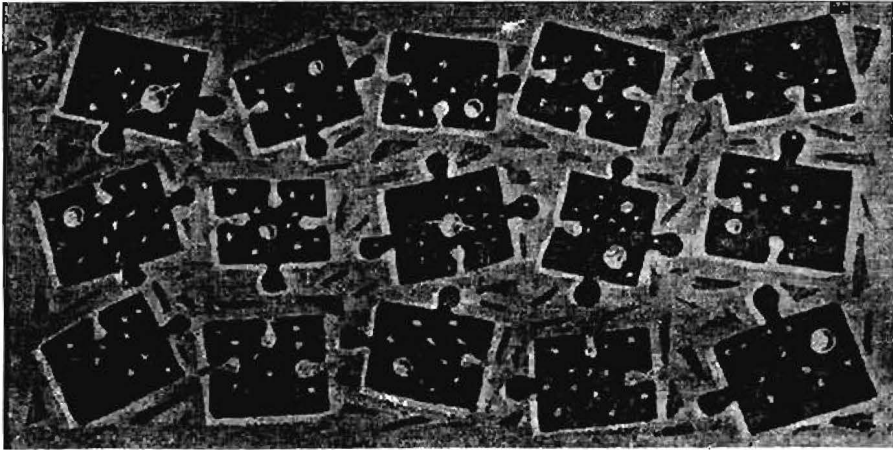


¿Como se formó el Mundo?*

EDWARD P. TRYON



El vacío más perfecto permitido por la teoría cuántica no es completamente vacío e inmutable. Nuestro Universo puede haber comenzado como una fluctuación del vacío la cual entonces se "infló" para hacer al Universo del tamaño que lo vemos hoy.

El título de este artículo fue la forma en que mi hija preguntó la cuestión más fundamental de la naturaleza: ¿de dónde proviene todo? Hoy, la respuesta científica se expresa usualmente en términos de la cosmología de la gran explosión. Las preguntas se convierten en: ¿Cuál fue el origen de la materia primitiva y qué causó la erupción de la materia en la gran explosión?

En 1973, propuse que nuestro Universo había sido creado espontáneamente de la nada (*ex nihilo*)¹, como resultado de principios establecidos de la física. Esta propuesta le pareció a la gente absurda, encantadora, o ambas cosas.

La novedad de una teoría científica de creación *ex nihilo* es evidente, ya que la ciencia nos ha enseñado que uno no puede hacer algo a partir de nada. Este enunciado coloquial de principio científico, sin embargo, merece escrutinio ya que la ciencia es notoriamente precisa, y las nociones de "algo" y "nada" pueden guardar sorpresas.

La ciencia ha identificado gradualmente varios aspectos de los sistemas

físicos que pueden ser cuantificados en formas simples y los cuales son "conservados", esto es, mantienen el mismo valor neto durante cualquier proceso físico. Ejemplos familiares son la energía, el momento lineal y el angular y la carga eléctrica. Otros ejemplos más abstrusos se encuentran en el campo de la física de partículas elementales, en donde un experimento típico involucra el acelerar un haz de protones o de electrones a una velocidad cercana a la de la luz, hacer chocar el haz contra un blanco compuesto de casi cualquier cosa y observar que pasa. Uno de los resultados más interesantes de tales colisiones es la creación de partículas que no estaban antes: algo de la energía cinética del haz incidente sufre una conversión en la masa de las partículas creadas, de acuerdo con la relación de Einstein $E = mc^2$. La masa y la energía no se conservan separadamente, aunque la masa-energía total sí. En todas las colisiones observadas, tales eventos de creación han mostrado regularidades que pueden codificarse como leyes de conservación. Las cantidades conservadas incluyen una entidad llamada "número bariónico", el cual tiene un valor + 1 para protones y neutrones y - 1 para antiprotones y antineutrones. La conservación del número bariónico significa que, cuando se crean partículas, se crea materia y antimateria en igual cantidad.

