

El Universo conocido está compuesto en gran parte por materia oscura y por energía oscura. La porción directamente observable del mismo no llega al 5% de su contenido total en materia/energía. En este trabajo se describe en detalle cómo los científicos hemos llegado a esta conclusión, la historia y evolución de este dilema, que podemos denominar de “la oscuridad del Cosmos” y se apuntan al final posibles líneas de trabajo para entenderlo en profundidad y llegar a resolverlo.

Palabras Clave: Materia oscura. Energía oscura. Expansión del Universo. Ecuaciones de Einstein. Constante cosmológica. Expansión acelerada. Origen del Universo.

Ezagutzen dugun unibertsoa materia ilunez eta energia ilunez dago osatuta, hein handian. Zuzenean ikus dezakegun unibertso zatia ez da haren materia- nahiz energia-edukiaren % 5era heltzen. Lan honetan, xehetasunez azaldu da zientzialariok nola atera dugun ondorio hori eta zein diren «Kosmosaren iluntasuna» izenda dezakegun dilema horren historia eta bilakaera. Gainera, sakon ulertzeko eta soluzioa bilatzeko lan-lerroak ere ematen dira amaieran.

Giltza-Hitzak: Materia iluna. Energia iluna. Unibertsoaren hedapena. Einsteinen ekuazioak. Konstante kosmologikoa. Hedapen azeleratua. Unibertsoaren jatorria.

La majeure partie de l'univers connu est composée de matière noire et d'énergie obscure. Or, la portion directement observable de l'Univers est inférieure à 5 % de son contenu total en matière/énergie. Cet article décrit en détail comment les scientifiques ont abouti à cette conclusion, aborde l'histoire et l'évolution de ce dilemme que l'on peut nommer « l'obscurité du Cosmos ». Pour terminer, différentes directions de travail visant à comprendre ce dilemme en profondeur, voire à le résoudre, sont évoquées.

Mots-Clés : Matière obscure. Énergie obscure. Expansion de l'Univers. Équations d'Einstein. Constante cosmologique. Expansion accélérée. Origine de l'Univers.

De la inesperada oscuridad del Cosmos

(On the unexpected Cosmic
darkness)

Elizalde, Emilio

Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Instituto
de Ciencias del Espacio (ICE-CSIC e IEEC)
Campus UAB, Carrer de Can Magrans, s/n
08193 Bellaterra
elizalde@ice.uab.es

1. Introducción

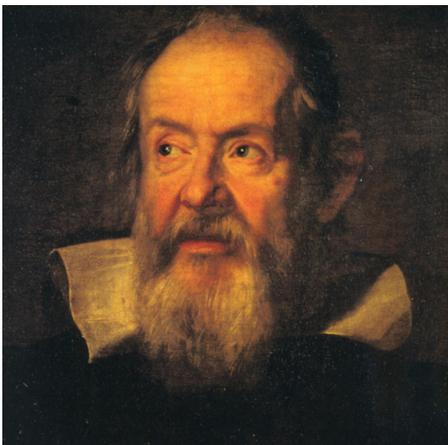
Para encontrar los orígenes de la Astronomía y aún de la propia Cosmología, eso es, del conocimiento del Universo a gran escala, como un todo, tendríamos que remontarnos muy atrás en la historia de la humanidad. Está generalmente aceptado, sin embargo, que la cosmología moderna, como ciencia, se empezó a gestar en los comienzos del pasado siglo.

Antes de eso habían aparecido los primeros grandes científicos modernos, siendo Galileo Galieli (1564–1642), de acuerdo con el consenso general, el primero de ellos. Mucho podríamos hablar sobre Galileo, pero éste no es el objetivo prioritario del presente artículo, por lo que me limitaré a referirme solo a un par de aspectos que sí tienen que ver con él.

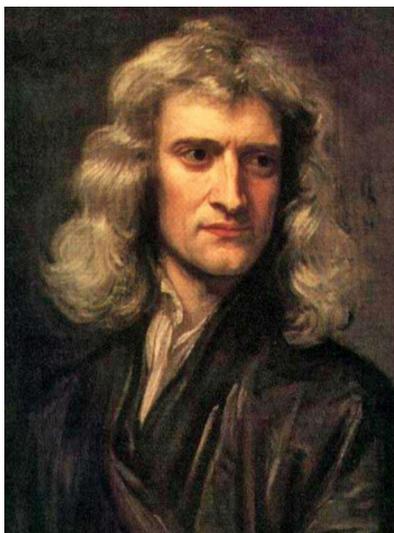
Galileo nos enseñó que la Ciencia debe basarse en dos pilares fundamentales, a saber, la observación experimental de la naturaleza y la teoría científica propiamente dicha. Si falla cualquiera de los dos no hay Ciencia. Por bella que sea una teoría científica, por “natural” o “evidente” que aparezca a nuestros ojos en

mil aspectos, si no se refrenda con la observación de la naturaleza, con la experimentación precisa, carecerá por completo de valor.

