

La energía fantasma y el futuro del universo

La energía oscura, a la que se debe la actual expansión acelerada del universo, podría hacer que los agujeros de gusano, conexiones entre partes separadas del espaciotiempo, creciesen hasta abarcar el universo entero

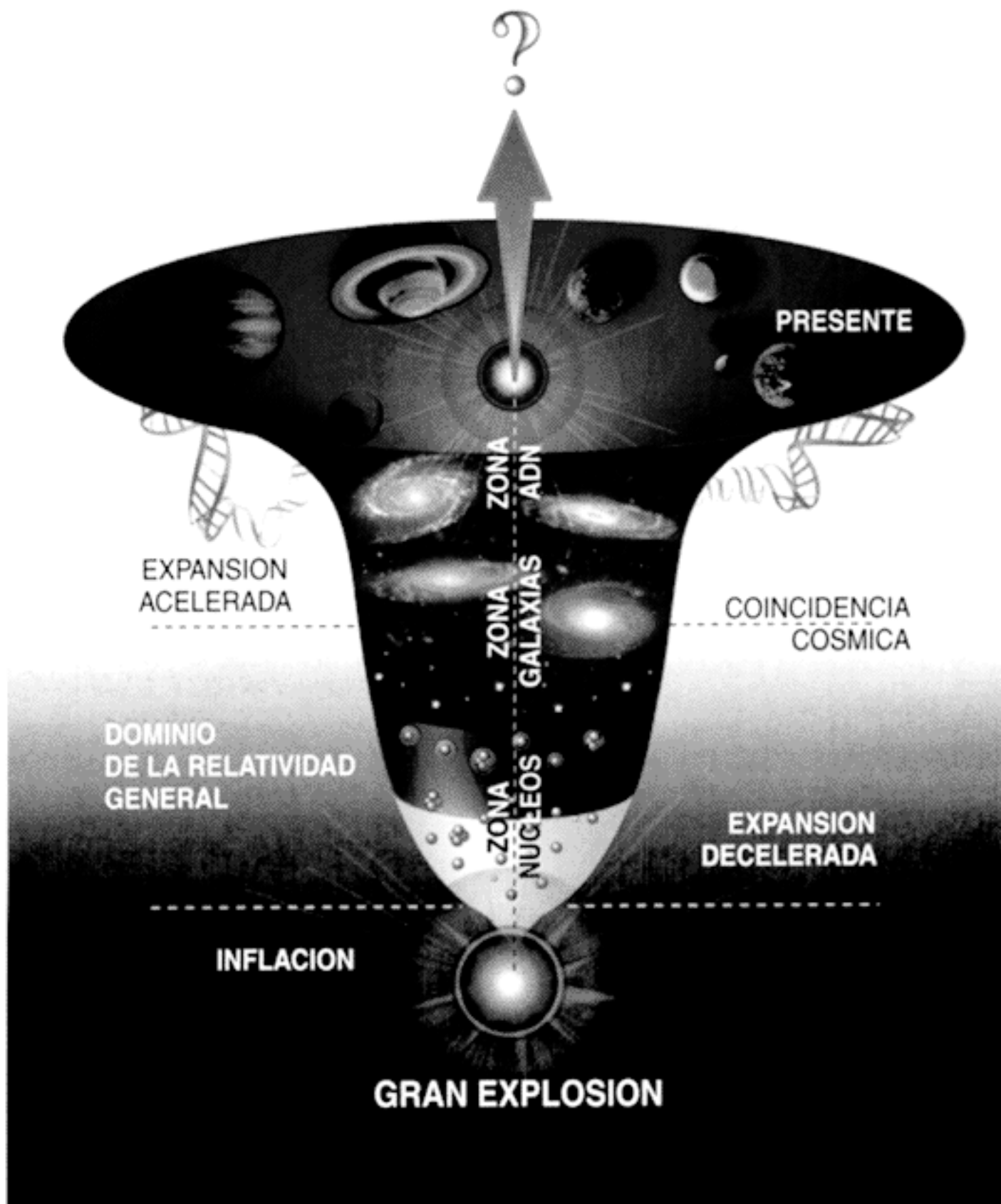
Pedro F. González Díaz

Quizás haya sido la cosmología la disciplina que nos ha ofrecido las sorpresas más llamativas en los últimos años. Y la mayor ha sido, sin duda, el descubrimiento realizado en 1998 de que, en estos momentos, el universo se está expandiendo de forma acelerada; un descubrimiento que se ha ido confirmando desde entonces cada vez con más convicción y argumentos más sólidos. Este hallazgo ha abierto a su vez una verdadera caja de Pandora, de la que están saliendo mundos posibles de características exóticas. Este artículo trata precisamente de uno de esos cuadros cósmicos.

Estudiando las características de supernovas de tipo Ia muy lejanas, dos grupos de investigación internacionales, dirigidos respectivamente por Saul Perlmutter y Adam Riess, descubrieron en los últimos años del pasado siglo que desde hace poco tiempo (en términos cósmicos, a partir de un desplazamiento hacia el rojo de la luz algo menor que 1) el universo viene sufriendo un proceso de expansión acelerada, por el cual las distancias relativas entre los objetos de comportamiento cosmológico aumentan cada vez con mayor velocidad. (Llámanse objetos con comportamiento cosmológico aquellos cuyos movimientos son pequeños con respecto al de expansión global del universo.) Las supernovas son magnas explosiones que tienen lugar durante el período final de la muerte de las estrellas. Las supernovas de tipo Ia poseen además la sorprendente propiedad de brillar con una luminosidad intrínseca que, en un alto grado de aproximación, es igual para todas. Fue esta propiedad la que aprovecharon los dos grupos mencionados para llevar a cabo la investigación —el estudio comparado y sistemático de la relación entre la distancia y el desplazamiento hacia el rojo— que les condujo a su gran descubrimiento. Desde entonces, todas las dudas que las primeras observaciones pudieron suscitar se han ido desvaneciendo, siempre en favor de la expansión acelerada, y nuevas observaciones basadas en diferentes supuestos han venido también después a corroborarla. Muy pocos cosmólogos ponen ahora en duda la validez, significado e implicaciones de este descubrimiento.

La energía oscura

Sin embargo, si bien existe ya un consenso razonable en lo que se refiere a la fiabilidad e interpretación de los resultados y de sus conclusiones, no ocurre lo mismo en lo que atañe a las causas aducidas para justificar la presente aceleración del universo. En lo que sí están todos los científicos de acuerdo es en algo ya de por sí muy sorprendente: no parece que baste la teoría general de la relatividad para describir con perfecta coherencia este tipo



1. LA EVOLUCION DEL UNIVERSO a partir de la gran explosión pasa por distintas etapas. Inicialmente, el universo sufre un proceso de expansión superacelerada, o inflación, que le dota de la uniformidad que es posible observar ahora. La fase inflacionaria, muy corta, se conecta suavemente con un largo período de expansión decelerada, gobernado por la relatividad general, que se extiende hasta que la energía oscura empieza a dominar, en un momento (el "tiempo de coincidencia cósmica") bastante próximo ya a nuestro presente. A partir de ese momento, el universo vuelve a expandirse de forma acelerada; esta situación se mantiene en la actualidad y, previsiblemente, en el futuro, aunque no se sabe por cuánto tiempo. A lo largo de estos períodos, se van generando sucesivamente todos los elementos, compuestos y estructuras observables. En primer lugar, los núcleos de los elementos más ligeros, luego los átomos, después se encienden las galaxias (cuyos gérmenes provienen del período inicial inflacionario), y, por último, se producen las condiciones necesarias para que aparezca la vida.

de comportamiento. En efecto, tal como descubrió el matemático ruso Aleksandr Friedmann en 1922, para una distribución de materia isótropa y homogénea, que es la distribución que caracteriza al universo como un todo, las ecuaciones de Einstein predicen un universo en expansión decelerada; es decir, un universo que no deja de expandirse, aunque cada vez a menor velocidad. Ante esta situación, se han adoptado dos posturas esencialmente diferentes. Por un lado, existe un grupo minoritario

de cosmólogos que considera que la teoría general de la relatividad debe modificarse de forma que prediga lo observado sin necesidad de incluir ningún tipo de fluido o campo de fuerzas extra. Pero, por otro lado, la mayoría considera más razonable el punto de vista contrario; es decir, se adhieren a la idea de que, para explicar los resultados de las observaciones de las supernovas de tipo Ia distantes, es preciso introducir un fluido cósmico repulsivo que se contraponga a la acción atractiva de la

gravedad de Einstein, aportando una energía del vacío de origen misterioso que ha venido a conocerse como energía oscura.

