

EDAD Y EVOLUCIÓN DEL UNIVERSO: Constante de Hubble y Materia Oscura

Un Universo en expansión necesariamente nos presenta con una realidad evolutiva, hacia el pasado y hacia el futuro. Si conocemos las dimensiones actuales de un sistema, y su ritmo de cambio espacial, podemos inferir el tiempo transcurrido desde el comienzo de su expansión: así busca la Cosmología el determinar la edad del Universo a partir de su estado inicial de alta densidad y temperatura, el “Big Bang”.

La evolución futura nos coloca ante un dilema: o la expansión continúa por un tiempo ilimitado, o debe llegar a pararse, con la subsiguiente contracción de todas las masas hacia un mismo punto por efecto de la atracción gravitatoria. En ambos casos, la Física habla solamente de cambios en las condiciones de un acervo constante de masa-energía, regido por leyes físicas universales e inmutables con el paso del tiempo. Pero mientras que el comienzo del Universo es un paso de la no-existencia a la existencia, el final no implica un retorno a la nada, pues ninguna aplicación de leyes físicas lleva consigo la estricta aniquilación de lo que ya es materia.

La expansión del espacio, que arrastra y separa más y más los cúmulos y supercúmulos de galaxias tiene que darse superando la atracción mutua de esas grandes masas. A largo plazo, debe ser la densidad la que establece si la velocidad de expansión (especificada por la constante de Hubble, H) excede, iguala o es inferior a la velocidad de escape. En los dos primeros caso tenemos una expansión sin fin, hacia un tamaño sin limitación alguna (densidad inferior al valor crítico), o hacia un tamaño máximo que nunca se alcanza completamente (densidad crítica, con expansión que lleva asintóticamente al radio límite). En la tercera hipótesis, la gravitación domina, y el Universo alcanza un tamaño que depende de su relación densidad-velocidad de expansión, pero sufre luego un colapso que es, intuitivamente, el reverso de la expansión, aunque en condiciones diversas.

Es común el describir las dos posibilidades de expansión indefinida como “universos abiertos” y el último caso como un universo “cerrado”, y asociar a ellos las posibles geometrías compatibles con la Relatividad: curvatura negativa para densidad inferior a la crítica, curvatura cero (espacio plano) para la densidad crítica, y curvatura positiva para la densidad que excede el valor crítico. Frecuentemente se añade la afirmación de que los dos primeros son universos espacialmente infinitos en todo momento, mientras que el tercero tiene un volumen finito. Son, éstas, formas de expresarse que van más allá de las implicaciones físicas, para dar realidad a un mero formalismo geométrico. En la Teoría de la Relatividad, un espacio desprovisto de masa tiene curvatura cero, y corresponde al espacio-tiempo plano (euclídeo) de la Relatividad Restringida; la introducción de masa curva al espacio-tiempo en la Relatividad Generalizada, con un radio de curvatura que depende de la masa y de la distancia de ella, pero siempre con un valor positivo.

Ni tiene sentido hablar de un Universo infinito en volumen espacial sin admitir una masa infinita, con sus consecuencias físicas inaceptables: el Universo tendría un potencial gravitatorio infinito en todos los puntos, con una fuerza gravitatoria nula (no habría diferencias de potencial), y la expansión supondría un crecimiento de volumen que no tiene sentido lógico, pues no puede verdaderamente crecer lo que es infinito..

Debemos admitir, por lo tanto, que el radio (y volumen) del Universo es finito en todo momento, y la pregunta de su futuro solamente debe responderse con respecto a la evolución de ese radio finito como función del tiempo. Tampoco debe tomarse como afirmación física la que supone que en una posible contracción la coordenada temporal se invertiría: no hay simetría con respecto a la expansión original, ni en la relación masa-energía ni en el estado de la materia, ni en la situación de las masas dentro del espacio: no basta con aplicar el signo negativo al tiempo en las ecuaciones relativísticas. Ni es correcto el identificar una reversibilidad de posiciones con un retroceso en el tiempo: siempre sería necesario aceptar que cada etapa es posterior a otra, por muchas veces que se repita: no es el tiempo algo que se identifica con ningún proceso físico concreto. Estas consideraciones deben ser tenidas en cuenta con mayor detalle al considerar la hipótesis de una evolución cíclica de un Universo

que se contrae.

La posibilidad de determinar el futuro de la expansión se encuentra condicionada por nuestras medidas de la constante de Hubble (que exigen conocer con exactitud distancias y velocidades de galaxias suficientemente lejanas), que también determina la edad en el pasado. El otro factor influyente en ambos cálculos es la densidad media del Universo, incluyendo todas las formas de masa directamente observada con diversos tipos de telescopios o inferida de órbitas en sistemas de amplitud creciente. Todas estas medidas tienen aún márgenes de error demasiado amplios para afirmar que hay un consenso dentro de la comunidad astronómica, y por eso no hay una respuesta clara para el pasado hacia el Big Bang ni para la evolución futura: debemos esperar nuevos instrumentos o nuevas técnicas de medición para alcanzar respuestas fiables. El telescopio Hubble ha sido puesto en órbita expresamente con este fin.

