

BACK IN BLACK

(LOS AGUJEROS NEGROS)

"¿A qué se parecería la Física sin la gravitación?" (A. Einstein)

RAFAEL ALCORTA MIÑAMBRES

Doctor en Teoría Cuántica de Campos

Catedrático (jubilado) de Física y Química de Bachillerato

1. BLACK IS BLACK

Siéntase usted un as del fútbol, coja un balón y dele una buena patada hacia arriba. El balón subirá hasta una cierta altura, se parará y volverá a caer. Si le da una patada más fuerte (si como se dice en Física, le imprime una velocidad inicial mayor), el balón subirá más alto antes de pararse, ¿verdad que sí? ¿A que esto de la Física no es tan difícil?

De todos modos, la velocidad que alcanza un balón al patearlo no es gran cosa, así que vamos a imaginar que lo que lanzamos hacia arriba es un cohete espacial que no puede autopropulsarse, es decir, se le lanza con una cierta velocidad, y hasta donde llegue. Pasará algo análogo: si por ejemplo se le da al cohete una velocidad inicial de digamos 1 km/sg, subirá hasta unos 51 km de altura, y allí se parará y caerá, lo mismo que el balón (cualquier estudiante de Física de 2º de Bachillerato debería ser capaz de calcular esto). Si la velocidad inicial del cohete es mayor, también subirá hasta una altura mayor antes de detenerse. La pregunta es: *¿se le puede proporcionar al cohete una velocidad inicial lo bastante grande para que ya nunca vuelva a caer sobre la Tierra?* La respuesta es sí, y el cálculo muestra que esta velocidad inicial debe ser de unos 11 km/sg. Por razones obvias, esta velocidad inicial necesaria para que nuestro cohete escape a la gravedad terrestre, se denomina "**velocidad de escape**". Depende del astro desde el cual el cohete es lanzado, puesto que por ejemplo, es más difícil escapar de la gravedad terrestre que de la lunar, dado que ésta última es menor (la velocidad de escape para un cohete disparado desde la superficie de la Luna es de solo unos 2'4 km/sg). Un cohete lanzado con una velocidad igual o superior a la de escape siempre seguirá hacia delante, cada vez más despacio desde luego, pero sin llegar a detenerse del todo nunca. En cambio, un cohete lanzado con velocidad inferior, tarde o temprano se parará y volverá a caer.

Ahora recordemos que la máxima velocidad posible en el Universo es la velocidad de la luz en el vacío, 300.000 km/sg. Si existiera un astro para el cual la velocidad de escape fuera superior a ésta, entonces *ningún* objeto que se disparara desde su superficie podría escapar a su gravedad, todos se detendrían y volverían a caer. Ni siquiera un rayo de luz podría huir, y esto en particular implica que desde tal astro no nos llegaría absolutamente nada de luz. Como un objeto del que no nos llega luz aparece a nuestros ojos como negro, un tal astro se denomina **"agujero negro"**; el nombre fue propuesto en 1967 por el físico norteamericano John Wheeler, y ha hecho fortuna desde entonces.

Por lo tanto, la idea de lo que es un agujero negro no es especialmente difícil: es un objeto cuya gravedad es tan intensa que ni siquiera un rayo de luz puede escapar de él. Las preguntas que ahora hay que plantearse son: ¿existen o pueden llegar a existir agujeros negros en el Universo? ¿Cómo y dónde podrían formarse? A responder a estas cuestiones se consagra el resto de este artículo.

2. GRAVITACIÓN Y GEOMETRÍA

Las anteriores ideas sobre objetos cuya atracción fuera tan potente que atrapara incluso la luz, no son en absoluto novedosas. Ya en 1796, el físico y matemático francés Pierre Simon Laplace las expuso en su obra "Exposición y Sistema del Mundo". Pero el propio Laplace se dio cuenta del problema que se presentaba al considerar estos hipotéticos objetos (es fácil hacer el cálculo, y de nuevo no debería revestir problema para cualquier alumno normal de 2º de Bachillerato). En efecto, para que un astro sea capaz de hacer volver incluso a los rayos de luz, se necesita que toda su masa se encuentre ultracomprimida, ocupando un volumen mínimo. No es necesario que el astro posea una gran masa, lo importante es la ultracompresión. Por ejemplo, la propia Tierra podría comportarse como un agujero negro siempre y cuando y sin perder masa, se encogiera hasta reducirse a una esfera de solo 9 milímetros de radio. Naturalmente, la posibilidad de una masa tan descomunal como la de toda la Tierra ($6 \cdot 10^{24}$ kg, seis mil trillones de toneladas) concentrada en una esfera tan diminuta, resultaba absurda para Laplace y para todos los físicos del siglo XIX, y por ello, la existencia de objetos semejantes quedó del todo descartada durante muchísimo tiempo.

La situación no iba a cambiar algo hasta 1915, el año en el que Albert Einstein (fig. 1) publicó su Teoría General de la Relatividad, sin duda la mayor construcción intelectual llevada a cabo por un hombre en solitario (se ha cumplido hace poco un siglo del acontecimiento sin que haya sido tan publicitado como merece, lo que muestra el



Fig. 1 Einstein en 1921

analfabetismo científico de buena parte de nuestra sociedad y de sus medios de comunicación, incluyendo a muchos que van de cultos). Es verdad que los trabajos de Einstein siempre han tenido fama de ser poco menos que incomprensibles para el hombre de la calle, quizá por las matemáticas elaboradas que requieren: es necesario saber calcular con unos objetos llamados "tensores", que son una generalización de los vectores ordinarios. Como dijo una revista científica de la época, *"un escalofrío ha recorrido la espalda de los físicos al comprender que en adelante, no les quedará más remedio que aprender Cálculo Tensorial"*. Pero aquí no nos vamos a liar con las matemáticas, y vamos a limitarnos a una descripción somera de lo que nos interesa.

Imagine el lector una superficie plana, rígida y horizontal. Si hacemos rodar sobre ella una canica, seguirá una trayectoria recta hasta que el rozamiento la detenga. Pero ahora imaginemos que a la superficie anterior le han brotado por todas partes jorobas y depresiones, de modo que aun siendo globalmente horizontal, ya no es plana en absoluto. Si echamos a rodar por ella nuestra canica, su trayectoria no será recta, sino que se curvará cada vez que su camino la haga pasar cerca de las jorobas o las simas. El quid del asunto está en darse cuenta de que **las fuerzas que han actuado sobre la canica son las mismas en ambos casos**: es la geometría plana o curva de la superficie sobre la que rueda lo que ha determinado que la trayectoria sea o no recta.