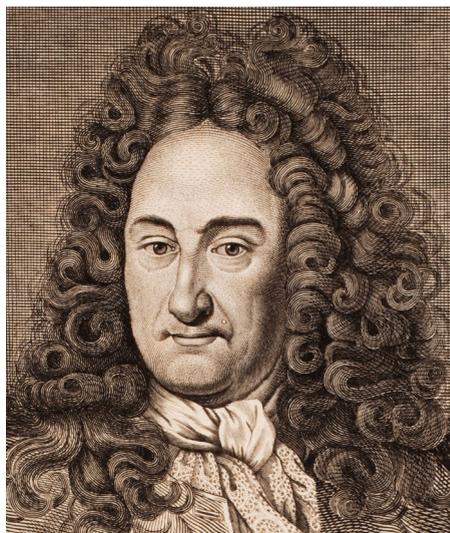
En el otro extremo, una tabla de resultados de nuestra observación de la naturaleza, por más precisos que sean, y por más completa que sea la tabla, se quedará solo en eso: una constatación empírica que tendrá un valor muy limitado, acaso fenomenológico, solo local y particularizado. Para promover estos re-



Galileo Galilei



Isaac Newton



Wilhelm Leibniz

sultados a un nivel superior, mucho más amplio y general, se precisa la formulación de una ley, de una teoría, cuando menos de un modelo, lo más genérico posible.

Eso es precisamente lo que hizo Galileo con sus múltiples experimentos y sus formulaciones de principios generales de la naturaleza. Descubrió leyes muy importantes de la física, entre ellas el principio de relatividad de las mismas, que antecede a la formulación definitiva por parte de Albert Einstein siglos más tarde. En mi trabajo de tesis doctoral estudié a fondo hasta qué punto las leyes de invariancia galileanas están contenidas en la teoría de la relatividad de Einstein y cuál es la relación precisa entre una y otra teoría a nivel de relaciones entre grupos de invariancia. Como corolario de mi tesis, fue muy interesante constatar hasta qué punto Galileo anticipó la teoría de la relatividad. A Galileo se debe la célebre afirmación: *“Il libro della natura é scritto in lingua matemática”* (el libro de la naturaleza está escrito en lenguaje matemático).

Galileo sabía eso, y muy acertadamente, pero no disponía del lenguaje matemático adecuado, el cálculo de infinitésimos, que fue desarrollado por Isaac Newton (1642–1727) y Wilhelm Leibniz (1646–1716) unos años más tarde. A veces se pasa por alto la enorme importancia que el cálculo infinitesimal (como también, claro está, desarrollos posteriores de la matemática) han tenido en la evolución de todas las ciencias, que no solo de la física (o filosofía natural, en aquel tiempo), donde tuvo su origen.

Considero conveniente ampliar estas reflexiones sobre el método científico, concepto tan importante en la actualidad, cuando se han producido discusiones de muy alto nivel, algunas de ellas por parte de físicos y matemáticos de gran relevancia y de diversas disciplinas. Se ha llegado a discutir incluso sobre “el final



Bernhard Riemann, Henry Poincaré, David Hilbert, Friedrich Gauss

de la ciencia”, en parte debido a que la frecuencia de físicos teóricos premiados con el Nobel de Física ha ido disminuyendo constantemente desde la época dorada en los años 20 del siglo pasado (John Horgan, para National Geographics, 09-04-2014). Recurriendo a mis vivencias personales acuden a mi mente dos ejemplos antagónicos, extremos, que se sitúan en las antípodas de los dos componentes del método científico de que estamos hablando: observación y teoría, o teoría y observación, puesto que citar una antes que otra ya podría interpretarse como que nos estamos decantando por una de ellas, cuando no debe ser así. En mis diversas estancias en el II. Instituto de Física Teórica de la Universidad de Hamburgo, situado en el recinto del Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY), en el barrio de Bahrenfeld, hable en varias ocasiones con el Prof. Samuel C. C. Ting, un famoso físico americano del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), en EEUU, receptor del Premio Nobel de Física en 1976. El Prof. Ting es un firme defensor de la experimentación en física de partículas y proclama que las teorías sirven de bien poco: son los resultados de escrutar la naturaleza los que cuentan y es sobre ellos que se debe edificar la física. En el polo opuesto se sitúa, en esta confrontación que pretendo poner de relieve, el Prof. Edward Witten, catedrático de física-matemática del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, en EEUU y uno de los principales adalides de la teoría por excelencia, hoy por hoy, dentro al menos de los dominios de la física fundamental: la teoría de cuerdas (o supercuerdas, como vengamos en llamarla). Difícilmente el Prof. Witten recibirá el Premio Nobel de Física, pero sí que posee uno equivalente en matemáticas, la



