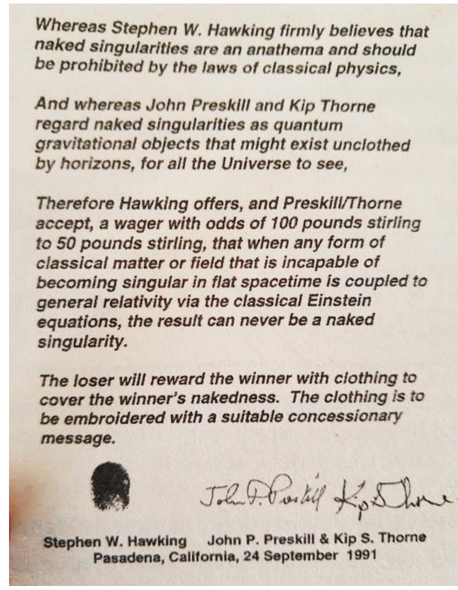
UNA APUESTA MUY SINGULAR

Luis A. de Vedia

En el año 1991 los físicos Stephen Hawking, John Preskill y Kip Thorne hicieron una apuesta en la que el primero de ellos, Hawking, defendía la posición que lo que en ese momento se designaban como "*singularidades desnudas*" ("*Naked singularity*"), estaban prohibidas por las leyes de la física, mientras que los segundos, Preskill y Thorne sostenían que tales singularidades eran entidades cuánticas que pueden existir "desnudas", es decir no ocultas detrás de los horizontes en agujeros negros. Más tarde Hawking les concedió el triunfo en la apuesta a Preskill y Thorne obsequiándoles una remera con un motivo que hoy podríamos considerar políticamente incorrecto. La figura muestra una versión comercial de dicha remera (1).



Whereas Stephen W. Hawking firmly believes that naked singularities are an anathema and should be prohibited by the laws of classical physics,

And whereas John Preskill and Kip Thorne regard naked singularities as quantum gravitational objects that might exist unclothed by horizons, for all the Universe to see,

Therefore Hawking offers, and Preskill/Thorne accept, a wager with odds of 100 pounds stirling to 50 pounds stirling, that when any form of classical matter or field that is incapable of becoming singular in flat spacetime is coupled to general relativity via the classical Einstein equations, the result can never be a naked singularity.

The loser will reward the winner with clothing to cover the winner's nakedness. The clothing is to be embroidered with a suitable concessionary message.

Stephen W. Hawking John P. Preskill & Kip S. Thorne
Pasadena, California, 24 September 1991

La apuesta de 1991 entre Hawking, Thorne y Preskill en la que el primero sostenía el Ppio. de censura cósmica, es decir que no pueden existir singularidades "desnudas"

Reproducción comercial de la remera que Hawking obsequió a Preskill y Thorne. La leyenda dice"*Nature abhors a naked singularity*"

Pero veamos los antecedentes de esta inusual apuesta y su epílogo que todavía hoy, casi 30 años más tarde, no se ha terminado de cerrar. Podemos identificar el comienzo de esta historia muchos años antes cuando Alberto Einstein hacia 1915 en el marco de su teoría general de la relatividad concluye que el espacio y el tiempo, digamos mejor espacio-tiempo, es distorsionado por la presencia de materia y/o energía, y que es precisamente esta distorsión del espacio-tiempo lo que origina la gravedad que entre otras cosas nos mantiene vinculados a la superficie de la tierra.

