

LA FÍSICA DEL GÉNESIS

The Physics of the Genesis

ALBERTO CLEMENTE DE LA TORRE
(IFIMAR-CONICET / UNMDP, Argentina)

Resumen

Desde una perspectiva física y atea se revisita el problema del origen del universo haciendo hincapié en el proceso secularizador que suponen las nuevas teorías científicas.

Palabras clave: astrofísica | cosmología | cosmogonía | ateísmo

Abstract

From a physical and an atheist perspective the problem of the origin of the universe is revisited. Stressing on the secularizing process that is involved in the new scientific theories.

Keywords: Astrophysics | Cosmology | Cosmogony | Atheism

¿Por qué la física del génesis?

La palabra “génesis” proviene del griego y significa nacimiento, creación, inicio y ha dado lugar a términos como genética, origen, ginecología, genitales, genealogía, etc. El Génesis es el primer libro de la Torah de los judíos o del Antiguo Testamento de los cristianos en que se describe el origen del mundo. Conocer el origen del mundo ha sido una de las principales cuestiones de todas las culturas y hasta el advenimiento de la cultura científica era incumbencia de las religiones y de los mitos. Con la implementación del conocimiento fundado que brinda la ciencia, la cuestión del origen del universo pasó a ser tema de la física. Sin embargo, hasta hace unas pocas décadas, no se podía presentar una descripción confiable del inicio del mundo. Hoy, después de un cambio

cualitativo, estamos en condiciones de presentar una descripción fidedigna, aunque aún con muchas lagunas e incertezas, de cómo pudo haber sido el origen del mundo sin necesidad de acudir a mitos religiosos y leyendas.

La posibilidad de explicar el origen del universo mediante la física es de gran relevancia para poder adherir a un ateísmo racional no dogmático. En efecto, hasta hace pocas décadas, todo ateo encontraba serias dificultades para concebir la existencia del mundo. Correctamente tenían fe en que la ciencia alguna vez presentaría una explicación aceptable pero no tenían ninguna prueba, ni siquiera un esbozo, de cómo toda esta maravilla que es el universo puede existir sin un creador. Por supuesto que F. Nietzsche no necesitó a la física para ser ateo. Antes de que la física intervenga en el asunto, había convencidos ateos pero para poder mantener sus convencimientos, en algún punto de su argumentación, debían recurrir a posturas dogmáticas. Este triunfo de la física fue resaltado por S. Weinberg al afirmar: "Uno de los grandes logros de la ciencia ha sido que, si bien no hizo imposible que gente inteligente sea religiosa, al menos hizo posible que ellos no sean religiosos".

Hoy, por primera vez en la historia de la cultura, nos encontramos con la posibilidad cierta de responder las preguntas sobre el origen del universo sin apelar a lo sobrenatural. Por supuesto que las respuestas son provisorias, algunas no son únicas y otras pueden resultar falsas. Seguramente habrá importantes cambios pero debemos rescatar que hoy disponemos de un esquema o modelo racional aproximado que nos permite sostener que no es necesaria la existencia de un creador del universo. En este trabajo no se analizará el interesante debate entre creyentes y ateos y nos limitaremos a presentar las teorías físicas que permiten concebir la existencia del mundo sin intervención divina. Para la descripción del origen del universo y su evolución hasta nuestros días, es necesario acudir a conceptos físicos, que en algunos casos, han sido desarrollados solamente en las últimas décadas. Por eso en este trabajo presentaremos primero varios resultados de la física, relacionados con la relatividad general y con la mecánica cuántica, que son necesarios para, al final, poder dar una descripción aceptable del origen e historia del universo.

Universo *ex nihilo*

La primera cuestión que aparece si pretendemos desarrollar un modelo de universo sin creador es la dificultad de explicar la existencia misma. Si el universo tuvo un origen, entonces debe haber habido una transición entre la no existencia y la existencia, cosa que parece violar toda idea de conservación o permanencia (*conatus*). En términos físicos, esta cuestión filosófica se traduce teniendo en cuenta que la *energía* es condición suficiente de existencia: todo lo que tiene energía existe y entonces la pregunta es: ¿de dónde proviene la energía del universo? Aparentemente, la intervención de un creador sobrenatural que provea dicha energía es ineludible, pero por otro lado, parece ser bastante insatisfactorio que dicho creador, en el instante mismo de la creación viole una de las leyes fundamentales que deberá cumplir la obra creada: la conservación de la energía.

Veamos *cuánta* energía hay en el universo. Es muy interesante que la física puede estimar dicha cantidad con mucha confiabilidad y el resultado es altamente asombroso: *¡la energía total del universo es nula!* Si tenemos en cuenta la conservación de la energía, el universo es gratis; puede provenir de la nada: *ex nihilo*.

Para explicar ese resultado asombroso, consideremos que la energía del universo tiene varias componentes: toda la materia del universo, *masa* para los físicos, es energía según establece la famosa $E=mc^2$ de Einstein, Toda esta materia incluye no solamente las estrellas y planetas sino también la llamada “materia oscura” cuyas partículas no han sido aún identificadas. Además hay que agregar la energía de toda la radiación en la que están inmersas las galaxias y también la “energía oscura” asociada con la expansión acelerada del universo detectada en la última década pero cuya naturaleza no es aún bien entendida. Todas estas componentes tienen valor positivo y contribuyen en la densidad de energía del universo δ . Para el balance total de energía debemos comparar estas componentes positivas con la *energía potencial gravitatoria* del universo que es negativa. La energía potencial, al no estar realizada, debe ser negativa de manera similar a lo que sucede en una planilla de contabilidad donde el “debe” y “haber” deben tener diferentes signos.