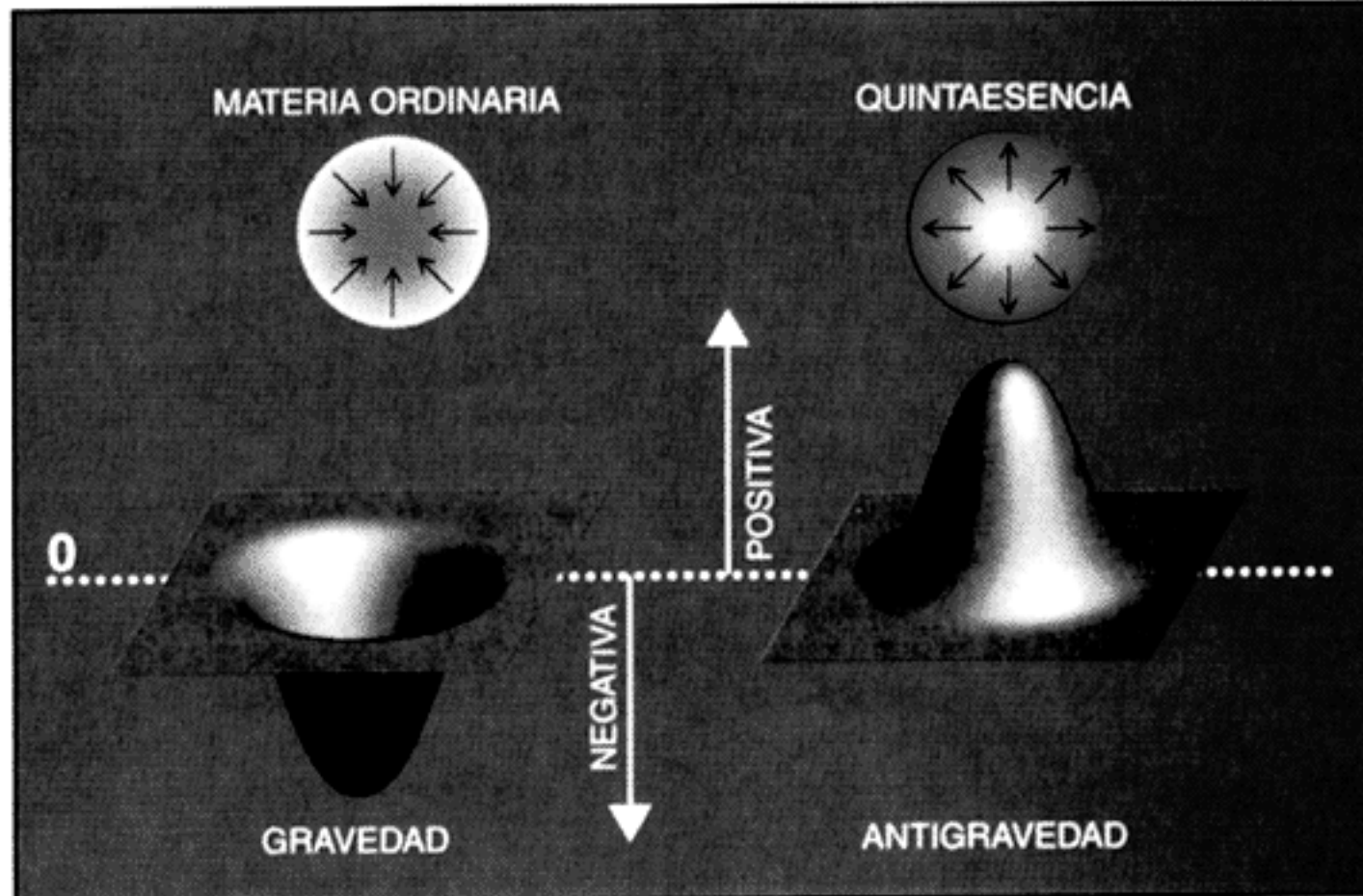
Existen en realidad muchos tipos posibles de energía oscura. El primero que se consideró fue el ligado a la constante cosmológica. La historia de esta constante es bien conocida. La introdujo el mismo Einstein en 1917, poco después de terminar la elaboración del magnífico edificio lógico-matemático de la relatividad general. Albert Einstein consideró que esta teoría adquiría una estructura más general si se añadía un término constante a sus célebres ecuaciones de campo gravitatorio. Lo hizo con un objetivo concreto: permitir que las soluciones cosmológicas de su ecuación fueran estáticas, de modo que describiesen un universo eterno y siempre igual; no obstante, como demostró Georges Lemaître años más tarde, dicho tipo de universo es inestable. El empeño de Einstein respondía en realidad a la creencia, ampliamente compartida por los científicos y filósofos de aquellos años, en la perfección del universo en el que vivían. Sin embargo, el posterior descubrimiento de Hubble —en 1929— de que el universo sigue un proceso continuo de expansión hizo que Einstein retirara la constante cosmológica; lamentó su inclusión como el mayor error de su vida. A pesar de ello, la constante cosmológica ha resucitado después en diversas ocasiones. Unas veces, para colaborar con la atracción gravitatoria; otras, cuando su valor es positivo, para oponerse a la misma. Este último es el caso aducido para justificar la expansión acelerada actual, y también la que se supone tuvo lugar en los primeros instantes del universo y que, bajo el apelativo de "inflación primordial", permitió que el universo adquiriera la uniformidad que observamos ahora.

Existe una solución famosa de las ecuaciones de Einstein para un universo con constante cosmológica y que no contenga materia. Fue descubierta por Willem de Sitter en el mismo año de 1917. La constante cosmológica desempeña en ella el papel de agente antigravitatorio (repulsivo); el correspondiente universo se expandiría de forma acelerada. Esta solución se ha utilizado muchas

veces en cosmología; incluye entre sus utilidades la que aún presta a la descripción del proceso de inflación primordial.

Sin embargo, el uso de esta constante plantea un grave problema a los teóricos. Puesto que debe interpretarse como una medida de la energía del vacío cuántico, sería de esperar un valor muy grande para la misma, un valor que, en cualquier caso, resultaría mucho mayor que el que se le exigiría, por ejemplo, para justificar la expansión acelerada del universo actual. A esta grave dificultad, o "problema de la constante cosmológica", se debe principalmente que los físicos continúen explorando muy activamente las otras posibilidades que se han ofrecido para la descripción de la energía oscura. Y entre éstas, la más popular es la ofrecida por la llamada "quintaesencia". A semejanza del quinto elemento añadido por los filósofos griegos de la Antigüedad para establecer el constituyente del mundo supralunar, la quintaesencia permitiría, junto con la materia visible y la materia oscura, una descripción completa del contenido energético del universo. Por lo normal, la quintaesencia se representa como un campo sencillo, que en términos técnicos se denomina campo escalar, ϕ , o como un fluido perfecto caracterizado por una presión negativa, P , y una densidad de energía positiva, ρ . [Para entender qué es una presión negativa, imagínese un globo en expansión que, en vez de contener moléculas que, con sus golpes sobre la membrana, lo hinchasen, estuviera conectado a unos muelles estirados que tirasen de él hacia el centro.] P y ρ pueden, a su vez, definirse en función del campo ϕ y se relacionan entre sí por medio de un parámetro constante, ω , según dicta la ecuación de estado para la energía oscura del universo, $P = \omega \times \rho$. Si, como se cree, la energía oscura domina sobre todas las demás formas de energía en el universo presente, esta fórmula tan sencilla, junto con las ecuaciones de Einstein (no tan sencillas), constituye toda la información que necesitamos para deducir de manera razonablemente aproximada el curso evolutivo del universo.

En el caso de que ω sea exactamente igual a -1 , y por lo tanto $P = -\rho$,



2. GRAVEDAD Y ANTIGRAVEDAD son fuerzas cuyo dominio se va alternando a lo largo de la evolución del universo. La gravedad, predominante en el curso de casi toda esa evolución, se describe mediante la teoría general de la relatividad de Einstein; es una fuerza atractiva que afecta a la materia ordinaria y se caracteriza por una energía potencial negativa. El régimen antigravitatorio domina sólo durante el comienzo y final de la evolución, cuando predomina un tipo especial de fluido cosmológico o "quintaesencia", caracterizado por presiones negativas e interacciones repulsivas; aquí, la energía potencial es positiva. La quintaesencia constituye una forma de energía oscura; otras son la constante cosmológica y la energía "fantasma".

el campo escalar ϕ pierde todo carácter dinámico y se convierte en una constante, que coincide formalmente con la constante cosmológica. Se describe así un universo de tipo De Sitter cuya expansión es la más acelerada de las conocidas hasta hace poco. Si, por otra parte, se tiene que $-1/3$ es mayor que ω y ω es a su vez mayor que -1 , el campo escalar ϕ conserva su carácter dinámico, aunque predice también una expansión acelerada. En este caso, no obstante, el ritmo al que el universo se acelera es más lento que el que imparte la constante cosmológica. Este intervalo corresponde al dominio de la energía oscura, donde el campo de quintaesencia ha sido estudiado más exhaustivamente, tanto para valores constantes del parámetro ω como para la situación, más general, en la que dicho parámetro cambia con el paso del tiempo.