Una consecuencia de las ecuaciones de campo de la teoría general de la relatividad es que conducen a la existencia de lo que pueden llamarse singularidades del espacio-tiempo. En física y en matemática solemos designar como singularidad a alguna variable que bajo ciertas condiciones se torna infinita. Un ejemplo trivial sería el cociente a/b cuando b se acerca a 0 siendo a distinto de 0. Decimos entonces que el cociente presenta una singularidad para $b = 0$. Una singularidad espacio-temporal implicaría una curvatura infinita del espacio-tiempo, algo así como un círculo que se reduce a un punto. Esta posibilidad matemática fue explorada por décadas por físicos tan prestigiosos como Robert Oppenhimer, John Wheeler, Roger Penrose and Stephen Hawking, pero solo en los últimos años su existencia se vio confirmada por la evidencia experimental. Estas singularidades, apropiadamente designadas "*agujeros negros*" son los objetos más extremos de la naturaleza. De acuerdo con las ecuaciones de campo de Einstein son una distorsión extrema del espacio-tiempo que contiene una densidad de energía tal que su campo gravitatorio impide que cualquier señal que se mueva a una velocidad no superior a la de la luz queda irremisiblemente atrapada por la singularidad y como la misma teoría de la relatividad lo prohíbe, ninguna señal que contenga información o energía puede desplazarse a una velocidad superior a la de la luz en el vacío. De aquí el nombre "agujero negro" ya que ninguna señal luminosa puede llegarnos desde el mismo.

Un concepto fundamental para describir la geometría de un espacio es el constituido por la *métrica* de ese espacio. La métrica de un espacio no es otra cosa que una expresión matemática que nos permite calcular la distancia dS entre dos puntos cercanos entre sí, en rigor, infinitamente próximos uno del otro. Es así que la métrica más simple que podemos concebir en un espacio multidimensional cuando referimos esa distancia a un sistema de ejes coordenados cartesianos ortogonales, es la del plano euclidiano que como sabemos es

$$dS^2 = dx^2 + dy^2 \qquad \textbf{(1)}$$

También sabemos que cuando el espacio es curvo, como lo es la superficie de una esfera, la expresión anterior no es válida y la métrica para este caso se torna más complicada, siendo en coordenadas esféricas

$$dS^2 = r^2\left(d\theta^2 + sen^2\theta d\phi^2\right) \qquad \textbf{(2)}$$

en la que r es el radio de la esfera y las coordenadas θ y ϕ los ángulos que corresponden a lo que podemos llamar la latitud y la longitud del punto considerado sobre la esfera. Es importante destacar que no hay manera de reducir esta última expresión a la de la métrica euclidiana de un plano del mismo modo que no podemos hacer de una superficie esférica un plano sin rasgarlo.

Ahora bien, la teoría general de la relatividad nos dice que la presencia de una masa o la presencia de energía que en última instancia es lo mismo dada la vinculación relativista entre ambos conceptos, produce una distorsión en el espacio-tiempo, es decir introduce una curvatura en el espacio y un cambio en la manera en que transcurre el tiempo.

A fin de hacer un poco más precisa la descripción de la manera en que un agujero negro representa una distorsión del espacio-tiempo en la vecindad del mismo, tengamos en cuenta que de acuerdo con las ecuaciones de campo de la relatividad general, en presencia de una distribución de masa con simetría esférica aquellas quedan satisfechas por una métrica del espacio-tiempo dada por

$$\begin{aligned} dS^2 = c^2 d\tau^2 = -\left(1-\frac{2GM}{rc^2}\right)c^2dt^2 + \left(1-\frac{2GM}{rc^2}\right)^{-1}dr^2 + \\ +r^2\left(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2\right);\ 0 \le \theta \le \pi;\ 0 \le \phi \le 2\pi \end{aligned} \qquad \textbf{(3)}$$

en la que dS^2 no es otra cosa que el cuadrado de la separación espacio-temporal de dos puntos próximos en el espacio-tiempo, G es la constante de gravitación universal, c la velocidad de la luz en el vacío, M la masa del cuerpo, r la distancia del objeto al centro del cuerpo y τ el *tiempo* *propio* que no es más que el tiempo medido por el reloj de un observador que se mueve en ese campo gravitacional. La (3) es conocida como la métrica de *Schwarzschild*.

Ahora bien, observemos que si

$$r = R_S = \frac{2GM}{c^2} \qquad \textbf{(4)}$$

donde R_S es el llamado *Radio de Schwarzschild*, la métrica (3) se torna infinita. De acuerdo con lo expresado más arriba, esto representaría una singularidad. Sin embargo debe destacarse que en la métrica de Schwarzschild esta singularidad surge como consecuencia del sistema de coordenadas esféricas empleado para describirla. De hecho, es posible emplear otro sistema de coordenadas como el *Krustal* en el cual la singularidad no está presente. Otro aspecto importante a tener en cuenta es que la métrica (3) depende exclusivamente de la masa M independientemente de cómo esta se encuentre distribuida en la medida que exhiba simetría esférica, por lo que la métrica (3) es válida sólo fuera de esa distribución de masa.