Pensemos ahora en la Tierra. Si no estuviera el Sol, no seguiría ninguna órbita cerrada; es la presencia del astro solar lo que la obliga a orbitar a su alrededor como lo hace. Dos siglos y medio atrás, Newton había explicado esto mediante su teoría de Gravitación Universal: todas las masas del Universo se atraen entre ellas, y es esta fuerza de atracción la que curva la trayectoria terrestre obligando a la Tierra a orbitar en torno al Sol, a la Luna a orbitar en torno a la Tierra, etcétera. El genio de Einstein radica en haber comprendido que estas fuerzas gravitatorias, cuyo origen el propio Newton consideraba un tanto misterioso, en realidad ino existen! ¿Entonces por qué el Sol obliga a la Tierra a curvar su trayectoria? Porque **la presencia de cualquier masa altera la geometría del espacio a su alrededor**, y ello ocasiona cambios en la trayectoria de

los objetos próximos, del mismo modo que la presencia de jorobas en la superficie del ejemplo alteraba el camino de la canica sin necesidad de nuevas fuerzas. Es decir, que realmente sobre la Tierra no está actuando ninguna fuerza de atracción hacia el Sol; la presencia del astro rey no origina nada nuevo en términos de fuerzas. Lo que sí produce la enorme masa solar es un cambio en la geometría del espacio que le rodea, el cual deja de ser plano a su alrededor, y se curva; la Tierra avanzando en este espacio curvo ya no puede seguir una trayectoria recta y se ve obligada a describir la órbita que observamos (lo mismo que la canica imposibilitada de ir en línea recta).

Es necesario hacer constar aquí que realmente la descripción del asunto no es tan simple. Para empezar, en Relatividad no se maneja el espacio usual de tres dimensiones, sino un objeto cuatridimensional denominado el "**espacio-tiempo**", que a las tres dimensiones espaciales añade una cuarta que es precisamente el tiempo; **son las cuatro dimensiones de este objeto las que se curvan y alteran su geometría al introducir una masa en él**, y no solo las tres dimensiones espaciales ordinarias. Visualizar objetos de cuatro dimensiones está fuera de las posibilidades de la mente humana (si usted lo intenta, lo único que conseguirá será un terrible dolor de cabeza), pero eso no impide hacer cálculos matemáticos con ellos. El propio Einstein obtuvo las ecuaciones generales que describen la forma en que una masa es capaz de curvar el espacio-tiempo a su alrededor, ecuaciones que llevan su nombre y que constituyen la cima de su obra.

Por desgracia, una cosa es escribir una ecuación, y otra muy distinta es poder resolverla. Y la Física está llena de ecuaciones que solo se saben resolver en unos pocos casos sencillos pero no en general: las ecuaciones que describen el movimiento de los fluidos por ejemplo, pertenecen a esta categoría. A pesar de que fueron deducidas hace dos siglos, itodavía seguimos sin entender muy bien porqué aparece turbulencia en un líquido que se mueve más allá de cierto límite! Es frustrante tener unas ecuaciones que contienen en su interior toda la información sobre un problema, y no poder llegar a ella por no disponer de métodos para resolverlas. Como tener un tesoro dentro de un cofre que no sabemos abrir más que a medias, de manera que a duras penas podemos acceder a tan solo una parte de él. Las ecuaciones de Einstein pertenecen a esta categoría. En jerga matemática, se trata de ecuaciones diferenciales tensoriales no lineales, o dicho de otro modo, horrorosamente difíciles de resolver, salvo en casos muy triviales.

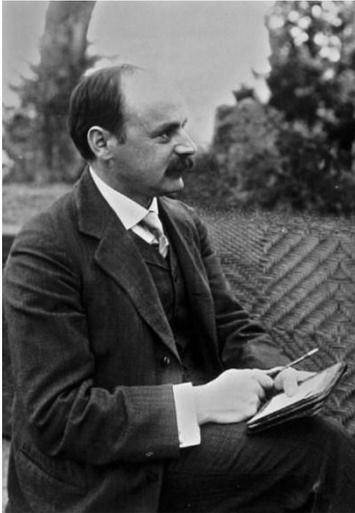


Fig. 2 Karl Schwarzschild

Esto pensaba el propio Einstein cuando las publicó, y por ello fue grande su sorpresa al recibir al poco tiempo una carta de la que vamos a hablar a continuación.

3. LA SOLUCIÓN DE SCHWARZCHILD

En aquellos años, casi toda Europa estaba envuelta en el torbellino de la Primera Guerra Mundial, y en el frente ruso se encontraba un brillante físico llamado Karl Schwarzschild (fig. 2), que voluntariamente se había alistado en el ejército alemán al comienzo de la contienda. A pesar de la guerra, de algún modo se las arreglaba para mantenerse al tanto de la actualidad científica, y fue así que el trabajo de Einstein llegó a sus manos casi en el mismo momento de su publicación.

Schwarzschild decidió buscar la solución de las ecuaciones de Einstein, es decir, averiguar cómo la presencia de una masa afecta a la curvatura del espacio-tiempo que la rodea, en un caso especial: el de un objeto esférico masivo. Este problema es muy importante por dos razones. Una, porque todos los astros importantes son aproximadamente esféricos. Dos, porque *cualquier* objeto, no importa la forma que tenga, se comporta como si fuera esférico a distancias suficientemente grandes (basta alejarse lo bastante como para que las irregularidades del objeto dejen de ser relevantes). Schwarzschild tardó muy poco tiempo en resolver el problema, escribió un artículo detallando la resolución y los resultados obtenidos, y desde el frente se lo envió directamente a Einstein con el ruego de que si merecía su visto bueno, recomendara su publicación en alguna revista de Física.

Einstein se quedó muy impresionado. Se ha conservado su carta de respuesta a Schwarzschild, en la que dice: "*yo no creía que pudiera encontrarse una solución exacta ni siquiera en este caso, con mucho gusto recomendaré la publicación de su artículo*". Por desgracia, Schwarzschild no iba a vivir mucho más; por esta misma época, se le declaró una rara enfermedad entonces incurable, el pémfigo, y murió en pocas semanas.

Pero la solución que él encontró a las ecuaciones de Einstein sigue llevando su nombre, y es de lo que vamos a ocuparnos a continuación. Y lo que aquí nos interesa es que por esas casualidades de la vida, y a pesar de partir de supuestos totalmente distintos,

cuando se considera el caso de un objeto ultracomprimido, el cálculo de Schwarzschild llega a las mismas conclusiones a las que había llegado Laplace más de un siglo antes: a partir de cierto grado de compresión, ni siquiera un rayo de luz puede escapar de tal objeto. De hecho, la fórmula que proporciona la compresión necesaria para ello resulta ser *la misma* en ambos planteamientos. Sin embargo, hay que remarcar que la descripción es muy diferente. Laplace suponía una fuerza gravitatoria tan intensa que incluso la luz se veía forzada a caer sobre el objeto, mientras que en Relatividad es la curvatura del espacio-tiempo alrededor y no una fuerza, la que impide escapar al rayo de luz y le lleva de vuelta atrás. La solución de Schwarzschild además, permite hacer muchas predicciones sobre los fenómenos observables en las proximidades de un objeto semejante; más tarde volveremos sobre algunos de ellos.