Para basar la factibilidad de crear un universo como el nuestro de nada, uno debe determinar el valor neto que tiene nuestro Universo de cada una de las cantidades conservadas conocidas. Para ser breve, me restringiré la atención aquí a las cantidades antes enumeradas, las cuales ilustran los rasgos esenciales. Las mediciones precisas de las propiedades cósmicas están más allá de nuestros medios, pero es eminentemente consistente con las observaciones el decir que nuestro Universo tiene valores netos de la carga eléctrica, del momento lineal y del momento angular iguales a cero. El número bariónico es más problemático: si se conservara, como se creía generalmente en 1973, entonces un universo creado de la nada contendrá cantidades iguales

* Tomado de *News Scientist*.

¹ Del latín nihil, nada (N. de T.).

de materia y antimateria. Por lo tanto la conjetura original de creación *ex nihilo* predecía que nuestro Universo contiene igual número de galaxias de materia y de antimateria. No había evidencia empírica sobre galaxias de antimateria en 1973, pero las investigaciones no eran aún definitivas. La posibilidad permanecía abierta. Llegamos finalmente a la conservación de la energía, la cual parecería haber evitado la creación de nuestro Universo de la nada. Hemos aprendido de Einstein que la materia es una forma de energía y nuestro Universo contiene una cantidad enorme de materia. Existe, sin embargo otra forma de energía de importancia central en cosmología, a saber la energía potencial gravitacional.

Dado que la gravedad es una fuerza universalmente atractiva, la energía potencial asociada con ella se acostumbra considerarla de signo negativo. ¿Podría la energía gravitacional negativa de todo el Universo cancelar la masa-energía positiva de las galaxias, dando una energía neta cero para el Universo como un todo? Para reforzar esta idea, debemos considerar la estructura a gran escala del Universo en que vivimos.

Como es costumbre, suponemos que el Universo es isótropo (igual en todas direcciones) y homogéneo (igual en todas partes), en cuyo caso no tiene centro ni bordes. Las galaxias distantes se alejan unas de otras. Vista desde cualquier galaxia típica, incluyendo la nuestra, la velocidad de recesión de otra galaxia típica está relacionada con la distancia d por $v = Hd$, donde H es la constante de Hubble. El tiempo requerido para que una galaxia haya alcanzado su distancia actual a nosotros es $T = d/v$, suponiendo que su velocidad ha sido siempre la misma. (Esta es una aproximación, pero servirá para continuar). La relación de Hubble entre d y v da entonces el "tiempo de Hubble" $T = 1/H = 15 \times 10^9$ años, una estimación de la edad del Universo.

En el marco de la relatividad general —la mejor teoría del Universo que tenemos— hay tres posibilidades.

El Universo puede ser "cerrado" y finito. En términos de la ecuación de Einstein, el espacio se curva sobre sí mismo, como la curvatura que "cierra" la superficie de una esfera. En términos cotidianos, en un Universo cerrado, la atracción gravitacional entre todas las galaxias es suficientemente fuerte para invertir la expansión inicial. La "gran explosión" culmina en un "gran crujido". El Universo puede ser "abierto" e infinito (el espacio se curva, pero no se cierra sobre sí mismo). En un Universo abierto, la fuerza de gravedad es demasiado débil para detener la expansión inicial.

El Universo puede ser "plano" e infinito (no hay curvatura del espacio, de ahí el nombre "plano"). Un Universo plano se expande por siempre, pero menos rápidamente que en el caso abierto.

Los tres tipos de universo difieren en el efecto final de la gravedad sobre la expansión inicial. Ya que la masa es fundamentalmente la fuente de la gravedad, el destino de nuestro Universo está gobernado por la relación entre la densidad promedio de materia y una "densidad crítica", ρ_c . La densidad crítica depende de la rapidez actual de expansión, la cual está caracterizada por la constante de Hubble y de la constante gravitacional de Newton G (uno puede mostrar que $\rho_c = 3H^2/8\pi G$). Si ρ es mayor que ρ_c , el universo es cerrado; si ρ es menor que ρ_c , el universo es abierto; y si $\rho = \rho_c$ el universo es plano.

El valor numérico de ρ_c es alrededor de $8 \times 10^{-30} \text{ gr/cm}^3$. La densidad real no se conoce bien, pero la masa detectada hasta ahora comprende un 10 por ciento de la densidad crítica, y puede quedar más por hallarse. Es una de las características más notables de nuestro Universo el que su densidad sea tan cercana a la densidad crítica.