Samuel Ting



Edward Witten

Medalla Fields que le fue concedida en 1990. En este otro extremo nos encontramos con las proclamadas como Teorías del Todo o Teorías M (por madre o, según algunos, misteriosas). Dichas teorías han resultado ser enormemente fructíferas en diversos campos de las matemáticas y su potencial para resolver algunas cuestiones candentes de la física es innegable, pero hasta el momento no han sido capaces de establecer conexiones de cierta relevancia con la física del laboratorio. Aunque sí conexiones unificadoras muy interesantes de campos totalmente distintos de la física y que parecían no tener nada que ver unos con otros. Pero es la falta de conexión con la realidad experimental lo que ha llevado a muchos físicos de otros campos a criticar severamente las teorías de cuerdas, por muchos y variados motivos. Citaré tan solo a Peter Woit y su "Not Even Wrong" (Basic Books, 2006) y a Lee Smolin con "The Trouble with Physics" (Houghton Mifflin, 2006), que sugieren que tal vez la teoría de supercuerdas no sea nunca capaz de tomar el relevo de las grandes teorías de la física, como la teoría de la relatividad y la física cuántica, en el sentido de que no habrá jamás manera de comprobarla experimentalmente de modo categórico, dicho de otra forma, falsable.

El método científico requiere de una teoría –mejor cuanto más simple, bella y general, única, a ser posible, dentro del campo en cuestión– y de su verificación experimental en el laboratorio, con la mayor precisión posible y por parte de diversos grupos, de manera totalmente independiente unos de otros. Como ejemplo, la Teoría de la Relatividad ha satisfecho con creces, de manera muy brillante, inigualada, todos estos criterios. Partiendo de la pura lógica, de supuestos básicos indemostrables, pero aparentemente muy claros y que tomó como axiomas, como la igualdad de la masa inerte y la masa gravitatoria, y la constancia de la velocidad de la luz en el vacío –comprobada en el experimento realizado en 1887 por Albert A. Michelson y Edward W. Morley– y apoyándose en la geometría de



Marcel Grossmann



Albert Einstein



Michele Besso

Bernhard Riemann, Einstein construyó una teoría bellísima que se ha demostrado cierta en todos los experimentos llevados a cabo hasta hoy en nuestro sistema solar, en nuestra galaxia y en regiones aún más distantes de nuestro universo.

Fueron ciertamente desarrollos de la geometría en el s. XIX, en particular de las geometrías no euclidianas, por parte de Friedrich Gauss (1777–1855), Nikolái Lobachevski (1792–1856), János Bolyai (1802–1860) y Bernhard Riemann (1826–1866), los que permitieron a Einstein –con la colaboración inestimable, según algunos historiadores, de su compañero matemático Marcel Grossmann y de su esposa Mileva Maric (1875–1948)– formular sus teorías de la Relatividad, primero la Especial y luego la General. No hay que olvidar tampoco las importantes aportaciones de otros grandes científicos, como Henri Poincaré (1854–1912), David Hilbert (1862–1943) y Hendrik Lorentz (1853–1928) por citar solo a tres de ellos.

Pues bien, toda la cosmología moderna se fundamenta en las ecuaciones de campo de Einstein, que formuló en 1915, correspondientes a su teoría de la Relatividad General. Ello da pie a muchos autores a situar, con precisión, el origen de la cosmología actual en el año 1917, en que Einstein usó sus ecuaciones, por vez primera, para construir un modelo con el que describir nuestro universo. El universo en aquella época se creía estático, sin origen ni final, y era muy pequeño pues todo el mundo estaba convencido de que todo lo que se veía estaba dentro de la Vía Láctea. Como fuese que un universo estático no era una solución a sus ecuaciones de campo, Einstein introdujo en ellas un término adicional, la ahora famosa constante cosmológica (volveremos sobre ella más adelante), que con el signo adecuado proporcionaba una especie de fuerza repulsiva que contrarrestaba la atracción de la gravedad (que es la que hacía colapsar a su universo estático), equilibrándola exactamente.

Otros estudiosos (entre los que se contaba hasta hace poco el autor de este artículo) sitúan el comienzo de la cosmología moderna unos años más tarde,

el día 23 de noviembre de 1924, fecha en que apareció, en la sexta página del New York Times, la siguiente noticia:

FINDS SPIRAL NEBULAE ARE STELLAR SYSTEMS

Dr. Hubbell Confirms View That They Are 'Island Universes' Similar to Our Own.

WASHINGTON, Nov. 22. -- Confirmation of the view that the spiral nebulae, which appear in the heavens as whirling clouds, are in reality distant stellar systems, or "island universes," has been obtained by Dr. Edwin Hubble of the Carnegie Institution's Mount Wilson observatory, through investigations carried out with the observatory's powerful telescopes. Galaxias, galaxias por todos lados: algunas de las más de cien mil millones de galaxias de nuestro Universo (Crédito: NASA/ESA/G. Illingworth, D. Magee, P. Oesch, University California Santa Cruz/R. Bouwens, Leiden University/HUDFO9 Team)

[ENCUENTRA QUE LAS NEBULOSAS ESPIRALES SON SISTEMAS ESTELARES

El Dr. Hubble Confirma El Punto de Vista De Que Son "Universos Isla" Similares Al Nuestro

WASHINGTON, Nov. 22. -- Confirmación del punto de vista de que las nebulosas espirales, que aparecen en el cielo como nubes en torbellino, son en realidad sistemas estelares distantes o "universos isla", ha sido obtenida por el Dr. Edwin Hubble del observatorio del Monte Wilson perteneciente a la Institución Carnegie, mediante investigaciones llevadas a cabo con los potentes telescopios del observatorio.]