Sin embargo, la existencia de cuerpos llevados a tal grado de ultracompresión parecía tan absurda en 1915 como en la época de Laplace, y por ello el trabajo de Schwarzschild no despertó un interés más que puramente académico durante varios decenios. No sería hasta la década de 1960, cuando con el desarrollo de la Astrofísica vendría el impulso que conduciría al renacimiento del interés por estas cuestiones. Para entenderlo, vamos a estudiar cómo nace, vive y sobre todo muere, una estrella.

4. NACE UNA ESTRELLA

El lector recordará que el primer elemento de la Tabla Periódica es el hidrógeno. El átomo de hidrógeno es el más simple de todos: un único protón constituye su núcleo, alrededor del cual se encuentra un único electrón. Esta simplicidad explica que el hidrógeno sea con mucho el elemento más abundante en el Universo, hasta el punto de que no perderemos generalidad si en lo que sigue, suponemos que éste consta solamente de hidrógeno. Asimismo, por el momento utilizaremos el viejo esquema de las fuerzas de gravitación de Newton, para no complicarnos la vida sin necesidad.

Imaginemos entonces una nube de hidrógeno gaseoso flotando en el espacio. En principio, los gases tratan siempre de expandirse y ocupar todo el sitio posible (la presión que un gas ejerce intentando dilatarse, no es más que una consecuencia de esa tendencia natural de todos ellos), por lo que esta nube debería poco a poco volverse más tenue a la vez que se dilata. Ahora bien, los átomos gaseosos se atraen entre ellos gravitatoriamente, por lo que hay igualmente cierta tendencia a que la nube se contraiga. Cuál de estos dos factores predomine, depende de la relación entre la masa y el tamaño de la

nube: si su masa es grande en relación con su tamaño, la nube se contrae; en caso contrario, se expande hasta el infinito.

Pongámonos entonces en la situación de una nube que se contrae a causa de la gravitación. Es posible probar que a medida que la contracción progresa, la nube debe calentarse ferozmente hasta alcanzar en su interior temperaturas de 10^6 grados (un millón de grados, nada menos). El tiempo necesario para que se llegue a este estado es relativamente breve: unos diez millones de años para una nube como la que dio origen al Sol. Ahora bien, a estas temperaturas se hacen posibles procesos impensables a temperaturas más bajas, en concreto, **procesos de fusión nuclear**, consistentes en la unión de cuatro de los núcleos del hidrógeno de la nube, para formar un único núcleo de helio, el elemento que en la Tabla Periódica figura a continuación del hidrógeno. En estos procesos se produce una tremenda liberación de energía, por lo que la temperatura dentro de la nube se hace incluso mayor, y eso hace aumentar muchísimo la tendencia del gas del interior a expandirse. Se llega de este modo a una situación de equilibrio: la enorme presión hacia afuera que se produce a esta temperatura en el corazón de la nube, hace que el colapso gravitatorio de la misma se detenga y quede compensado. En dicho corazón el hidrógeno inicial se fusiona paulatinamente en helio, desprendiendo energía que poco a poco atraviesa las capas exteriores de la nube, hasta ser emitida al exterior de la misma en forma de luz. ¡Señoras y señores, ha nacido una estrella!

El Sol y todas las estrellas son inmensos hornos nucleares. En el interior del Sol, la temperatura es de unos diez millones de grados; allí la fusión nuclear convierte poco a poco el hidrógeno inicial en helio, y la energía emitida en esos procesos se radia al exterior. La pequeña fracción de esa energía que llega a la Tierra, es la responsable de que estemos vivos¹. Durante los últimos cuatro mil quinientos millones de años, el Sol ha radiado sin interrupción de esta manera, y por lo menos le quedan otros tantos de seguir haciéndolo, así que por el momento no tenemos que preocuparnos mucho por él.

Ahora bien, ¿qué pasará cuando se haya cumplido ese tiempo? ¿Qué le sucede a una estrella cuando su provisión de hidrógeno para fusionar se agota? La respuesta a esa pregunta y el "cadáver estelar" que vaya a formarse, dependen de la masa de la estrella.

¹ Por eso resulta bastante absurdo que el emblema antinuclear por excelencia sea precisamente un Sol muy sonriente, ¡cuando el Sol es el mayor horno nuclear que tenemos en nuestras proximidades!

5. MUESTRARIO DE CADÁVERES

El agotamiento del hidrógeno y de la fusión nuclear implica que disminuyen la temperatura y la presión hacia fuera en el interior de la estrella (ahora un interior de helio), por lo que ésta de nuevo empezará a contraerse debido a la gravitación. Pero a su vez, la contracción ya sabemos que ocasiona un calentamiento feroz, y llega un momento en que la temperatura en el interior es tan alta que pueden comenzar *otras* reacciones nucleares: ahora son tres núcleos del helio los que se fusionan, formando un núcleo de carbono. La situación vuelve a estabilizarse por un tiempo. Por desgracia, esta estabilización va acompañada de una dilatación desmesurada de la estrella, de más de mil millones de veces su volumen inicial. Como al hacerse tan grande, las capas más exteriores se alejan mucho del corazón caliente, se enfrían comparativamente, y cambian a un color rojizo: la estrella se ha convertido en una **"gigante roja"**.

Esto representará el final de la Tierra y de los planetas interiores; en esta fase de su existencia el Sol se hinchará tanto que los englobará. Puede resultar triste sin duda, pero no cabe esperar que las leyes de la Física respeten las emociones humanas. Al menos es algo que no sucederá hasta dentro de unos cuatro mil quinientos millones de años, lo que da un cierto consuelo.

¿Y cuando se acaba el helio? En principio, vuelta a empezar: la contracción de la estrella se reinicia y su interior (que ahora es de carbono) vuelve a calentarse como consecuencia. Pero ahora es cuando interviene la masa de la estrella.

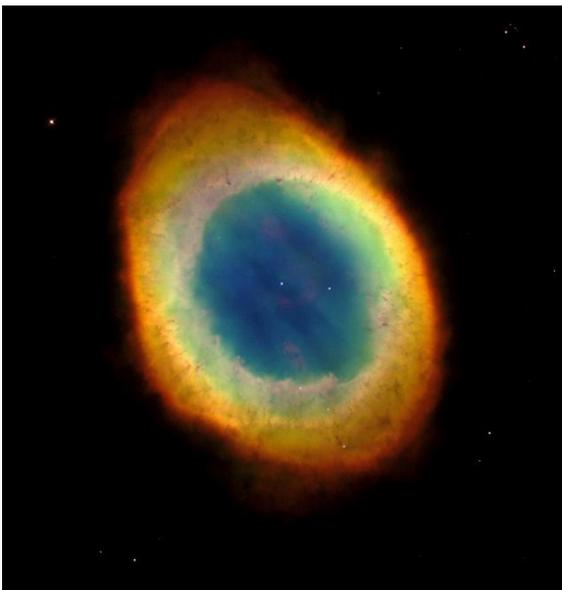


Fig. 3 La nebulosa del Anillo, prototipo de nebulosa planetaria

Para estrellas "pequeñas" (hasta ocho veces la masa del Sol), el calentamiento de su interior nunca alcanza los 600 millones de grados, que es la temperatura a la que podrían empezar reacciones de fusión de los núcleos de carbono en otros núcleos más pesados. La estrella, a la vez que lanza al espacio sus capas exteriores (las cuales al expandirse forman lo que se denomina una "nebulosa planetaria", ver fig. 3), se contrae hasta reducirse a un tamaño similar al de la Tierra, con una