El valor de la densidad de energía δ es crucial para establecer el destino del universo. Si esta cantidad fuese muy grande, la atracción gravitatoria sería predominante: eventualmente detendría la expansión del universo y comenzaría una etapa de contracción. Por el contrario, si la densidad fuese muy pequeña, la atracción gravitatoria sería menos importante y el universo continuaría eternamente su expansión. Estos dos casos drásticamente diferentes están separados por un valor de *densidad crítica* δ_c . Numerosos argumentos teóricos y observaciones indican que la densidad de energía del universo es *exactamente* igual al valor crítico δ_c . Este resultado es extremadamente interesante porque para este valor de densidad las componentes positivas de la energía y la energía potencial gravitatoria que es negativa se cancelan exactamente resultando en una energía total nula para el universo.

La segunda cuestión que resalta, consecuencia de la anterior, es ¿por qué hay *algo* en vez de *nada*? En efecto, parecería ser que la realización más sensata de un ente con energía nula es la nada y no algo con un delicado balance entre enormes componentes negativas y positivas que se cancelan. En términos teológicos, Dios no es necesario para proveer la energía del universo pero es requerido para “separar” ambas componentes. Para esta pregunta la física también tiene una posible respuesta: el vacío, la nada, es inestable y decae hacia algo por un mecanismo designado como *rotura espontánea de simetría* que veremos más adelante.

Indeterminaciones y fluctuaciones cuánticas

Es ampliamente sabido que la física clásica, esencialmente la de las leyes de Newton, describe exitosamente el comportamiento de los sistemas físicos macroscópicos, o sea, aquellos que captamos con nuestra percepción sensorial. Sin embargo estas teorías clásicas fracasan rotundamente cuando pretendemos aplicarlas a sistemas físicos de acción extremadamente tenue, como los átomos, núcleos, y partículas subatómicas o cuando las aplicamos a sistemas que se desplazan a velocidades cercanas a la velocidad de la luz. Este fracaso motivó el desarrollo de teorías superadoras en los inicios del siglo XX: la mecánica cuántica y la relatividad.

Una de las características esenciales de la mecánica cuántica es que todos los observables del sistema físico toman valores y además, indisociablemente, están afectados de una indeterminación ineludible. Los observables (excepto en algunos casos especiales) no toman valores exactos sino que son difusos o indeterminados en cierta medida. La teoría cuántica nos permite calcular, o sea predecir, los valores promedio (o valores de expectación) y también las indeterminaciones de los observables. Así, la posición y velocidad de una partícula están caracterizadas por valores medios X y V pero también por sus indeterminaciones simbolizadas por Δ_X y Δ_V . De la misma manera, la energía de un sistema E y el tiempo de evolución de un proceso T , están afectadas por las indeterminaciones Δ_E y Δ_T .

Que los observables estén indefectiblemente asociados a indeterminaciones es altamente asombroso para nuestra intuición, educada por el contacto con sistemas clásicos que poseen valores exactos. Mucho más asombroso es que esas indeterminaciones no son totalmente independientes sino que la teoría indica (y los experimentos lo corroboran) que existen correlaciones entre ellas. Las más famosas de esas correlaciones están formalizadas por el principio de indeterminación de Heisenberg que nos dice que el producto entre las indeterminaciones en la posición y velocidad de una partícula de masa m siempre es mayor que cierto valor, muy pequeño pero no nulo, dado por la constante de Planck \hbar . O sea.

$$\Delta_X \cdot \Delta_V \geq \hbar/m.$$

Es posible preparar a la partícula para que tenga muy pequeña indeterminación en la posición pero al costo de tener una gran indeterminación en su velocidad y viceversa, prepararla para tener una velocidad muy precisa pero gran difusión en la posición. Para la energía y tiempo de evolución de un sistema, también se encuentran correlaciones:

$$\Delta_E \cdot \Delta_T \geq \hbar.$$

Esta última relación de incertidumbre entre energía y tiempo de evolución permite la existencia de inesperadas fluctuaciones del vacío:

supongamos que en algún lugar del vacío absoluto se produce una violación del principio de conservación de la energía y aparecen “de la nada” dos partículas de masa m pero de carga eléctrica opuesta, por ejemplo, un electrón y un positrón. Esto implica una violación de la conservación de la energía en la cantidad $\Delta E = 2mc^2$, según la fórmula de Einstein. Todos sabemos que dicha violación no debería ser posible pero la mecánica cuántica la permite, solamente durante un tiempo ΔT suficientemente corto como para que sea compatible con el principio de indeterminación tiempo-energía. Pasado ese tiempo, las partículas creadas de la nada se aniquilan mutuamente, desaparecen, y se reestablece la conservación de energía. Podemos pensar entonces que lo que llamamos “vacío” es en realidad una continua y permanente creación y aniquilación de materia y antimateria durante pequeños intervalos de tiempo (del orden de $5 \cdot 10^{-22}$ s). Estas partículas son llamadas “virtuales” por su efímera vida, pero aquí “virtual” no significa que no existan (como sí sucede con la llamada realidad virtual creada en las computadoras). Las partículas virtuales existen realmente. Todo esto parece tan asombroso que alguien puede dudar de que sea verdadero. Sin embargo los físicos estamos convencidos de la realidad de esas fluctuaciones del vacío porque existen muchos experimentos donde dichas fluctuaciones se manifiestan (desplazamiento de Lamb, efecto Casimir, valor del momento magnético del electrón, etc.). Veremos más adelante que las fluctuaciones cuánticas juegan un rol importante en el origen del universo.

Los campos cuánticos

Así como con la física clásica de Newton se estudia el movimiento de una partícula cuando se conocen las fuerzas que actúan sobre ella, con la mecánica cuántica se puede estudiar el movimiento y estado de un electrón o de cualquier otra partícula pequeña. Sin embargo, el estudio de *una* partícula con la mecánica cuántica es instructivo e interesante pero es un modelo de poca aplicación a la realidad porque, según vimos en la sección anterior, para tener una descripción más fidedigna de la realidad deberíamos tener en cuenta también la aparición y aniquilación de partículas virtuales como las que aparecen en las fluctuaciones del vacío. La mecánica cuántica de una partícula es entonces extendida a una nueva teoría en que el número de partículas es

indeterminado debido a la permanente creación y aniquilación de partículas. Esta teoría superadora es denominada “teoría de campos cuánticos”.