Este fue sin duda un acontecimiento que revolucionó nuestro conocimiento del universo visible. Había sido vaticinado con anterioridad por varios científicos, pensadores y filósofos, como el propio Immanuel Kant, al que se debe en gran manera la denominación de "universo isla". En efecto, si contemplamos un mapa actual de una región suficientemente grande del universo visible observaremos claramente las diversas islas, que son las galaxias.



Edwin Hubble



Ernst J. Öpik

De todos modos, recientemente el autor de este artículo ha cuestionado en diversas conferencias impartidas esa fecha precisa de 1924 al haber descubierto que el astrónomo estonio Ernst J. Öpik (1893-1985) había publicado en 1922, en la prestigiosa revista *Astrophysical Journal*, [E. Öpik, *Astrophysical Journal* 55, 406 (1922)] un cálculo de la distancia a que la galaxia Andrómeda se encuentra de nosotros, de 450 kpc (1 kpc o kiloparsec equivale a 3.262 años luz), mucho más preciso que el del propio Hubble, 285 kpc, pues hoy sabemos que está a 775 kpc. Öpik, que fue también el primero en calcular la densidad de una estrella enana blanca, descubrió pues antes que Hubble (y con un resultado doblemente ajustado que el de éste) que Andrómeda era otro mundo, lejos de nuestra galaxia. Obvio es remarcar que su resultado paso mucho más desapercibido que el de Hubble y que no tuvo ni de lejos el mismo impacto mediático. Este tipo de pequeños descubrimientos, como el que yo hice aquí por puro azar, deberían obligarnos a reescribir la historia de la cosmología. Pero demos ahora el salto al tema que nos ocupa.

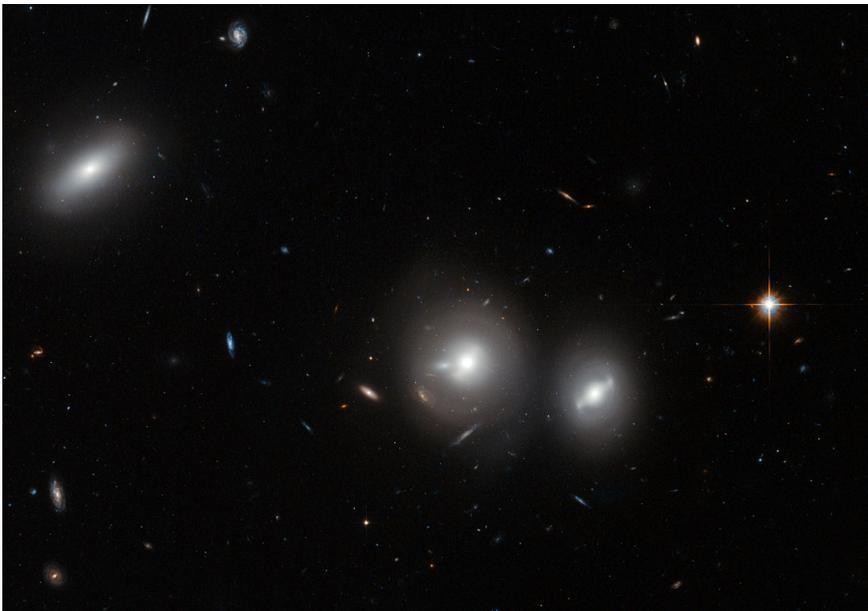
Pese a los extraordinarios avances de la cosmología moderna (para breves descripciones actualizadas ver, por ejemplo, las Refs. [1,2]^{1,2}), los físicos y cosmólogos teóricos hemos de convivir a día de hoy con el acuciante problema de tener que encontrar una explicación convincente a las enormes cantidades de las denominadas materia oscura y energía oscura que, según todos los resultados

1. ELIZALDE, E. "Cosmological Constant and Dark Energy: Historical Insights". En *Open Questions in Cosmology*, G.J. Olmo Ed. (InTech Publishers, Geneva, 2012), Chap. 1, ISBN 978-953-51-0880-1; DOI:10.5772/51697.

2. ELIZALDE, E. "L'origen i el futur de l'Univers". En *La Terra a l'Univers: Astronomia*, Enciclopèdia Catalana, Barcelona 2012; pp. 186-194.

ción aún mucho más grande) y que sabemos que existe, sin duda, debido a sus efectos gravitacionales. Éstos son, principalmente, anomalías en las curvas de rotación de las galaxias, sus efectos como lentes gravitatorias (de acuerdo con la teoría de la Relatividad General de Einstein), y otros. No sabemos aún de qué está hecha esta materia que ha escapado hasta el presente cualquier tipo de detección directa.