Ignorando algunos pasos de álgebra simples pero tediosos, de la expresión (3) de la métrica de Schwarzschild podemos encontrar la ecuación para una partícula que cae libremente en el campo gravitacional creado por la presencia de la masa *M*. Esta ecuación es

$$\frac{d^2 r}{d\tau^2} = -\frac{GM}{r^2} \qquad \textbf{(5)}$$

La (5) es similar a la expresión newtoniana para un cuerpo en caída libre en un campo gravitatorio creado por la masa M pero hasta ahí llega la analogía. En este caso r no es simplemente la distancia desde la partícula hasta el centro de la masa M sino el resultado de la integración de la métrica (3) desde la posición de la partícula hasta el centro de la masa M. Por otra parte τ no es el tiempo newtoniano universal sino el tiempo propio tal como lo mediría un reloj solidario con la partícula.

Aunque la singularidad que la métrica de Schwarzschild presenta para $r = R_S$ no es esencial, como lo es la correspondiente a $r = 0$, ocurren cosas importantes de significado físico cuando un objeto atraviesa ese límite. En efecto, puede demostrarse que una vez pasado ese límite no hay vuelta atrás. Cualquier forma de energía que traviese ese límite, denominado *horizonte de Schwarzschild* u *horizonte de eventos* permanecerá dentro del mismo sin posibilidad de escape. Por lo tanto ninguna señal, ni siquiera una señal luminosa puede emerger al exterior. Esta es la razón por la cual los agujeros negros son "*negros*".

Es interesante destacar que para un observador estacionario externo, es decir fuera del horizonte, el tiempo t que demoraría una partícula en caer libremente en el campo gravitatorio del agujero negro medido por ese observador sería aproximadamente

$$t(r) \approx -\frac{R_S}{c}\ln(r - R_S) \qquad \textbf{(6)}$$

de modo que tardaría un tiempo infinito en alcanzar la posición $r = R_S$. Esto es consecuencia de la dilatación gravitacional del tiempo que hace que un reloj marche más despacio a medida que el campo gravitacional aumenta. Simultáneamente tendremos un efecto gravitacional de contracción de longitudes por lo que las dimensiones de cualquier objeto que se acerque al horizonte finalmente se convertirá en una suerte de película infinitamente delgada acercándose asintóticamente a la superficie de ese horizonte pero nunca alcanzándola. Sin embargo, y esto constituye una paradoja, de acuerdo con la teoría de la relatividad un observador que cayese con la partícula no observaría nada extraño al atravesar el horizonte y demoraría un tiempo local finito, es decir medido por su propio reloj, en alcanzar el centro $r = 0$[(1)]. Esta última afirmación está hoy cuestionada con el argumento de que cuando se tienen en cuenta efectos cuánticos (recordemos que la teoría general de la relatividad es una teoría "*clásica*" que no tiene en cuenta tales efectos), efectos peculiares pueden ocurrir al alcanzarse el horizonte. Estas extremadamente distintas experiencias entre un observador local en caída libre y otro externo no son otra cosa que el resultado de las extrañas predicciones de la teoría de la relatividad y han dado origen al término "*firewall*" para referirse a los eventos todavía hoy no totalmente explicados que tienen lugar en el horizonte de Schwarzschild. Como veremos, estos eventos están estrechamente vinculados con la naturaleza de la singular apuesta hecha entre Stephen Hawking, John Preskill y Kip Thorne.

De modo que desde un punto de vista relativista clásico, para un observador externo toda la energía/información que llega al agujero negro se quedaría en esa estructura cuasi bidimensional infinitamente próxima al horizonte sin poder atravesarlo. Ahora bien, la cantidad de información que esa estructura puede albergar es ilimitada ya que los bits de información de acuerdo con la física clásica pueden estar constituidos por pulsos de energía arbitrariamente pequeños y por lo tanto no habría límite para la cantidad de bits que la estructura puede contener. Esta información permanece sin embargo inaccesible para el observador externo ya que nada puede escapar del horizonte, es información o energía perdida.