LA CONSTANTE DE HUBBLE

Cuando en 1929 anunció su famosa ley relacionando la velocidad de expansión con la distancia, ($v = H \cdot d$), Edwin Hubble tenía medidas muy imperfectas de las distancias, en parte por no conocerse la existencia de dos tipos distintos de Cefeidas con magnitudes intrínsecas que diferían en casi dos unidades. El resultado de este desconocimiento llevaba a situar las galaxias a distancias demasiado próximas (con el consiguiente aumento de la relación $H = v/d$, que se estimó como de casi 500 km/s/Mpc), y a una edad del Universo, $1/H$, inferior a los 2.000 millones de años (error que chocaba con la edad geológica de la Tierra, ya establecida en unos 4.000 millones). Tal discrepancia hacía atrayente la teoría del Estado Estacionario, con un Universo eterno sostenido en su estado inmutable por la continua creación de hidrógeno.

Aunque esas dificultades han desaparecido en su forma extrema, sigue siendo cuestionado el valor de H , la “constante de Hubble”, de la cual depende la edad total del Universo, afectada también por el cálculo de la densidad y la consecuente deceleración: si el Universo es muy denso, su expansión fue más rápida en el pasado, y ha tardado menos en alcanzar el radio actual. La dificultad de determinar H tiene dos vertientes: la velocidad debe medirse para galaxias lo suficientemente remotas para que sus velocidades propias se deban casi totalmente al “flujo de Hubble” y no a atracciones de carácter más o menos local (muchas veces difíciles de determinar), y las determinaciones de distancias por métodos cada vez más indirectos nos obligan a aceptar márgenes de error cada vez más amplios. De ahí la discrepancia de valores afirmados para H por grupos de astrónomos, todos de reconocido prestigio y con acceso a los mejores instrumentos.

La medición de velocidades se hace por el cambio de longitud de onda de la luz emitida por galaxias, según la interpretación más obvia que atribuye tal cambio a un seudo “efecto Doppler” de alejamiento mutuo por la expansión predicha por Einstein¹. No hay hoy realmente una propuesta plausible por otra causa física conocida: la hipótesis de una “luz cansada”, que pierde energía en alguna forma en su recorrido por el espacio, no tiene explicación para la perfecta proporcionalidad que se observa entre cambio de longitud de onda y longitud original, sea cual sea ésta.

Tampoco es realista un modelo de Universo en que nos encontrásemos exactamente en los antípodas de un enorme agujero negro cuya gravedad causa una pérdida de energía de la luz según la fuente se encuentra más próxima a esa concentración de masa y más alejada de nosotros (hipótesis meramente formal de Ellis). Ni ha sido aceptada como suficientemente demostrable la afirmación de

¹ En una aplicación típica, para una velocidad v muy inferior a la de la luz c , el cambio de longitud de onda dividido por la longitud en reposo, definido como z , es $z=v/c$. Cuando la velocidad es “relativista” y v es casi igual a c , una fórmula más compleja permite valores de z superiores a la unidad, de modo que algunos cuasares, con $v=0.92 c$ muestran $z=4$.

Halton Arp de corrimientos al rojo discrepantes en cúmulos de galaxias o en supuestas asociaciones de galaxias y cuasares: aun si se aceptase alguno de sus ejemplos como indicador de un fenómeno desconocido que remeda el efecto Doppler, hay demasiada evidencia de que en la mayoría de los casos observamos movimientos reales a distancias cosmológicas.

El medir velocidades de galaxias individuales tiene siempre la limitación de darnos en forma total la contribución de movimientos propios, dentro de un entorno más o menos localizado, junto con el flujo de Hubble, debido a la expansión del espacio intergaláctico. Tal problema se resuelve utilizando la velocidad media de muchas galaxias en un cúmulo, donde las órbitas individuales deben cancelar sus diversas velocidades propias. Más difícil es la corrección de posibles movimientos de conjunto por atracciones de cúmulos y supercúmulos entre sí; una vez más, se intenta evitar el error mediante la comparación de velocidades de galaxias equidistantes de nosotros pero en direcciones opuestas con respecto a la Vía Láctea. Con estos métodos se considera que la medida de velocidad es suficientemente fiable, y que el problema de la constante de Hubble se centra en las medidas de distancia y de densidad.

DISTANCIAS EXTRAGALÁCTICAS

El método básico para determinar distancias más allá de lo que permite el paralaje estelar es la observación de Cefeidas, estrellas pulsantes cuyo período es proporcional a su magnitud absoluta. Hubble las utilizó para establecer su famosa ley de expansión universal, aunque los errores de calibración, ya mencionados, le llevaron a estimar una edad del cosmos muy inferior a la ya conocida de las rocas terrestres. Pero son todavía las Cefeidas las que forman el primer peldaño del proceso de buscar distancias a galaxias dentro de un radio de unos 100 millones de años-luz.