Así, ¿cuánta energía gravitacional contiene el Universo? En la teoría Newtoniana, la energía gravitacional E_g de dos masas m y M separadas por una distancia r está dada por $E_g = -GmM/r$. Si m denota la masa de cualquier objeto familiar, por ejemplo la tierra, necesitamos elegir M y r para referirlos al resto del Universo en algún sentido apropiado.

El "radio de Hubble" R del Universo es la distancia que la luz podría haber viajado a una velocidad c durante el tiempo de Hubble, desde el inicio del Universo: $R = cT \cong 15 \times 10^9$ años luz. La fuerza de gravedad se propaga a la velocidad de la luz, por lo que solamente las galaxias dentro de una esfera de radio de Hubble han tenido tiempo para interactuar con la tierra. Si tomamos M como la masa dentro de la esfera, suponiendo que el espacio contiene la densidad de materia crítica, y aproximando la distancia promedio a la materia en esa esfera por la mitad del radio de Hubble, entonces la fórmula Newtoniana da $E_g = -mc^2$. Así emerge un hecho notable: si el espacio contiene la densidad de materia crítica, entonces una estimación simple e ingenua indica que la energía gravitacional cósmica es suficiente para cancelar la masa-energía mc^2 de la Tierra y, por analogía, de cualquier otro objeto.

El análisis precedente no es riguroso, ni puede hacerse que lo sea: la energía neta de un universo resiste una definición precisa. Tenemos sin embargo una fuer-

te indicación de que un universo cerrado, al menos, podría ser creado de la nada. Solamente los modelos de Universo cerrado contienen una cantidad finita de materia, y los procesos físicos tienden a resultar en sistema finitos. Por tanto mi propuesta de creación *ex nihilo* estaba acompañada de una predicción de que nuestro Universo es finito y por consiguiente "cerrado".

Si se admite que nuestro Universo tiene valores netos iguales a cero para todas las cantidades conservadas, la cuestión persiste: ¿qué podría haber causado la creación del Universo? Una respuesta plausible para esta pregunta de la "primera causa" es provista por la teoría cuántica del campo, la cual describe (con gran éxito) la creación, aniquilación e interacciones mutuas de las partículas elementales. Puesto que es una teoría cuántica, existen incertidumbres intrínsecas en los fenómenos que describe. Entre otras cosas, el número de partículas presente en cualquier instante y/o lugar es incierto, estando sujeto a "fluctuaciones cuánticas" espontáneas. El Vacío más perfecto permitido por la teoría no es completamente vacío e inmutable, sino más bien una etapa para la creación espontánea de pares partícula/antipartícula.

En circunstancias normales, tales pares desaparecen después de un tiempo sumamente breve: su persistencia violaría la conservación de la energía (la cual se cumple en tiempos macroscópicos en la teoría cuántica, pero puede ser violada por duraciones microscópicas debido a una relación de incertidumbre tiempo-energía). Pero si hubiera una fluctuación cuántica espontánea dando un sistema con energía neta cero, ese sistema podría persistir para siempre. En principio, no hay límite a qué tan grande podría ser tal fluctuación. Así yo conjeturé que nuestro Universo tenía su origen físico como una fluctuación cuántica de algún verdadero vacío preexistente. Así se encontraban las cosas cuando mi propuesta de creación *ex nihilo* fue publicada en *Nature* en Diciembre de 1973.

Dificultades y su solución

Inmediatamente, la conjetura se encontró con dificultades. Se montaron búsquedas de galaxias de antimateria mediante instrumentos llevados por cohetes por encima de la atmósfera terrestre, desde donde deberían ser fáciles de detectar: pero ninguna se encontró. Emergió un consenso de que nuestro Universo es burdamente asimétrico entre materia y antimateria, en aparente contradicción con la creación *ex nihilo*. También

nuevas estimaciones de la densidad de la materia, junto con reinterpretaciones de los datos sobre la rapidez con que se reduce la expansión cósmica, llevaron a la difundida (aunque corta de consenso) creencia que nuestro Universo es abierto e infinito. Esto parecía conformar otra refutación a la propuesta.

Había también dificultades teóricas.