Ahora bien, esta información no es otra cosa que entropía que estaría entonces almacenada pero inaccesible para un observador externo en la superficie del horizonte. Jacob Bekenstein **(2)** fue quien en los '70 especuló y demostró que el horizonte de un agujero negro sólo puede contener una cantidad finita de entropía, es decir una cantidad finita de información. Para demostrarlo basta considerar que se "construye" un agujero negro partícula por partícula, donde cada partícula contiene sólo un *q*-bit de información (un bit cuántico por lo tanto indivisible), por ejemplo un fotón de longitud de onda lo suficientemente grande, es decir de energía lo suficientemente baja como para que no contenga información sobre en qué punto del agujero negro en construcción hace su ingreso el fotón ya que de lo contrario se requeriría más de un *q*-bit. Esta longitud de onda λ debería ser entonces comparable a R_S, el radio de Schwarzschild. De modo que el ingreso del fotón al agujero negro incorporaría una cantidad de energía dada por

$$\delta E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{R_S} \qquad \textbf{(7)}$$

Ahora bien, la **(7)** implica un incremento de masa del agujero negro (recordemos que $E = Mc^2$)

$$\delta M = \frac{h}{R_S c} \qquad \textbf{(8)}$$

(1) Aquí estamos ignorando efectos tales como los resultantes de las fuerzas de marea ("*tidal forces*") que según su intensidad pueden conducir a una "*espaguetización*" del sujeto en caída libre, según una ingeniosa expresión del físico John Wheeler.

lo que teniendo en cuenta (4) implica un aumento en el radio del agujero negro

$$\delta R_S = \frac{2G}{c^2}\frac{\mathrm{h}}{R_S c} = \frac{2G}{c^3}\frac{\mathrm{h}}{R_S} \qquad \textbf{(9)}$$

Multiplicando (9) por R_S, obtenemos

$$R_S \delta R_S = \frac{2G\mathrm{h}}{c^3} \;\; \alpha \; \delta A \qquad \textbf{(10)}$$

siendo δA el incrementó de área A de horizonte debido a la introducción de un q-bit de información y constituye una constante universal. De manera que el número máximo de q-bits que el horizonte puede almacenar, es decir su entropía S, luego de algunos ajustes efectuados por Stephen Hawking, resulta

$$S = \frac{Ac^3}{4\mathrm{h}G} \qquad \textbf{(11)}$$

es decir finito y proporcional al área del horizonte.

Dado que la entropía está vinculada con la temperatura absoluta T a través de la relación $dE = TdS$, Hawking (3) demostró que la temperatura del horizonte de un agujero negro está dada por la expresión

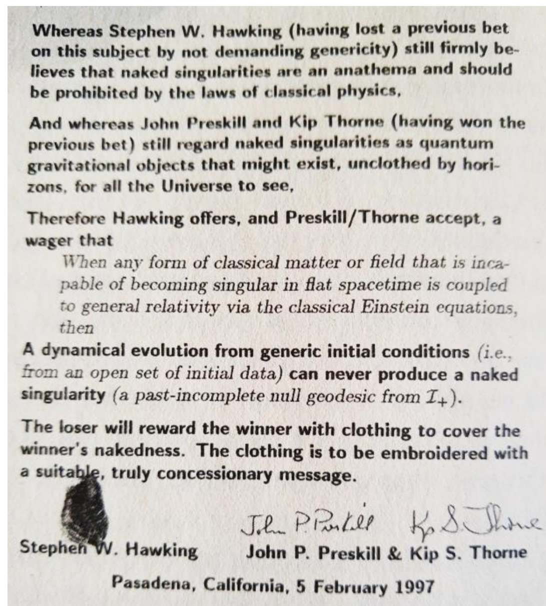
$$T = \frac{\mathrm{h}}{8\pi MG} \qquad \textbf{(12)}$$

es decir inversamente proporcional a su masa. Como consecuencia de esta expresión la temperatura del agujero negro es pequeña ya que ≅ es una cantidad muy pequeña. Pero ésta es la temperatura del agujero negro vista desde el exterior y por lo tanto muy desplazada hacia el rojo. La superficie del horizonte medida localmente puede ser en cambio sumamente elevada.

