

CONCEPCIÓN FÍSICA CONTEMPORÁNEA DEL UNIVERSO

ALBERTO CHAMORRO BELMONT

Departamento de Física Teórica e Historia de la Ciencia
Universidad del País Vasco

1. INTRODUCCIÓN:

Las bases de la cosmología generalmente aceptada en la comunidad científica actual son: 1) Las observaciones astrofísicas; 2) El principio cosmológico; 3) La relatividad general; y 4) La teoría de las partículas elementales y campos cuánticos. La primera de ellas es experimental, como siempre es el caso con cualquier ciencia de la naturaleza, las otras tres son teóricas. Hace más de tres siglos, Pascal expresaba su asombro ante el universo insondable con las palabras: *"Cuando miro en la noche a los cielos siento pavor y temblor"*. Cuando, con los medios actuales, el astrónomo escruta los cielos descubre una variedad de curiosos objetos: planetas, estrellas, púlsares, galaxias, cuásares, cúmulos, supercúmulos, ... Dada las magnitudes en juego, la emoción que estas percepciones despiertan en muchos de los observadores modernos no debería estar lejos de la profundidad de los sentimientos que invadían al gran pensador francés.

La descripción del Universo, tal y como hoy lo observamos, es el objeto de la Cosmografía. La sección que sigue versará brevemente sobre ella.

2. COSMOGRAFÍA:

El sol es la estrella más cercana a nosotros (unos $15 \cdot 10^7$ km) y no es sino una estrella de tamaño mediano de las 10^{11} estrellas que pertenecen a nuestra galaxia, la Vía Láctea. Una esfera que contuviese justamente a la Tierra en su centro y a la Luna orbitando en su superficie tendría el tamaño típico de una estrella pequeña. El número 10^{11} es del orden del número de cabezas de alfiler que llenarían una habitación de 5 m x 5 m x 5 m. La distancia media entre estrellas en una galaxia es de unos 10 años-luz. Una galaxia típica tiene dimensiones lineales del orden de $3 \cdot 10^4$ años luz. A la escala que asemeja una estrella a una cabeza de alfiler, la distribución de estrellas en una galaxia se correspondería con cabezas de alfiler esparcidas a distancias de unos 50 km entre cada dos de ellas más cercanas. A esta misma escala, nuestro sistema solar, con todos sus planetas, cabría en una esfera de unos 10 m de diámetro. Con los modernos sistemas de observación podemos

ver unas 10^{11} galaxias, y la distancia mínima entre galaxias es de $3 \cdot 10^6$ años luz. Monedas de 25 pts esparcidas de metro en metro representarían, a escala, el tamaño y distancias típicas de las galaxias en el universo visible. En este modelo, las galaxias observadas más lejanas de la nuestra serían monedas a unos 2,5 km y los cuásares (núcleos galácticos muy activos) más distantes corresponderían a monedas situadas a más de 10 km. Los cúmulos son agrupaciones de galaxias ligadas por sus respectivas atracciones gravitatorias. Un cúmulo puede tener desde sólo dos galaxias hasta unas diez mil de ellas. Los cúmulos ricos en galaxias tienden a su vez a agruparse en grupos de ellas llamados supercúmulos. Las dimensiones de estos son del orden de 50 Mpc. Los supercúmulos mayores podrían contener hasta 10^5 galaxias. Nuestra propia galaxia pertenece al llamado supercúmulo local, que incluye lógicamente el cúmulo al que pertenece ella misma, llamado el grupo local de galaxias. El supercúmulo local tiene forma de una especie de tortilla elipsoidal de unos 15 Mpc de eje mayor y 1 Mpc de espesor. Nuestra galaxia se encuentra cercana al borde de este sistema metagaláctico.

Entre los supercúmulos se encuentran enormes regiones prácticamente vacías de galaxias llamados "vacíos". Estos vacíos pueden alcanzar dimensiones de 100-200 Mpc. En los últimos decenios se ha llegado a la convicción de que la materia luminosa del Universo parece distribuirse al modo de las celdas de un panal de miel, donde las galaxias están situadas en las paredes y los huecos de las celdas corresponden a los "vacíos". Hay alrededor de un millón de estas celdas en el inmenso panal que constituye el universo visible. Parece que esta estructura es repetitiva, con notable uniformidad, de tal modo que cuando se consideran diferentes regiones de dimensiones de unos 500 Mpc la densidad media de galaxias resulta ser prácticamente constante, así como las características físicas globales de estos enormes espacios vacíos y ello independientemente de la dirección del espacio en que observemos el Universo. Es este hecho el que fundamenta el mencionado *principio cosmológico*, según el cual el Universo, a gran escala, es homogéneo e isotrópico.

3. EL MODELO STÁNDAR DEL UNIVERSO:

El modelo de universo al que la Cosmología asentada en las bases citadas en la sección 1 ha conducido, se conoce con el nombre de modelo estándar o del *big bang* caliente, por razones que luego veremos.