¿Porque es nuestro Universo tan grande y longevo? Uno esperaría que las fluctuaciones cuánticas produjeran muchos más universos pequeños que grandes, así que ¿qué explicación hay para el "tamaño innecesariamente grande" del nuestro?

¿Porqué es el Universo isótropo y homogéneo? La conjetura de la creación *ex nihilo* provee una explicación parcial ya que si la creación fuera un resultado de una ley física, la (supuesta) universalidad de la ley física debería resultar en fuertes similitudes entre todas las regiones del cosmos. Esta explicación es insuficiente, sin embargo: la conjetura parece permitir universos con rapidez de expansión arbitrarias, y no es claro porqué un universo no podría estar expandiéndose más rápidamente en algunas regiones que en otras, violando la isotropía y la homogeneidad.

El modelo de la "gran explosión caliente" ha estado con nosotros tanto tiempo que damos por supuesto la existencia de temperaturas muy altas en el Universo temprano. Sin embargo, las soluciones cósmicas de la relatividad general permiten la expansión sin un movimiento local azaroso; un universo en expansión puede tener temperatura cero. Por lo tanto, ¿por qué fue caliente el Universo temprano?

Finalmente, ¿cómo llegó el Universo temprano a estar en un estado de rápida expansión? La expansión temprana no fue un resultado de la alta temperatura, ya que uno puede mostrar que un universo nacido caliente pero inicialmente estacionario comenzaría inmediatamente a contraerse bajo la fuerza de la gravedad.

Hasta hace poco, estas preguntas no respondidas parecían dejar la creación *ex nihilo* sin una base segura. Durante los pasados cinco años, sin embargo, han emergido resoluciones plausibles de todas estas dificultades, comenzando con la ausencia de galaxias de antimateria.

Inspirados por el éxito en la unificación de la interacción electromagnética y la débil en una sola teoría "electrodébil", un número de teorías han considerado "teorías de la gran unificación" (o "TGU s") las cuales combi-



Edwin Hubble midió la velocidad a la cual se expande el Universo.

nan la interacción electrodébil y la fuerte (nuclear). Muchas de éstas teorías han sido propuestas a partir de la primera en 1974, y actualmente se gasta mucho esfuerzo para ver cual (si alguna) de ellas es concreta. Un rasgo notable de tales TGUs es que el número bariónico no se conserva estrictamente: la aparente simetría entre materia y antimateria se rompe dramáticamente a energías muy altas o, equivalentemente, a temperaturas muy altas.

Una consecuencia interesante de las TGUs es que la preponderancia observada de la materia sobre la antimateria podría haber surgido a partir de condiciones inicialmente simétricas a tiempos muy tempranos (10^{-35} segundos después de la gran explosión), cuando la temperatura era muy alta.

El camino está abierto para que los universos comienzan simétricos pero desarrollen muy rápidamente asimetrías materia/antimateria. Respecto a las posibilidades de que nuestro Universo sea abierto, la creencia en un universo abierto se ha desgastado. Existe una consideración renovada acerca de la dificultad de determinar si nuestro Universo es abierto, cerrado o plano.

Las dificultades restantes han hallado soluciones plausibles en los pasados tres años. En 1981, Alan Guth publicó una conjetura fascinante basada en una descripción de los primeros 10^{-35} segundos en términos de TGUs. La esencia del "modelo inflacionario" de Guth es que el Universo sufrió una expansión extravagante durante ese breve periodo, debido a una extraña ecuación de estado para la materia en ese temprano periodo.