El telescopio espacial puede detectar Cefeidas en el cúmulo de Virgo, cifrando su distancia en unos 50 millones de años-luz, y también en el de Fornax, en el cielo austral, con su distancia estimada en unos 60 millones a.l. Con estos valores H sería de unos 75 km/s/Mpc (según Wendy Freedman y su grupo de los Observatorios Carnegie) y un Universo de densidad plausible habría comenzado su expansión hace 10 a 12 eones en el pasado, tiempo apenas reconciliable con la edad de estrellas en cúmulos globulares (14 eones, según la teoría más refinada de evolución estelar). De medidas a galaxias semejantes, Allan Sandage y sus colaboradores, también de los Observatorios Carnegie, deducen un valor de H entre 53 y 61 km/s/Mpc. Se discute la posibilidad de que Cefeidas con diversa composición química tengan brillo diverso aun con períodos idénticos, y esto modificaría las estimaciones de distancia en forma todavía no conocida.

Distancias mayores se calculan por el brillo de supernovas de tipo Ia, debidas a transferencia de masa sobre una enana blanca en un sistema doble: al excederse el límite de Chandrasekhar (1,4 masas solares), la enana blanca se contrae catastróficamente para dar lugar a una estrella neutrónica, y la explosión subsiguiente debe alcanzar una luminosidad máxima de magnitud absoluta constante. Pero, aun así, no es totalmente cierto que todas estas supernovas ocurran exactamente igual (puede haber diferencias por la composición química y por el ritmo de acreción de masa), ni es fácil observar el momento de máxima luminosidad cuando su aparición es totalmente aleatoria en cada galaxia, y no ocurre sino muy infrecuentemente.

El tamaño angular de nebulosas planetarias es otra indicación de distancia, así como el de regiones de Hidrógeno ionizado brillante (regiones H II), que parecen tener un diámetro medio constante de una galaxia a otra del mismo tipo. Ambos métodos son utilizables hasta distancias de poco más de los 100 millones de años-luz, un radio dentro del cual hay grandes concentraciones de masa cuyo influjo gravitatorio no es conocido exactamente: el "Gran Atractor" se sitúa a mayor distancia.

También son indicadores indirectos los restos de supernovas tipo II, en que una estrella de gran masa sufre el colapso gravitatorio cuando su núcleo de Hierro excede la masa de Chandrasekhar. La determinación de su espesor por la radiación emitida y el cambio aparente de diámetro permite deducir la velocidad de expansión, y el diámetro real, del cual se deduce la distancia.

En cúmulos y supercúmulos lejanos es posible recurrir a la relación de Tully-Fisher para galaxias espirales: su Luminosidad absoluta es proporcional a la cuarta potencia de la velocidad de rotación inferida del efecto Doppler de su periferia (para objetos vistos parcialmente de canto), porque la producción de energía es proporcional al contenido de estrellas, y la masa total de la galaxia determina la velocidad orbital de sus componentes. Todavía es necesario recurrir a medidas más indirectas, de tipo estadístico, cuando se trata de cúmulos remotos, donde se supone que la galaxia más luminosa, o la segunda más luminosa, debe tener un magnitud absoluta prácticamente constante.

Márgenes de error en exceso del 20% son de esperar en estos últimos casos, sobre todo por efectos poco conocidos de evolución de galaxias individuales y de encuentros y fusiones en cúmulos densos. Relaciones diversas pueden usarse con galaxias elípticas, donde la "granularidad" de su imagen es tanto menor cuanto mayor es la distancia real.

Parece, recientemente, que las discrepancias en la determinación de H van siendo menores, con una tendencia a valores comunes de unos 65 km/s/Mpc. Esta cifra da lugar a edades cósmicas con muy poco margen para aceptar las edades de las estrellas más evolucionadas en cúmulos globulares, aunque es posible que algunos ajustes del cálculo de procesos estelares lleve a un resultado compatible. Es, con todo, demasiado prematuro el acudir a tales revisiones mientras no se obtengan distancias fiables, con márgenes de error inferiores al 10%, a galaxias mucho más lejanas. Esperamos que esto se consiga relativamente pronto con los datos del telescopio espacial y de los grandes telescopios actualmente en construcción en Hawaiki, Chile y Arizona.

Podemos confesar, como consecuencia de lo expuesto, que todavía no tenemos una cifra de la constante de Hubble aceptada comúnmente. Esto presenta de nuevo el problema ya encontrado por Hubble: el Universo parece más joven que algunos de sus componentes. Si bien la discrepancia de edad ha sido reducida en los últimos años, todavía hay otros factores que podrían acentuar la paradoja, si las medidas de densidad nos indican que la expansión ha ocurrido a ritmo notablemente diverso en las épocas primitivas. Esto mismo influirá en las predicciones de evolución futura, que se verá afectada igualmente por la presencia o ausencia de una posible "constante cosmológica": una posible fuerza repulsiva radicada en el vacío físico intergaláctico, que tendería a acelerar la expansión, implicando también su menor velocidad en el pasado.