De la física que aprendimos (o que sufrimos) en el colegio secundario, recordamos dos tipos de sistemas físicos clásicos que poseen y transportan energía e impulso. Estos son las partículas y los campos. Como ejemplos de partículas se presentaron piedras, proyectiles, cohetes, y los famosos y tediosos “móviles” que parten de cierta ciudad para cruzarse con otro que partió de cierta otra ciudad en cierto lugar que a nadie interesa. Además de estas partículas se presentaron en el colegio los campos eléctricos, los campos magnéticos (y su unificación: el campo electromagnético) y el campo gravitatorio que aparecen para representar las fuerzas eléctricas, magnéticas o gravitatorias. Los campos fueron presentados como ciertas perturbaciones en el espacio que generan las fuerzas que se aplican sobre las partículas en los lugares donde el campo no se anula.

Tenemos entonces dos conceptos aparentemente bien separados: partículas y campos o fuerzas. Con el advenimiento de la teoría de campos cuánticos se descubrió que estos dos conceptos no son realmente diferentes. Partículas y campos son dos manifestaciones clásicas de una realidad cuántica más compleja que en algunas situaciones se manifiesta como partícula pero en otras situaciones, esa misma realidad, se manifiesta como un campo. La concepción filosófica que posibilita esta unificación de dos aspectos clásicos, aparentemente diferentes o contradictorios, en una misma realidad cuántica es denominada “complementariedad”. Como metáfora para la complementariedad podemos pensar en un rostro humano que puede ser visto desde diferentes perspectivas excluyentes. Puede ser visto de frente (partícula) o de perfil (campo) y si optamos por una perspectiva, forzosamente excluimos la otra: lo vemos de frente o de perfil (se trata de una partícula o de un campo) sin embargo existe una realidad, un rostro, que es generador de las diferentes perspectivas (existe una realidad cuántica que se presenta a veces como partícula y otras veces como campo). Cuando Picasso unifica perspectivas excluyentes en una misma imagen, como en el rostro de Velásquez que aparece en la versión que él hizo de “Las Meninas”, está brindando una representación de la realidad más fidedigna que la que podría presentar una fotografía, condenada a optar por una sola perspectiva y excluir otras. En la mecánica

cuántica se hace una síntesis similar al considerar que partículas y campos son visiones complementarias de una misma realidad.

En la teoría de campos cuánticos cada tipo de campo está asociado con un tipo de partícula: el campo electromagnético está asociado con una partícula llamada *fotón* y el gravitatorio está asociado con el *gravitón*. Viceversa, cada tipo de partícula: electrón, neutrinos, o quark tiene asociado su campo correspondiente.

Los campos cuánticos ocupan una extensión en el espacio y evolucionan con el tiempo de una manera descrita por las ecuaciones de movimiento del campo (algo equivalente a las ecuaciones de Newton para el movimiento de las partículas clásicas). Para describir los primeros instantes del universo será de gran importancia un tipo de campo cuyas ecuaciones indican que éste se expande en el espacio de forma explosiva.

Relatividad general

En la primera década del siglo XX, Einstein descubrió la relatividad especial, teoría necesaria para poder explicar el movimiento de partículas con velocidades cercanas a la de la luz, que aportó asombrosos cambios a nuestros conceptos de espacio y tiempo. Se descubrió, por ejemplo, que la simultaneidad es relativa. Esto significa que dos acontecimientos que suceden en el mismo instante para un observador no son simultáneos para otro que esté en movimiento. Para éste, uno de los eventos sucede antes que el otro y esa relación temporal, antes-después, puede ser invertida para un tercer observador. También se descubrió que la longitud de los objetos y la duración de los intervalos de tiempo tampoco son absolutos sino que toman diferentes valores para diferentes observadores, Las longitudes se contraen y los intervalos se dilatan para observadores en movimiento.

Más asombrosos fueron los descubrimientos de Einstein, una década después, relacionados con la relatividad general. En esta teoría, el espacio-tiempo deja de ser solamente el substrato donde suceden las cosas y adquiere un carácter dinámico. En esta teoría, la presencia de energía, presión o tensión modifica el contenido del espacio, le impone curvatura, lo concentra o diluye, lo distorsiona, y el movimiento de la materia se hace buscando los caminos más

cortos en ese espacio distorsionado. De esta manera, Einstein logra eliminar las fuerzas y en su lugar modifica el espacio. Así, en vez de considerar a una partícula sometida a fuerzas que le imprimen cierto tipo de movimiento, se considera a la misma partícula, sin fuerzas, pero que se mueve buscando los caminos más cortos en un espacio distorsionado: la gravitación es producida por la distorsión del espacio. Las predicciones en estas dos consideraciones, fuerzas o geometría, no son idénticas (pero para los casos usuales son muy similares) y las mediciones experimentales le dan razón a la relatividad general.

Vimos que las causas que distorsionan al espacio son la energía (o masa), la presión y la tensión (que es una presión negativa como la que se puede encontrar en una banda elástica estirada). Estas componentes actúan en forma diferente. La energía y la presión generan una deformación del espacio que resulta en una *atracción* gravitatoria mientras que la tensión resulta en una *repulsión* gravitatoria. Es interesante constatar que estos comportamientos pueden resultar en situaciones inestables con resultados catastróficos. Supongamos una región del espacio con una gran densidad de materia, y por lo tanto, con una gran presión. Esta presión y energía generan una atracción gravitatoria que puede superar a la presión (que tiende a producir una expansión) y aumentar aún más la densidad. Esto generará mayor atracción gravitatoria que a su vez producirá más presión. La densidad y la presión crecen sin límite. Se ha generado un agujero negro que colapsa sobre si mismo. Esta predicción, de que cuando la densidad supera cierto valor crítico el sistema colapsa, se ha confirmado con la observación de numerosos agujeros negros.