Si bien de acuerdo con la teoría de relatividad clásica un agujero negro no puede radiar ningún tipo de energía, Stephen Hawking en 1974 presentó un argumento teórico por el cual un agujero negro puede radiar energía desde su horizonte. El argumento se basa en que de acuerdo con la teoría cuántica de campos el vacío es en realidad sitio de creación de pares de partículas-antipartículas virtuales, es decir no reales ya que son básicamente un artefacto matemático de la teoría, que rápidamente se aniquilan mutuamente. Ahora bien, en la cercanía del horizonte de un agujero negro, el intenso campo gravitatorio puede atrapar una de las partículas virtuales de un tal par incorporándola al agujero negro y dejando a la otra escapar libremente. En el proceso, las partículas se tornan reales y por lo tanto la partícula que escapa conlleva una energía positiva mientras que la antipartícula que queda atrapada en el agujero negro posee, por el principio de conservación de la energía, energía negativa. Esto hace que gradualmente la energía del agujero negro vaya disminuyendo hasta el punto en que el mismo pueda desaparecer y a este proceso se lo denomina *evaporación* del agujero negro.

No hay hasta el momento evidencia experimental contundente de la existencia de la radiación de Hawking pero vale la pena destacar que un proceso similar puede ocurrir con un agujeró negro "clásico" cuando el mismo está rotando. En tal caso, en contraste con la radiación de Hawking, por la cual la emisión de energía para agujeros negros de tamaño razonable es ridículamente pequeña, tengamos en cuenta que un agujero negro con una masa igual a la del sol tardaría unos 10^{67} años! para evaporarse completamente, la radiación por agujeros negros en rotación es tremendamente significativa. De hecho, se cree que la emisión de energía por las fuentes más potentes conocidas en el universo como los cuásares y radio-galaxias parece originarse en la energía rotacional de grandes agujeros negros. Estos fenómenos naturales extremos constituyen hoy lo que puede ser la puerta de entrada a una teoría de la gravedad cuántica, que sin duda es el "santo grial" de la física actual, ya que los intentos de cuantificar la gravedad mediante los recursos que han sido exitosos para otras teorías de campo han fracasado para el campo gravitatorio. Quizás esta circunstancia se deba a que la mecánica cuántica y la gravitación están estrechamente vinculadas entre sí.

Hawking reconoció haber perdido la apuesta de 1991 frente a Thorne y Preskill ante resultados de modelos computacionales que demostraban que bajo condiciones iniciales muy finamente sintonizadas, un frente de ondas gravitacionales convergente podía producir una singularidad sin que esta necesariamente estuviese oculta detrás del horizonte de un agujero negro. Por esta razón, la apuesta hecha por Hawking, Preskill y Thorne en 1991 es el antecedente de otra inusual apuesta hecha entre Hawking, Thorne y Preskill el 5 de Febrero de 1997 cuyo texto puede verse a la derecha. Hawking mantenía que bajo condiciones genéricas, es decir no tan finamente sintonizadas, las singularidades "desnudas" no podían existir. Existe una cierta confusión respecto de la posición de Thorne en la apuesta. Sin embargo, en su artículo "*Spacetime warps and the quantum world*", el propio Thorne manifiesta su posición junto con Preskill y en oposición a Hawking respecto de la imposibilidad existencia de singularidades "desnudas". La confusión se aclara si se tiene en cuenta el documento suscripto por los mismos tres físicos un día después, es decir el 6 de Febrero de 1997**(4)** en el que Hawking y Thorne comparten la posición que la información que ingresa a un agujero negro se pierde irremisiblemente.