DENSIDAD DEL UNIVERSO

Como queda indicado, el considerar la velocidad de expansión como inferior, igual o superior a la velocidad de escape exige conocer cuál es la densidad real del Universo. Diversas consideraciones entran en juego para entender propiamente el llamado "problema de la deficiencia de masa", a veces confundido con la búsqueda de materia oscura.

La densidad obtenida del recuento de estrellas y nubes cósmicas en una galaxia normal nos da solamente del 1 al 2 % de la densidad crítica para valores razonables de H . Pero el cálculo de masa gravitatoria para justificar las órbitas de estrellas y nubes periféricas nos exige aceptar que una cantidad del orden de 10 veces más masa existe en forma indetectable en la Vía Láctea y en muchas otras galaxias: la velocidad orbital no decrece como función del radio aun para nubes exteriores al disco visible. Esta masa, posiblemente en la forma de objetos masivos oscuros en el halo (MACHOS), ha sido detectada recientemente por fenómenos transitorios de lente gravitatoria, pero en cantidad inferior a la esperada, e insuficiente para resolver el problema de su naturaleza.

En forma más directa, el movimiento de las Nubes de Magallanes alrededor de la Vía Láctea es otra prueba de que nuestra Galaxia contiene una masa invisible que supera a la estelar al menos en un factor de 10x.

Suponiendo que esta proporción es típica de la mayoría de las galaxias, tendríamos una masa visible y gravitatoria del orden de un 20% del valor crítico. No es necesario, sin embargo, que tal masa sea comprobada con tipo alguno de telescopio: su presencia se infiere con certeza de los cálculos de

órbitas según las leyes de Kepler. En cuanto a su naturaleza, puede consistir en estrellas de muy poco brillo, "enanas marrones" que no alcanzan a producir energía por reacciones nucleares, planetas semejantes a Júpiter, enanas blancas y agujeros negros de generaciones estelares primitivas, o partículas elementales más o menos hipotéticas.

Agujeros negros en el núcleo de diversas galaxias se infieren de las velocidades de estrellas próximas al centro, sobre todo con medidas del telescopio espacial. En la gigante elíptica M 87, en Virgo, tal agujero negro debe superar los 3.000 millones de masas solares. La galaxia M 51, una gran espiral muy conocida, alberga también un agujero negro comparable, y otros de millones de masas solares se infieren en M 32 (galaxia elíptica satélite de Andrómeda) y en el centro de nuestra Vía Láctea. Objetos semejantes es muy probable que se den en casi todas las galaxias.

La velocidad media de galaxias en grandes cúmulos es también una indicación de la masa total, necesaria para que el cúmulo no se disgregue en períodos de tiempo comparables con la edad, aun en su valor mínimo, del cúmulo y del Universo. Se obtienen así estimaciones que pueden alcanzar hasta el 80% de la masa crítica, extrapolando los casos más extremos a todos los demás cúmulos. En algunos casos se detecta gran cantidad de masa no estelar en nubes intergalácticas emisoras de rayos X, a temperaturas de millones de grados; su permanencia en el cúmulo exige también suficiente masa gravitatoria. En otros, el movimiento de radiofuentes deja una estela que indica claramente la existencia de un medio invisible, aunque sea difícil estimar su densidad y masa total, así como su composición.

Más recientemente, la detección de lentes gravitatorias ha permitido calcular la masa de cúmulos de galaxias cuya gravitación da imágenes múltiples de objetos lejanos, o distorsiona en arcos concéntricos otras galaxias a enormes distancias del cúmulo. Este método también afecta otras estimaciones de abundancia de masa en las regiones más distantes: de ser elevada la densidad media, o de existir una constante cosmológica de valor suficiente para afectar notablemente la expansión, cabría esperar un número mayor de casos de lentes gravitatorias.

Hasta aquí, podemos decir que los cálculos tienen refrendo experimental, aun si datos discrepantes han llevado a considerar la posibilidad de que la masa total sea inferior a la sugerida: algunos cúmulos podrían no ser estables, por encontrar en ellos galaxias con curvas de rotación que solamente implican la masa visible. Sería lógico dar por zanjada la cuestión y admitir un Universo de muy poca densidad como consecuencia, con la connotación deseable de una edad suficiente para la evolución estelar. Pero por razones teóricas que se basan en modelos de unificación de fuerzas y de crecimiento inflacionario en los primeros instantes del Big Bang, se mantendría la exigencia de que la densidad sea exactamente igual a la crítica.