El éxito que ha tenido el modelo estándar se justifica por los hechos que explica teóricamente. Los principales son:

1. La ley de expansión del universo, descubierta por Hubble en 1929, según la cual las galaxias o cúmulos se alejan entre sí a velocidades dadas por la relación $v = H_0 \cdot d$, donde d es la distancia entre galaxias y H_0 la constante de proporcionalidad, llamada constante de Hubble, tiene un valor entre 60 y 75 $\text{km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$.
2. La radiación de fondo de microondas (RFM) de 2,73 K de temperatura, predicha por Alpher, Bethe y Gamow, descubierta por Arno Penzias y Robert Wilson en 1965. El espectro de esta radiación es el que corresponde a un cuerpo negro, y se supone que se produjo en la fase de recombinación del hidrógeno, cuando la temperatura de la materia en el Universo era de unos 3000 K, y la materia, que entonces tenía una densidad muy superior a la actual, se hizo "transparente" para la radiación. La gran isotropía de esta radiación es quizás el más fuerte apoyo al principio cosmológico. Sin embargo, en 1992, el radiómetro diferencial de microondas del satélite COBE de la NASA ha detectado un pequeña anisotropía en la radiación de

fondo, que ya había sido prevista por Sachs y Wolfe en 1967, y que se interpreta como la huella que las fluctuaciones de densidad, que fueron el germen de la estructura del Universo en galaxias, cúmulos y supercúmulos, dejaron en la RFM en la época en que ésta se independizó de la materia.

3. La observada abundancia de los núcleos ligeros ^4He , ^2H , ^3He y ^7Li en el Universo. Según el modelo estándar hubo una época, la de la nucleosíntesis, en la que el Universo era como un reactor nuclear de fusión sintetizando núcleos ligeros a partir de protones y neutrones. Cálculos astrofísicos detallados, basados en medidas actuales, dan unos resultados para las cantidades relativas con que fueron producidos en la nucleosíntesis primordial estos mismos elementos que concuerdan muy satisfactoriamente con los que cabría esperar a partir de la teoría del big bang. La cuestión es particularmente importante para el ^4He dada su alta concentración cósmica actual y primordial -alrededor del 24 % en masa para la última- y además porque la abundancia cosmológica del ^4He está relacionada a través de la nucleosíntesis con el número de neutrinos diferentes, N_n , que existen en la naturaleza. Esta relación cosmológica predice que $N_n \leq 3$, lo que limita las familias neutrónicas a las conocidas n_e , n_μ , n_τ . Esencialmente el mismo resultado para N_n ha sido obtenido de experimentos realizados en 1990 con aceleradores de partículas.

Existe un valor crítico r_0 para la posible densidad de masa actual en el Universo, del orden de 10^{-29} g/cm^3 , de gran significación. La presente densidad de masa del Universo, r , no ha podido ser determinada aún con exactitud debido a que lógicamente sólo vemos la materia luminosa, pero existen razones que apuntan a que el Universo contiene materia oscura de la que muy probablemente aún no hemos detectado la mayor parte. Estudios de las órbitas de estrellas periféricas en galaxias prueban que la masa total de éstas es bastante mayor que la que cabría esperar de la suma de sus estrellas y posibles sistemas planetarios.

Consideraciones dinámicas similares sugieren que la masa de los cúmulos de galaxias es mayor que la suma de las galaxias que los componen. Parte de esta masa ha sido detectada como un gas muy caliente que emite rayos X. Teniendo en cuenta la masa de éste y la materia luminosa se obtiene una densidad media del orden de 10^{-30} g/cm^3 . Pero puede haber mucha más materia oscura aún no detectada debido a polvo y estrellas intergalácticas, estrellas ya apagadas, rocas, agujeros negros, como parece que podrían existir en los núcleos de muchas galaxias, neutrinos masivos, si fuera el caso que estos fermiones tienen una pequeña masa, e incluso otras partículas más exóticas, como *monopolos magnéticos*, *fotinos*, *gravitinos*, *bosones de Higgs* y *axiones*, cuya existencia es predicha por las modernas teorías de partículas elementales. Si resulta que $r > r_0$ el modelo estándar nos dice que la geometría del Universo sería *elíptica*: la suma de los ángulos de un triángulo excedería el valor euclidiano de 180° y la expansión del Universo se detendría alguna vez y comenzaría la reconcentración. Topológicamente, el Universo sería cerrado, con una curvatura espacial positiva, análogamente a lo que ocurre bidimensionalmente con una superficie esférica, que es finita pero no tiene límites. Si fuese $r = r_0$ la geometría del espacio tridimensional sería *euclídea*. La expansión sería cada vez más lenta acercándose indefinidamente a cero sin detenerse nunca. Viviríamos en un Universo abierto, de curvatura espacial nula, al igual que ocurre en un plano. Si tuviéramos $r < r_0$ la geometría sería *hiperbólica*: la suma de los ángulos de un triángulo sería menor que 180° . La expansión se ralentizaría acercándose a un valor constante, sin jamás detenerse. El espacio también sería topológicamente abierto, pero curvo, con curvatura negativa. Quizás en los próximos años, los datos que se obtengan desde las estaciones de observación espacial actualmente en órbita alrededor de la Tierra y otras que se lancen, nos permitan decidir cuál de las geometrías y modos de evolución que

hemos mencionado son los que corresponden a nuestro Universo. De hecho, mencionaremos más adelante, en la sección 7, cómo un descubrimiento realizado en 1998 podría, sin embargo, modificar drásticamente estas perspectivas.

Las diversas variantes del modelo estándar tienen en común su consideración del actual estado del Universo como resultado de una evolución desde anteriores estados más densos y calientes cuanto más remotos en el tiempo. Extrapolando acríticamente hacia el pasado los correspondientes modelos matemáticos se llega a un estado inicial en que la densidad y temperatura eran infinitas y, por así decirlo, toda la materia y energía estaba concentrada en un solo punto que entonces era todo el Universo. A esta situación se le llama singularidad inicial y es lo que se conoce también con el anglicismo de "big bang", por la imagen que transmite de que el Universo se produjo en una tremenda explosión inicial. Esto habría ocurrido hace unos 10^{10} años. Al llegar aquí, con objeto de salvaguardar al lector de algunos prejuicios que impregnan la cultura popular sobre este tema, conviene algunas palabras de cautela.