densidad bastante brutal de unos 800 kg/cm^3 . La todavía enorme masa estelar que queda, no admite una mayor compresión, así que llegados a este punto todo lo que hay es un cadáver muy denso y comprimido, y aún muy caliente, una **"enana blanca"**, que poco a poco va enfriándose. Este enfriamiento es lento (de miles de millones de años) y a su término, el cadáver estelar ya no emite luz, y ha pasado del estado gaseoso al estado sólido cristalino: es un gigantesco cristal de carbono, una **"enana negra"**. He aquí el futuro lejano del Sol.

Pero, ¿qué pasa con las estrellas más masivas y qué cadáveres originan?

6. DESDE CHINA CON AMOR

En el año 1054, un nuevo astro apareció de repente en el cielo. Era después del Sol y de la Luna, el objeto más luminoso del firmamento: durante el primer mes incluso brillaba en pleno día. Luego fue atenuándose poco a poco, pero aún duró unos dos años. Finalmente, desapareció. Los europeos de aquella época estaban en plena Edad Media, los años oscuros del conocimiento, quizá demasiado ocupados en luchar todos contra todos, y no registraron la presencia del nuevo astro aunque tuvieron necesariamente que verlo. Tal vez pensaron que era obra del demonio para confundir a las buenas gentes, o un anuncio de la inminencia del fin del mundo. Pero los minuciosos astrónomos chinos de entonces, sí lo registraron, e indicaron la región del cielo en que había aparecido.

El nuevo astro era una **"supernova"**, el destino de toda estrella de masa superior a ocho masas solares. Al contrario que en el caso de las estrellas "pequeñas", el calentamiento en su interior supera los 600 millones de grados necesarios para que los núcleos de carbono se fusionen en otros más pesados, y éstos a su vez en otros, y los resultantes en otros, iniciándose de éste modo una catarata de fusiones nucleares sucesivas.

El resultado final en muy poco tiempo, es la explosión de toda la estrella, una explosión a una escala difícil de concebir por la mente humana. Durante el tiempo que dura, la luminosidad de la estrella se hace miles de millones de veces mayor, en el cataclismo se producen todo tipo de fusiones nucleares imaginables, y como resultado, se forman núcleos de todos los elementos químicos conocidos. Es así como se han formado los elementos que ahora encontramos en la Tierra: salvo el hidrógeno que es primordial como ya hemos dicho, todo lo demás (el carbono que constituye la materia orgánica de la que estamos hechos, el oxígeno que respiramos, el calcio de nuestros

huesos, el hierro, el cobre y los metales que utilizamos, el fósforo, el nitrógeno...), absolutamente todo ha sido sintetizado en explosiones de supernovas que se produjeron mucho antes de que el sistema solar se formara. En la explosión, este material es lanzado al espacio, el cual paulatinamente se va enriqueciendo en estos elementos. Andando el tiempo, algunos de ellos han acabado formando la Tierra y también a nosotros mismos. Somos cenizas de estrellas, de supernovas que estallaron en un pasado muy remoto.

Solo las supernovas que aparezcan en nuestra galaxia o sus proximidades, pueden ser observadas a simple vista. Además de la del año 1054, los astrónomos chinos consignaron otras en los años 185, 396, 827 y 1006; ésta última también fue registrada en algún monasterio europeo y por los árabes. Se vio otra en todo el mundo en 1572, y una más en 1604. Y se acabó la lista hasta 1987, en que apareció una en la Gran Nube de Magallanes, una galaxia muy cercana a la nuestra; fue la primera (y por ahora, única) vez en que se ha podido estudiar una explosión de supernova con detalle.

Cuando los modernos astrónomos enfocaron sus telescopios hacia la región del cielo en que los chinos habían registrado la supernova del año 1054, encontraron allí los restos de la inmensa explosión que tuvo lugar: una gran masa de gases en expansión, que forman la llamada "nebulosa del Cangrejo" (fig. 4). En su centro, se ha detectado el cadáver residual de la estrella que explotó: es un objeto ultracomprimido de solo 15 km de radio, que gira sobre si mismo en menos de un segundo, y cuya densidad es muchísimo mayor que la de una enana blanca, inada menos que cien millones de toneladas por centímetro cúbico! En cierto modo, este cadáver se parece a un núcleo atómico gigante porque al llegar a este grado de compresión, ya no queda sitio para que puedan existir átomos individuales; los electrones de la corteza atómica se unen a los protones de los núcleos para formar neutrones, y el objeto resultante es en realidad, materia de un nuevo tipo, una materia ya no formada por átomos, sino por neutrones fortísimamente empaquetados. Es una **"estrella de neutrones"**.

Las propiedades de la "materia neutrónica" no son bien conocidas, dado que en un laboratorio terrestre es imposible reproducir unas

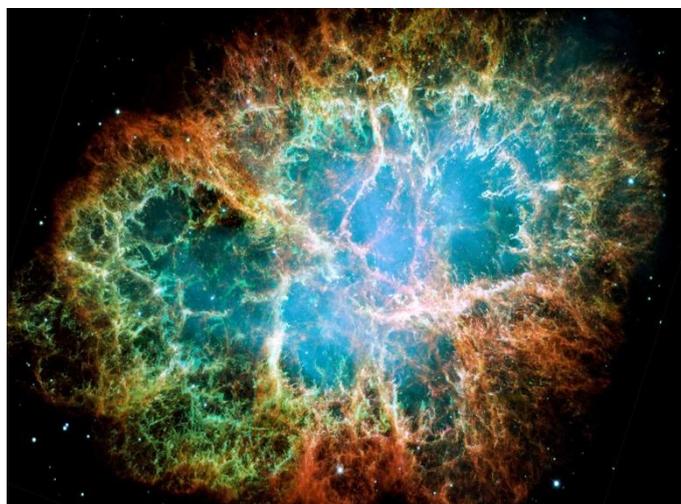


Fig. 4 La nebulosa del Cangrejo

condiciones de compactación semejantes. Puede que usted desee estudiarlas sobre el terreno, pero en ese caso tenga en cuenta que la gravedad de una estrella de neutrones es unas cuarenta mil millones de veces mayor que la terrestre, suficiente para aplastarles como gusanos a usted y a su nave espacial a medida que se acercan a ella.