La energía fantasma y el ocaso catastrófico

En los últimos cuatro años se han realizado diversas observaciones, más o menos sistemáticas, con el objetivo de determinar, o al menos

acotar, el valor del parámetro ω de la ecuación de estado del universo. Los valores obtenidos hasta ahora poseen una barra de error que hace compatible la ecuación de estado del universo con la que corresponde a un campo de quintaesencia para valores de ω menores que $-0,8$, lo que incluye a la constante cosmológica, mientras que no excluye un nuevo dominio de valores de ω definidos dentro del intervalo $-1,4 < \omega < -1$. Este último intervalo correspondería a expansiones superaceleradas del universo, más allá incluso de lo que predice la constante cosmológica. En este régimen, se ha dado a la energía oscura la denominación de "energía fantasma". La evolución futura del universo presenta en él aspectos que pudieran ser incluso inquietantes.

En efecto, si ω resultara ser menor que -1 , el universo llegaría a expandirse a un ritmo tal, que cualquier volumen de espacio que puede delimitarse en él se convertiría en infinito en un tiempo finito de nuestro futuro. A este ocaso catastrófico, auténtico desgarrón espaciotemporal (*big rip*), y a los acontecimientos que desembocarían finalmente en tal

catástrofe han dedicado numerosos estudios Robert Caldwell y sus colaboradores. Estos autores concluyeron que para un valor del parámetro de la ecuación de estado próximo a $\omega = -3/2$ y para los valores de los demás parámetros cosmológicos que corresponden a las condiciones más naturales posibles, ese ocaso catastrófico ocurriría dentro de unos 22.000 millones de años, algo que en verdad no sería inquietante ni para nosotros ni para nuestros descendientes.

En realidad, nuestro sistema solar habría desaparecido muchos años antes de que ocurriera dicho cataclismo, debido a otras causas bien conocidas. Pero Caldwell y sus colaboradores pusieron de manifiesto además que el gran acontecimiento final vendría precedido por una sucesión de hechos, todos ellos catastróficos, conforme el universo fuera acercándose a su dilución final. Si existiera alguna civilización en alguna estrella de nuestra Vía Láctea o de otra ga-

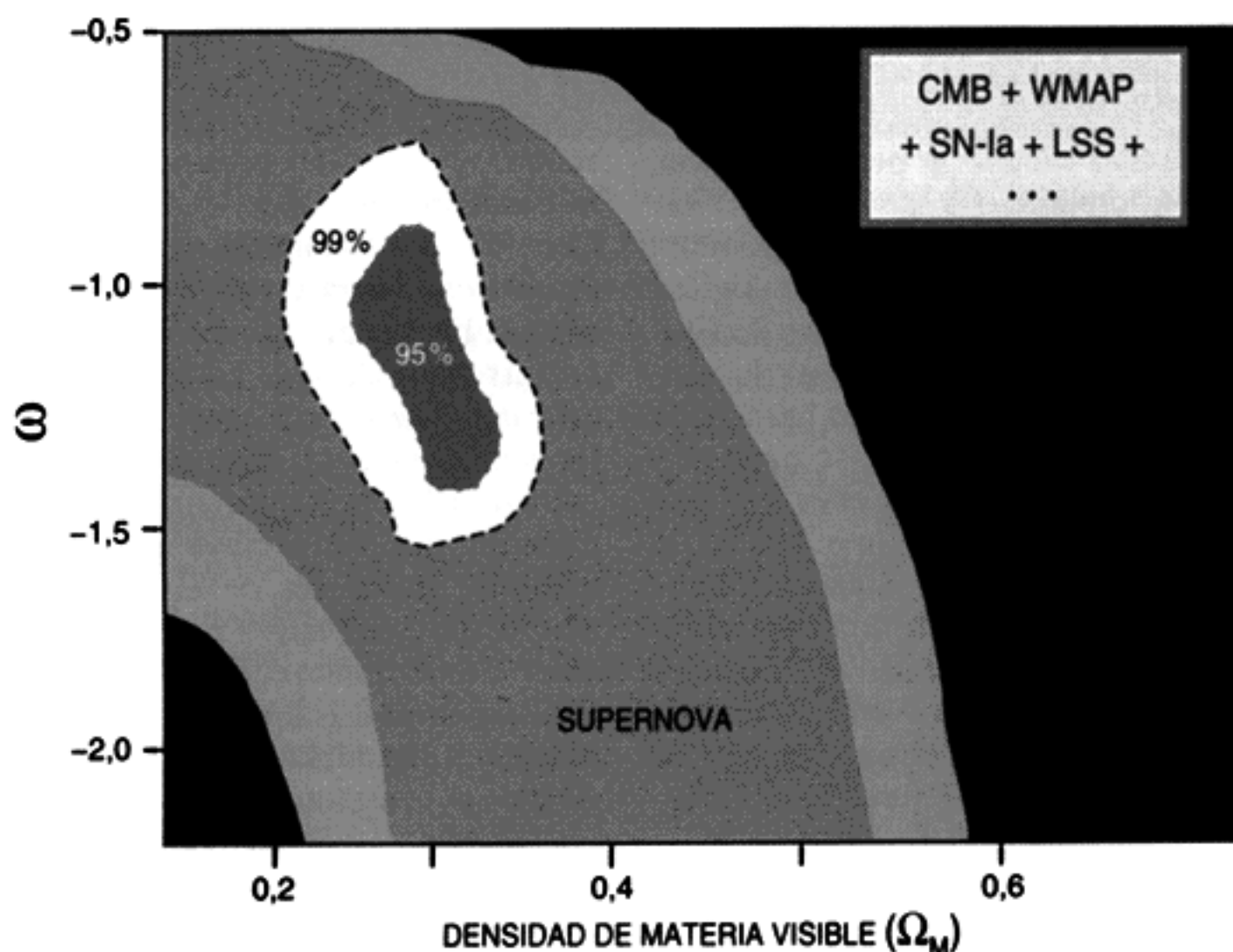
laxia por entonces, observaría primero cómo la Vía Láctea, o la galaxia correspondiente, desaparecería más allá de su horizonte; luego vería desaparecer su sol y sistema planetario, después su propio planeta se esparciría hasta el infinito,... y así hasta que las mismas partículas elementales que formarían los cuerpos de los individuos de esta hipotética civilización se alejasen distancias infinitas entre sí, inmediatamente antes del ocaso definitivo (*big rip*), después del cual nada quedaría del universo.

Si la energía oscura que parece dominar nuestro universo estuviera en la forma conocida como energía fantasma, un nuevo fenómeno único e imponente ("big") tendría que añadirse a los ya existentes en cosmología: la gran explosión, la gran implosión y el ocaso final conformarían la trilogía cósmica de lo más grandioso. La gran explosión marcaría el inicio del universo, mientras que los dos sucesos restantes

representarían formas diferentes de describir su final. La gran explosión y el ocaso final corresponden estrictamente a una singularidad matemática, un punto del espaciotiempo donde fracasan todas las leyes de la física y aun las de la biología y las demás ciencias. Estas características dantescas están presentes en la descripción clásica cuando no se tienen en cuenta las leyes de la teoría cuántica. Si dispusiéramos de una teoría de la gravedad cuántica de la que pudiésemos extraer soluciones cosmológicas coherentes, quizá se podría esperar que, aunque las leyes de la física que nos son familiares dejaran de cumplirse a medida que nos acercáramos al principio o al fin del universo, tales leyes serían entonces reemplazadas por otras. Estas, pese a ser mucho más extrañas y ajenas a nuestra experiencia cotidiana, serían leyes al fin y al cabo y tendrían la envidiable propiedad de mantener su vigencia incluso en los momentos inicial y final del universo.