De admitirse tal presupuesto, es necesario encontrar "la masa que falta", y sugerir su composición de tal modo que pueda explicarse por qué no es observable y por qué el cálculo de reacciones nucleares primitivas solamente conduce a predicciones correctas de la abundancia de He si no se excede la densidad de masa conocida en formas normales de la materia (masa bariónica, compuesta de protones y neutrones). Es, sin embargo, necesario el subrayar que ninguna de estas teorías de unificación, ni de crecimiento inflacionario, tiene refrendo experimental alguno; también es importante que ninguna teoría plausible propone una densidad superior a la crítica.

La sugerencia menos radical busca neutrinos con masa. Se calcula que el número de estas partículas excede por un factor de unos 100 millones el número de bariones, y constituirían la forma predominante de masa si tuviesen aun solamente una cienmilésima de la masa del electrón. Al mismo tiempo, neutrinos con masa serían inestables con respecto a los tres tipos diversos que se asocian al electrón, el muón y el electrón tau: espontáneamente se transformarían de uno a otro, con la consecuencia deseable de poder explicar el número reducido de neutrinos solares detectados en diversos experimentos desde hace más de veinte años, problema también considerado desde el punto de vista de la estructura y evolución del Sol, pero sin solución cierta hasta el presente. Todavía no hay datos experimentales comprobados acerca de esta posible masa mínima del neutrino, equivalente

a unos 5 electrón-voltios de energía; de establecerse con certeza, los neutrinos tendrían una masa total por lo menos del 50% de toda la masa bariónica, y nos encontraríamos con un Universo de densidad crítica.

Otras partículas propuestas son puramente hipotéticas: WIMPS (Weakly Interacting Massive Particles, o partículas masivas de interacción débil), y otras como "axiones", "gravitinos", etc. Todas tienen en común la falta casi total de interacción con la materia ordinaria excepto por su contribución a la masa gravitatoria del Universo. Solamente en aceleradores de una energía técnicamente impensable cabría esperar alguna confirmación experimental de su existencia, y la misma base teórica para postularlas es muy discutible: no hay un consenso acerca de cuál de las propuestas merece más atención, aun después de bastantes años de discusión desde diversos puntos de vista.

Alternativas que se basan en el desacoplar las diversas fuerzas en los primeros instantes del Universo (del tiempo de Planck, 10^{-44} s, al fin del período de inflación) sugieren irregularidades en la estructura misma del espacio (deformaciones topológicas masivas), llamadas "monopolos magnéticos", "cuerdas cósmicas" y "paredes de dominio", según su dimensionalidad. En todo caso serían estructuras de gran masa, pero inobservables excepto por su efecto de servir de semilla de supercúmulos de galaxias o de causar irregularidades en la intensidad y temperatura de la radiación de fondo cósmico. Las recientes medidas del satélite COBE parecen descartar las paredes de dominio, y tal vez también las cuerdas cósmicas. Un posible caso de detección de un monopolo magnético hace unos 15 años continúa inexplicado y sin confirmación subsiguiente.

No es posible utilizar ninguna de estas propuestas como solución al requerimiento de que el Universo tenga exactamente la densidad crítica, sobre todo teniendo en cuenta que tal exigencia brota de una teoría (Universo inflacionario) que no tiene confirmación independiente. Pero es de notar que ninguna teoría con visos de ser físicamente plausible lleva a una densidad mayor que la crítica, que sería necesaria para frenar la expansión de las galaxias y causar el colapso. Es legítimo, por tanto, afirmar que todos los datos experimentales que hoy poseemos, así como todas las teorías seriamente discutidas en la actualidad, llevan a predecir un Universo que se expande indefinidamente, aunque no sepamos con exactitud su tasa de frenado con el tiempo.²

La insistencia en buscar razones para una eventual detención y colapso de las galaxias tiene su razón de ser, implícita o explícita, en el deseo de presentar como posible un Universo cíclico, autoregenerado en una nueva explosión después de la contracción final. Así se espera poder evitar los problemas metafísicos de un comienzo por creación y de una destrucción total de estructuras.

EVOLUCIÓN DE UN UNIVERSO CERRADO

Aunque la hipótesis de un colapso futuro no tiene apoyo experimental ni teórico, su repetida exposición como alternativa científicamente plausible exige discutir brevemente sus implicaciones.

Si la masa real del Universo tiene suficiente atracción gravitatoria para frenar totalmente las galaxias, debe llegar un momento en que su movimiento cambia de signo, y tendremos un corrimiento al azul de sus espectros, indicando que se acercan unas a otras. Por la velocidad finita de la luz, se podría observar el corrimiento al azul en cúmulos cercanos, mientras la luz de los más lejanos nos indicaría aún el corrimiento al rojo, muy reducido en magnitud, de las épocas previas. Con el paso del tiempo,

Es de notar que la presencia de 100 millones de fotones por cada barión se atribuye a la mutua destrucción de partículas y antipartículas en los primeros momentos del Universo. Su masa equivalente debe ser, en consecuencia, millones de veces superior a la de toda la materia bariónica, cosa que no encaja con las estimaciones de la masa contribuida por toda la radiación en el espacio (una mínima fracción del 1% de la densidad crítica), y que es incompatible con la misma expansión del Big Bang.

la velocidad de contracción iría en aumento, llevando a choques y coalescencia de supercúmulos, hasta fundirse galaxias y estrellas en grandes masas incandescentes, donde la temperatura llegaría a deshacer todas las estructuras, incluso de nivel atómico. Finalmente se produciría el colapso de todas las masas sobre un único volumen arbitrariamente reducido dentro del horizonte de sucesos de un agujero negro: una "singularidad" que no puede ser descrita por las leyes físicas.

