

Lo mejor para describir la expansión es usar la **teoría de la relatividad general**, publicada por Albert Einstein en 1915. Esta teoría nos dice que la geometría del espacio está ligada a la densidad del Universo.

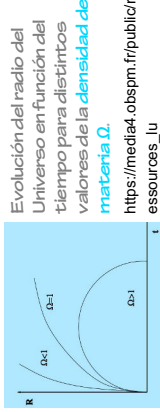
Einstein no estaba satisfecho con la primera versión de su teoría porque no era coherente con un Universo estático (es decir, sin expansión). Por ello, en 1917 introdujo un nuevo término, la **constante cosmológica Λ** .

Iba a ser el comienzo de una saga que, más de un siglo después, quizá esté ahora en su apogeo...



Albert Einstein

El destino del Universo



La velocidad de las galaxias debida a la expansión se conoce gracias a las observaciones, pero desconocemos la fuerza gravitatoria de la materia, que está controlada por su densidad. Si la densidad es suficientemente alta ($\Omega > 1$), la expansión se detendrá y el Universo se contraerá. Si la densidad es demasiado baja ($\Omega < 1$), la fuerza gravitatoria no es suficientemente fuerte y la expansión continuará eternamente. El caso límite entre estas dos posibilidades se da cuando la densidad es igual a la densidad crítica ($\Omega = 1$).

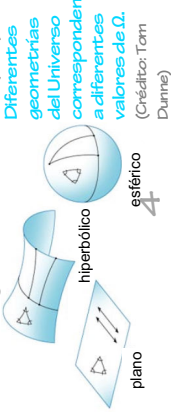
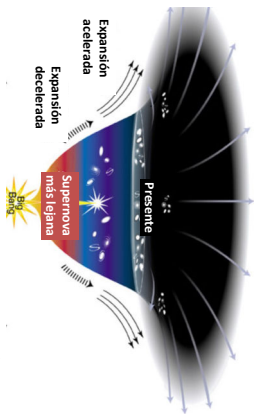


Diagrama que representa la expansión acelerada del Universo.

Credito: Diseño de Alex Mittleman, Coldreation

Una gran diversidad de teorías intentan explicar la expansión acelerada del Universo. No hace falta decir que describir estas teorías con cierto detalle es matemáticamente complicado.

Otra solución posible es modificar la teoría de la gravedad de Einstein. Hay muchas formas de conseguirlo, pero es difícil hacerlo sin violar una o varias de las muchas predicciones acertadas de la relatividad general. Por último, ambos enfoques pueden combinarse de distintas maneras...



Energía oscura

La constante cosmológica introducida por Einstein es muy artificial desde el punto de vista teórico. El valor del vacío cuántico predicho por la teoría cuántica de campos supera el valor deducido de las observaciones en 120 órdenes de magnitud como mínimo.

Por ello, se han propuesto muchas explicaciones alternativas para el origen de la expansión acelerada, un origen apodado '**energía oscura**'.

La quintaesencia es la forma más simple de energía oscura: es un componente hipotético que interactúa con el resto del Universo únicamente a través de la gravedad. Su densidad puede variar con el tiempo, pero también puede comportarse de forma muy parecida a una constante cosmológica; todo depende del potencial que gobierna su evolución.

En 2024, la colaboración DESI afirma haber encontrado algunos indicios de dicha energía oscura **13** en evolución.