Zwicky fue uno de esos grandes astrónomos injustamente poco reconocidos por el gran público. Además de poner de manifiesto la existencia de la materia oscura, entre sus muchos y trascendentales descubrimientos figura el de haber entendido la importancia del efecto de lente gravitatoria de las grandes masas del cosmos, al desviar las trayectorias de los rayos de luz que pasan cerca de ellas, en acuerdo con las ecuaciones de Einstein de su teoría General de la Relatividad⁴. En 1937 Zwicky calculó con muy aceptable precisión el valor de dicho efecto (que él denominaba efecto de Einstein) y predijo la enorme importancia que iba a tener en astronomía⁵. Dicho fenómeno no fue confirmado por observaciones directas precisas hasta 1979.



Visión del cúmulo de Coma Berenice desde el telescopio espacial Hubble (ESA/Hubble Picture of the Week, 2014)

4. EINSTEIN, A. "Die Feldgleichungen der Gravitation". *En Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin* (1915), Seite 844–847; "The Foundation of the General Theory of Relativity". *En Annalen der Physik*. 354, 769 (1916).

5. ZWICKY, F. "Nebulae as Gravitational Lenses". *En Physical Review* 51, 290 (1937).

La materia oscura no es más que eso, exactamente, materia que no se puede ver. Su comportamiento gravitatorio es exactamente el mismo que el de la materia ordinaria. En este sentido no es ninguna cosa extraña. De hecho, se creyó durante algún tiempo que podría tratarse de grandes objetos masivos, como planetas del tamaño de Júpiter que son muy difíciles de observar en sistemas estelares lejanos, los denominados *Massive astrophysical compact halo object* (MACHOS), objetos astrofísicos masivos y compactos, que no son luminosos y como hemos dicho, difíciles de detectar. Aparte de planetas como Júpiter incluyen también estrellas de neutrones, agujeros negros y enanas marrones. Pero esta teoría tiene cada vez menos adeptos ya que se ve ahora muy difícil que pueda explicar en su totalidad las enormes proporciones de materia oscura del universo.

Otro componente que se ha analizado son los neutrinos, que se ha descubierto que tienen masa, aunque muy pequeña. A pesar de la ingente cantidad de neutrinos su contribución tampoco resuelve el problema.

Astrónomos actuales muy famosos por sus estudios de la materia oscura, ya que rescataron este importantísimo problema de un olvido que se había prolongado luego por más de cuarenta años, son Vera Rubin (recientemente fallecida, en dic 2016) y Kent Ford, por sus trabajos publicados en los años setenta del pasado siglo⁶. Cabe mencionar, para los más avezados, que han surgido propuestas de explicación alternativas que eliminan la existencia de dicha materia oscura, en



Vera Rubin y Kent Ford

6. RUBIN, V.C. y FORD, Jr., W.K. "Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions". En *The Astrophysical Journal*. 159, 379–403 (1970).

base a una modificación de las leyes de Newton a gran escala (la propia Vera Rubin defendió a veces vehementemente alguna de estas propuestas alternativas) pero la gran mayoría de los investigadores en materia oscura están buscando las llamadas *wimps* (*weekly interacting massive particles*, o partículas con masa que interaccionan muy débilmente), en grandes proyectos como⁷: el “XENON Dark Matter Project” (XENON1T), experimento localizado en la montaña del Gran Sasso, en la Italia central; el “European Underground Rare Event Calorimeter Array” (EU-RECA), que será construido en el Laboratorio Subterráneo de Modane, en el túnel de Fréjus entre Francia e Italia, y que es el laboratorio subterráneo a mayor profundidad de Europa; el “Axion Dark Matter Experiment” (ADMX), proyecto americano de la Universidad de Washington, en Seattle (EEUU); y el “LZ Dark Matter Experiment”, proyecto americano también. Se tienen puestas muchas esperanzas, en particular, en el proyecto XENON1T, auspiciado por el CERN, el mayor centro de física de partículas del mundo con sede en Ginebra, Suiza, que no hace mucho descubrió el importantísimo bosón de Higgs el cual tiene a su vez implicaciones fundamentales en Cosmología (por falta de espacio quedan desafortunadamente fuera del alcance de este artículo) y es una muestra palpable del liderazgo europeo en física de altas energías. Debemos sentirnos extraordinariamente orgullosos de todos estos logros y, aún más, de la perspectiva que nos abren de cara al futuro.