En primer lugar, en el momento presente ninguno de los modelos cosmológicos de que disponemos pueden válidamente ser extrapolados hasta el mismo *big bang*. En algún momento antes de alcanzar la singularidad inicial que ellos predicen, las condiciones físicas de densidad y energía de las partículas que constituyen el plasma cósmico son tan extremas que no es posible ignorar los efectos cuánticos debidos al campo gravitacional. Se puede hablar de esta época como la *era de Planck* y se ubica entre el "supuesto" big bang y unos 10^{-43} segundos después, cuando la temperatura era de unos 10^{32} K. Se piensa que entonces las cuatro fuerzas fundamentales que se conocen: la débil (responsable de la desintegración beta de los neutrones) la fuerte (que mantiene unidos a los protones en los núcleos atómicos) la electromagnética y la gravitatoria, estaban unificadas en una misma fuerza universal. Nuestro presente conocimiento científico no incluye, sin embargo, una teoría adecuada de esta fuerza universal, ni siquiera una teoría satisfactoria y acabada de una gravitación cuántica. Por tanto, nada fundado se puede decir hoy día sobre lo que ocurrió durante la era de Planck y en consecuencia tampoco si dicha era tuvo un comienzo, es decir, si realmente hubo un big bang. La teoría del big bang es una denominación para una importantísima teoría científica del Universo que, por lo que al big bang se refiere, significa sólo lo que decimos más arriba.

Pero veremos ahora que, aún dentro de la relatividad general, la cuestión de la inevitabilidad del big bang puede dudarse. Las soluciones de las ecuaciones de Einstein que describen la estructura geométrica del espacio-tiempo de un universo espacialmente homogéneo e isotrópico fueron obtenidas por primera vez en 1922 por Alexander Alexandrovitch Friedmann, físico matemático de San Petesburgo. Por ello, los modelos de universo basados en estas soluciones, tal como es el caso del modelo estándar, reciben el nombre de modelos de Friedmann. Los modelos de Friedmann del Universo implican que éste tuvo un comienzo, y no fueron aceptados sin resistencia desde el principio. El mismo Einstein los rechazó, pues creía que el Universo tenía que ser estacionario, no sujeto a la expansión. Einstein modificó su actitud un año después. Pero hubo otros que sospechaban que en las concepciones friedmannianas había una sumisión al misticismo religioso del que la Ciencia parecía haberse librado finalmente. El que Lemaître, un sacerdote y más tarde presidente de la Academia Pontificia del Vaticano, propusiera también en 1927, independientemente de Friedmann, modelos evolutivos homogéneos e isotrópicos para el Universo y que éstos fueran citados en encíclicas del papa Pío XII, pudo haber contribuido a las suspicacias de muchos científicos. Fue tras las observaciones de la recesión de las galaxias y de la RFM cuando la teoría basada en los trabajos de Friedmann y sus desarrollos posteriores se convirtió en la preferida de los cosmólogos. Posteriormente, los ingleses (1967 y 1970) Hawking y Penrose

probaron que las singularidades en el espacio-tiempo no son exclusivas de los modelos altamente simétricos, como lo son los de Friedmann, sino genéricas para todas las soluciones de las ecuaciones de Einstein que verifiquen una serie de condiciones consideradas como bastante razonables. Entonces la idea de la inevitabilidad de la singularidad inicial, impregnó también a la generalidad de la comunidad científica. Sin embargo, aparte de lo que se ha dicho anteriormente sobre los límites de la validez de la relatividad general, hemos de mencionar aquí que alguna de las hipótesis de los teoremas de Hawking y Penrose pudiera ser violada por ciertas soluciones cosmológicas que, por otra parte, fueran físicamente aceptables. Con esto podrían darse modelos cosmológicos sin big bang incluso en el contexto de la relatividad general clásica. En efecto, uno de estos modelos, que, por otras razones, no es apto para describir el Universo real, fue descubierto por el español Senovilla en 1990. Queda pues abierta la cuestión de si no será posible un día obtener, incluso dentro de la relatividad general, una descripción aceptable del cosmos sin big bang.