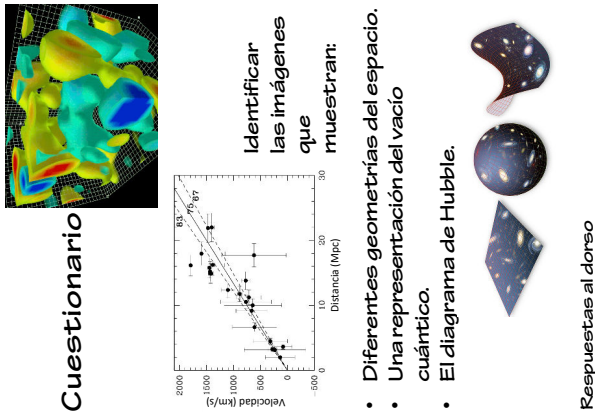
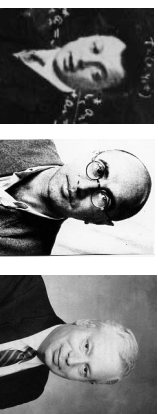
El vacío cuántico

Wolfgang Pauli Yakov Zeldovich Steven Weinberg

Tres de los más grandes físicos del siglo XX examinaron la cuestión del **vacío cuántico**, y notaron el valor increíblemente grande predicho para la densidad del vacío cuántico en comparación con el deducido de las observaciones. El valor cuántico es unas 10^{120} veces * mayor; esto se describe a menudo como el cálculo de orden de magnitud más erróneo de toda la física.

De nuevo, un asunto que podría haberse quedado en el armario de las curiosidades inútiles de la física.

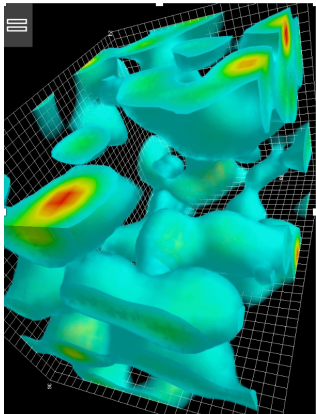
* $10^{120} = (10 \times 10 \times 10 \dots 10)$ 120 veces



<https://physicscommunication.lehigh-matters-how-the-study-of-vacuum-energy-is-proving-catastrophic>

Visite este sitio para ver la animación

Según la mecánica cuántica, el vacío no es la ausencia de todo, sino un enjambre permanente de partículas y antipartículas que aparecen y desaparecen continuamente. Por tanto, el vacío debe tener una densidad distinta de cero.



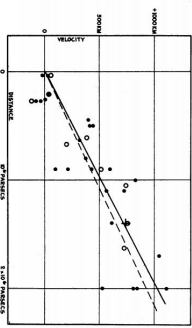
El Universo en mi bolsillo



La naturaleza de Λ

El descubrimiento de la expansión del Universo llevó a relegar la constante cosmológica al armario de las curiosidades inútiles de la física, con la aprobación de Einstein...

Pero en 1931, Lemaitre hizo una observación crucial que pasó desapercibida en su momento: la constante cosmológica, considerada hasta entonces un término adicional en la parte geométrica de las ecuaciones de Einstein, puede atribuirse con la misma facilidad a la presión y densidad de un fluido, siendo el fluido **el vacío del espacio!**



Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

El diagrama original de Hubble (Hubble 1929).

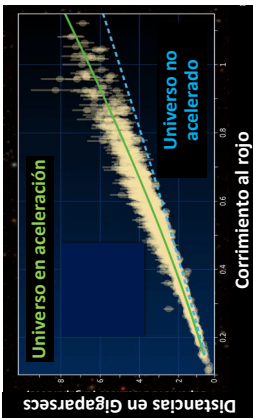
Muestra la velocidad V medida para las galaxias en función de su distancia D , esta última deducida usando la relación periodo-luminosidad de las estrellas Cefeidas que estableció unos años antes Henrietta Leavitt (véase TUMIP 13).

La relación $V = H_0 \times D$, denominada ley de Hubble-Lemaître, cambió radicalmente

El valor de H_0 , la constante de Hubble, se estimó primero en unos 500 km/s por Mpc, a principios de los años sesenta, en unos 100 km/s por Mpc. Las estimaciones actuales son de unos 73 km/s por Mpc.