Otro tipo de inestabilidad similar a la anterior requiere la existencia de un campo con energía y presión despreciable pero con cierto valor de tensión. En este caso se da el proceso inverso al descrito antes: si la tensión es suficientemente grande se producirá una repulsión gravitatoria que hará expandir más al campo, produciendo aún más tensión, cosa que aumenta la repulsión gravitatoria. La extensión de este campo crece sin límite: el campo explota. Campos de este tipo probablemente causaron la brutal expansión del universo que describiremos más adelante. Cuando se descubra, cosa muy probable, la partícula llamada “bosón de Higgs” en el acelerador de partículas LHC puesto en funcionamiento en 2008 en Europa, se tendrá evidencia de la existencia de campos escalares similares a los que producen la expansión

mencionada pero con la importante diferencia que el campo de Higgs tiene energía que produce gravedad atractiva que cancela la componente repulsiva generada por la tensión. Felizmente no hay posibilidades de que el bosón de Higgs explote.

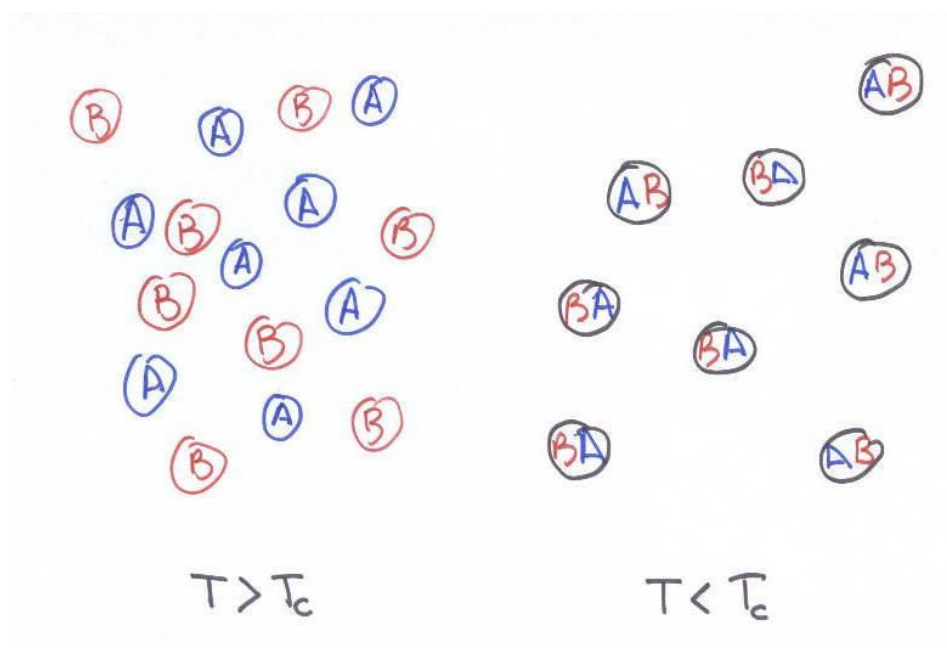
Temperatura y cambios de fase

El universo comenzó en un estado de enorme densidad y se encuentra en permanente expansión. En esa expansión, la energía de movimiento se transfiere a energía gravitatoria y, como consecuencia, el universo se enfría a medida que se expande. Es usual que cuando los sistemas se enfrían, cambian de aspecto. Por ejemplo si enfriamos un gas formado por vapor de agua, a cierta temperatura pasará a estado líquido y después a estado sólido. El universo también pasó por etapas en que tenía aspectos bien diferenciados. Veamos en detalle por qué los sistemas cambian con la temperatura. Antes de eso, recordemos qué es la temperatura. Nosotros creemos entender bien lo que es la temperatura porque tenemos percepción sensorial para ella (aparentemente los patos no la tienen, ya que nadan alegremente en agua muy fría. Para ellos la temperatura debe ser algo muy misterioso). Solamente después de profundos razonamiento llegamos a la conclusión de que la temperatura de un objeto es la energía de movimiento promedio de las componentes de dicho objeto. Un gas está más caliente cuando sus moléculas se mueven con más velocidad.

Consideremos una reacción en que un sistema físico designado por (A) se combina con otro, designado por (B), para formar el sistema que designamos por (AB). Un ejemplo de esto puede ser la reacción química en que la molécula de hidrógeno (H_2) se combina con un átomo de oxígeno (O) para formar agua (H_2O).

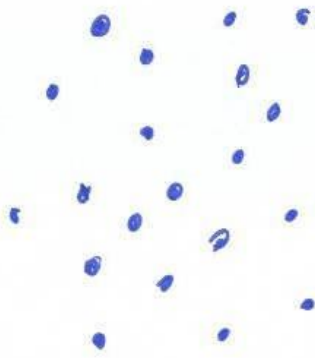
Las partes (A) y (B) se atraen por acción de alguna fuerza y por eso se puede formar (AB), en símbolos: $(A)+(B)\rightarrow(AB)$. Si tenemos muchos sistemas del tipo (AB) y la temperatura es suficientemente alta, esto es, si la velocidad de las moléculas es grande, los choques pueden ser suficientemente violentos como para romper o disociar el sistema en sus componentes: $(AB)\rightarrow(A)+(B)$. Se entiende entonces que a baja temperatura el sistema se encontrará

predominantemente combinado en (AB) pero a alta temperatura se encontrará predominantemente disociada en (A) y (B). En la figura se ilustra esto.