Whereas Stephen W. Hawking (having lost a previous bet on this subject by not demanding genericity) still firmly believes that naked singularities are an anathema and should be prohibited by the laws of classical physics,

And whereas John Preskill and Kip Thorne (having won the previous bet) still regard naked singularities as quantum gravitational objects that might exist, unclothed by horizons, for all the Universe to see,

Therefore Hawking offers, and Preskill/Thorne accept, a wager that

When any form of classical matter or field that is incapable of becoming singular in flat spacetime is coupled to general relativity via the classical Einstein equations, then

A dynamical evolution from generic initial conditions *(i.e., from an open set of initial data)* **can never produce a naked singularity** *(a past-incomplete null geodesic from $\mathcal{I}_+$).*

The loser will reward the winner with clothing to cover the winner's nakedness. The clothing is to be embroidered with a suitable, truly concessionary message.

John P. Preskill Kip S. Thorne

Stephen W. Hawking **John P. Preskill & Kip S. Thorne**

Pasadena, California, 5 February 1997

La nueva versión, del 5 de Febrero de 1997 de la apuesta entre Hawking, Thorne y Preskill. Hawking mantiene su posición sobre la imposibilidad de singularidades desnudas (censura cósmica), mientras que Preskill y Thorne se oponen a esta idea.

Dado que de acuerdo con la teoría de la relatividad los agujeros negros no podían radiar energía y por lo tanto emitir información, esto implicaría que la energía/información que entra al agujero negro, por ejemplo en forma de partículas, se pierde irremisiblemente cuando este se evapora. Por este motivo la postulada radiación de Hawking no se podía originar detrás del horizonte y no se correspondería con la energía o información previamente ingresada. Pero esto contradecía la idea de microcausalidad en la mecánica cuántica que en esencia dice que la información no se puede destruir. En efecto, según la mecánica cuántica toda la información de un sistema físico está contenida en la función de onda de dicho sistema y a menos que se produzca la reducción de la función de onda del sistema, la información debe conservarse. Lo contrario exigiría un replanteo de la mecánica cuántica. Por esta razón Preskill argumentaba que la mecánica cuántica sugería que la información emitida como radiación por el agujero negro se tenía que deber a la información introducida en ese agujero negro con anterioridad lo que implicaba una revisión no de la mecánica cuántica sino de la teoría de la relatividad en su aplicación a los agujeros negros.

Whereas Stephen Hawking and Kip Thorne firmly believe that information swallowed by a black hole is forever hidden from the outside universe, and can never be revealed even as the black hole evaporates and completely disappears. And whereas John Preskill firmly believes that a mechanism for the information to be released by the evaporating black hole must and will be found in the correct theory of quantum gravity, therefore Preskill offers, and Hawking/Thorne accept, a wager that:

When an initial pure quantum state undergoes gravitational collapse to form a black hole, the final state at the end of black hole evaporation will always be a pure quantum state.

The loser(s) will reward the winner(s) with an encyclopedia of the winner's choice, from which information can be recovered at will.
Stephen W. Hawking, Kip S. Thorne, John P. Preskill
Pasadena, California, 6 February 1997

Texto de la apuesta hecha el 6 de Febrero de 1997 entre Hawking, Thorne y Preskill en la que los dos primeros aceptaban la pérdida de información ingresada a un agujero negro.

Sea como sea el caso es que Hawking reconoció haber perdido la apuesta frente a Preskill aceptando que los agujeros negros podían filtrar información a través de su horizonte por lo que le entregó como premio al ganador una ejemplar de "*Total Baseball: The Ultimate Baseball Encyclopedia*" al que Thorne no quiso contribuir por no aceptar enteramente los argumentos de Hawking. Este dilema no ha sido aún resuelto definitivamente aunque en los últimos años, particularmente durante 2019 se ha hecho un progreso significativo en el sentido que la información efectivamente se conserva.

Algunas de las propuestas para resolver este dilema están vinculadas con la aparente paradoja de las dos experiencias tan diferentes entre la de un observador estacionario externo y la de otro observador en caída libre en un agujero negro. Investigación de frontera sobre este tema ha llevado a concebir ideas que parecen más ciencia-ficción que ciencia dura. En tales ideas intervienen conceptos relacionados con fenómenos como enlaces cuánticos (*quantum entaglement*), agujeros de gusano (*wormholes*) y representación holográfica de espacios tridimensionales en espacios bidimensionales.