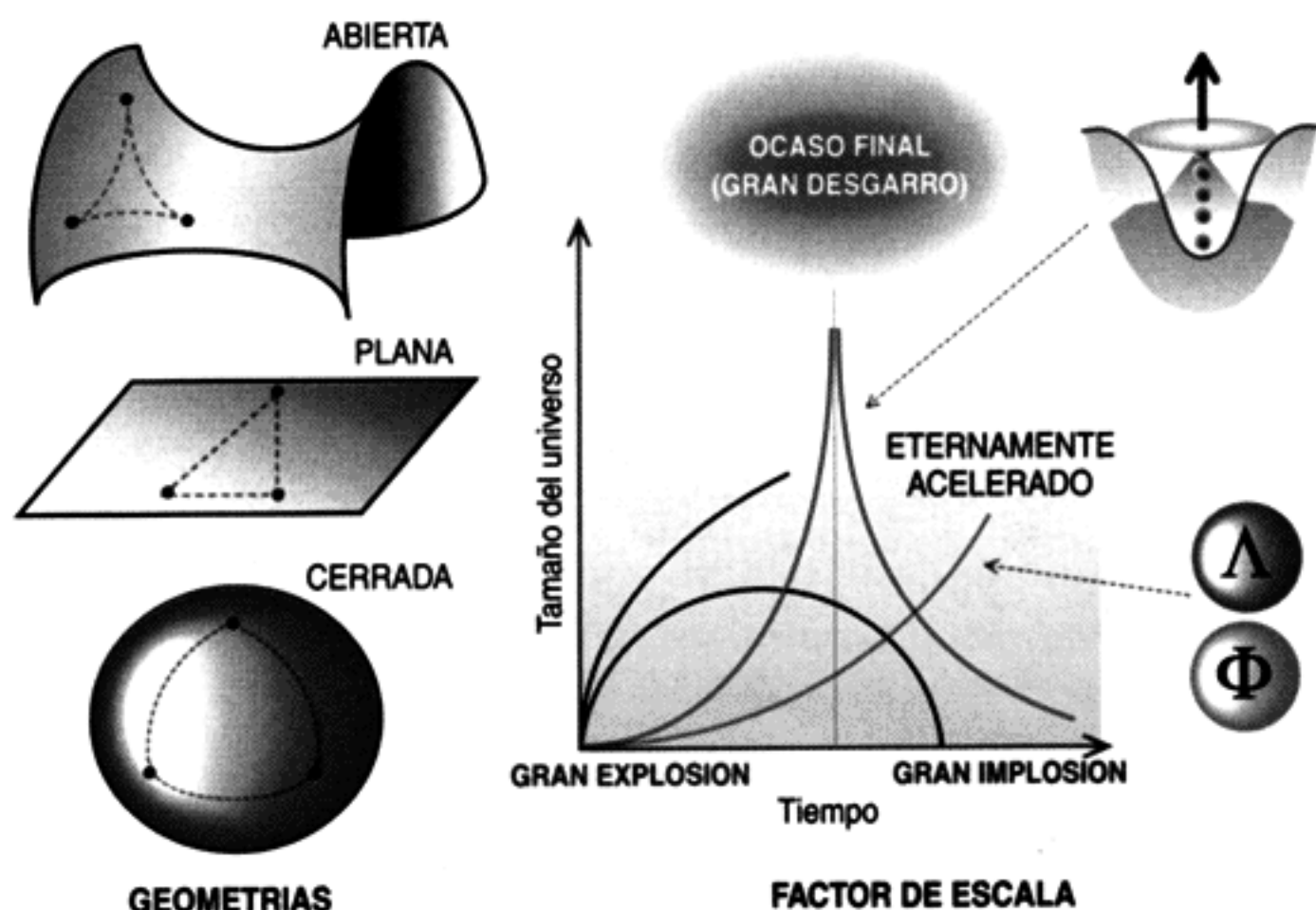
La energía fantasma añade, pues, un nuevo modelo cosmológico clásico a los ya existentes. Atendiendo a su geometría, el universo puede ser plano, cerrado o abierto. De acuerdo a cómo varía su tamaño a medida que evoluciona, el universo puede a su vez comportarse como abierto o cerrado. En este último sentido, el modelo del ocaso final (*big rip*) es un modelo abierto; mas, en contraposición al modelo abierto ordinario, donde cualquier volumen del universo se hace infinito en un tiempo también infinito, alcanza un tamaño infinito en un tiempo finito.

Ya sabemos que la gran catástrofe futura (*big rip*) no debe preocuparnos ni por nuestra seguridad, ni por la de nuestros descendientes, dado que parece que en ningún caso podría afectarnos ni a nosotros, ni a ellos. Sin embargo, la vida, y las nuevas civilizaciones que engendrarse, podrían prender de nuevo en otros lugares de nuestro universo en un futuro suficientemente lejano como para que la amenaza de dicho ocaso fuera real para tales civilizaciones. En este punto cabe preguntarse: ¿Sería inevitable el ocaso final para estas hipotéticas civilizaciones futuras? ¿Habrían de perecer sus componentes inexorablemente en la gran catástrofe si ω fuera menor que -1 ? Aun en el caso de que



3. DETERMINACION CONJUNTA DE ω Y Ω_M gracias a los resultados obtenidos por diversas misiones: CMB (Radiación Cósmica de Fondo), WMAP (Sonda Wilkinson para Anisotropías del Fondo de Microondas), LSS (Estructura a Gran Escala y Lentes Gravitatorias), SN-Ia (Supernovas del tipo Ia Distantes), etc. ω es el parámetro de la ecuación de estado de la energía oscura y Ω_M es la densidad de materia (visible + oscura). De acuerdo con este gráfico, los valores más probables de ω y Ω_M han de situarse en la región en rojo (con el 95 % de confianza estadística) o amarilla (con el 99 % de confianza). En cualquier caso, estos valores tienen que situarse en el entorno de 0,3 y de -1 (o un poco inferior), respectivamente. Nótese que $\Omega_M + \Omega_p$ (la densidad de energía oscura) parece ser aproximadamente 1 (valor que corresponde a un universo plano), así que Ω_p ha de valer más o menos 0,7.

4. LOS MODELOS COSMOLÓGICOS. En lo que se refiere a la variación del factor de escala del universo con el tiempo, los modelos cosmológicos incluyen los conocidos modelos abierto y cerrado (*líneas en negro*), el de expansión acelerada (*línea verde*), inducida por la presencia de una constante cosmológica (Λ) o de un campo escalar de quintaesencia (Φ), y el modelo del ocaso final (*líneas rojas*), inicialmente en expansión superacelerada y luego en contracción, tras la singularidad (el *gran desgarro*, que supondría el final del universo y de todas las leyes de la física y, por supuesto, de la biología). Este último modelo se induce por la presencia dominante de la energía fantasma. No hay que confundir estos modelos con las posibles geometrías, abierta, cerrada y plana, del universo (*a la izquierda en la figura*).



cosmológica y energía fantasma no pueda resolverse en mucho tiempo.

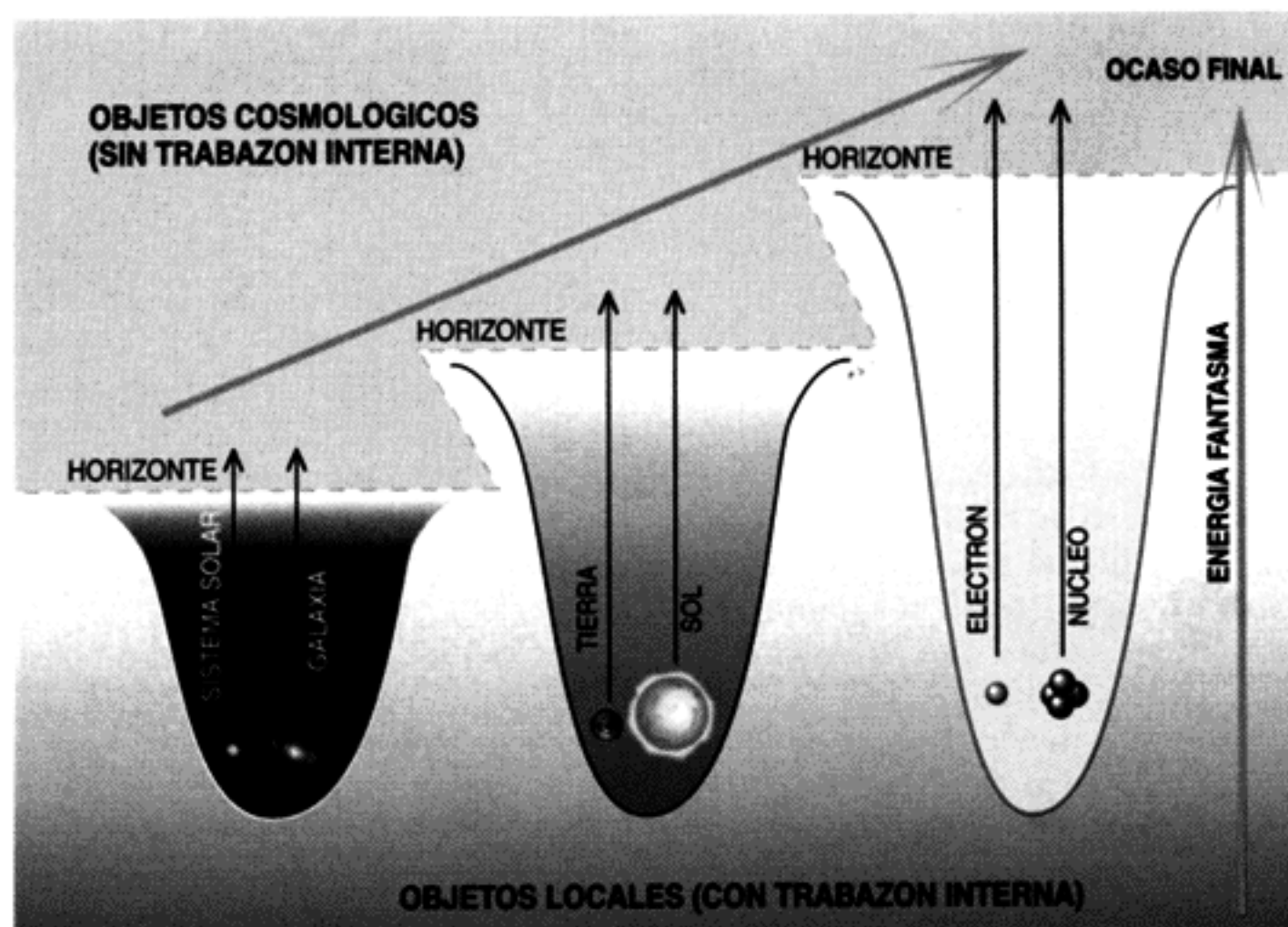
Pero si, pese a ello, alguien insistiera en mantener la energía fantasma como su modelo favorito, debería saber que dicho fluido, aparte de predecir una singularidad futura del tipo del ocaso final, tiene otras propiedades que también son muy poco corrientes. Conviene resaltar aquí algunas. Por una parte, resulta difícil de concebir que, pese a describir un universo cuyo tamaño aumenta tan rápidamente, la energía fantasma posea una densidad de energía positiva que aumenta con el tiempo sin violar el principio de conservación de la energía.