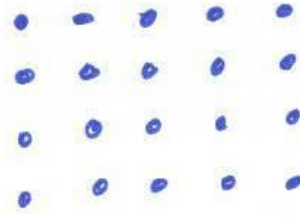


En la naturaleza tenemos numerosos ejemplos de cómo un cambio de temperatura produce cambios cualitativos en los sistemas físicos. Cuando crece la temperatura, las moléculas se disocian en los átomos que las componen. A mayor temperatura, los átomos se ionizan, o sea se disocian en los electrones y los núcleos que los forman. Si la temperatura crece mucho más aún, los núcleos se rompen y se disocian en los protones y neutrones que los forman. A altísimas temperaturas los protones y neutrones se rompen y forman un gas compuesto por los quarks que los componen. La materia del universo se presentó en una etapa como quarks a muy alta temperatura y a medida que se fue enfriando pasó por las diferentes etapas hasta presentarse como un gas de hidrógeno y helio a partir del cual se formaron las estrellas y galaxias.

Otro ejemplo interesante de cambio de fase debido al cambio de temperatura es cuando las moléculas de un líquido (agua, por ejemplo), que se mueven desordenadamente a alta temperatura, se estabilizan en lugares precisos a baja temperatura formando un cristal (hielo) como está esquematizado en la figura.

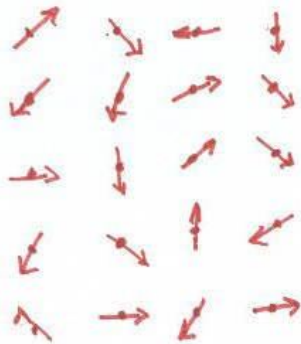


$T > T_c$

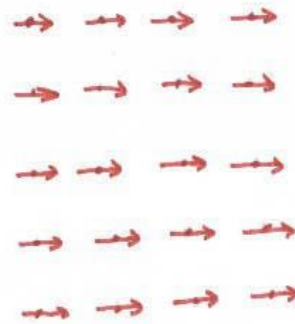


$T < T_c$

También la magnetización de un imán es un cambio de fase cuando los pequeñísimos imanes que son los átomos, que a alta temperatura están orientados en cualquier dirección, se orientan todos en la misma dirección a baja temperatura.



$T > T_c$



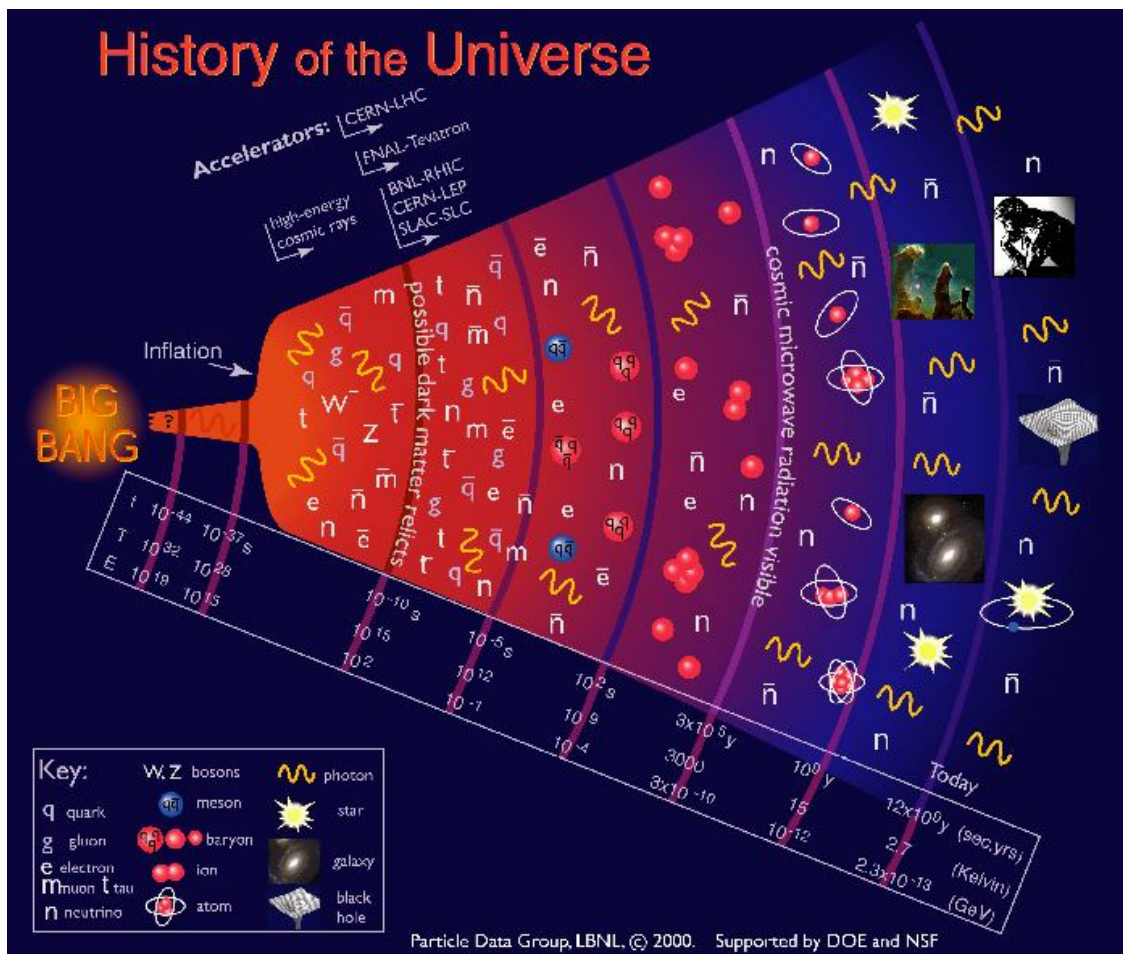
$T < T_c$

Estos dos últimos ejemplos son interesantes porque ilustran un fenómeno físico de gran importancia que se denomina *rotura espontánea de simetría*. Notemos que a alta temperatura el sistema tiene mayor simetría: todos los lugares y todas las direcciones son equivalentes pero después del cambio de fase se rompe la simetría y se selecciona espontáneamente una

dirección privilegiada (la dirección de la magnetización) o unas posiciones definidas. Veremos que el universo en una muy temprana edad hizo un cambio de fase con rotura espontánea de simetría.

