

2205, 100 años de la Teoría Especial de la Relatividad

La energía oscura

- No solo se está expandiendo, el Universo también se está acelerando.
- La aceleración se debe a la energía del vacío, constante cosmológica, o quintaesencia.
- Vivimos en un mundo oscuro, solo el 0.5% es visible, 23% es materia oscura.
- El 73% del universo es una forma de *energía oscura* de naturaleza desconocida.

El universo está en expansión: 100 años de poderosa teoría

Cuando Albert Einstein propuso en 1917 su Teoría General de la Relatividad (TGR) el entendimiento del universo era limitado. No se sabía que el universo estaba en expansión. En 1929, Alexander Friedman resolvió las ecuaciones de Einstein y encontró que sus soluciones implicaban un universo en expansión. En 1930, Edwin Hubble observó que las galaxias se alejaban unas de otras, con una velocidad proporcional a su distancia, comprobando que el universo se expande.

Pero Einstein, al principio, estaba convencido que el universo debía ser estático. Ese era el concepto que prevalecía a principios del siglo XX. Sin embargo, esa idea no era consistente con sus propias ecuaciones. Entonces, agregó un término a las mismas para obtener una solución estática. Una constante (cosmológica) fue introducida para que la fuerza gravitacional de repulsión contrabalanceara a la atracción gravitacional de la materia. Sin embargo, ese término no es necesario para explicar un universo en expansión. Después de tales experiencias el maestro suprimió ese término.

La Teoría de la Relatividad de Einstein es una teoría que lleva ya 100 años y sigue resistiendo

todas las pruebas. Más aún se siguen produciendo importantes consecuencias. En muchos aspectos estamos apenas en el principio de “algo”. El famoso astrofísico hindú, S. Chandrasekar, una vez dijo que la teoría de Einstein era limitada porque solamente estaba abriendo las puertas para un mundo nuevo. En efecto, Einstein construyó una visión nueva del universo, visión que sigue en desarrollo. La última palabra no está dicha. Apenas hace 7 años, en 1998, empezó una revaloración en la física del siglo XXI y, la constante cosmológica, ha vuelto a resurgir.

La constante cosmológica

Hoy en día, la constante cosmológica de Einstein se entiende de otra manera. Las ecuaciones de campo de Einstein relacionan la curvatura del espacio con la distribución de materia y energía. Son 2 partes de una misma ecuación. El término cosmológico fue agregado originalmente al lado izquierdo, en la parte geométrica de las ecuaciones, sugiriendo que la constante era una propiedad del espacio. Sin embargo, si el término se escribe del otro lado, en la parte de materia, tiene otro significado. La constante, ahora, representa una nueva forma de energía que permanece constante mientras el

universo se expande y cuya gravedad es repulsiva en vez de ser atractiva.

La constante surge de las recientes observaciones de un universo en aceleración y de los principios de la mecánica cuántica. Es decir, la nueva forma de energía solo puede ser posible en un espacio vacío.

Cuando se habla del espacio vacío se dice comúnmente que es la “nada”. Sin embargo, a nivel del mundo subatómico cuántico, a escala muy pequeña, el espacio vacío no está realmente vacío. En tal escala, las partículas y antipartículas surgen del vacío (se aparecen), recorren cortas distancias y desaparecen en un tiempo tan corto que no se pueden observar directamente. Esto es una consecuencia del Principio de Incertidumbre de Heisenberg. Sin embargo, en ese nivel, los efectos cuánticos pueden ser muy importantes y se pueden observar (y medir) indirectamente.

Entonces, si las partículas virtuales del espacio vacío existen, y tienen movimiento, podrían tener una energía que no es cero. Desde el punto de vista de la mecánica cuántica, la constante cosmológica no es opcional sino un término necesario. El problema es que el valor de la energía del espacio vacío (o constante cosmológica) es demasiado grande, más de 10^{100} veces la materia y la energía de todo el universo observable. Se piensa que, si esa energía, fue tan alta al principio del universo, éste podría haber “volado” literalmente.

La energía de la nada

Para la teoría de la relatividad todas las formas de energía, incluyendo la energía de la nada, actúan como una fuente de gravedad. La nada cuántica tiene gravedad negativa. Así como la gravedad de un objeto depende de su masa, la fuerza repulsiva de la nada depende de cuánto pesa la nada. La nada tiene peso porque el espacio vacío está permeado por un mar de partículas virtuales.

Las primeras estimaciones de la densidad de energía del vacío las hizo Yakov B. Zel'dovich en 1960. Como el valor obtenido era absurdamente muy alto, se pensó que algo podría cancelar a la energía del vacío y, se supuso, que era más plausible que la densidad del vacío fuera cero, es decir, la nada cuántica pesaba nada.

Después se avanzó al medir la velocidad con que el universo parecía desacelerarse. Las observaciones del alejamiento de las galaxias, hechas por Hubble, explicadas por la teoría de la

2005 energía 5 (70) 51, FTE de México
relatividad establecían que la ley de Hubble surgía de la expansión del espacio, misma que podría detenerse en el tiempo debido a la atracción gravitacional. Muchos cosmólogos se dedicaron, entonces, a medir la desaceleración del universo para confirmar las teorías sobre la forma y el destino del universo.