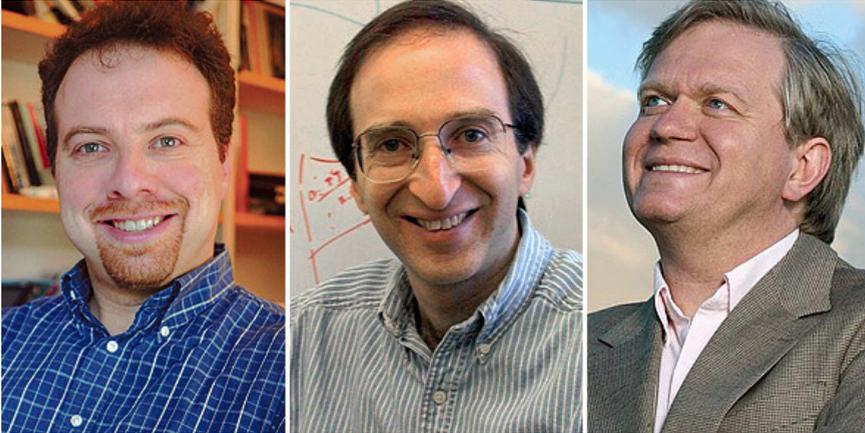
3. La energía oscura

Pero hablemos ahora ya de la energía oscura, la componente más importante de lo que he denominado “oscuridad del Cosmos”. Observaciones astronómicas llevadas a cabo, hace menos de veinte años, por dos equipos de una treintena de científicos cada uno (Riess et al., Perlmutter et al., 1998; participó en esta última colaboración la muy reconocida investigadora María Pilar Ruiz Lapuente, de la Universidad de Barcelona, que fue alumna del autor de este artículo, durante un par de cursos) indican que la expansión del Universo tiene lugar de manera acelerada. Este descubrimiento fue extraordinariamente sorprendente e inesperado, pues pilló a los investigadores que lo realizaron a contrapié. De hecho, lo que ambos equipos estaban buscando era comprobar con que intensidad la distribución de masas del Universo frenaba la expansión del mismo, debido a la atracción de la gravedad. Ambos grupos comprobaron de manera independiente, y para su asombro, que la expansión prosigue aceleradamente, venciendo por tanto a la gravedad atractiva. Pero para que eso ocurra, como bien sabemos desde Galileo, s. XVI, y Newton, s. XVII, ha de existir una fuerza, repulsiva y más intensa que la atracción gravitatoria, y esta fuerza desconocida debe actuar a nivel cósmico. La gran pregunta es ahora: ¿cuál es la naturaleza de una tal fuerza repulsiva que es

7. The XENON Dark Matter Project.

<http://xenon.astro.columbia.edu/>; cordis.europa.eu/project/rcn/101085_en.html;

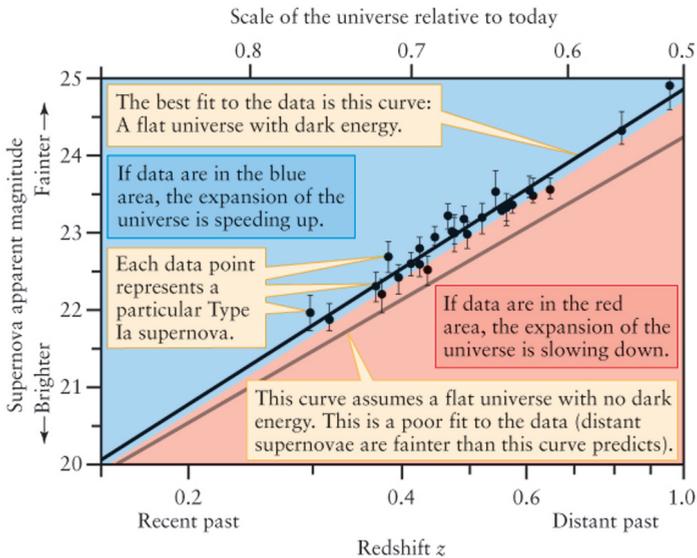
<http://www.sciencemag.org/news/2014/07/two-big-dark-matter-experiments-gain-us-support>.



Adam Riess

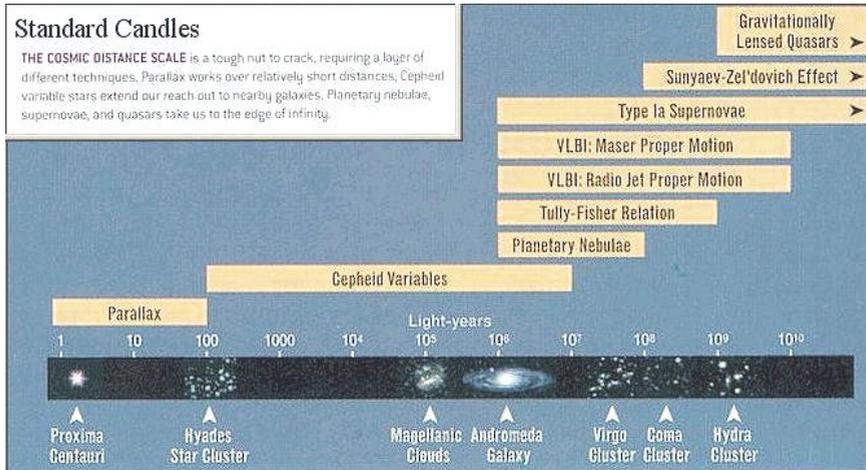
Saul Perlmutter

Brian Schmidt



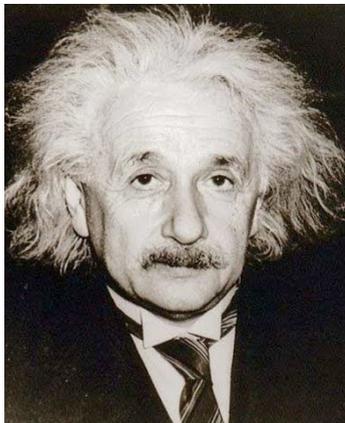
La expansión del Universo no se frena por la gravedad, sino que, por el contrario, se acelera

capaz de producir la aceleración del mismísimo `tejido' del cosmos? Al igual que en el caso de la materia oscura, no hemos sido aún capaces de dar respuesta a esta pregunta decisiva, mucho más misteriosa, si cabe aún, que la que se refiere a la materia oscura, y a la cual, encima, le corresponde explicar una fracción sensiblemente mayor del balance energético total del universo (superior al 72%, frente al 23% de la otra).