Si bien ha habido contribuciones muy importantes en este tema, como las de los físicos Leonard Sussking, Gerardus 't Hooft y otros, el trabajo del físico argentino Juan Maldacena (5) ha sido pionero en este último aspecto. La idea básica de Maldacena es que así como la entropía de un agujero negro es proporcional a su área y no a su volumen, la información contenida en el interior del agujero negro, proveniente de todo aquello de los cual el agujero negro se ha alimentado, desde partículas elementales hasta galaxias, está codificada en la superficie de su horizonte en una forma análoga a como un holograma codifica en dos dimensiones la información contenida en un volumen tridimensional. Esto permitiría, y algunos trabajos reciente en computación cuántica parecen confirmarlo, establecer una conexión entre gravedad, descrita en forma clásica por la teoría general de la relatividad de Einstein, con la teoría de interacciones entre partículas descrita por las teorías cuánticas de campos. Esta equivalencia permite que un universo con gravedad sea estudiado con un modelo de universo más simple, libre de gravedad, empleando las teorías cuánticas de campo.

Todas estas ideas están además vinculadas a la propuesta que en un trabajo conjunto Maldacena y Sussking **(6)** hicieron en 2013 según la cual un "*agujero de gusano*" ("wormhole") es equivalente a dos agujeros negros "*enlazados*" ("entangled") con lo cual la información contenida en un agujero negro podría ser rescatada en el otro extremo del universo mediante el otro agujero negro. El "agujero de gusano" sería una suerte de "túnel" en el espacio-tiempo que vincula dos regiones espacio-temporales distantes. El concepto fue introducido por los físicos americanos John Wheeler y Charles Misner **(7) (8)** en 1957.El segundo agujero negro enlazado con el primero podría ser formado mediante la información provista por la radiación de Hawking de modo que no se violaría el principio básico que la energía/información no puede transmitirse superluminicamente.

Para terminar, digamos que la física, en la búsqueda de la unificación entre las teorías de campo del modelo estándar con la relatividad general ha dado origen a ideas tan novedosas como excitantes. Prueba de esto son las decenas de miles de trabajos de investigación que se han publicado sobre estos temas en los últimos años. De hecho el trabajo de Maldacena figura como el trabajo más citado de la historia en el campo de la física moderna. Esto sin duda debe enorgullecernos a sus compatriotas y tiene que ver seguramente, por un lado, con el hecho que nunca antes ha habido la cantidad de investigadores que hoy se desempeñan en miríadas de universidades, institutos u otros organismos de investigación pero, por el otro, que el hombre con sus limitadas capacidades esté comenzando a rasgar el velo del misterio más profundo que nos presenta la naturaleza.

Aclaración sobre la notación: Por un error tipográfico, el símbolo h que figura en las ecuaciones **(7), (8), (9), (11)** y **(12)** corresponde a la constante de Planck dividida 2pi, lo que se conoce habitualmente como h barra.

Referencias

(1) Kip S. Thorne "*Spacetime warps and the quantum world: Speculation about the future*" en "The future of spacetime" W.W. Northon & Company, N.Y., London, 2002.

(2) J. D. Bekenstein, *Black holes and entropy*, Phys. Rev. D 7:2333–2346 (1973)

(3) Roger Penrose "*The road to reality: A complete guide to the laws of the universe*" Alfred A. Knopf, N.Y., 2005.

(4) http://www.theory.caltech.edu/people/preskill/bets.html

(5) Juan Maldacena, "*The Large N limit of Superconformal Field theories and Supergravity*," *Advances in Theoretical and Mathematical Physics* 2 (1998): 231–52.

(6) Maldacena, Juan; Susskind, Leonard (2013). "*Cool horizons for entangled black holes*". Fortsch. Phys. **61** (9): 781–811.

(7) Misner, C. W.; Wheeler, J. A. (1957). "*Classical physics as geometry*". *Ann. Phys*. **2** (6): 525.

(8) Misner, Charles W.; Kip S. Thorne; John Archibald Wheeler (September 1973). *Gravitation*. San Francisco: W. H. Freeman. ISBN 0-7167-0344-0.