Una impresión superficial lleva con frecuencia a decir que este "reverso del Big Bang" implica un cambio en la dirección del tiempo. Se cae así en el error de suponer que los procesos físicos constituyen el tiempo, y que dos instantes que muestran las mismas posiciones y movimientos de todas las partículas constituyen el mismo momento, repetido en dos series temporales de dirección opuesta. La lógica nos dice, por el contrario, que los movimientos y cambios materiales ocurren en el tiempo y con el tiempo, pero no lo constituyen: en el mismo intervalo temporal coexisten movimientos de diverso ritmo, con una simultaneidad que nos permite usar un movimiento (de un tipo de reloj) para referir a él otros muchos de diversa duración y velocidad. No es correcto afirmar un mero "dar marcha atrás a la película" de la evolución cósmica: procesos irreversibles, de emisión de energía por ejemplo, no tienen posible razón física de volver al estado original, pues no hay modo de capturar y comprimir la energía dispersa para volver a constituir las partículas o átomos que la produjeron.

Tampoco se da simetría en la condensación con respecto a la expansión del Big Bang: al principio del Universo todo el espacio existente era el espacio sobrecargado de energía y partículas, que podía expandirse, incluso a velocidades superlumínicas, arrastrando consigo las masas que todavía hoy se alejan dentro de un volumen siempre creciente de espacio con energía más y más diluida. No era la explosión un brotar de los confines de un agujero negro hacia un espacio exterior vacío, pues éste no existía. En cambio, en el supuesto colapso futuro, se parte de un espacio enormemente vacío, donde las galaxias se moverían por fuerzas gravitatorias para formar un agujero negro, rodeado todavía de ese espacio; un "horizonte de sucesos", con su radio de Schwarzschild, separa inevitablemente ambas regiones. No es aplicable la deceleración, que detiene a las galaxias, a los fotones de la radiación, de origen diverso: se mueven siempre a la velocidad de la luz, sin frenado o parada posible. Ni es claro cómo el espacio mismo debe contraerse por el simple hecho de que las galaxias se acerquen mutuamente, aunque esto cambie la curvatura local que define el campo gravitatorio en cada región.

Una vez formado un agujero negro a partir de un espacio pre-existente, ninguna ley física conocida o sospechada permite un rebote explosivo, un nuevo Big Bang que haga que el Universo renazca de sus cenizas. Solamente la lentísima "radiación de Hawking", sintetizando pares de partículas y antipartículas a partir de la energía del campo gravitatorio, puede permitir la evaporación del agujero negro en tiempos que desafían el cálculo cuando se trata de toda la masa del Universo; tal proceso no podría dar lugar a ningún Big Bang, sino a partículas sueltas en un vacío inimaginable. Todo lo expuesto es aplicable aun en el supuesto, casi de ciencia ficción, de que hubiese un "agujero de gusano", un túnel que conectase nuestro agujero negro con otro universo ficticio donde la materia reapareciese instantáneamente: lo haría en una condición de extrema densidad que volvería a constituir necesariamente un agujero negro.

Siempre es posible afirmar que puede haber leyes físicas desconocidas que permitan el rebote explosivo a partir del agujero negro final, poniendo en ellas la esperanza ciega de un universo cíclico que renace de sus cenizas indefinidamente. No es ya una hipótesis científica, basada en datos y en extrapolación de hechos y leyes conocidas, sino una esperanza -tal vez respondiendo al terror de una destrucción final que parece absurda- que se utiliza como recurso en contra de la ciencia. Pero deben evaluarse las consecuencias aun de esa hipótesis, por gratuita que sea.

En un posible rehacerse del Universo, no es claro que las constantes físicas y las leyes de la naturaleza deban mantenerse inmutables: ya hemos visto que las teorías de universos múltiples, simultáneos o sucesivos, sugieren conjuntos distintos de parámetros, incluso de dimensiones, para cada uno de ellos. De tomarse este punto de vista, ninguna discusión es posible acerca de su comportamiento. En la suposición menos extrema, en que solamente hay un reciclaje de materia

normal, es necesario tener en cuenta que la energía producida en la evolución estelar, a partir de la masa, no es recuperable en el colapso, y la expansión del nuevo ciclo se dará en un espacio ya existente con restos energéticos del ciclo anterior. Crece, por tanto, la entropía en ciclos sucesivos, hasta que el universo termina siendo abierto y en expansión indefinida.