Métodos usados para la medida de distancias en Astronomía

Se han propuesto para ello diversos modelos y experimentos⁸, el más simple de los cuales respeta en su totalidad la validez de la teoría general de la relatividad de Einstein, con el simple añadido de su famosa constante cosmológica, que él introdujo para estabilizar el modelo de universo estático imperante en su época y que ahora sería capaz de propulsar su expansión acelerada. La naturaleza física de dicha constante era todo un misterio para Einstein pero ahora sabemos que podría tratarse de una manifestación de las fluctuaciones cuánticas del es-



La constante cosmológica Λ fue introducida por Einstein, en 1917, en sus ecuaciones de la Teoría de la Relatividad General que había obtenido en 1915 para así ejercer una fuerza repulsiva que consiguiese mantener el Universo en equilibrio estático, contrarrestando exactamente la fuerza atractiva de la gravedad

8. <https://www.darkenergysurvey.org/>; <http://sumire.ipmu.jp/en/>; https://twitter.com/ACT_Pol; <http://hetdex.org/hetdex/>; <http://www.sdss3.org/surveys/boss.php>; <http://sci.esa.int/euclid/>

tado vacío de los campos físicos que habitan el universo⁹. Aunque complicado de entender, podría aceptarse a primera vista que la respuesta es bien directa y natural, de no ser por el siguiente hecho: cuando se hacen los cálculos con detalle, los números no cuadran, siendo la discrepancia astronómica (y nunca mejor dicho), de muchísimos órdenes de magnitud. Existen, pues, en este punto grandes desavenencias entre teoría y observación; es lo que se conoce como 'el problema de la constante cosmológica'.

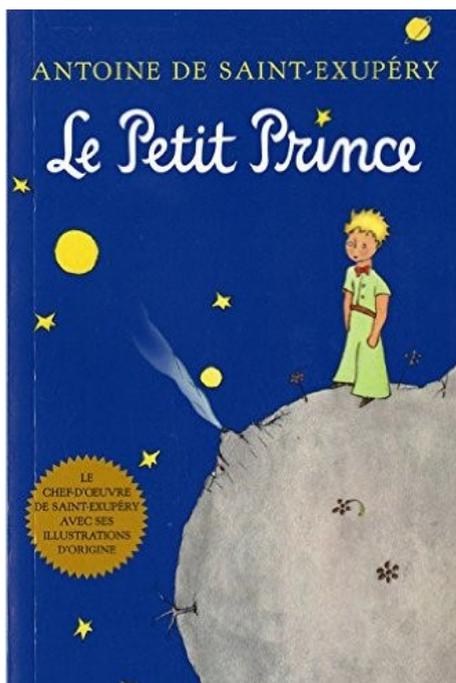
4. Un universo en expansión satisface las ecuaciones de Einstein

Reflexionando un momento, a poco que sepamos de física podremos llegar a entender fácilmente que un universo en expansión uniforme, como el modelo de *Big Bang*, no necesita de la actuación de ninguna fuerza para seguir así, expandiéndose indefinidamente, siendo suficiente para ello el impulso inicial del *Big Bang*. Eso sí, siempre y cuando la densidad de materia/energía del universo sea inferior a un cierto valor crítico; ya que, de lo contrario, una alta densidad de la misma sería capaz de ir frenando la expansión del universo hasta reducirla a cero, momento a partir del cual empezaría a contraerse hasta terminar en lo que se conoce con el nombre de *Big Crunch*.

Siendo aún más pedagógicos, imaginemos a un niño, el Principito, pongamos por caso, que vive en un planeta minúsculo de cien metros de radio (por

decir algo). Si el Principito lanzase una piedra con todas sus fuerzas ésta ya no regresaría para caer luego sobre él, sino que se perdería en el espacio, alejándose para siempre. Pero si el Principito la lanza desde la Tierra, es seguro que la piedra terminará cayendo. Es el mismo principio físico de que estoy hablando: la atracción gravitatoria. Una vez más: un Universo con una densidad de materia inferior a un valor crítico no sería capaz de llegar nunca a frenar su expansión, que proseguiría por siempre jamás.