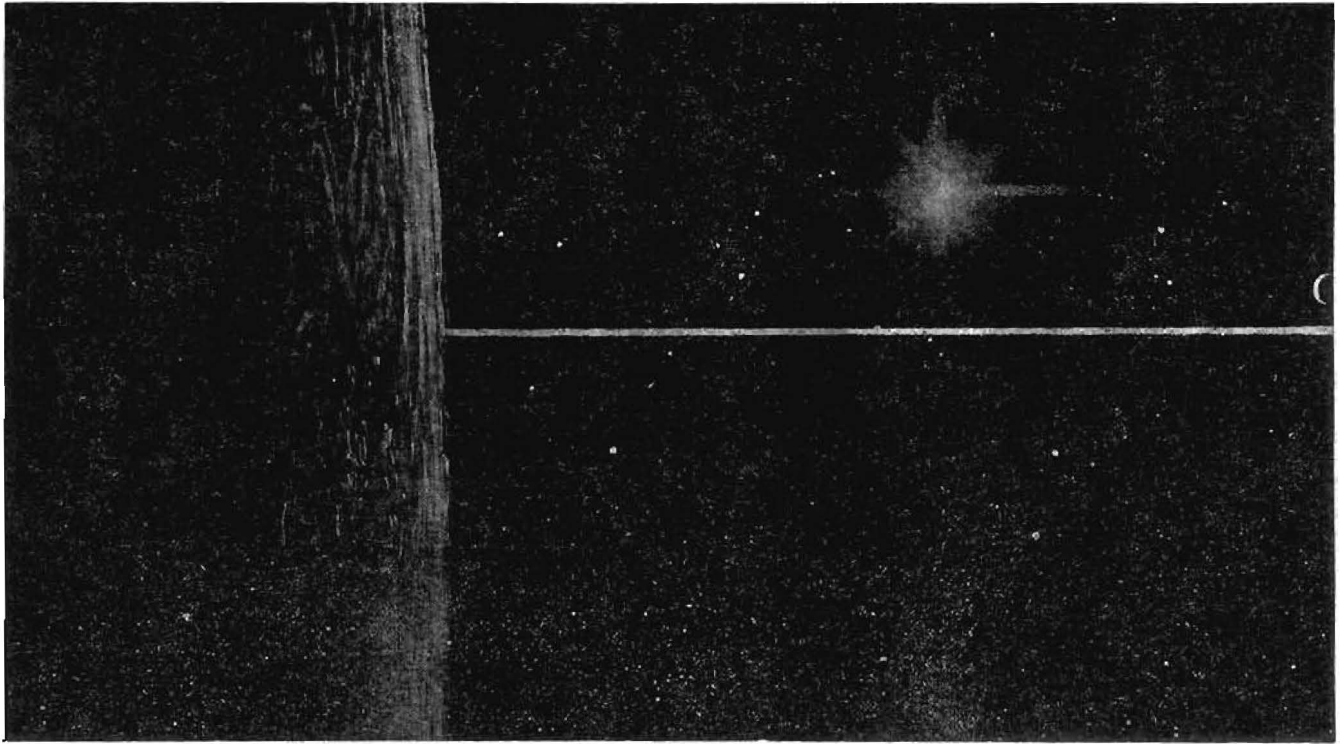
La fuerza gravitacional entre las galaxias está reduciendo la rapidez actual de expansión. Uno puede preguntar: ¿existe algún fenómeno natural que

aceleraría la rapidez de expansión, comportándose, en efecto, como una fuerza cósmica de repulsión o "antigravedad"? Dentro del contexto de la relatividad general, la respuesta es sí, puesto que la materia puede exhibir la propiedad peculiar de una gran presión negativa.

En la relatividad general, la fuente neta de gravedad en un medio isótropo y homogéneo es $\rho + 3P/c^2$, donde ρ es la densidad de masa energía y P es la presión ejercida por el medio. En circunstancias familiares, la presión es positiva y su contribución a la gravedad es insignificante.

Para entender qué significa una presión negativa, notamos que la materia que ejerce una presión positiva tiene una tendencia innata a expandirse. Recíprocamente, la materia que ejerza una presión negativa tendría una tendencia innata a contraerse (por ejemplo, el hule que abarca una pelota sólida cuya superficie ha sido estirada hacia afuera en todas direcciones). Si la presión fuera negativa y suficientemente grande, entonces $\rho + 3P/c^2$ sería negativa, y entonces la gravedad se comportaría en una forma perversa: ejercería una fuerza repulsiva.