De hecho, esta gravedad tan inmensa hace desplomarse cualquier irregularidad: las "montañas" de una estrella de neutrones no pueden tener más que unos pocos centímetros de altura.

En una explosión de supernova, la mayor parte de la estrella que explota es lanzada al espacio, y solo una parte relativamente pequeña queda formando la estrella de neutrones residual. Ahora bien, a pesar de su casi increíble grado de compresión, una estrella de neutrones está aún lejos de poder impedir que la luz escape de ella. Pero puede demostrarse que no pueden existir estrellas de neutrones de masa superior a unas tres masas solares. Si la masa del residuo que queda tras la explosión supera este valor, entonces ni siquiera los neutrones son capaces de impedir que continúe la compresión gravitatoria. La gravitación se erige ahora en triunfadora por encima de todas las demás fuerzas de la Naturaleza. El cadáver estelar que ha quedado, sigue comprimiéndose más, y más, y más...

7. SCHWARZCHILD CABALGA DE NUEVO

... y ya nada puede impedir su total compresión sin límite. Éste parece el destino final de las estrellas más masivas (de cientos de veces la masa del Sol), que aunque durante su explosión como supernovas puedan eyectar la mayor parte de su materia, aún así, nada impide que el cadáver remanente todavía supere el máximo de masa admisible para estabilizarse como estrella de neutrones. En ese caso, la compresión prosigue hasta el final; en algún momento se hace tan brutal que incluso la luz queda atrapada por la tremenda gravitación del cadáver en contracción, y queda formado un agujero negro.

El colapso gravitatorio de las estrellas supermasivas es el mecanismo básico que puede dar lugar a la formación de agujeros negros. De un modo general, cualquier astro compacto e invisible, de masa superior a tres o cuatro veces la del Sol, es un buen candidato a agujero negro (su presencia y sus características se deducen de manera indirecta por la forma en que afecta a las estrellas visibles de su entorno). El primer objeto de este tipo se observó en la

constelación del Cisne en 1964, y desde entonces han aparecido otros; el más próximo parece estar a unos 3.000 años-luz.

En definitiva, como consecuencia del avance de los conocimientos sobre la evolución estelar, la existencia de una ultracompresión de la materia tan grande que diera lugar a la formación de agujeros negros, ya no era un absurdo en 1960-70, sino una posibilidad muy real. Ello iba a conducir a un renacimiento del interés por estos objetos, y al descubrimiento de una serie de resultados inesperados, sobre todo por parte de los británicos Stephen Hawking y Roger Penrose, el neozelandés Roy Kerr, y el israelí Jacob Beckenstein. En estas condiciones tan drásticas de gravitación, los esquemas newtonianos se vuelven inaplicables; fue imprescindible volver a la Teoría General de la Relatividad, y utilizar la solución que Schwarzschild encontró para las ecuaciones de Einstein medio siglo antes, y que había permanecido poco menos que en hibernación hasta entonces. Vamos a ello.

8. LA HORRIBLE SINGULARIDAD

Imaginemos un agujero negro formado por el colapso de un resto de supernova de masa demasiado grande como para formar una estrella de neutrones. Para empezar, es lógico preguntarse ¿qué va a pasarle a este cadáver estelar? ¿Seguirá contrayéndose indefinidamente, o su colapso cesa en algún momento? A fin de cuentas, es difícil imaginar la materia como algo infinitamente comprimible, y menos todavía un objeto tan masivo. Parece que algún espacio mínimo tendrá que acabar ocupando, a pesar de todo. La respuesta sin embargo, es que en unos cuantos minutos **el cadáver estelar debe contraerse hasta un punto matemático, el cual aglutinará toda su masa con una densidad infinita**. Ese punto tan especial se halla en el centro del agujero, y se denomina una "**singularidad**".

Por imposible que parezca, la reducción de toda una masa estelar a un punto matemático es una predicción inescapable de la solución de Schwarzschild: el destino que le espera a todo resto de supernova excesivamente masivo es precipitarse sobre si mismo hasta formar una singularidad. Esto se debe a que el cadáver estelar no se ha contraído en un espacio-tiempo estático; es todo el espacio-tiempo de su entorno el que es arrastrado y se contrae con ella, como un globo que de repente implosionara. A su alrededor, la gravedad es tan intensa que ni siquiera la luz puede escapar: se ha formado un agujero negro completamente vacío, salvo por la singularidad en su centro. Sigamos.

9. EL HORIZONTE DE SUCESOS

"Los que entréis aquí, abandonad toda esperanza" (Dante, La Divina Comedia)

Continuemos con nuestro desgraciado cadáver estelar, que arrastrado por su excesiva masa, ha colapsado hasta formar un agujero negro con una singularidad en el centro. ¿Pero hasta dónde se extiende el agujero negro? En otras palabras, ¿a partir de qué distancia ya no hay peligro de caer en su interior? Para fijar ideas, pongamos que el cadáver que formó el agujero tiene una masa de 5 masas solares (unos 10^{31} kg). Pues bien, puede demostrarse que a partir de una cierta cercanía a la singularidad central, (que en nuestro ejemplo sería de unos 15 km), ya nada escapa, ni siquiera un rayo de luz. Esta distancia se denomina "**radio de Schwarzschild**" del agujero, y la superficie esférica imaginaria que delimita en torno de su centro, "**horizonte de sucesos**". Un objeto que se encuentre fuera del horizonte de sucesos, puede escapar a la atracción gravitatoria del agujero si se le da velocidad suficiente; un objeto situado dentro del horizonte de sucesos no puede escapar, y está condenado a caer indefectiblemente en la singularidad central, incluso aunque se trate de un rayo de luz. La singularidad lo engulle todo, pero nada sale de ella; es un sumidero, no una fuente.

Lo anterior significa que todo lo que ocurra dentro del horizonte de sucesos, está vedado. Ningún objeto, ninguna luz, ninguna información, nada en absoluto puede escapar de allí, así que no hay forma de saber lo que está sucediendo en su interior. Es una región en la que la entrada está abierta para todos, basta dejarse caer, pero una vez dentro no hay salida, solo un horrible precipitarse en la singularidad central.

10. EL ASTRONAUTA LOCO

Ahora supongamos que un astronauta amigo nuestro ha enloquecido, y está dispuesto a arrojarse de cabeza al agujero negro anterior, contándonos además por radio todas sus experiencias en directo. Como estamos ansiosos por presenciar su viaje, le dejamos partir (aunque nos despedimos de él con lágrimas en los ojos, claro está). Mientras se mantiene lejos del horizonte de sucesos no pasa nada especial, pero a medida que se aproxima al mismo, empieza a suceder algo extraño. Es posible probar que nuestro amigo cruzará a través del horizonte de sucesos (no lo notará por nada especial), y que a partir de ahí, en un tiempo de apenas 8 cienmilésimas de segundo, será devorado por la singularidad. No podrá verla ni

describirla mientras se acerca ya que según hemos dicho, ni la luz ni nada puede salir de ella para llegar hasta él, así que la singularidad está en todo momento en su futuro. Tampoco estará vivo para entonces, porque la terrible gravedad en el agujero lo aplastará hasta reducirlo a un punto matemático a él también. La masa aglutinada en la singularidad se incrementará levemente al recibirlo, y eso será todo.