Las tres eras del universo

El universo no siempre tuvo el mismo aspecto que observamos hoy. En la evolución temporal del universo, desde el preciso instante de su inicio hasta nuestros días, podemos reconocer tres etapas en las que el universo presenta características bien diferentes denominadas la *Era de Planck*, la *Era de la Inflación* y finalmente, la *Era de Materia y Radiación*, en la que se encuentra actualmente. Las dos primeras eras tuvieron una duración extremadamente corta y la tercera abarca casi toda la duración del universo. En la figura se ve un esquema en el que se representan varias etapas en la evolución del universo.



En esta figura, el tiempo transcurre desde la izquierda hacia la derecha de manera que el tiempo actual corresponde al extremo derecho, donde vemos al “Homo Sapiens”, planetas y estrellas organizadas en galaxias. La expansión del universo está representada en la figura por el ensanchamiento vertical. La mayor parte de la figura representa a la era de radiación y materia mientras que las eras de inflación y de Planck corresponden al extremo a la izquierda de la figura.

La era de materia y radiación

Antes de que, por acción gravitatoria, se formaran las estrellas y de que éstas se organizaran en galaxias, el universo estaba constituido por un gas en expansión, compuesto por átomos de hidrógeno y helio. En tiempos más cercanos al origen, en vez de átomos teníamos protones, neutrones y electrones sueltos inmersos en un océano de fotones (partículas de luz). En tiempos más tempranos aún, el universo era una sopa increíblemente densa y caliente de quarks, electrones y otros tipos de partículas que la física del siglo XX ha estudiado con gran detalle. Todo este tiempo, en que el universo evolucionó desde las partículas elementales hasta tomar el aspecto que observamos hoy, puede denominarse la *Era de Materia y Radiación* que abarca el tiempo desde $t=10^{-32}$ segundos después del inicio del universo hasta nuestros días, $t=1,4 \cdot 10^{10}$ años.

Notemos que el instante de inicio de la era de radiación y materia, $t=10^{-32}$ segundos, es increíblemente cercano a cero, o sea al inicio mismo del universo. Ese tiempo está más cerca de cero que cualquier nulidad de nuestra percepción sensorial. Por ejemplo: un segundo, comparado con la edad del universo es despreciable pero es 200 millones de millones ($2 \cdot 10^{14}$) de veces más grande que 10^{-32} segundos comparado con un segundo.

Es un motivo de orgullo de la cultura, y especialmente de la física, constatar que poseemos un conocimiento muy confiable del universo en esta era de radiación y materia. Las teorías físicas, principalmente la relatividad y la mecánica cuántica pero también las teorías llamadas clásicas, como la mecánica, termodinámica, electrodinámica, etc. brindan una descripción del universo que ha sido corroborada por innumerables observaciones y experimentos. Por

supuesto que existen numerosas preguntas, referidas a esta era de materia y radiación, que aún no tienen respuesta. Hay muchas predicciones teóricas que todavía no han sido confirmadas. Un ejemplo de esto es la predicción de la existencia de un tipo de partículas, el bosón de Higgs, que es necesario para darle coherencia a la teoría y que probablemente será descubierto en el acelerador LHC recientemente inaugurado en Europa. También se sabe que deben existir ciertos tipos de partículas que constituyen la llamada “materia oscura”, aún no descubierta. También hay ignorancia de las causas de la expansión acelerada del universo que se ha observado, contradiciendo la expectativa de que la expansión del universo debería irse atenuando por la acción gravitatoria. También existen serias posibilidades de que las teorías físicas, que son extremadamente exitosas, deban ser modificadas y corregidas y resulten ser solamente buenas aproximaciones de otras teorías aún no desarrolladas. Claramente, no tenemos un conocimiento definitivo del universo en esta era de radiación y materia pero podemos afirmar que estamos en buen camino hacia esa meta.

La era de la inflación

De la misma manera que hoy encontramos fósiles que nos permiten asegurar que hace cien millones de años existieron los dinosaurios, de forma similar, el estudio del universo actual nos permite inferir que antes del inicio de la era de materia y radiación, el universo pasó por una etapa en que su tamaño aumentó en forma exponencial, de manera que porciones minúsculas pasaron a ser gigantescas. El intervalo de tiempo, extremadamente corto, en que el universo creció en forma desmesurada se denomina la *Era de la Inflación*. En la era de la inflación, que estimamos que sucedió entre el tiempo de $t=10^{-43}$ segundos y $t=10^{-32}$ segundos, la extensión del universo se duplicó 86 veces; éste es el “Gran Pum” propiamente dicho. Para imaginar esa monstruosa explosión pensemos que en un tiempo increíblemente corto, una región del tamaño de un átomo creció hasta ocupar un año luz de extensión, mucho mayor que el tamaño actual del sistema solar y comparable con la distancia típica entre las estrellas. Una distancia de $0.1mm$, el ancho de un papel muy fino o el de una partícula de

polvo, se expande a un millón de años luz, diez veces el diámetro de la Vía Láctea.