1 Mpc equivale a 3 millones de años luz

El diagrama de Hubble de las supernovas



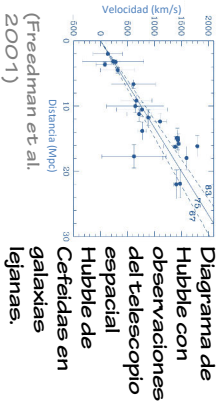
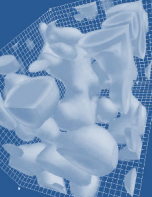
Adaptado de la colaboración NOIRLab DES

Las supernovas seleccionadas para este estudio eran de tipo Ia, que tienen una luminosidad muy uniforme, por lo que pueden usarse para determinar distancias fiables.

La versión moderna del diagrama de Hubble, basado en **supernovas de tipo Ia**, demostró que la expansión se está acelerando. Este descubrimiento les valió el Premio Nobel de Física 2011 a Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt y Adam G. Riess. El resultado es bastante sorprendente: significa que, a la escala del Universo, **la gravitación actúa como una fuerza repulsiva.**

Respuestas

Una representación del vacío cuántico.



(Freedman et al. 2001)

Diferentes geometrías del espacio.



Traducción: Mónica Rodríguez TUMIP Creative Commons



Para obtener más información sobre esta serie y sobre los temas presentados en este librito, visite <http://www.tumip.org>



El Universo en mi bolsillo nº 41

Este librito fue redactado en 2024 por Alain Blanchard, de la Universidad Paul Sabatier (Francia), y revisado por Stan Kurtz, del IRYA (México).

Imagen de portada:

Darth Vader de la serie Star Wars es el personaje que se ha "pasado al lado oscuro de La Fuerza". El Universo mismo está sometido a una fuerza desconocida cuyo misterioso origen se ha denominado "Energía Oscura".

La expansión acelerada

En 1998, dos equipos que estudiaban el diagrama de Hubble de supernovas lejanas hicieron un descubrimiento que revolucionó la cosmología y la física fundamental. Estas supernovas están tan alejadas que la luz detectada en ellas se produjo cuando el Universo era mucho más joven. Esto permite comparar la velocidad de expansión del Universo en aquella época con la velocidad actual.

En un Universo dominado por la materia, la velocidad de expansión disminuiría con el tiempo. El diagrama de Hubble de las supernovas reveló que **la velocidad de expansión del Universo está aumentando.**



Albert Einstein y Georges Lemaitre

En 1948, Georges Lemaitre construyó el primer modelo cosmológico que trataba con la fase primitiva del Universo, denominada "átomo primigenio", predecesor del Big Bang. Observó que, dada la velocidad de expansión medida por Hubble, el Universo sería más joven que la edad de la Tierra a menos que se abogara por una constante cosmológica, argumento que no convenció a Einstein, quien abandonó dicha constante tras el descubrimiento de la expansión.

De todos modos, con el valor de la constante de Hubble conocido hoy en día, la discrepancia entre la edad del Universo y la de la Tierra desaparece.

La ley de Hubble-Lemaître

Justo después del Gran Debate de 1925, en el que se concluyó que existen galaxias fuera de la nuestra, Edwin Hubble observó que las velocidades de recesión de estas galaxias eran proporcionales a sus distancias. Georges Lemaitre interpretó este hecho como un efecto de la expansión del Universo.

La expansión del Universo es un concepto que no es trivial de comprender: dejando a un lado los movimientos individuales que acompañan a la estructura de la Red Cósmica (véase TUMIP 13), las galaxias se alejan unas de otras con una velocidad proporcional a sus distancias respectivas. Lo que **rige esta velocidad es la gravitación**. Es como lanzar una piedra hacia arriba: si la velocidad inicial es baja, la piedra sube y luego vuelve a caer. Si la velocidad inicial es suficientemente alta (órbitas de la atmósfera terrestre), la piedra sube indefinidamente.