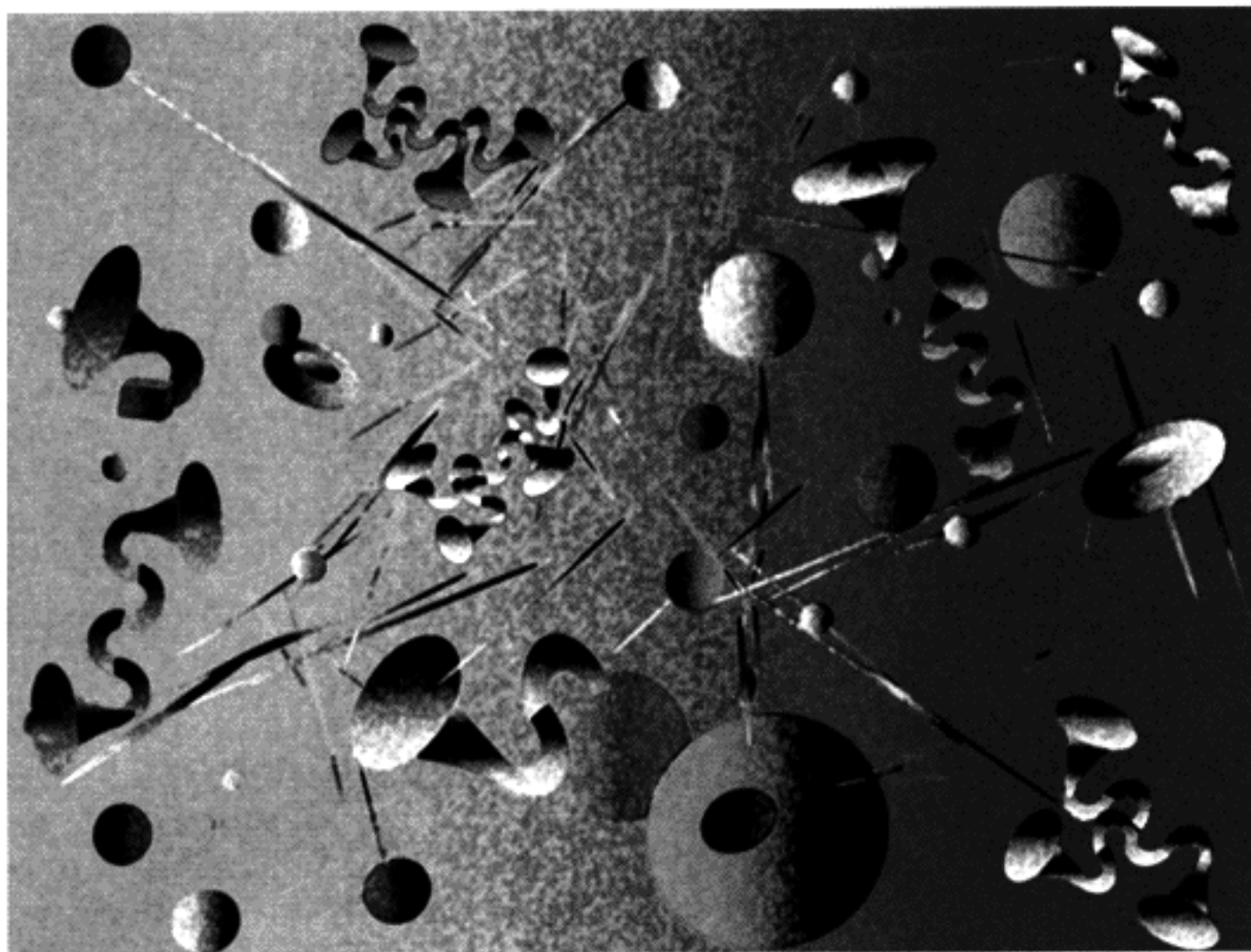
Por otra parte, puesto que el valor absoluto de su presión negativa es mayor que el de su densidad de energía positiva, la energía interna del fluido fantasma resulta ser negativa, de forma tal que la energía de un sistema ordinario que absorbiera energía fantasma tendría que disminuir necesariamente. Esta última característica se traduce además en la violación de uno de los principios sacrosantos de la física, el llamado principio de la energía dominante: el valor absoluto de P ha de ser menor que ρ . En efecto, en el caso de la energía fantasma la suma de la presión y la densidad de energía, $P + \rho$, debe ser siempre negativa.

no se consideren las modificaciones que la teoría cuántica induciría en el marco del ocaso final, veremos más adelante que las hipotéticas civilizaciones del futuro podrían tener a su disposición ciertas formas de evitar la catástrofe y que estas vías de escape se basan en posibilidades no menos sorprendentes.

Las observaciones llevadas a cabo para la determinación del parámetro ω indican que toma un valor muy próximo a -1 . Pero si finalmente ω no llegase al valor -1 , aunque sólo fuera por una cantidad pequeñísima, todo lo dicho anteriormente sobre el modelo del ocaso final (*big rip*) conservaría su validez. Dado que, por otra parte, no es previsible que dispongamos a corto plazo de procedimientos que nos ofrezcan observaciones tan precisas y sistemáticas que nos permitan discriminar entre valores de ω muy próximos, es de temer que la incertidumbre que hoy existe a la hora de decidir entre los modelos de quintaesencia, constante

5. LA ENERGÍA FANTASMA, a medida que el universo se aproxima al ocaso final, convierte los objetos locales, cuyos movimientos no siguen individualmente leyes cosmológicas, en objetos cosmológicos que las obedecen por sí mismos. Ocurre primero con los objetos de mayor tamaño y, luego, con objetos cada vez menores.





Túneles en el espaciotiempo

Existe otro tipo de soluciones de las ecuaciones de Einstein que violan también el principio de la energía dominante. Se trata de los agujeros de gusano o de anillo lorentzianos, túneles imbricados en la propia estructura del espaciotiempo. Corresponden a soluciones de las ecuaciones de Einstein para una distribución esférica, en el caso de los agujeros de gusano, o toroidal, en el de los agujeros de anillo, de materia exótica. Las propiedades de este tipo de materia son, en cierto sentido, muy parecidas a las de la energía fantasma. No resulta extraño imaginar que un universo dominado por energía fantasma contuviera también de forma natural ejemplares de estos agujeros de gusano y de anillo distribuidos por todo su volumen. Veremos a continuación lo que podría ocurrirles a estos túneles espaciotemporales durante la evolución del universo.

Un agujero de gusano viene a ser un túnel en el espaciotiempo que une dos regiones extensas de un mismo universo —o de distintos universos, es decir, distintos continuos espaciotemporales sin otra conexión que ésa—, a las que se abre por una boca de entrada y una boca de salida. Estos túneles poseen una garganta de tamaño finito; corresponde a la sección más estrecha del túnel; en dicha garganta se concentra la materia exótica en una distribución

esférica (o toroidal en el caso de un agujero de anillo), que impide que el agujero se estrangule por su centro y lo convierte, por consiguiente, en un túnel estable que puede ser atravesado de una a otra boca por cualquier viajero de tamaño suficientemente pequeño.

Estos túneles espaciotemporales pueden convertirse en una máquina del tiempo: los viajeros que los atraviesan viajan “instantáneamente” hacia el futuro o hacia el pasado. Basta para ello con imponer un cierto movimiento relativo entre las dos bocas del agujero. Este movimiento conduce a la aparición en el interior del túnel de un horizonte cronológico. Se trata de una superficie, situada en las proximidades de la garganta, a partir de la cual todo viajero que atravesase el túnel se encontrará en una región donde se produce una violación sistemática de la causalidad. Tal violación se debe al fenómeno relativista de la dilatación del tiempo, por el que dicho viajero evolucionaría instantáneamente hacia su propio pasado o futuro, dependiendo del tipo de movimiento relativo entre las bocas.