Los “fósiles” que indican que la inflación tuvo lugar son múltiples. Uno de ellos es la homogeneidad que tiene el universo. Si observamos al universo en regiones suficientemente separadas como para asegurar que no pudo haber comunicación entre ellas, constatamos que esas regiones son casi idénticas: cantidad de galaxias, temperatura y distribución son como si se hubiesen igualado por interacción entre ellas pero dicha interacción parece ser imposible por la distancia que las separa. La inflación permite explicar dicha homogeneidad porque esas regiones, antes de la inflación, estuvieron suficientemente cercanas como para igualarse. Otro “fósil” interesante que sugiere la existencia de la inflación es que la densidad de energía del universo es muy cercana a la densidad crítica. Resulta que la densidad es una cantidad inestable: si fuese menor que la crítica debería ser *mucho menor* y si fuese mayor que la crítica debería ser *mucho mayor*; sin embargo las estimaciones sugieren que es *cercana* a la densidad crítica. Esto se entiende solamente si es *exactamente* igual a la densidad crítica. Una de las predicciones de la inflación, es justamente que la densidad del universo debe ser igual a la densidad crítica. Existen muchos otros motivos para convencernos de que la inflación tuvo lugar realmente a pesar de que ese hecho sucedió en un tiempo tan lejano que es imposible obtener una observación directa. La certeza que los físicos tienen de la existencia del período de inflación es tan grande como la que los paleontólogos tienen de la existencia de los dinosaurios.

Mencionamos antes, que la cultura puede sentirse orgullosa del conocimiento que se tiene sobre lo acontecido en la era de radiación y materia. Con la era de la inflación el orgullo no es tan grande. No poseemos una única descripción teórica de la inflación sino que tenemos varios esquemas alternativos y la falta de datos experimentales y de observaciones astronómicas no nos permite todavía discernir entre esas alternativas.

Ya vimos que la teoría de relatividad general y la mecánica cuántica presentan la posibilidad de existencia de un tipo de campo que tiene las características de expansión como la que aconteció durante la era de inflación. Esto es un logro importante. Así, podemos pensar que el universo durante la inflación en vez de contener partículas en movimiento (como sucederá un

instante más tarde durante la era de materia y radiación) estaba compuesto por un campo que podemos llamar “inflatón”. Una característica asombrosa de este campo es que la región que ocupa se expande exponencialmente como es requerido por la inflación. Otra característica importante de este campo es que su densidad de energía es constante o sea cuando aumenta de tamaño, también aumenta la energía pero esto no significa creación de energía en violación del conocido principio de conservación: a medida que el campo crece de tamaño su energía aumenta pero en la misma medida aumenta la energía potencial gravitatoria, que es negativa y ambas se cancelan. La misma cantidad total de energía inicial, que puede ser muy pequeña, se conserva pero la componente positiva de energía y la negativa gravitatoria pueden hacerse enormes. Justamente, esa enormidad de energía es la que se transformará en las partículas en movimiento en la era de radiación y materia.

Las fluctuaciones cuánticas son importantes para brindar una posibilidad de inicio del universo sin un creador externo. Es en efecto posible que en los tiempos extremadamente cortos de la era de la inflación, un campo inflatón apareciera como fluctuación del vacío y, dadas sus características gravitatorias, iniciara la expansión inflacionaria que dio origen al universo como lo hemos descrito. Disponemos entonces de teorías físicas que pueden explicar la inflación del universo pero existen muchos interrogantes que deberán ser resueltos para lograr una descripción plenamente satisfactoria. Uno de esos interrogantes es cómo se detiene la inflación en $t=10^{-32}$ segundos, cuando comienza la era de radiación y materia. Una posibilidad para explicar el fin de la inflación es que el inflatón es un campo que está en un estado inestable, como por ejemplo podría ser una fina varilla parada en posición vertical sobre uno de sus extremos. Después de un tiempo corto, el inflatón decae espontáneamente (la varilla cae) y toda su energía se materializa y se transforma en las partículas que existen en el inicio de la era de radiación y materia (quarks, electrones, y otras). El universo hace así un cambio de fase, una transición espontánea en que toda la energía del inflatón se transforma en materia y radiación. El campo en brutal expansión se transforma en partículas y la expansión inflacionaria se detiene dando lugar a la expansión normal del universo por la inercia de las partículas en movimiento. Existen decenas de propuestas teóricas con diferentes detalles de cómo se produce el cambio de fase que detiene la inflación

y desafortunadamente no disponemos aún de criterios empíricos para determinar cuál es la descripción correcta de lo que realmente sucedió durante la era de la inflación. Confiamos en que en el siglo XXI se podrán resolver esas ambigüedades.

La era de Planck

Si la era de radiación y materia está caracterizada porque tenemos un buen conocimiento teórico y experimental de lo acontecido, y la era de la inflación está caracterizada porque tenemos varias propuestas teóricas pero pocos datos empíricos para validarlas, entonces podemos caracterizar la era de Planck por una falta de propuestas teóricas y también una falta de datos empíricos. Sobre el universo en este intervalo de tiempo, desde $t=0$ a $t=10^{-43}$ segundos, sabemos poco y sólo podemos hacer algunas especulaciones.

Ya se dijo que el tiempo de inicio de la era de radiación y materia es increíblemente corto. Sin embargo, dentro de esa escala de tiempo podemos concebir la evolución de un sistema físico de un estado a otro. De hecho, hemos visto que el universo cambió violentamente en tiempos más cortos aún durante la era de la inflación. Los tiempos involucrados en la era de Planck son tan cortos que ningún sistema físico cambia en su transcurrir. Podemos considerar que en esta escala el tiempo pierde su capacidad de ordenar los eventos. Esto es, entre dos eventos separados por el tiempo de Planck, $T_p=10^{-43}$ segundos, no podemos decir cuál de ellos es anterior al otro. Dentro del tiempo de Planck no hay pasado ni futuro; el tiempo de Planck es la *duración del instante* físico. Relacionado con el tiempo de Planck T_p , también se define la longitud de Planck $L_p=10^{-35}m$, que es la distancia que recorrería la luz durante el tiempo de Planck. De la misma manera que el tiempo de Planck es la duración del instante, podemos decir que la longitud de Planck es la *extensión del lugar*. Dos puntos separados por L_p están juntos en el sentido que ningún proceso físico los puede diferenciar. La escala de Planck marca los límites de discernibilidad o de resolución del espacio-tiempo. En algunos modelos teóricos, se propone que el espacio-tiempo tiene una especie de estructura granular o como pequeñas burbujas en una espuma con pequeños dominios de extensión L_p que aparecen y desaparecen en tiempos T_p .