Pero lo que nosotros veremos desde el exterior (a una distancia segura), va a ser algo muy distinto. Para empezar, nada de lo que pase dentro del horizonte de sucesos puede ser visto ni radiado afuera. ¿Veremos entonces que nuestro amigo simplemente desaparece, y que su transmisión de radio se interrumpe al cruzar el horizonte de sucesos? Tampoco. De hecho, inunca le veremos llegar a cruzarlo! Aunque el tiempo que él nota que ha tardado en llegar al horizonte es un tiempo finito, para nosotros, tarda un tiempo infinito. Es decir, que le veremos acercarse poco a poco al horizonte, pero sin que la distancia que le separa de él llegue jamás a anularse (empleando la jerga matemática, para nosotros esa distancia va a tender asintóticamente a cero). ¿Y su transmisión de radio? Pues sucede que sus mensajes también tardan cada vez más tiempo en reproducirse: una palabra que él haya pronunciado en dos segundos, en nuestros receptores puede tardar años en escucharse de principio a fin, y así hasta una duración infinita al llegar al horizonte de sucesos. El tiempo ha transcurrido de manera completamente diferente para él y para nosotros.

Estas distorsiones del tiempo para los diferentes observadores, se deben a la contracción que el propio espacio-tiempo ha experimentado al formarse la singularidad. En realidad, dentro del horizonte de sucesos se produce una especie de inversión: las tres dimensiones espaciales se convierten en temporales, mientras que el tiempo adquiere propiedades de dimensión espacial.

A veces se dice que a través de un agujero negro, podrían ponerse dos universos diferentes en comunicación; el agujero sería una especie de puente entre ellos. En la ciencia-ficción todo es posible, pero en la realidad, la singularidad bloquea el camino: todo lo que rebasa el horizonte de sucesos, está condenado a caer en ella y quedarse allí para siempre, reducido a un punto matemático. Y no hay nada más.

Hay que recordar por último, que prácticamente todos los astros giran sobre si mismos, de manera que el cadáver estelar que originó nuestro agujero negro, con toda probabilidad era un cadáver en rotación, y este movimiento de rotación debe continuar en el

agujero. Esto es algo que hasta ahora no hemos tenido en cuenta. Fue Kerr quien en 1962 añadió este efecto a la solución de Schwarzschild original; ello da lugar a toda una serie de consecuencias nuevas en las que sin embargo, no vamos a entrar aquí.

11. MONSTRUOS ESCONDIDOS

Además de los debidos al colapso de las estrellas supermasivas, ¿existen otros agujeros negros en el Universo, y dónde?

Sabemos que el Universo contiene un número inmenso de galaxias, cada una de las cuales se compone a su vez de un increíble número de estrellas. Y desde hace mucho tiempo se sabe que el núcleo central de la Vía Láctea, nuestra propia galaxia, es una zona activa en la que se produce radiación de energía a una gran potencia. Las nubes de gas que existen en su dirección nos impiden una observación visual detallada de esa región, pero existen métodos para explorarla sin emplear la luz visible. Lo más importante es que toda esa energía proviene de una zona central muy pequeña a escala galáctica (del tamaño de la órbita de Saturno) pero extraordinariamente masiva: ¡contiene más de 4 millones de veces la masa del Sol!



Fig.5 La región denominada Sagitario A en el centro de la Vía Láctea, que contiene un agujero negro supermasivo

¿Qué se oculta allí dentro? Tras haber ensayado y descartado muchas otras ideas, hoy todos los astrónomos están de acuerdo en atribuir el origen de esta actividad inusual a un agujero negro supermasivo situado en el centro de nuestra galaxia. Este agujero traga lentamente el gas y el polvo que le rodea, los cuales, al ser acelerados para caer en su interior, emiten la potente radiación que observamos provenir de allí (fig. 5).



Fig. 6 La galaxia activa

En la actualidad, parece seguro que todas las galaxias contienen en su centro un agujero negro supermasivo, aunque los detalles de su formación no están todavía bien entendidos.

En comparación con otros, el de la Vía Láctea es pequeño y pacífico.

El de la galaxia M87 por ejemplo (fig. 6), tiene una masa de seis mil quinientos millones de veces la del Sol! Algunos de estos monstruos hipermasivos desarrollan una actividad increíble, auténtico canibalismo estelar, porque no solo engullen el gas y el polvo que les rodea, sino que su tremenda gravedad aplasta y desgarran las estrellas de su alrededor, disgregándolas en pedazos antes de devorarlas. Y los fragmentos estelares y las masas de gas y polvo engullidas, a su vez liberan ingentes cantidades de energía al ser arrastrados hacia el agujero, energía que es emitida al exterior.

Los objetos denominados "**cuásares**" son las galaxias más activas en este sentido (fig. 7): los super-agujeros de sus centros devoran estrellas a un ritmo de mil masas solares al año; la radiación emitida por la comida al disgregarse y caer es tal, que un solo cuásar emite por sí solo tanta energía como varios cientos de galaxias normales juntas. Cuando ya no le quedan más estrellas cerca por devorar, la actividad del superagujero disminuye, y pasa a alimentarse a un ritmo similar a los de las galaxias más tranquilas.

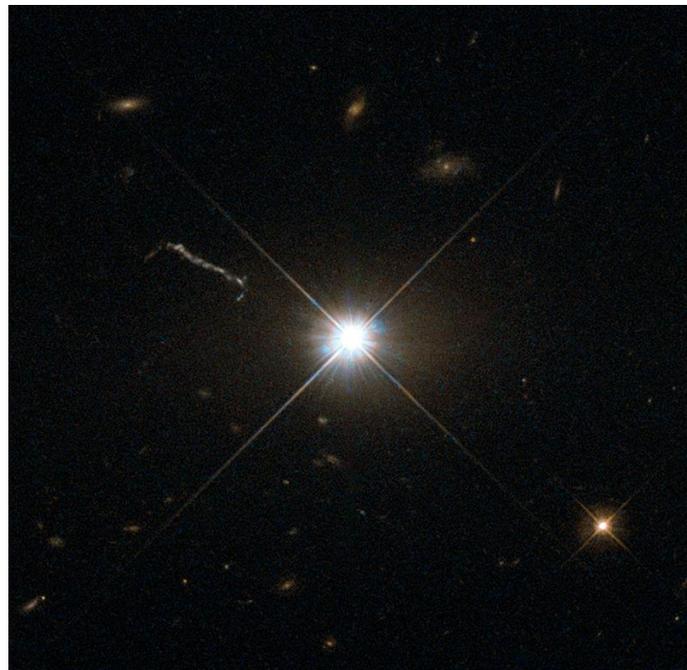


Fig. 7 El cuásar 3C273 fotografiado con el telescopio espacial Hubble. Es de los más cercanos, solo está a unos 2.200 millones de años-luz!