4. EL UNIVERSO PRIMITIVO:

En un principio todo debió ser inmensamente rápido y violento. Veamos, muy esquemática y simplificada, cuál pudo ser, de acuerdo con el conocimiento presente, la película de los hechos cósmicamente significativos a partir de la era de Planck. Hubo primero un cortísimo periodo de tiempo (del orden de 10^{-35} s) llamado *era de la Gran Unificación* porque entonces se aplicaba la teoría cuántica que unifica todas las fuerzas de la naturaleza salvo la gravitacional, que ya se independizó y se puede tratar clásicamente. Durante esta era existía un completo equilibrio entre la materia y la antimateria. Este equilibrio se rompe finalmente al ir bajando la temperatura resultando en la sopa cósmica una preponderancia de quarks sobre antiquarks que sería el origen de la descompensación que hoy apreciamos entre materia y antimateria. Sigue un periodo del orden de unos 10^{-12} s en el que las fuerzas nucleares fuertes se separan de las débiles y las electromagnéticas. Es el tiempo *electrodébil*. La temperatura ya es inferior a 10^{27} K y ya no hay energía suficiente para que se formen las partículas supermasivas X propias del tiempo de la Gran Unificación, pero se siguen produciendo los bosones W^+ , W^- y Z^0 , propios de la interacción electrodébil hasta que el universo se enfría por debajo de los 10^{15} K. Comienza entonces la *era hadrónica* en la que las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza adquieren la independencia con que hoy las percibimos. Desaparecen los quarks generándose a su costa los protones y neutrones y algunos mesones. Se produce pues una *transición de fase* al pasar la materia del estado quark al estado nucleón, formándose en el Universo unos 10^9 fotones por cada barión, que es la relación que se viene a tener hoy en el Universo. Hasta aproximadamente 1 segundo después de la era de Planck la abundancia de protones y de neutrones es prácticamente la misma. Pero entonces, ya a unos 10^{10} K, el plasma cósmico que se ha estado expandiendo continuamente se hace poco denso para los neutrinos que los traspasan sin colisionar, cesan las rápidas transmuciones entre protones y neutrones, y por ser los últimos más pesados y necesitar más energía para formarse terminan quedando alrededor de 13 neutrones por cada 87 protones. Esta época, de pocos segundos de duración, se conoce como *era leptónica*. Durante los tres minutos siguientes, cuando la expansión ha hecho bajar la temperatura a unos 10^9 K, se originan los núcleos de los elementos más ligeros (*deuterio y helio4*). Aún no se pueden formar átomos por la enorme presión de radiación debida a los fotones, pero cuando el universo se ha enfriado hasta unos $3 \cdot 10^3$ K, unos 10^6 años después de la era de Planck, la sopa cósmica deja de estar en estado de plasma. Los fotones siguen el mismo destino que los neutrinos habían seguido alrededor de 1 s después de la era de Planck, cuando la temperatura era de 10^{10} K. El Universo se hace así transparente para la radiación fotónica que hoy llega a nosotros,

experimentando ocasionales absorciones y reemisiones en su ruta, con una temperatura de $2,7\text{ K}$ y una estructura espectral que refleja el estado de equilibrio térmico del Universo un millón de años después de la era de Planck. Esta radiación fósil, que hoy detectamos, es la RFM descubierta por Penzias y Wilson. Cuando la RFM fue emitida tenía una temperatura de unos 3000 K . A esa temperatura ya se pudieron empezar a formar los átomos de hidrógeno, y algo después, las primeras moléculas de hidrógeno, seguidas por algunos otros compuestos químicos más pesados y complejos. Tras varios miles de millones de años, comenzaron a aparecer grandes aglomeraciones de materia formadas por las fuerzas atractivas gravitatorias; colapsando y fragmentándose se crearon las protogalaxias, los cúmulos globulares y diversos tipos de lo que hoy llamamos material intergaláctico. Finalmente, después de unos 10^{10} años, se condensan las galaxias, los quásares, embriones de estrellas empiezan a brillar dentro de enormes nubes de polvo de galaxias, produciéndose en sus interiores, por nucleosíntesis, los elementos más pesados que componen los tejidos de los seres vivos. Se forma la nube ancestral origen de la Vía Láctea y, dentro de ella, una nebulosa protosolar se condensa para dar lugar al sistema planetario que llamamos Sistema Solar, en órbita alrededor de una estrella que llamamos Sol.

5. DIFICULTADES DEL MODELO ESTÁNDAR:

A pesar de los éxitos del modelo estándar, éste no está exento de dificultades. Señalaremos algunas. En primer lugar, no existe todavía una explicación suficientemente satisfactoria de cómo se pudo formar la estructura a escala intermedia del Universo, galaxias, cúmulos, supercúmulos y "vacíos", que describíamos en la sección 2.

Otro problema es el de la *planitud* así llamado porque se corresponde con el hecho de que la densidad de materia actual en el universo, r , aunque no conocida con exactitud, está cercana al valor crítico, r_0 , que esta magnitud habría de tener para que la geometría del espacio fuera euclídea o plana. Esta "cercanía" hay que interpretarla en el sentido de que, usando la incertidumbre presente, $0,01 < r/r_0 < 2$, si nos remontamos al final de la época de Planck, y llamamos $(r/r_0)_p$ al valor de la precedente relación en aquel tiempo, tendríamos la incertidumbre dada por $1 - 10^{-58} < (r/r_0)_p < 1 + 10^{-58}$. En otras palabras, las condiciones "iniciales" del Universo estaban asombrosamente cercanas a las de la planitud espacial. Esta coincidencia reviste una importancia capital pues si en vez de lo anterior se hubiera tenido solamente $(r/r_0)_p < 1 - 10^{-50}$ el Universo habría sido abierto, se habría expandido con tanta rapidez y las galaxias estarían tan lejanas unas de otras que hoy día r sería prácticamente cero; si por el contrario hubiera sido $(r/r_0)_p > 1 + 10^{-50}$ el Universo sería cerrado y se habría recolapsado hace millones de años. La pregunta que se plantea es, por tanto, ¿por qué la densidad del Universo hace unos 10^{10} años estaba tan cercana al valor crítico que corresponde a la planitud espacial? El que nuestro Universo sea tan plano explica después de todo que la Humanidad haya tardado tanto en barruntar la posibilidad de que la geometría del espacio pudiera no ser euclidiana.