Tampoco es posible admitir un número infinito de ciclos previos al presente: la actual entropía solamente puede permitir un número finito de expansiones y contracciones en el pasado, como ya indicaron Tolman (hace más de 60 años), Novikov y Zeldovich, Dicke y Peebles. Tanto el comienzo como el final del Universo vuelven a aparecer como consecuencia ineludible de las leyes físicas, que no permiten ningún proceso que se mantiene eternamente.

El intento más reciente y divulgado de conseguir un universo eterno, autocontenido, siempre repetido, se debe a Stephen Hawking, que lo popularizó en su libro "La Historia del Tiempo". Tomando como punto de partida la suposición de que no debe haber "singularidades" ni al principio ni al fin de la evolución cósmica, Hawking describe matemáticamente un universo cíclico, eterno, cuyo desarrollo se da en un "tiempo imaginario" que permite solucionar las ecuaciones de la Relatividad sin caer en agujeros negros finales ni exigir situaciones no calculables en los comienzos.

No dice el autor por qué debe darse físicamente la contracción futura, en contra de los datos ya expuestos de densidad inferior a la crítica; tampoco explica el significado físico del tiempo imaginario. En un momento de sinceridad científica confiesa que el introducir tal variable constituye un truco matemático, y que si en el tiempo imaginario se evita un principio, en el tiempo real hay que admitir que el Universo tuvo un comienzo. Sus sugerencias filosóficas, que cuestionan la necesidad de un Creador para un Universo eterno, muestran que su concepto de creación apenas es más que la búsqueda de una causa física más profunda; él mismo se admira también de que haya en realidad un Universo que corresponde a las ecuaciones, y no puede explicar el que así sea.

El Principio Antrópico afirma que todo el Universo está finísimamente ajustado para que aparezca la vida inteligente, pero la evolución cósmica nos asegura que luego todo se destruye sin remedio. El deseo de evitar tal absurdo lleva, a quienes no tienen mejor perspectiva filosófica, a pedir angustiosamente que no sea verdad que todo se destruye, sino que vuelve a renacer de sus cenizas.

Pero el absurdo se mantiene: ciclos, aun eternos, de estructuración y destrucción solamente repiten sin término la pregunta del "por qué" y "para qué", y si un ciclo sin respuesta parece absurdo, todavía lo es más el admitir que el mismo proceder ilógico eternamente se repite sin que pueda encontrarse la respuesta en ninguna ecuación de la Física, ni aplicada al pasado, ni a un futuro de evolución sin progreso ni desenlace inteligible..

UNIVERSOS ABIERTOS

Aceptando la insuficiencia de masa para frenar la expansión y provocar el colapso, tenemos que describir el futuro del Universo en un tiempo ilimitado, extrapolar las leyes y procesos físicos hacia épocas arbitrariamente lejanas: no se trata meramente de un "fin del mundo" concerniente a la existencia humana o a las condiciones de habitabilidad de la Tierra, sino a llevar a todos los procesos físicos, macro y microscópicos, a sus últimas consecuencias calculables, aunque el cálculo sea con márgenes de error cada vez de mayor amplitud.

La evolución del Sol, actualmente en el punto medio de su carrera, debe continuar durante unos 5.000 millones de años más hasta desembocar en la fase de Gigante Roja, con una luminosidad de cientos de veces la actual y un radio que excederá el de la órbita de Mercurio y, probablemente, el de la órbita de Venus. En esa época ya no habrá condiciones de vida en ningún planeta o satélite del sistema solar, y todos los cuerpos cercanos al Sol perderán los materiales volátiles que constituyen océanos y atmósferas. Cálculos más exactos prevén que la temperatura terrestre será incompatible con la vida mucho antes, tal vez ya en una época dentro de 500 millones de años (tiempo comparable al de la existencia de vivientes pluricelulares en nuestro planeta); la pérdida de masa del Sol en sus

fases finales producirá un aumento del radio orbital de la Tierra y el planeta no quedará englobado dentro del radio solar.

De existir entonces la especie humana podría pensarse en una posible solución por una tecnología tan avanzada que permitiese desplazar a la Tierra de su órbita o bloquear de algún modo una parte importante de la radiación solar. Otros factores astronómicos, como el impacto de cuerpos semejantes a los que causaron grandes extinciones en el pasado, son muy probables en tiempos del mismo orden, aunque es posible concebir tecnologías que permitan proteger a la humanidad en un caso semejante. No ocurre así con el final necesario de la producción de energía solar.

Otras estrellas agotarán también sus combustibles nucleares y, aunque parte de sus materiales se recicle, llegará el momento en que ya no lucirán estrellas. Dentro de unos billones de años el Universo será oscuro y frío, con un volumen millones de veces mayor que el actual, y distancias típicas entre cúmulos de galaxias oscuras comparables a las dimensiones del Universo que hoy conocemos. Un hipotético superviviente en cualquier galaxia, aun con los telescopios más potentes, apenas podría divisar algunas galaxias lejanísimas por la radiación correspondiente a temperaturas de solamente milésimas de grado sobre el cero absoluto.