Desde 1989, año en que Kip Thorne los obtuvo como soluciones de las ecuaciones de Einstein, estos extraños objetos espaciotemporales se han convertido en tema de investigación. No obstante, está aún lejos el día en el que una civilización mucho más

6. LA ESPUMA ESPACIOTEMPORAL, representada aquí en forma figurada, es un hervidero continuo de actividad creadora y aniquiladora, a la que está sometida una ingente cantidad de objetos submicroscópicos de vida efímera que corresponden a todo tipo de posibles topologías y formas energéticas. No es posible asignar una flecha del tiempo a esta espuma de vacío cuántico, ya que en él no existen leyes de causalidad en las que la causa preceda necesariamente al efecto, ni verdadera ordenación espacial de los objetos.

avanzada que la nuestra sea capaz de generar una técnica tal que permita disponer de estos túneles y haga viable viajar en el tiempo a través de ellos. Por otra parte, los agujeros de gusano y de anillo presentan un considerable problema de estabilidad, que se pone de manifiesto cuando se consideran las fluctuaciones cuánticas del vacío en presencia de estos objetos espaciotemporales. Diversos cálculos demuestran que ciertas magnitudes que caracterizan a esas fluctuaciones cuánticas divergen (es decir, se hacen infinitas) a medida que nos aproximamos al horizonte cronológico. Por esa razón, los agujeros de gusano y de anillo resultan inestables.

Steven Hawking elevó este tipo de cálculos a la categoría de conjetura científica, bajo el nombre de “conjetura de protección cronológica”, de acuerdo con la cual las leyes de la física cuántica prohíben la existencia de máquinas del tiempo. No obstante, a pesar de tener en cuenta las fluctuaciones cuánticas del vacío, la conjetura de Hawking tiene una naturaleza esencialmente semiclásica, lo que quiere decir que sólo se aplica al caso de máquinas del tiempo cuya geometría no venga descrita de acuerdo con las leyes de la teoría cuántica. Se ha demostrado después que, si se considera la geometría cuántica de tales objetos, éstos se comportan de forma estable, incluso en presencia de las fluctuaciones del vacío, siempre y cuando la garganta de los túneles tenga un tamaño submicroscópico, es decir, corresponda a escalas menores que las que caracterizan a las partículas elementales.

El vacío clásico de la gravedad puede describirse como la ausencia

total de espacio, tiempo y materia. Sin embargo, si consideramos una vez más las características de la teoría cuántica, el vacío gravitatorio se convierte en una "espuma cuántica espaciotemporal", un lugar repleto de actividad de una naturaleza no causal, que abandona el carácter de ausencia absoluta propio de la descripción clásica para llenarse con la presencia de todo tipo de objetos geométricos y topológicos de vida fugaz y tamaño submicroscópico. Así, proliferan agujeros negros virtuales en continua creación y aniquilación, universos fugaces siempre recién nacidos y que acaban de perecer, cuerdas cósmicas diminutas, membranas y, finalmente, como depositarios de todo elemento de violación de la causalidad y garantía para la espuma de que no hay efecto que no pueda preceder a su causa, diversos tipos de túneles espaciotemporales submicroscópicos. Una forma previsible de técnica del futuro, la más obvia tal vez, y con la cual civilizaciones venideras podrían disponer de máquinas del tiempo, consistiría en extraer de la espuma cuántica espaciotemporal estos agujeros y aumentarlos hasta un tamaño macroscópico, conservando sus características geométricas y cuánticas.

Pero aunque esto llegara a ser posible algún día, los viajeros del tiempo deberían enfrentarse con otro problema. Para realizar un viaje a través del tiempo un viajero tendría que pasar por el túnel desde una boca a otra, atravesando así necesariamente la garganta, una zona donde se concentra la materia exótica, cuyas

características parecen incompatibles con la vida que conocemos. No es posible encontrar ningún atajo libre de materia exótica en el caso de un agujero de gusano. Sin embargo, los agujeros de anillo disponen de vericuetos a través de los cuales es posible ir de una a otra boca sin encontrar materia exótica. El problema en este caso quedaría reducido a saber distinguir desde el exterior estos itinerarios "seguros".