Por último, mencionaremos el problema del *horizonte*. La gran isotropía de la RFM nos indica que el Universo era extraordinariamente homogéneo cuando la radiación se desacopló de la materia, unos 10^6 años después de la era de Planck, al menos éste debió ser el caso para aquellas regiones desde las cuales nos llega la RFM en el presente. Haciendo cálculos, en el contexto del modelo estándar, se obtiene que dichas regiones ocupan entonces un volumen que, a su vez, contenía unas 10^5

regiones que jamás podían haber tenido entre sí interacción física alguna. Esto es esencialmente una consecuencia de que la velocidad de la luz establece un límite superior para cualquier propagación física y de la hipótesis de que hubo un instante inicial o *big bang*. El interrogante que se suscita es: ¿cómo es posible que regiones físicamente desconectadas desde el "principio" del Universo estuviesen en estados físicos tan parecidos?

Los dos últimos problemas que se han señalado, se podrían desdeñar aduciendo simplemente que el Universo fue creado homogéneo y prácticamente plano. Pero la ciencia contemporánea se resiste, en lo posible, a aceptar esta clase de recursos extracientíficos. Para resolver este tipo de problemas se introdujo por Guth en 1980, y en una forma más refinada un año más tarde por Linde e independientemente por Albreche y Steinhardt, el llamado "*escenario inflacionario*", una condición del Universo que supuestamente se dio después de la era de Planck durante el tiempo de la Gran Unificación. Combinando la relatividad general y la teoría de la Gran Unificación, se hace plausible la existencia de un mecanismo que produjo en el Universo diminutas regiones con presión menor que la de las regiones circundantes, de tal modo que esas regiones se "inflaron" velozmente, a un ritmo exponencial con el tiempo. El periodo de inflación finalizaría después de unos 10^{-35} s, retornando la forma de expansión friedmanniana, potencial en el tiempo en aquella época temprana del cosmos. Pero tras corto espacio de tiempo, las regiones conectadas causalmente se habrían expandido tanto que para el momento en que se produjo la RFM las 10^5 regiones de las que antes afirmamos que, con una expansión puramente friedmanniana no podían haber estado nunca conectadas causalmente, ahora formarían parte de una región mucho mayor con una conexión causal entre sus partes. De hecho, toda la región del Universo que hoy podemos observar, nuestro *horizonte*, sería una porción de una de esas regiones homogeneizadas por sus intrainteracciones físicas; de ahí la solución al problema del *horizonte*. La dinámica del modelo inflacionario para el universo primitivo resuelve también de forma natural el problema de la *planitud*. En efecto, las ecuaciones de Einstein y el ritmo de expansión exponencial nos dicen que al final del periodo inflacionario la relación r/r_0 necesariamente estaría cercana a la unidad; tan extremadamente cercana que también ése sería el caso en el presente, por lo que viviríamos en un universo prácticamente exento de curvatura.

Los escenarios inflacionarios resuelven también además otras dificultades, pero todos ellos adolecen de sus propias deficiencias cuando se desciende a los detalles. Se cree, sin embargo, que de algún modo las ideas esenciales que conforman esos modelos constituyen un paradigma al que difícilmente se puede sustraer una, aún desconocida, correcta descripción del Universo primitivo.

En años recientes se ha intentado penetrar más allá del periodo inflacionario e incluso en la era de Planck con las teorías supersimétricas de las partículas elementales, que introducen una simetría entre fermiones y bosones, las teorías de Kaluza-Klein, que dotan al espacio de dimensiones extra con las que se pretende explicar los atributos internos de las partículas, y la teoría de supercuerdas, con la que se esperaba por fin, construir la teoría cuántica unificadora de todas las interacciones, incluida la gravitatoria. A pesar del enorme esfuerzo intelectual y especulativo, las dificultades técnicas, interpretativas y de reconciliación con la realidad observada, así como la escasez de predicciones, sobre todo en el caso de la teoría de supercuerdas, ha hecho remitir el primitivo entusiasmo que llevó a algunos reputados científicos a expresar la audaz convicción de que "el fin de la física" estaba cercano. Uno de los más ambiciosos planteamientos de los últimos tiempos ha sido el de la *Cosmología Cuántica*, en el que se trata al Universo en su totalidad como un sistema cuántico dotado de su función de onda. Se trata, nada menos, que de hallar una explicación al origen mismo del Universo construyendo

una teoría en la que incluso las condiciones iniciales del Universo sean consecuencia de las propias leyes físicas. Sería ésta una verdadera cosmología científica. Aún es pronto para evaluar el porvenir de estas valientes exploraciones. Por primera vez, la ciencia se hace preguntas acerca del "por qué" de las cosas, en vez del "cómo", pretendiendo desvelar cuestiones que hasta ahora se habían considerado exclusivamente metafísicas.

6. EL PRINCIPIO ANTRÓPICO:

Existe una tradición en el pensamiento natural, cimentada desde el Renacimiento en nombres como Copérnico, Galileo y Darwin, y de la que forman parte principios científicos importantes como el mismo principio cosmológico, que viene a afirmar que el ser humano no ocupa ningún lugar privilegiado en el orden del mundo. Sin embargo, comenzando con Dicke en 1961, un punto de vista diferente ha sido adoptado por algunos cosmólogos en un intento por comprender el Universo que habitamos sobre una base teológica. El conjunto de ideas tras esta novedosa forma de pensar, que apunta a reinstaurar, de una forma mucho más sutil que lo hubiera soñado Ptolomeo, al hombre en el centro del mundo, recibe el nombre de *principio antrópico*. En una de sus formas más extremas, es el postulado de que el Universo se explica en función del ser humano, o que las leyes de la física y los valores de las constantes universales que determinan la intensidad de las fuerzas fundamentales son aquellos, quizás los únicos, que pudieron hacer posible que a lo largo de la evolución del Universo, se hayan producido las formas complejas de materia en las que se basa la vida inteligente tal y como la conocemos. Esta es la versión llamada *principio antrópico fuerte*. En ese espíritu, el astrofísico Brandon Carter, parafraseando el famoso dicho de Descartes: "*pienso, luego existo*", sugiere la afirmación: "*pienso, por tanto, el mundo es como es*". Entre los muchos ejemplos que los proponentes del principio antrópico aducen en apoyo de sus tesis, mencionaremos tres:

A. Los núcleos de los átomos se mantienen estables gracias a las fuerzas nucleares fuertes cuyo origen radica en los quarks y gluones. Si esta fuerza fuese algo más débil, los núcleos atómicos serían inestables, se desintegrarían rápidamente, y así el núcleo de deuterio (que es el más simple de los compuestos: protón + neutrón), y que mantiene al protón y al neutrón unidos tenuamente por la fuerza nuclear, no podría existir de forma estable si la intensidad de la fuerza nuclear fuera sólo unos pocos tantos por ciento más débil. El Sol y las estrellas que usan el deuterio como eslabón esencial en su cadena de reacciones nucleares no podrían mantenerse encendidos, a menos que encontraran un nuevo circuito nuclear (hoy no conocido) para generar su calor. Igualmente dramáticas serían las consecuencias si las fuerzas nucleares fueran ligeramente más fuertes. En tal caso, dos protones podrían superar su repulsión eléctrica y unirse. Como dijimos antes, alrededor de $t \approx 1s$ después de la era de Planck, había muchos más protones (87%) que neutrones (13%), los protones se unieron con los neutrones para formar deuterio y después helio⁴. Los protones que sobraron quedaron para formar la mayor parte de la materia prima de las estrellas. Si la fuerza nuclear hubiera sido más fuerte, esos protones se podrían haber asociado en pares, y en esa asociación uno de los protones se habría desintegrado en un neutrón y un positrón, dejando de nuevo núcleos de deuterio que otra vez, por pares, formaría helio. Por tanto, el Universo en el que la fuerza nuclear hubiera sido algo más fuerte no quedaría virtualmente nada de hidrógeno desde aquél primer segundo después del big bang. No podrían existir estrellas estables como el Sol, ni agua. Es por tanto dudoso que la vida hubiera podido emerger si la intensidad de la fuerza nuclear hubiera sido ligeramente distinta de la que es.

B. El cociente de la fuerza con que se atraen gravitacionalmente dos protones y la fuerza con que se repelen debido a su carga eléctrica, es crucial para la determinación de la estructura de las estrellas. El valor de este cociente da lugar a que exista un equilibrio de fuerzas dentro de las estrellas que hace que casi todas ellas, en cuanto a sus masas y luminosidades, se encuentren alejadas de los dos extremos que corresponden a las enanas rojas (frías, convectivas y pequeñas) y las gigantes azules (calientes, radiativas y grandes). Una ligerísima alteración en ese valor, por ejemplo, la que se produciría si la constante de la gravitación fuese distinta de que es en sólo un 10^{-38} %, sería suficiente para que todas las estrellas tuvieran que ser gigantes azules o enanas rojas. No existirían estrellas como el Sol, ni ninguna forma de vida que dependa de estrellas del tipo solar para su sustento.

C. Otro hecho puesto de manifiesto por Fred Hoyle: en el núcleo de las estrellas puede producirse la siguiente reacción: $3He^4 \rightarrow C^{12}$. Esta triple colisión es muy rara, por lo que apenas se produciría C^{12} si no fuera por una curiosa propiedad del núcleo de Carbono. Primero, lo que ocurre es $2He^4 \rightarrow Be^8$ que es mucho más probable. El Be^8 es inestable, y el que se produzca la reacción $Be^8 + He^4 \rightarrow C^{12}$ antes de que se desintegre el Be^8 depende muy sensiblemente de la energía con la que colisione el He^4 con el Be^8 . Hay una energía muy particular (fenómeno de la resonancia nuclear) a la que se produce la reacción. A energías ligerísimamente distintas no lo hace. Afortunadamente da la coincidencia de que la energía térmica de los constituyentes nucleares en el interior de una estrella típica está casi exactamente en el valor correspondiente a la resonancia del C^{12} . Sin este feliz accidente? La formación de carbono en las estrellas quedaría drásticamente reducida.

Pero aún hay más: el C^{12} no sobreviviría en el horno estelar si no fuera por otra feliz circunstancia. En efecto, se produciría la reacción $He^4 + C^{12} \rightarrow O^{16}$ quemándose prácticamente todo el carbono, si no fuera porque la naturaleza ha elegido que la energía de resonancia a la que se produce la anterior reacción esté por debajo de la energía térmica del He^4 y del C^{12} presente en las estrellas.

La localización de estas resonancias depende de las fuerzas fundamentales de la naturaleza, especialmente de la nuclear y de la electromagnética. Si éstas hubieran sido ligerísimamente distintas, las resonancias del C^{12} y del O^{16} hubieran estado localizadas de modo que la vida, en su variedad terrestre al menos, habría sido mucho menos posible.