Una cuestión importante durante la era de Planck es lo que sucede con las fluctuaciones cuánticas. Recordemos que según la mecánica cuántica, es posible la emergencia de cierta cantidad de energía, de la nada y en aparente violación de la conservación de energía, durante un tiempo suficientemente corto al cabo del cual se reestablece el balance energético. Si el tiempo de “violación” es muy corto la cantidad de energía puede ser grande y viceversa, en tiempos más largos solamente valores de energía muy pequeños son aceptables. ¿Qué pasa con las fluctuaciones cuánticas durante la era de Planck? Si las fluctuaciones existen durante la era de Planck y si tenemos en cuenta que los tiempos involucrados en esta era son increíblemente pequeños, resulta que la energía de esas fluctuaciones debe grande. Además, esa gran cantidad de energía está distribuida en regiones increíblemente pequeñas y por lo tanto las fluctuaciones en la era de Planck están caracterizadas por tener una gigantesca densidad de energía. Tan grande es esa densidad de energía o de masa (recordemos que masa y energía son equivalentes) que la atracción gravitatoria es tan grande que esa masa colapsa sobre sí misma como en un agujero negro. Las fluctuaciones en la era de Planck son agujeros negros que colapsan. Durante esta era, el universo no puede crecer a partir de una fluctuación porque éstas se devoran a sí mismas. Son intentos frustrados. Esto cambia cuando entramos en la era de la inflación en la que las distancias y los tiempos son mayores y la atracción gravitatoria de las fluctuaciones no es suficiente para colapsarlas. Recién entonces, de una fluctuación cuántica puede emerger un campo inflatón que inicia la brutal expansión que caracteriza dicha era. Para aclarar esto podemos acudir a una metáfora y pensar que durante la era de Planck, el espacio-tiempo es como una matriz que no ha llegado aún al estado de madurez requerido para que pueda crecer el germen que dará nacimiento al universo. La fertilidad es alcanzada después, en la era de la inflación, en que empieza a crecer el universo en forma explosiva. Antes de eso el universo devoraba a sus propios hijos como lo hacía el dios Chronos (Saturno) terriblemente representado por F. Goya.



Francisco de Goya
Saturno devorando a uno de sus hijos
(1819-1823)

Para la escala de Planck no tenemos aún una teoría física que nos permita describir el comportamiento de los sistemas físicos. Dicha teoría debería contener simultáneamente la relatividad general de Einstein y la mecánica cuántica. Existen varios intentos de formular dicha teoría pero ninguno es totalmente satisfactorio. El desarrollo de esta teoría será una de las principales tareas de la física teórica del siglo XXI. En ausencia de esa teoría, es poco lo que podemos asegurar sobre el aspecto del universo en la escala de Planck que marca el propio inicio del universo. La era de Planck marca el inicio del espacio-tiempo-energía que por el momento podemos imaginar como fluctuaciones cuánticas frustradas, pero solamente con el desarrollo de una teoría adecuada podremos adquirir cierta certeza de cómo era el universo en su inicio.

Leyenda (fundada) del génesis

En resumen de todo lo anterior, podemos presentar la leyenda que los científicos han desarrollado para el origen y evolución del universo. Esta leyenda es fascinante y está llena de poesía pero se diferencia esencialmente de las otras leyendas de la creación, presentada por los mitos y religiones, en que ésta es fundada, o sea, responde a criterios de validación empírica, si no en todos sus aspectos, al menos en la mayoría de ellos y podemos tener la esperanza en que la ciencia logrará en el futuro, brindar un modelo único y racional del universo sin intervención divina. Las etapas principales de esta leyenda son,

Etapas

- Nada. Ni tiempo ni espacio ni materia (*Vernichtende nichts*).

- Aparecen fluctuaciones cuánticas frustradas. Burbujas que se autodevoran.
- Fluctuación cuántica de un campo inflatón que explota.
- Cambio de fase: el inflatón deviene en quarks, leptones y radiación.
- Expansión lenta con enfriamiento y formación de protones, neutrones, núcleos, átomos de hidrógeno y helio.
- Crecen las fluctuaciones de la densidad hasta que se encienden las primeras estrellas y se organizan en galaxias.
- En las estrellas se fabrican los núcleos pesados.
- Explosiones de supernovas dispersan el polvo cósmico.
- Formación de nuevas estrellas y planetas.
- Crecimiento de la complejidad autoorganizada. Vida. Evolución.
- Filosofía: el Homo Sapiens comienza a pensar. Primero fue agricultor para vencer el hambre, después teólogo para superar el miedo y al fin físico para entender el universo.
- Escribió la leyenda fundada del génesis.

Bibliografía

DAVIES, P. (1994). *Superfuerzas*. Salvat Editores.

DE LA TORRE, A. C. (2009). *Universo sin dioses*. Mar del Plata, EUDEM.

GUTH, A. H. (1997). *The Inflationary Universe*. Perseus Books.

HAWKING, S. (1988). *Historia del Tiempo*. Grijalbo.

HOGAN, C. J. (1998). *The Little Book of the Big Bang*. Nueva York, Springer Verlag.

LONGAIR, M. S. (1996). *Our Evolving Universe*. Cambridge University Press.

PADMANABHAN, T. (1998). *After the First Three Minutes*. Cambridge University Press.

PEACOCK, J. A. (1999). *Cosmological Physics*. Cambridge University Press.

REES, M. (2000). *Just Six Numbers*. Lymington, Basic Books.

WEINBERG, S. (2001). *Facing Up*. Harvard University Press.