Multiplicando por un millón esas edades futuras, en cada galaxia sin luz ni calor seguirán sus órbitas las estrellas muertas, con su planetas helados. Y aunque las distancias entre estrellas son tan enormes comparadas con su propio diámetro, dado tanto tiempo habrá encuentros que perturben las órbitas: en tal caso, uno de los cuerpos debe salir despedido hacia el espacio intergaláctico, mientras otro se precipita hacia el centro de la galaxia. Así llegarán a formarse grandes agujeros negros centrales, con la masa de un 10% de cada galaxia, rodeados de un halo de estrellas oscuras, tal vez todavía acompañadas de sus planetas.

Multiplicando de nuevo por un millón el tiempo transcurrido, la pérdida de energía por radiación gravitatoria³ llevará a todos los cuerpos, aún en órbita, a caer sobre el centro de masa del sistema, con choques que fugazmente producirán destellos de luz y calor a partir de los cadáveres estelares. Estamos ya a un cuatrillón de años del Big Bang (10^{24}), y grandes agujeros negros super-galácticos marcan el fin de los cúmulos y supercúmulos, tan inmensamente distantes que el tamaño del Universo actual es insignificante en comparación .

Si las teorías de unificación de fuerzas son correctas, el protón, constitutivo básico de la materia, es inestable y se desintegra con un vida media que asegura su desaparición cuando haya transcurrido un trillón de trillones de años (10^{36}). Solamente quedarían electrones positivos y negativos, neutrinos y radiación tenuísima, mientras la expansión del espacio continúa diluyendo el contenido de masa y energía de cada unidad de volumen. Finalmente, la radiación de Hawking, en que pares de partículas y antipartículas se sintetizan a partir de la energía del campo gravitatorio de un agujero negro, lleva a la desaparición de todos los agujeros negros cuando la edad del Universo en años se escriba con la unidad seguida de 100 ceros. Tal vez se encuentre un electrón en el volumen ocupado ahora por una galaxia, y la temperatura del espacio seguirá acercándose más y más al cero absoluto, sin alcanzarlo nunca exactamente debido a los efectos cuánticos aun del espacio físico vacío de partículas y ondas electromagnéticas.

Nada puede predecir la Física que cambie este final desolador, aunque el acervo total de masa y energía siga existiendo, y el vacío, con su posible actividad indetectable, todavía establezca la

Según la Relatividad General, todo movimiento acelerado, como el de cuerpos en órbita, implica una distorsión espacial cambiante, que exige un gasto energético continuo, cuya fuente es la energía de movimiento. Consecuentemente, aun en ausencia total de roces, la órbita decae. Un pulsar doble, con sus componentes muy próximos, muestra este efecto tal como lo predijo Einstein.

diferencia básica entre la etapa final y la nada "anterior" al Big Bang con que comenzó la historia cósmica. La historia total del Universo aparece, científicamente, como única en su transcurso de un tiempo irreversible.

¿ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS?

La insatisfacción humana ante las descripciones meramente físicas de la realidad lleva a suponer, aunque solamente como ciencia-ficción, un control tecnológico futuro que permita cambiar el curso evolutivo del Universo, al menos en una escala limitada pero suficiente para la supervivencia humana.

Tal vez con una ingeniería que permita extraer energía de agujeros negros, o recoger gases difusos para formar nuevas estrellas, o sustituir las estructuras biológicas por otras inmunes al vacío y el frío, como super-ordenadores donde se encerraría la cultura y la personalidad de cada individuo humano.

Sueños más fantásticos llegan a sugerir la posibilidad de frenar la expansión artificialmente, para obligar a la materia a reciclarse en un nuevo Big Bang, tal vez de ámbito más reducido. Quienes tienen una confianza ciega en el continuo desarrollo de la ciencia y en la capacidad del Hombre para controlar la naturaleza, se niegan a aceptar un final de irremediable destrucción y muestran una certeza inamovible de que el progreso científico sabrá siempre encontrar alguna salida aceptable.

Pero el Hombre no ha tenido la iniciativa para su existencia individual o como especie, ni menos aún para la existencia del Universo, en el que aparece en un momento dispuesto por la evolución según leyes físicas independientes de su voluntad o tecnología. Son estas mismas leyes, descubiertas, no impuestas, las que producen los fenómenos descritos en la evolución futura, ante la cual todos nuestros sueños y esfuerzos aparecen solamente como gritos de un niño ante la furia de un volcán o la esterilidad de un desierto de nieve polar. Podemos esperar mucho de nuestro desarrollo, pero siempre nos faltará la capacidad de crear lo que no existe, y toda nuestra tecnología tiene que usar la materia para transformarla con energías extraídas de ella misma: un proceso que siempre tiene pérdidas de eficiencia y lleva, tarde o temprano, al final que hace imposible nuestra supervivencia.

Manuel M. Carreira, S.J., Ph.D.