El cosmólogo británico John Barrow, uno de los proponentes del principio antrópico, a la vista de circunstancias tan afortunadas para que se haya producido la vida como las mencionadas, afirma que muchas de las observaciones del mundo natural, aunque son sorprendentes *a priori*, cuando se ven a la luz del principio antrópico fuerte, resultan comprensibles como consecuencias inevitables de nuestra propia existencia.

Tal vez sea necesario indicar que el principio antrópico concita una fuerte oposición en otros científicos. Si resultase correcto, habría que completar el pensamiento optimista de Leibniz de que "el Universo es el mejor entre todos los posibles" por el más dudoso, dependiendo de la valoración que se tenga de la Humanidad, con sus grandezas y miserias, de que "el Universo es el único posible que es compatible con la existencia del ser humano".

7. FUTURO DEL UNIVERSO:

Como ya se dijo en la sección 3, el Universo se expandirá para siempre si $r \leq r_0$, o llegará un momento en el que la expansión cesará y comenzará a recontraerse si $r \geq r_0$. El futuro del Universo físico será, pues, muy distinto según que se dé una u otra de estas dos situaciones. Describamos muy sucintamente lo que podría suceder en cada una de las dos circunstancias.

- *Universo abierto: $r < r_0$*

Hay expansión eterna, y r tenderá a cero con el tiempo. Todos los elementos del Universo están destinados a cesar gradualmente en su actividad (estrellas y galaxias) pues crece la entropía, se conserva la energía, los elementos irradian energía y la energía almacenada en ellos es finita. Más pronto o más tarde, la energía interna se agotará y se convertirán en tremendos bloques fríos errantes por el Universo.

Consideremos primero dos estrellas:

Hay cuatro fases básicas de estrellas cuasi-estacionarias (de vida casi comparable a la vida del Universo): las estrellas de la secuencia principal, las enanas blancas, las estrellas de neutrones y las enanas rojas. Las tres primeras clases están genéricamente relacionadas. Cuando la energía termonuclear almacenada en las estrellas de la secuencia principal se agota, se produce un colapso (o contracción) que da lugar a las enanas blancas, estrellas de neutrones o agujeros negros (dependiendo de sus masas).

La vida de las estrellas de la secuencia principal depende de sus masas. Las estrellas relativamente pequeñas (el Sol, por ejemplo) brillan intensamente por largo tiempo. El Sol tardará unos $(10-20) \cdot 10^9$ años en transformarse en una enana blanca. Estrellas con mayor masa que el Sol irradian más, de tal modo que permanecen en la secuencia principal mucho menos tiempo. Por ejemplo, una estrella con una masa 10 veces la del Sol, abandonará la secuencia principal en unos 100 millones de años.

La vida de las enanas blancas, mientras dura su luminosidad, es de unos 10^{14} años. Después se convierten en oscuros bloques de temperatura $\gg 1$ K. Las estrellas de neutrones tienen el mismo destino, sólo que tardan 10^{19} años en enfriarse, y su temperatura final es de unos 100 K.

Peculiar es el destino de las estrellas de masa pequeña, en particular de las enanas rojas. Su radiación no es causada por reacciones termonucleares, como en el Sol, sino por la energía cinética suministrada a sus componentes a partir de sus propias fuerzas gravitatorias; en definitiva, proviene de su energía potencial gravitatoria. Resulta que esta energía durará por promedio, unos 10^{11} años. Después, tras una especie de colapso, las enanas rojas terminan en algo parecido a las enanas blancas.

Las estrellas de masas muy pequeñas, irradian muy débilmente, se apagan muy lentamente, y por consiguiente, se convierten en cuerpos fríos sólidos, sin sufrir ningún cataclismo.

Consideremos las Galaxias

Hay una especie de "evaporación" de las galaxias (pérdida de estrellas que se escapan del mismo modo que las moléculas de un fluido) que causará una erosión apreciable en un tiempo del orden de $10^{18}-10^{19}$ años. Después, como consecuencia, se producirá su colapso por las fuerzas gravitatorias.

Consideremos las partículas elementales:

Según la TGU (moderna teoría de unificación de fuerzas a la que ya nos hemos referido) el protón No es totalmente estable, sino que se puede desintegrar con una vida media de $10^{31 \pm 2}$ años. Si esto es correcto, después de unos 10^{31} años, casi toda la materia consistirá de electrones, positrones, fotones y neutrinos esparcidos por el espacio con baja densidad.

Pero aún quedan los hipotéticos agujeros negros (de ahí el anterior "casi toda la materia"). En 1974 se descubrió que los agujeros negros también irradian fotones y por tanto van perdiendo masa. La vida media de un agujero negro de masa parecida a la del Sol es extremadamente larga: 10^{70} años. Después de la evaporación de los agujeros negros, el Universo consistiría exclusivamente en partículas ligeras.

El sombrío destino anteriormente esbozado para un Universo abierto, es un destino posible a la luz de nuestro actual conocimiento, pero podría ser distinto si, por ejemplo, aparecen nuevas fuerzas de la naturaleza, aún no descubiertas, que modificaran sustancialmente el anterior escenario evolutivo. De hecho, en 1998, dos equipos de astrónomos, estudiando supernovas en galaxias distantes parecen haber llegado a la conclusión de que, contrariamente a lo previsto, la expansión del Universo no se está frenando, sino acelerando. Si ello se confirma no habrá más remedio que aceptar la existencia de una fuerza repulsiva cósmica que se opone a la fuerza atractiva gravitatoria. Es "fácil" acomodar fenomenológicamente una fuerza de estas características en el marco de la relatividad general introduciendo en las ecuaciones de Einstein la famosa constante cosmológica. Es de notar que el mismo Einstein propuso la presencia de esa constante en sus ecuaciones de gravitación en 1917, pero porque como señalábamos en la sección 3, no podía en aquel momento, aceptar un Universo NO estático; después, a la luz de las observaciones de Hubble que mostraron la dinámica evolutiva del Cosmos, retiró su propuesta a la que calificó como "el mayor error de su vida". Quizás, estas nuevas observaciones reivindiquen, otra vez, la intuición genial del físico, pero por razones distintas de aquéllas en las que él se basó.