La aceleración del universo

Hace apenas una década, en los 90s, dos grandes grupos trataron de medir esa desaceleración y encontraron lo opuesto. El universo no está en desaceleración, ni va a la contracción, sino que se está acelerando, se trata de un universo en expansión y en aceleración.

En el Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley, un grupo norteamericano y, en el Observatorio Mount Stromlo, un grupo australiano encabezados por Saul Perlmutter y Brian Schmidt respectivamente, en sendos importantes proyectos trataron de medir la desaceleración de la expansión del universo mediante observaciones de explosiones de supernova utilizadas como candelas standard. En 1998, ambos grupos anunciaron sus resultados: en los últimos 5 mil millones de años (casi la edad de la Tierra), la expansión del universo se ha estado acelerando no al revés. Esta expansión acelerada es debida, aparentemente, a una aceleración gravitacional repulsiva de “algo”. Ese “algo” sería una forma de energía cuya naturaleza desconocemos.

El universo es plano

Los tres grandes apoyos de la teoría de la gran explosión (Big Bang) del universo son: la expansión del universo, la existencia de una radiación cósmica de fondo de microondas y la nucleosíntesis (formación) de los elementos químicos ligeros (hidrógeno, helio y litio).

La radiación de fondo fue descubierta (accidentalmente) en 1965. En 1995, el satélite COBE (Cosmic Microwave Background Explorer) descubrió variaciones (anisotropías) en la radiación cósmica de fondo. En el año 2000 se hicieron nuevas mediciones y se concluyó que la geometría del universo es plana. Esto fue confirmado por el satélite WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) en 2003. Pero un universo plano requiere de una forma de energía como la energía del vacío.

2005 energía 5 (70) 52, FTE de México

El WMAP alcanzó a mirar desde los 400 millones de años después del Big Bang, antes se miraba desde los 1 mil millones de años. De acuerdo al WMAP las *Primeras Estrellas* empezaron a brillar a los 379 millones de años después del paradigma.

Los resultados del WMAP indican también que el universo está formado por un 73% de *energía oscura* (cuya naturaleza se desconoce) y 27% de materia. De ésta, el 23% es *materia oscura* (cuya naturaleza se desconoce), el 3.5% es materia ordinaria no luminosa y solamente un 0.5% es materia visible en forma de estrellas y galaxias, gas y polvo. La densidad cosmológica es de 1.02, es decir, un universo *plano* como el predicho por la teoría de la *inflación*.

En 1981, Alan Guth propuso una teoría inflacionaria del universo de la cual existen diversas variantes, incluyendo una inflación caótica. De acuerdo a la teoría de la inflación, en los primeros momentos del universo hubo una enorme expansión que aplanó y suavizó la geometría del universo. En esos momentos, se produjeron fluctuaciones que hicieron crecer las estructuras de materia del tamaño atómico al cósmico produciendo al universo inhomogéneo que ahora vemos.

En 1995, Lawrence M. Kraus y Michael S. Turner propusieron tomar en cuenta a la energía del vacío para explicar el paradigma ya que, los datos observacionales resultaban diferentes a las predicciones teóricas. Por ejemplo, el universo resultaba más joven que algunas de las estrellas más viejas que se han observado. En 2003, las observaciones del WMAP, considerando el término cosmológico, estimaron una edad del universo de 13 mil 600 millones de años.

La Teoría-M

La Teoría de la relatividad de Einstein ha perdurado 100 años pero ahora se piensa que está incompleta ya que no incorpora consistentemente a la mecánica cuántica.

Una de las propuestas alternativas es la teoría-M, o teoría de cuerdas cósmicas, cuya idea básica es la supersimetría (SUSY) entre partículas elementales. En un mundo de este tipo, un electrón supersimétrico (llamado s-electrón) podría ser tan ligero como el electrón. En tal supermundo, la nada cuántica podría pesar nada y el vacío podría tener un valor cero. Sin embargo, en el mundo real no se conoce que pueda existir un s-electrón tan ligero

como un electrón. Se piensa que la nada cuántica debe pesar algo. Esto querría decir, que la nada es ALGO, tal vez mucho.

Por otra parte, la teoría-M ofrece una explicación a la aceleración del universo postulando 6-7 dimensiones adicionales a las 3 conocidas.

La Quinta-esencia

La palabra viene de la tradición filosófica de la antigua Grecia y probablemente no sea afortunada si bien es atractiva. Se decía que el universo estaba hecho de aire, agua, tierra y fuego. El quinto elemento sería una sustancia efímera que previene a la Luna y a los planetas de caer en el centro de la esfera celeste (sic). Ahora, el término se utiliza por algunos cosmólogos para referirse a un campo cuántico que explique a la energía oscura. La quintaesencia interactúa con la materia y evoluciona con el tiempo, de manera que, su valor puede ajustarse al presente.