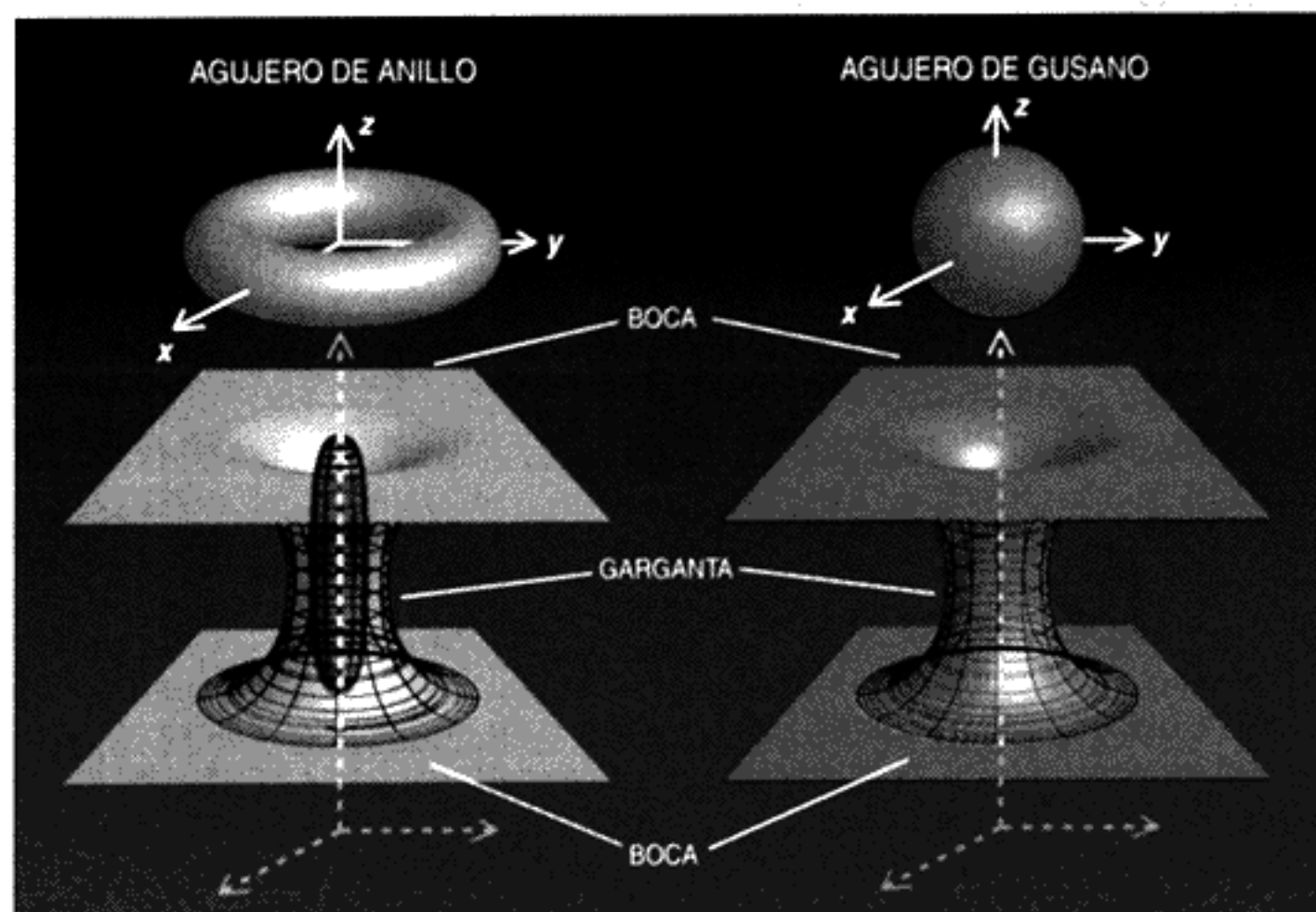
Crecimiento espontáneo de los túneles

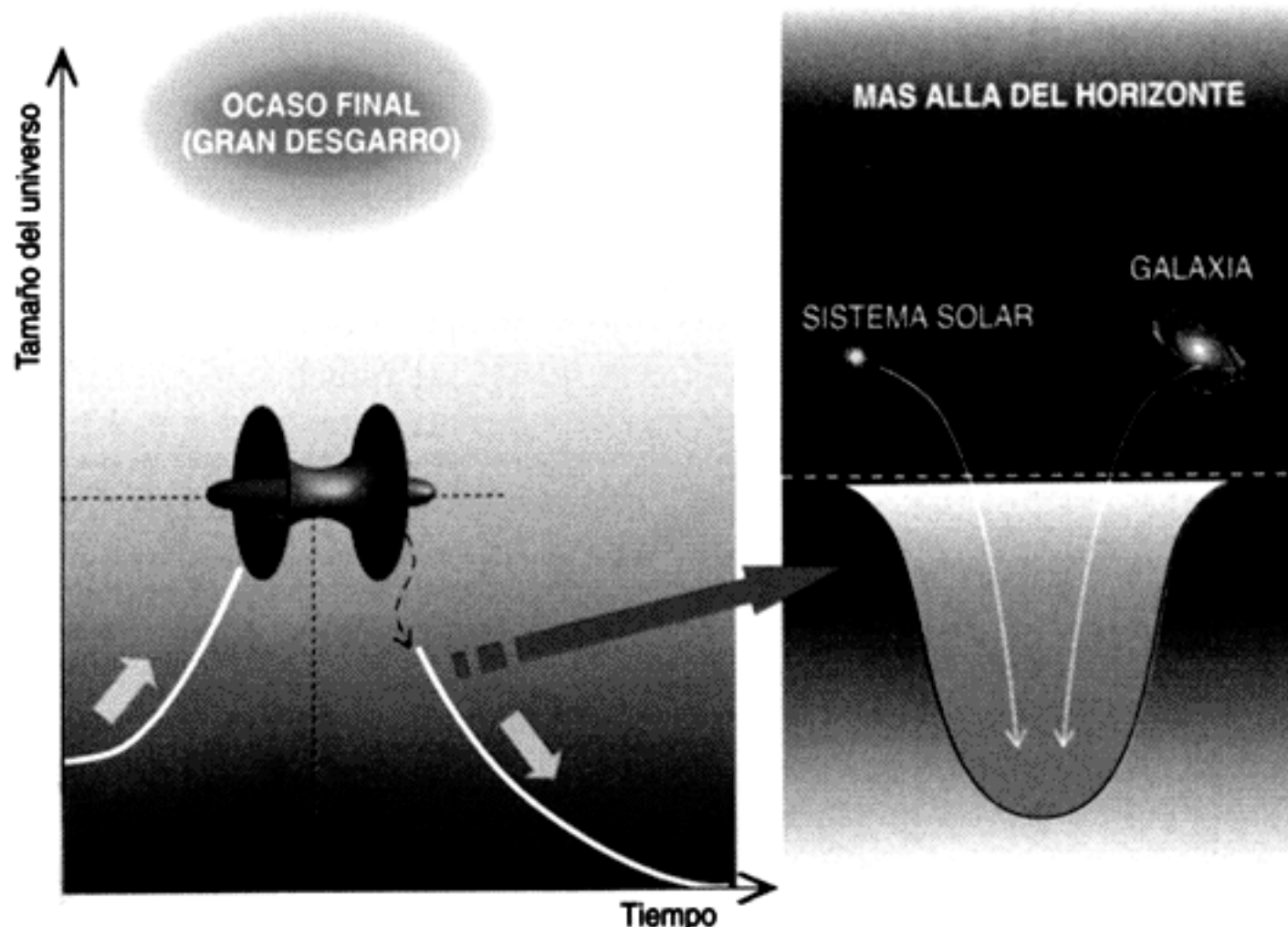
¿Qué le ocurre a uno de estos agujeros de gusano o anillo cuando se encuentra inmerso en un universo que, como el presente, está dominado por energía oscura? Se han esbozado dos propuestas completamente diferentes. Nos ocuparemos a continuación de la primera, dejando la segunda para el final. Si sólo se tienen en cuenta los efectos que la expansión acelerada del universo tiene en la geometría y tamaño de los agujeros de gusano o anillo, se llega a la siguiente conclusión: el tamaño de la garganta de los agujeros de gusano y anillo inmersos en un universo que contiene energía oscura aumenta en un factor proporcional al factor de escala del universo con respecto al sistema de referencia del espacio inicial en que están inmersos. (Por factor de escala se entiende el factor en que las distancias cósmicas se dilatan, en función del tiempo, a consecuencia de la expansión del universo.) Con otras palabras: todos los

agujeros aumentan de tamaño en la misma proporción en que aumenta de tamaño el universo, mientras que su estructura y forma geométrica permanecen inalteradas. Todo ocurriría como si esa técnica futura a la que antes aludíamos fuera un recurso del que la propia naturaleza dispone por sí misma y mediante el cual, para llegar a contar con una máquina del tiempo de tamaño macroscópico, no habría más que esperar que pasara un tiempo suficiente. Lo único que tendría que hacer entonces el hipotético viajero sería aprender a identificar el lugar donde se encuentra la boca de entrada de un agujero, comprobar su tipo, identificar los itinerarios seguros a través del túnel y, finalmente, fijar la velocidad relativa entre las bocas.

Pero, ¿esperar cuánto? Obviamente, cuanto menor sea el parámetro ω que caracteriza la ecuación de estado de la energía oscura, mayor será el ritmo al que se expande el universo y, por tanto, el ritmo de crecimiento de los agujeros. Sin embargo, como el tamaño de partida de la garganta de un agujero de gusano o anillo, al principio en la espuma cuántica espaciotemporal, es extraordinariamente pequeño (poco mayor que la longitud de Planck, 10^{-33} cm, la escala donde los fenómenos cuánticos empiezan a predominar sobre la gravitación clásica), si ω fuera mayor que -1 , el tiempo que habría que esperar para que la naturaleza preparara una máquina del tiempo adecuada sería inimaginablemente

7. LOS AGUJEROS DE ANILLO Y DE GUSANO corresponden a soluciones de las ecuaciones de Einstein para distribuciones de materia exótica con simetría toroidal y esférica, respectivamente. Las propiedades de la materia exótica son similares a las de la energía fantasma. Por ese motivo, los túneles pueden formarse de manera natural en un universo donde la energía fantasma domine sobre los demás tipos de energía. Los agujeros de anillo y de gusano cortocircuitan el espaciotiempo conocido al conectar sus bocas a puntos ilimitadamente distantes entre sí, permitiendo viajar entre dichos puntos, y a través del tiempo, hacia el futuro o el pasado.





8. REPRESENTACION ESQUEMATICA del uso, por una hipotética civilización avanzada del futuro, de un agujero de anillo macroscópico para evitar el "gran desgarro" (*big rip*). Una vez identificada la boca de entrada al agujero, los científicos de dicha civilización podrían conectarse a la zona futura en contracción cortocircuitando el espaciotiempo del universo entre dos puntos del mismo e imponiendo un movimiento relativo conveniente entre las bocas. Por la boca de salida llegarían así a la región futura, donde la contracción del universo iría recuperando paulatinamente los objetos astrofísicos perdidos más allá del horizonte antes de ese viaje.

largo. Durante el tiempo invertido por la garganta del túnel para crecer hasta un tamaño suficiente, el universo habría evolucionado hasta convertirse en un lugar donde a duras penas cabría concebir una noción de vida o civilización. La situación diferiría si en el universo dominara la energía fantasma. En tal caso, el ritmo de crecimiento del universo llegaría a ser tan considerable, que el tamaño de la garganta de los agujeros de gusano o anillo podría alcanzar un tamaño macroscópico incluso un poco antes de que se produjera el ocaso final (*big rip*).

Manual para evitar la catástrofe

Al concluir nuestro análisis del ocaso final, nos preguntábamos: ¿Será una catástrofe inevitable para las futuras civilizaciones que puedan existir cuando nuestro universo haya envejecido unos 22.000 millones de años? ¿Habrían de perecer tales civilizaciones inexorablemente en esta gran catástrofe si ω es menor que -1 ? De lo que acabamos de decir se deduce que la presencia de agu-

jeros de gusano y anillo con una garganta de tamaño macroscópico les podría todavía ofrecer un camino de escape adecuado y seguro en el último minuto.

Desde un punto de vista matemático, la singularidad futura a la que llamamos ocaso final divide la evolución del universo en dos partes. Ya sabemos que antes de ese episodio, el universo se expande de forma superacelerada. Después del ocaso final, entraría en un período de contracción continuada que le habría de conducir paulatinamente hasta un tamaño cero a lo largo de un tiempo infinito. No obstante, puesto que el suceso en cuestión corresponde a una singularidad matemática, no es posible establecer ninguna continuidad causal entre ambos períodos.

La singularidad pone fin al período de evolución causal del universo y no tiene sentido preguntarse cómo éste podría reanudar después una evolución causal. O mejor dicho, no tiene sentido siempre que no haya una conexión, basada en procesos no gobernados por la causalidad, que lleve al universo desde un momento

antes a un momento después del ocaso final a través de un cortocircuito del espaciotiempo. En este caso, la evolución acelerada previa podría ser continuada por la contracción posterior. Si las hipotéticas civilizaciones futuras que existieran en tiempos previos al ocaso final identificaran las bocas de entrada de los agujeros de anillo, podrían viajar a través de ellos a su futuro para reencontrarse en un universo donde irían recuperando poco a poco todo lo que antes se les había ido escapando más allá del horizonte: el sistema planetario, la galaxia, etc.

Si tales civilizaciones controlasen el movimiento relativo de las bocas de los agujeros, en teoría podrían viajar hasta su pasado. Sin embargo, mientras los viajes al futuro no plantean graves problemas de causalidad, los viajes al pasado sí lo hacen. Son bien conocidas las paradojas que surgen. El viajero que mata a su abuelo antes de que éste hubiera podido engendrar a su propio padre es el arquetipo de las mismas. Y si este tipo de dificultades llegaran a resolverse, siempre se puede aducir el argumento pragmático de Steven Hawking: los viajes al pasado no serán nunca posibles ya que jamás se han visto turistas del futuro en nuestro mundo.