- Universo cerrado: $r > r_0$

El Universo cesará en su expansión una vez que haya alcanzado su tamaño máximo, pero finito, y comenzará a recontraerse. Según análisis realizados por Hawking y Page en 1986, es posible que el Universo NO comience a recontraerse hasta que no pase un largo tiempo. Tan largo, que para entonces también se habrán "quemado" las estrellas, colapsado las galaxias, y desintegrado los bariones como en el anterior caso. No habría pues condiciones para la existencia de seres como nosotros en la fase de recontracción, por lo que recurriendo a una versión débil del principio antrópico, resulta explicado que nos encontremos escribiendo sobre estas cosas mientras el Universo se expande. Durante la recontracción no habría seres humanos para tratar de estos asuntos.

Pero aún si las conclusiones de Hawking y Page no fueran correctas y supusiéramos que asistimos al final de la época de expansión, la perspectiva no cambia significativamente. Ahora la edad del universo $\approx (10-20) \cdot 10^9$ años, es pequeña comparada con los tiempos que tardan en extinguirse muchos de los objetos cósmicos anteriormente considerados (estrellas enanas blancas, estrellas de neutrones, etc.) Por tanto, la reconstrucción no les dejará morir en paz. Procesos violentos tendrán lugar en los estados últimos de la rápida recontracción que los aniquilarán por colisiones y acción de fuerzas tremendas. Por ejemplo, a unos 100 s del final, las enanas blancas serán destruidas, y a 10^{-4} s, lo harán las estrellas de neutrones. Después, sólo quedarán protones, neutrones, electrones, fotones, neutrinos y agujeros negros.

Pero lo que suceda después, al igual que lo que ocurrió en el primerísimo intervalo inicial, en torno al tiempo de Planck, aparece mucho más nebuloso. Es probable que para $t \leq 10^{35}$ s antes del "final" otra vez aparezcan partículas supermasivas, en adición a los agujeros negros, como al principio. En los instantes finales, como al comienzo, podrían producirse transiciones de fase en la materia interaccionando con el vacío cuántico. Esto podría dar lugar al nacimiento de nuevos Universos. ¿Cumplimiento de la visión de Nietzsche del eterno retorno, o ciencia ficción? En cualquier caso, aquí, como en el principio de nuestro Universo, nos topamos con el límite de nuestro conocimiento actual. A todo lo anterior hay que añadir la posibilidad de la existencia de las fuerzas repulsivas contragravitatorias, mencionadas antes, que podrían modificar drásticamente el escenario evolutivo.

La construcción de una teoría cuántica "correcta" de la gravitación o, como algunos aún piensan, la elaboración completa de la teoría de supercuerdas, podría en principio, permitirnos franquear estos umbrales. Los optimistas que aún quedan, esperan alcanzar así el comienzo de todo y el final de todo, por consiguiente, la totalidad del Universo físico. A mi entender, esto es esperar demasiado, y si bien esas nuevas y prometedoras construcciones pueden ampliar la historia de lo que fue y la perspectiva de lo que será, es muy posible que por mucho tiempo, quizás para siempre, el mismo origen y final del Universo quede fuera del alcance de la ciencia física tal y como hoy la concebimos.

Quizás resulte necesario ampliar el concepto de realidad que tenemos hoy, formado por la tradición científica moderna, y más en general, por nuestra tradición cultural occidental. Por eso, no está de más traer a colación una palabra de uno de los fundadores de la mecánica cuántica, un hombre famoso por su mente aguda y crítica, que fue llamado "la conciencia de la física", Wolfgang Pauli, que en una carta a su amigo Fierz en 1948 escribía *"Cuando el profano dice "realidad" suele pensar que está hablando de algo que conoce de forma autoevidente; a mí, sin embargo, me parece que la tarea más importante y extremadamente de nuestra época es trabajar en la elaboración de una nueva idea de realidad. Esto es también lo que quiero decir cuando siempre hago hincapié en que la Ciencia y la religión deben tener algo que ver entre sí"*. Yo creo que las palabras de Pauli siguen teniendo plena vigencia.

Para terminar: la cosmología moderna se ha establecido como una disciplina científica que suscita el interés y hasta el entusiasmo de sectores importantes de investigadores. Espoleada por indudables éxitos, por primera vez la Ciencia se atreve a buscar explicaciones sobre hechos cuyas razones siempre se había creído que se encontraban en otros ámbitos del conocimiento. Pero la seducción que ejerce por su propia naturaleza globalizante, que incluye el origen del Cosmos del que formamos parte y su devenir, junto con la imposibilidad actual de contrastar con la experiencia teorías que se aplican para describir el Universo alrededor del tiempo de Planck, han contribuido, en nuestra opinión, a excesos especulativos que antes no habían tenido cabida en el marco de la Ciencia natural.

Alberto Chamorro Belmont
Catedrático de Física Teórica
Director del Departamento de Física Teórica e Historia de la Ciencia
Universidad del País Vasco.