Puesto que todos los cuásares se encuentran muy lejos de nosotros (10.000 millones de años-luz, y aún más), teniendo en cuenta todo el tiempo que su luz ha tardado en llegarnos, se deduce que esta hiperactividad se produce solo en galaxias que se hallan en una etapa temprana de su evolución. Quizá nuestra actualmente tranquila Vía Láctea fue también así en sus primeros tiempos.

12. BLACK NO ES TAN BLACK: LA RADIACIÓN DE HAWKING

Bien conocido por el gran público a causa de la enfermedad del sistema nervioso que poco a poco le paralizó hasta impedirle incluso hablar (se comunicaba por medio de un aparato generador de voz), sin duda ha sido el recientemente fallecido Stephen Hawking (fig. 8) el físico que más resultados ha deducido acerca de los agujeros negros, hasta el punto de que su nombre ha quedado indefectiblemente unido a estos objetos. Y probablemente de todos estos resultados, el principal sea el que sigue:



Fig. 8 Stephen Hawking
en 2006

TEOREMA DEL ÁREA

(Hawking, 1972): **en cualquier proceso que afecte a un agujero negro, el área de su horizonte de sucesos no puede disminuir.**

Los lectores deberán recordar ahora que para todo sistema existe una magnitud denominada "**entropía**" que mide el grado de su desorden interno, y que si el sistema está aislado (si no intercambia calor con el exterior), no puede disminuir, suceda lo que suceda. ¿Se deduce de lo anterior que un agujero negro también posee entropía, y que ésta se halla relacionada con el área del horizonte de sucesos? Beckenstein demostró en seguida que así es: la entropía de un agujero negro es proporcional al área de su horizonte de sucesos.

Para poder estudiar un agujero negro como un sistema sujeto a los principios de la Termodinámica, necesitamos además poder asignarle una temperatura, y ello es posible gracias a otro resultado que Hawking obtuvo en 1974: **"a todo agujero negro se le puede**

asociar una temperatura inversamente proporcional a su masa". Las temperaturas que resultan son increíblemente bajas: la temperatura de nuestro agujero estelar de 5 masas solares por ejemplo, es de 10^{-8} K, tan solo una cienmillonésima por encima del cero absoluto Y los agujeros supermasivos de los centros de las galaxias, poseen temperaturas aún mucho menores.

Junto con el anterior, Hawking todavía dedujo otro resultado muy sorprendente. Combinando por primera vez los resultados de la Relatividad General con algunas ideas de la Mecánica Cuántica, obtuvo que **todos los agujeros negros deben radiar un flujo continuo de energía al exterior.** Esta emisión de energía se denomina "**radiación de Hawking**", y dado que energía y masa son equivalentes a través de la célebre ecuación de Einstein $E=mc^2$, ello debe conducir inevitablemente a la progresiva pérdida de masa del agujero hasta su total "evaporación" (salvo que reponga masa engullendo objetos de sus alrededores). El área del horizonte de sucesos va disminuyendo a medida que la evaporación progresa, pero eso no contradice el teorema anterior, el cual no tenía en cuenta los requisitos cuánticos; la disminución de entropía del agujero se compensa con un aumento de la de su entorno al recibir la radiación emitida.

En consecuencia, un agujero negro no es algo inerte que solo puede crecer a base de devorar los objetos que le rodean; la inevitable emisión de radiación de Hawking le condena irremisiblemente a una lenta autodestrucción. El tiempo de vida del agujero puede calcularse, y resulta ser proporcional al cubo de su masa. El ritmo de emisión sin embargo, es tan lento que puede obviarse a todos los efectos: nuestro agujero estelar de 5 masas solares necesitará 10^{67} años para evaporarse del todo (un tiempo casi 10^{57} veces mayor que la edad del Universo), y los superagujeros de los centros galácticos aún tardarán muchísimo más. ¿Y qué es lo que queda (si queda algo) tras la "evaporación" de un agujero negro? Misterio.

13. MINIAGUJEROS

En el año 2008 se puso en marcha en Ginebra (Suiza) el LHC, siglas del Gran Colisionador de Hadrones (fig. 9), un túnel circular subterráneo (en parte bajo Francia) de 4'3 km de radio, en el que dos haces de protones son acelerados en sentidos opuestos hasta el 99'99 % de la velocidad de la luz. En ese momento, ambos haces son obligados a chocar frontalmente, concentrándose de este modo una enorme cantidad de energía (es decir, de masa) en la pequeñísima zona de choque; de este modo, se obtienen aunque a nivel local y

solo durante un breve tiempo, unas condiciones similares a las que reinaron en el Universo en los primeros momentos de su existencia. Y en la prensa mundial se generaron ríos de tinta ante el temor de que esta hiperconcentración de energía en un espacio tan reducido fuera suficiente para crear un pequeño agujero negro que acto seguido empezaría naturalmente a devorarlo todo a su alrededor, creciendo y creciendo sin límite hasta aniquilarnos a todos.

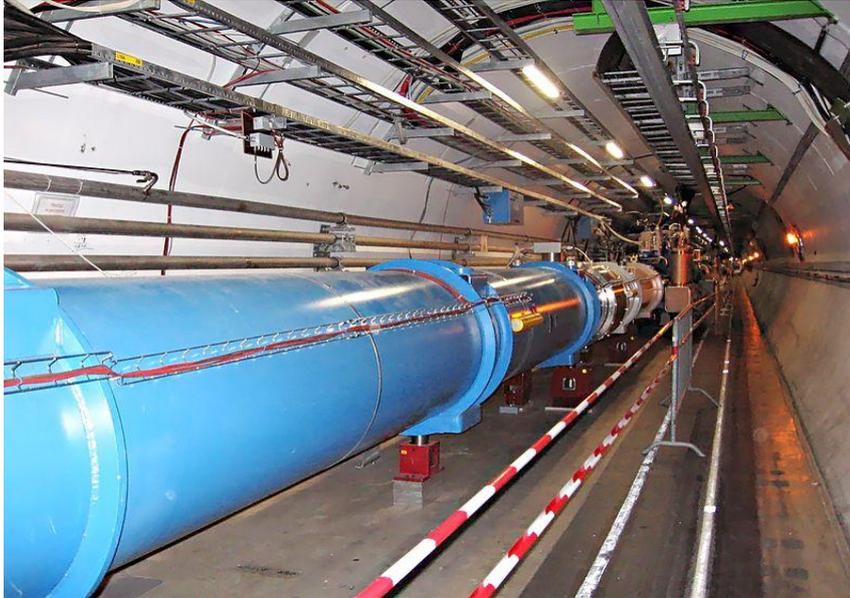


Fig. 9 Interior del LHC

Sensacionalismo barato en estado puro, porque aun suponiendo que el agujero se formara (cosa que muchos dudan), su masa inmensa a escala de un protón pero minúscula en realidad, lo haría evaporarse "a la Hawking" en un visto y no visto, sin ejercer ningún efecto gravitatorio significativo en su entorno. Se especula sin embargo, con que la posibilidad de que tales "miniagujeros" puedan haberse formado en gran número en las enormes concentraciones de energía del Universo primitivo; en ese caso, los de mayor masa podrían haber sobrevivido y quizá estar evaporándose en estos mismos momentos.