En la teoría de la *Quintaesencia*, propuesta por Jeremiah P. Ostriker y Paul J. Steinhardt, el vacío no es la única fuente que genera presión negativa, otra es la quintaesencia misma que varía en el tiempo y el espacio. La quintaesencia puede tomar varias formas, la más simple es un campo cuántico que varía lentamente y es más débil que un *inflatón*, el campo que produce la inflación del universo. En la quintaesencia, la presión negativa no acelera al universo tan fuertemente como la energía del vacío. Este es un punto medio entre un universo solo de materia que se desacelera y uno con constante cosmológica que se desacelera.

Con base en la quintaesencia se ha pensado en un universo cíclico en el cual la quintaesencia sería el centro de la secuencia de ciclos de expansión y contracción. En este esquema el tiempo y el espacio existirían por siempre.

La física de la nada

Todos los intentos para determinar cuanto pesa la nada indican números muy grandes. Pero si la nada no pesa nada, debe existir una forma de energía que haga que el universo se expanda y acelere.

En suma, la aceleración cósmica implica la existencia de una presión negativa y una gravedad repulsiva. Esa aceleración puede estar revelando a una nueva forma de energía, la llamada *energía oscura* que no es predicha ni por la mecánica cuántica ni por la teoría de cuerdas.

Un universo dominado por una energía del vacío positiva se expandirá por siempre. Un universo dominado por una energía del vacío negativa colapsará. Si la energía oscura no es energía del vacío, el futuro es incierto. La densidad de energía oscura podría, también, variar con el tiempo. Si la densidad aumenta, la aceleración también y todo, galaxias, estrellas, planetas, átomos, se alejará más rápido quedando un universo en soledad. En los próximos 1 mil millones de años todo estaría más solo cada vez, algunas estructuras visibles estarían tan lejos que no podríamos miraras nunca. Pero si la densidad baja y se hace negativa el universo podría colapsar.

La teoría de la relatividad de Einstein transformó los conceptos de espacio, tiempo, materia y energía. Esta teoría nos permite un mejor entendimiento del universo pero hay aún muchas cuestiones que no podemos explicárnoslas. Se necesita de un mayor desarrollo teórico.

Probablemente, la energía oscura no existe y el espacio vacío se expande y acelera de manera natural y, al día de hoy, el espacio vacío no lo está, simplemente ha disminuido en cien órdenes de

2005 energía 5 (70) 53, FTE de México magnitud. Kraus y Turner piensan que la física de la nada podría determinar el destino del universo. Pudiera ser, también, como Einstein lo pensaba, que hace falta una teoría que unifique a las fuerzas de la naturaleza, incluyendo a la gravedad.

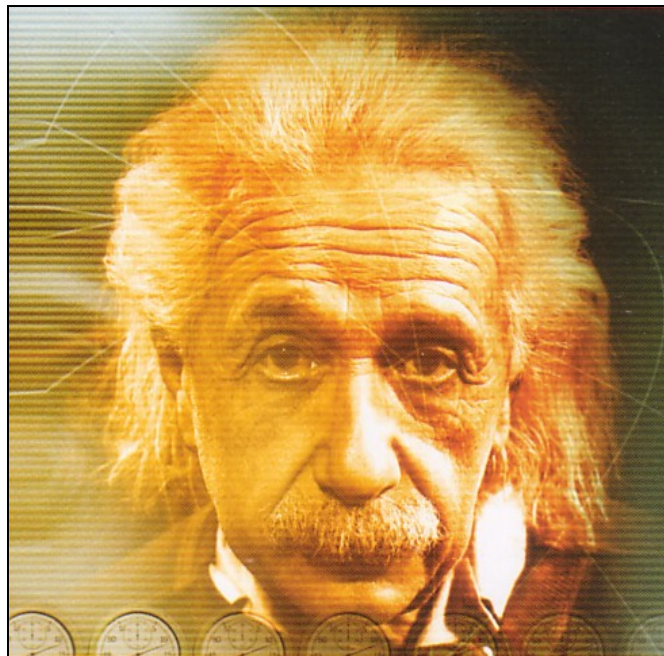
¡Fuerzas de la naturaleza, Uníos!

Referencias

- Bahen D. 2003, *Kosmologie*, FTE.
Bahen D. 2004, *Cosmological models*, FTE.
Krauss M., Turner M.S. 2004, *Scientific American* 291, 53.
Ostriker J.P., Steinhardt P. 2002, *Scientific American* 12, 41.
Spergel D.N. et al. 2003, *Astrophysical Journal Supplement Series* 148, 175.
Turner M.S. 2004, *Discover* 25, 70.
Turner M.S. 2004, *Astronomy*, November 2004, www.astronomy.com
Weinberg S. 1989, *Reviews of Modern Physics* 61, 1.

NOTA:

El FTE de México se congratula de haber celebrado todo el año 2005 al profesor Albert Einstein en el centenario de la Teoría Especial de la Relatividad.



Profesor Albert Einstein