Todas las TGUs tienen una importante entidad llamada campo de Higgs (en honor de Peter Higgs de la Universidad de Edimburgo). Los campos, por naturaleza, tienen algún valor en todos los puntos del espacio. En la mayoría de las teorías, un campo cuyo valor es cero en alguna región no tiene consecuencias ahí: un campo nulo usualmente tiene valores nulos para todas



las cantidades físicas. Un campo de Higgs, sin embargo, tiene la notable propiedad que posee una cantidad definida, positiva de masa-energía ρ_H en cada unidad de volumen que ocupa. Por lo tanto uno tendría que hacer trabajo para incrementar el volumen del espacio dentro del cual el campo de Higgs es cero, ya que la energía de un campo de Higgs nulo es proporcional al volumen que ocupa. Recíprocamente, cualquier volumen tal de espacio tendría una tendencia innata a la contracción, ya que se liberaría energía en el proceso.

Por lo tanto un campo de Higgs nulo ejerce una presión negativa P_H , y uno puede mostrar que $P_H = -\rho_H c^2$.

En el modelo inflacionario, uno presume que el campo de Higgs ha sido cero durante un periodo muy temprano del tiempo cósmico, y se supone además que el campo nulo de Higgs ha dominado la masa-energía y la presión cósmicas durante parte de (o todo) ese periodo. Puesto que $P_H = -\rho_H c^2$, la fuente de gravedad cósmica era aproximadamente $\rho_H + 3P_H/c^2 = -2\rho_H$, una cantidad negativa cuyo efecto gravitacional fue la repulsión. El Universo respondió expandiéndose a una rapidez acelerada, y uno puede mostrar que su tamaño creció exponencialmente en el tiempo. El factor por el cual se expandió el Universo solamente puede ser estimado, pero parece razonable un factor de 10^{29} o más durante este breve periodo (10^{-35} segundos) de crecimiento exponencial.

Un campo nulo de Higgs es inestable intrínsecamente, temiendo una tendencia innata a evolucionar hacia el valor que tiene la mínima energía (cero). Cambió a este valor cuando el Universo tenía alrededor de 10^{-35} segundos, y su densidad de masa-energía fue convertida en la masa-energía de quarks (de los cuales están hechos los protones y los neutrones), electrones, etc., y sus correspondientes antipartículas. Esta conversión de energía de una forma a otra ocurrió en una forma caótica, así que se generó calor. La temperatura cósmica se incrementó dramáticamente. En la alta temperatura resultante, la naturaleza asimétrica de las TGU's resultó en que la materia llegó a ser preponderante sobre la antimateria. Subsecuentemente el Universo evolucionó de acuerdo con el modelo estándar de la gran explosión.

Si ocurrió la inflación cósmica, las preguntas planteadas anteriormente como desafíos a la creación *ex nihilo* encuentran fácil respuesta. El "tamaño innecesariamente grande" de nuestro Universo es un resultado de esa temprana inflación. Las fluctuaciones cuánticas originales crearon solamente un "universo microscópico" el cual, sin inflación, nunca hubiera alcanzado proporciones macroscópicas (mucho menos cósmicas). La inflación dio lugar a la rápida expansión, y convirtió el microcosmos inicial en un cosmos.

La isotropía y la homogeneidad son explicadas notando que el universo observable fue enormemente más peque-

ño en un tiempo temprano (anterior a la inflación) que lo que se había supuesto corrientemente. Las galaxias más distantes que vemos ahora a través de los telescopios más grandes estuvieron originalmente tan cercanas que hubo tiempo suficiente para alcanzar un equilibrio dinámico.

En el escenario original de Guth's el Universo comenzó con una gran explosión caliente (por razones no especificadas por él), y el campo de Higgs adquirió un valor nulo como resultado de estar en equilibrio térmico con la materia caliente y la radiación. Uno puede imaginar, sin embargo, que el microcosmos inicial nació con una temperatura y una velocidad de expansión modestas. En ausencia de inflación, habría colapsado rápidamente. Las fluctuaciones cuánticas habrían producido un microcosmos con un campo nulo de Higgs. Sin embargo, la inflación produjo entonces la expansión, y la conversión de la energía del campo de Higgs en materia caliente y radiación en un tiempo de 10^{-35} segundos inició la "fase de la gran explosión caliente".

Así, la propuesta de creación *ex nihilo*, originalmente motivada por una simple estimación Newtoniana de la energía gravitacional y por los principios de la teoría cuántica del campo, permanece especulativa, pero aparece viable en detalle más bien notable.