14. ¿MÁS ALLÁ?

"Un físico es un curioso personaje que los lunes, miércoles y viernes estudia Mecánica Cuántica, los martes, jueves y sábados estudia la Teoría General de la Relatividad, y los domingos acude desesperado a la iglesia para rogar a Dios que alguien (de preferencia, él) encuentre la manera de casar estas dos teorías" (viejo chascarrillo entre físicos).

"Lo que Dios ha separado, no lo unirán los hombres" (W. Pauli)

"Necesitamos imaginación, pero una imaginación encorsetada dentro de una terrible camisa de fuerza. Y eso es lo difícil" (R. Feynman)

Todas las conclusiones a las que hemos llegado son consecuencias inevitables de la Relatividad General, sazonada en algún caso con una pizca de Mecánica Cuántica. Pero cuando un cadáver estelar se contrae sin límite para formar un agujero negro, en algún momento debe llegar a ser tan minúsculo que su estado tendrá que ser descrito inevitablemente por aquella rama de la Física que se ocupa del reino de lo muy pequeño, la Mecánica Cuántica. Y no considerada como un mero complemento de la Relatividad General, sino en pie de igualdad con ella desde el principio. Así que necesitamos una teoría de la "gravedad cuántica", por llamarla de algún modo.

Por desgracia, esa teoría hoy no existe. Después de casi ochenta años de intentos infructuosos (comenzados por el propio Einstein al final de su vida), seguimos sin saber por dónde tirar. La humorística cita de Pauli acerca de la imposibilidad de casar la Relatividad General y la Mecánica Cuántica, sigue en vigor. Son como el agua y el aceite: la Mecánica Cuántica lineal pero no local, la Relatividad General no lineal pero local, dos teorías de plena validez en sus respectivos dominios, pero a las que es imposible hacer encajar en una única teoría común que las englobe. Semejante teoría debería decirnos cuál es el destino último del cadáver en contracción, evitando quizá verse reducido a una singularidad concentrada en un único punto. Pero nadie sabe muy bien a qué atenerse a pesar de tener trabajando en ello a algunas de las mentes más inmensas del momento, y aunque no han faltado los intentos (el más famoso sin duda es el de las célebres "supercuerdas"). Probablemente necesitamos un nuevo Einstein, pero el problema es que los genios así son muy raros. Aunque quizá haya nacido ya, y no esté lejano el día en que su inteligencia empiece a funcionar a pleno rendimiento (incluso a pesar de nuestros planes de estudios).

Hasta entonces, solo queda tener paciencia y seguir intentándolo.



15. BIBLIOGRAFIA SELECCIONADA

Como uno ya tiene sus añitos, los libros que puedo recomendar son los que yo mismo tiempo atrás utilicé como estudiante o para estar al día (seguro que aún pueden conseguirse por Internet), sin que ello presuponga que no existan desde entonces otros incluso mejores que sin embargo, me son desconocidos.

A) LIBROS DIVULGATIVOS (sin matemáticas)

LUMINET, J.-P.-*Los agujeros negros*. Alianza Universidad, 1991. Un libro de lo más recomendable, muy ameno y completo, de deliciosa lectura y sobre el que se ha basado este artículo.

Durante la década de 1980, la Editorial Salvat publicó una excelente colección divulgativa con el nombre de Biblioteca Científica Salvat, en la que de cara al tema que nos ocupa pueden citarse:

- **DAVIES, PAUL**-*El Universo desbocado*
- **DAVIES, PAUL**-*La frontera del infinito*
- **BOSLOUGH, JOHN**-*El Universo de Stephen Hawking*

B) LIBROS NO DIVULGATIVOS (con matemáticas)

B1) *Sobre Cálculo Tensorial*

Aunque casi todos los textos sobre Relatividad incluyen uno o dos capítulos introductorios exponiendo las bases del Cálculo Tensorial, he aquí algunos libros específicos sobre esta rama de las Matemáticas:

LICHNEROWICZ, A.-*Elementos de Cálculo Tensorial*. Ed. Aguilar, 3ª ed. 1972. Un librito muy clásico y en el que nos hemos curtido varias generaciones.

SOKOLNIKOFF, I. S.-*Análisis Tensorial*. Editorial Index. 2ª ed. 1979. Junto con el anterior, el otro texto clásico sobre la materia. Al igual que éste, contiene muchas aplicaciones físicas y no solo de Relatividad.

SANTALÓ, L. A.-*Vectores y Tensores con sus aplicaciones*. Ed. Universitaria de Buenos Aires. 10ª ed. 1976. Escrito por un profesor español exiliado al término de la Guerra Civil, se trata de un libro muy claro y que parte de un nivel más asequible que los dos anteriores, lo que en absoluto le resta altura.

B2) Sobre Astrofísica y Relatividad General

BATTANER, E.-*Fluidos cósmicos*. Ed. Labor, 1986. Un texto de introducción general a la Astrofísica sin usar Relatividad General.

MISNER, C., THORNE, K. & WHEELER, J.-*Gravitation*. Freeman and Co. 1973. Considerado durante mucho tiempo con justicia como la Biblia de la Relatividad. Eso sí, en general el nivel es alto.

SCHUTZ, B.-*A firstcourse in General Relativity*. Cambridge University Press, 1985. Nivel más asequible que el anterior (dentro de lo que cabe) y bastante completo, aunque no tan exhaustivo.

WALD, R.-*Espacio, Tiempo y Gravitación*. Fondo de Cultura Económica, México 1982. Escrito en tono muy divulgativo, aunque con unas cuantas fórmulas.



Observatorio del Teide, isla de Tenerife, Canarias, España
Altitud 2390 metros.

La Astrofísica en Canarias dio sus primeros pasos en este observatorio con la instalación del primer telescopio en los años sesenta del pasado siglo.

Ligado inicialmente a la Universidad de La Laguna, pasó a formar parte de Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) al crearse este en 1975. La inauguración oficial del Observatorio del Teide tuvo lugar en 1985.

El lugar donde está situado el Observatorio, por encima de la altura de formación de nubes, ofrece un cielo transparente y con unas condiciones climatológicas idóneas para la observación astronómica.

Dedicado principalmente a la física solar, los mejores telescopios solares europeos se encuentran instalados en Observatorio del Teide.