Un universo que viaja en el tiempo

Como señalamos anteriormente, existe otra propuesta acerca del destino que les correspondería a los agujeros de gusano y anillo en un universo en expansión acelerada. Toma en consideración los efectos que se producen en los agujeros espaciotemporales en virtud de la acreción gravitatoria de energía oscura. Se los ha estudiado sólo cuando los túneles espaciotemporales pertenecen al tipo de los agujeros de gusano. La acreción, o incorporación constante de energía de fuera mediante la simple interacción gravitatoria, es el único fenómeno físico mediante el cual un objeto espaciotemporal puede absorber energía oscura o fantasma.

Mientras que la acreción de energía oscura con ω mayor que -1 conduce a una disminución paulatina del tamaño de la garganta hasta su desaparición final, la acreción de energía fantasma conduce al efecto contrario,

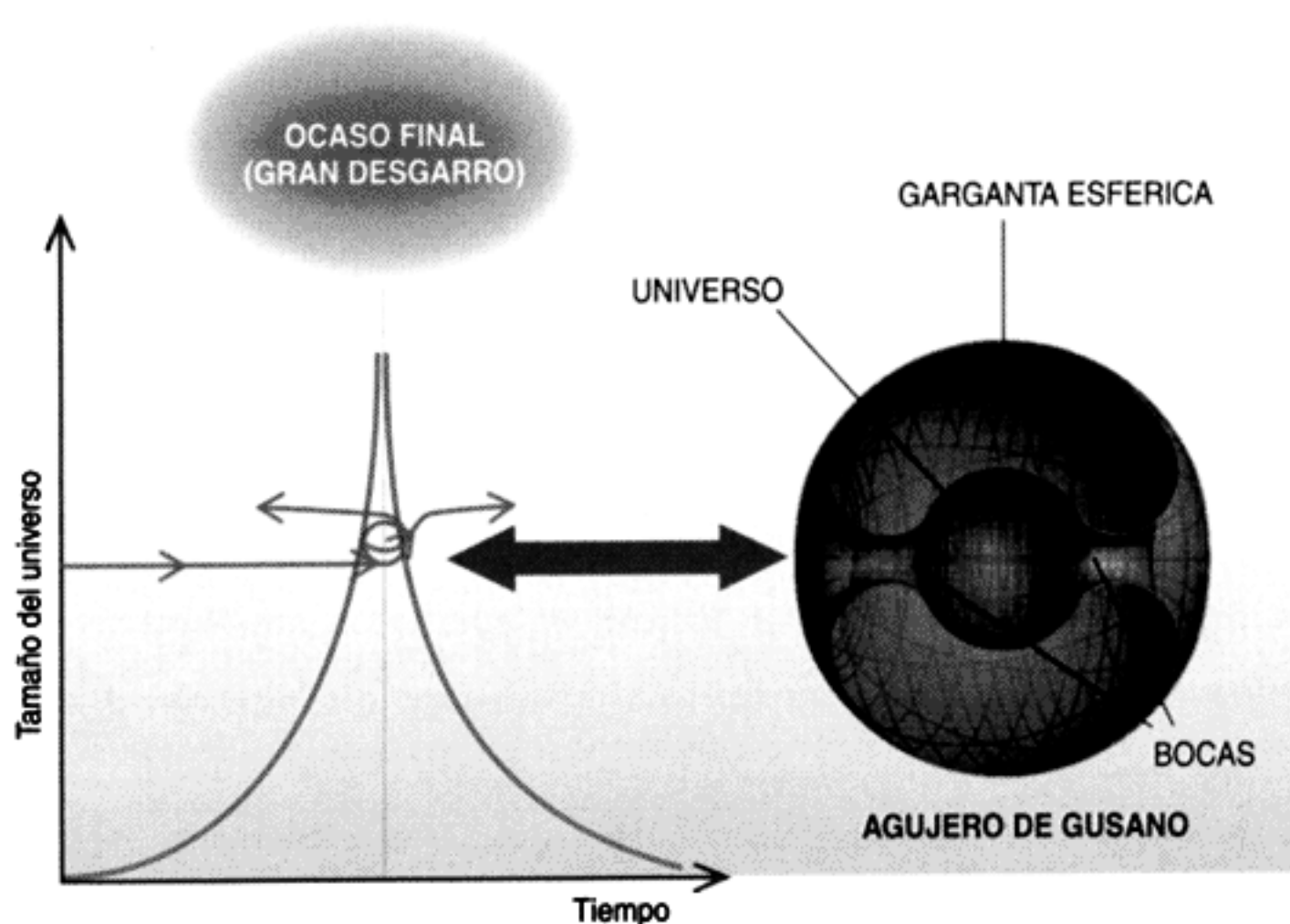
es decir, a un aumento continuado del tamaño del túnel.

La razón por la que tienen lugar fenómenos de acreción tan dispares puede entenderse fácilmente si recordamos que la energía interna es positiva para un fluido de quintaesencia con ω mayor que -1 y negativa tanto para el fluido fantasma como para la materia exótica presente en los agujeros espaciotemporales. Puesto que el tamaño de la garganta de un agujero de gusano es proporcional a la cantidad de materia exótica que contiene, dicho tamaño aumentará cuando se inyecte energía negativa y disminuirá cuando se inyecte energía positiva.

Cuesta más entender que el tamaño de la garganta aumente tan deprisa como para que llegue a abarcar cualquier volumen del universo por grande que sea, e incluso se haga infinito antes de que el universo alcance la singularidad del ocaso final. Pero esto es lo que predicen los cálculos. Si el universo se hallara ahora dominado por energía fantasma y este dominio continuara en el futuro, ese resultado sería inevitable y significaría que antes de que ocurriese el ocaso final, el universo quedaría incluido en el interior de al menos un agujero de gusano en su totalidad. Así, el universo se convertiría en un viajero con billete individual a través de su propio tiempo. En tal caso, nuestro universo podría evitar la singularidad del ocaso final que le aguardaría dentro de 22.000 millones de años. Lo haría una vez incluido en el interior de al menos un agujero de gusano, viajando instantáneamente hacia su futuro para integrarse al fin en una fase evolutiva de contracción.

Esta sería una forma de salvar de la gran catástrofe del ocaso final no sólo a las civilizaciones inteligentes que pudieran existir en el universo en sus tiempos postreros, sino al universo mismo en su totalidad. Un viaje al futuro en el que el viajero es el universo mismo merece la denominación de "gran viaje" (*big trip*). Quizás el aspecto más espectacular de este viaje resida en el hecho de referirse al viajero más macroscópico que es posible imaginar: el universo.

Este artículo tiene un carácter fundamentalmente especulativo, tanto en lo que se refiere a la posibilidad de que el universo se halle dominado



9. EN EL GRAN VIAJE EN EL TIEMPO, el viajero que evita la catástrofe del ocaso final es el propio universo. Este llevaría como equipaje toda su historia y su contenido completo de galaxias, estrellas, radiación, civilizaciones futuras, etc. El fenómeno ocurriría de forma natural y estaría desencadenado por la acreción de energía fantasma en los túneles del espaciotiempo, proceso que haría crecer la garganta de los agujeros de gusano tan rápidamente que, antes de que se produjera el ocaso final, el universo quedaría incluido en el interior de un túnel y viajaría así de forma espontánea por su propio tiempo.

por una energía oscura fantasma con características muy peculiares, como en todo lo que concierne a la física que describe los túneles espaciotemporales, con diferentes topologías, convertibles en hipotéticas máquinas del tiempo. Así, Valerio Faraoni y Werner Israel, respectivamente de la Universidad del Obispo y de la Universidad Victoria, ambas en Canadá, al estudiar la acreción de energía fantasma por un agujero de gusano en un caso un poco distinto al planteado aquí, han llegado

a una conclusión muy parecida a la que, según hemos expuesto antes, se llega cuando sólo se consideran los efectos de la expansión y no se toma en cuenta la acreción: que el agujero crece al mismo ritmo al que se expande el universo. En tal caso, pues, no podrían producirse los viajes del universo como un todo. Sin embargo, quisiera recordar que la mayoría de las ideas que se consideran hoy en día probadas, al menos en cosmología, tuvieron también un fuerte carácter especulativo en sus orígenes.

El autor

Pedro Félix González Díaz trabaja en el grupo de relatividad y cosmología del Instituto de Matemáticas y Física Fundamental del CSIC en Madrid desde 1992. A partir de 2000 su labor se ha concentrado en el estudio de temas relacionados con la energía oscura, mundos brana y modelos de cosmología cuántica.

Bibliografía complementaria

- THE COSMOLOGICAL CONSTANT AND DARK ENERGY. P. J. E. Peebles y B. Ratra en *Reviews of Modern Physics*, vol. 75, págs. 559-606; 2003.
- PHANTOM ENERGY AND COSMIC DOOMSDAY. R. R. Caldwell, M. Kamionkowski y N. N. Weinberg en *Physical Review Letters*, vol. 91, pág. 071301; 2003.
- WORMHOLES AND RINGHOLES IN A DARK-ENERGY UNIVERSE. P. F. González Díaz en *Physical Review*, vol. D68, pág. 084016; 2003.