Hasta hace solo veinte años, antes del descubrimiento de la expansión acelerada, la cuestión crucial, la más fundamental de toda la cosmología era averiguar si la men-



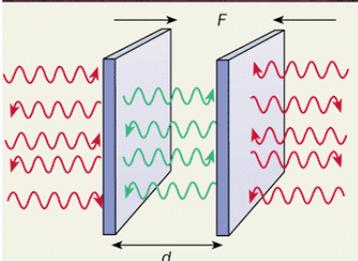
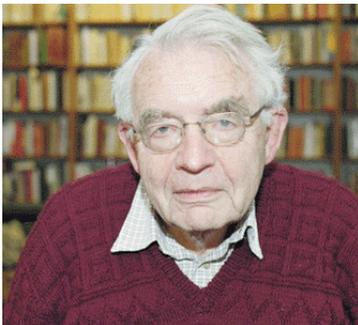
Si el Principito lanzase una piedra con todas sus fuerzas ésta ya no regresaría

cionada densidad de materia/energía del universo era superior o inferior a dicho valor crítico, en otras palabras, si el universo iba a continuar expandiéndose por siempre o si, por el contrario, dicha expansión se frenaría del todo en un tiempo futuro para a partir de ahí empezar a contraerse sin remedio, hasta el *Big Crunch*.

5. La expansión del universo se acelera

El paradigma ha cambiado completamente con el descubrimiento de que la expansión del universo se acelera. Este hallazgo es uno de los mayores hitos de toda la historia de la Humanidad. Ello hace que la energía oscura, como ya he dicho, sea intrínsecamente mucho más misteriosa, fundamental e interesante que la materia oscura. ¿De dónde proviene la fuerza que actúa constantemente sobre la piedra que ha lanzado nuestro Principito y que sigue acelerándola sin cesar? De otra manera, ¿cuál es el origen y la naturaleza de la fuerza cósmica que acelera constantemente la expansión de nuestro universo? De hecho, no se ha probado todavía que dicha aceleración sea constante. Para ello deberíamos demostrar que su derivada temporal es nula, cosa que resulta del todo imposible con los datos (por más precisos que sean) de que disponemos.

A nivel puramente matemático, con el signo adecuado la constante cosmológica de Einstein es capaz de realizar tal función. Cuando la propuso en 1917 no había ninguna explicación física a este término, pero desde hace unas décadas sabemos que la física a que obedecen las entrañas del universo (sus niveles atómicos y subatómicos) es cuántica. Y eso lo conocemos ahora con una preci-

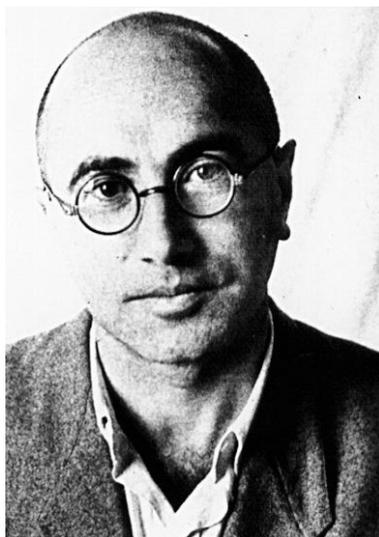


¿De dónde proviene la fuerza que actúa constantemente sobre nuestro Principito y que sigue acelerándole sin cesar, venciendo a la propia gravedad de su pequeño planeta?

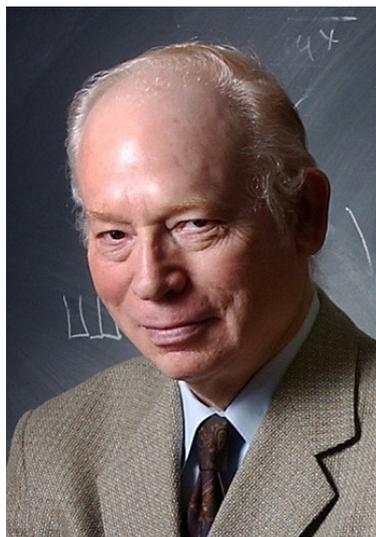
sión increíble de más de 15 cifras decimales, una tras otra y sin un solo fallo. También los fenómenos que tuvieron lugar en el Universo cuando éste era muy pequeño y caliente se rigen por la Física Cuántica; la cual afirma en particular que, en cualquier sistema imaginable, incluso su estado de menor energía, el denominado estado vacío: la “nada”, en otras palabras (volveremos sobre ella más tarde), está plagado de fluctuaciones cuánticas que, pese a ser virtuales, pueden manifestarse como una fuerza real que resulta medible con precisión en el laboratorio (el efecto Casimir y otros)⁹.

6. Fluctuaciones del vacío cuántico

Esta fuerza no es ninguna entelequia difícil de observar sino todo lo contrario, se trata de una fuerza omnipresente, común a todo sistema cuántico y que, en principio, hay que tener en cuenta siempre, aunque a veces es demasiado pequeña en comparación con las demás fuerzas que intervienen en nuestro sistema (electrostáticas, o incluso gravitatorias) y suele resultar despreciable al no poder competir con ellas. Todo depende de diversos factores que hay que analizar en cada situación concreta. A nivel cósmico las fluctuaciones del vacío cuántico deberían, de acuerdo con las teorías más usuales, dar origen a una fuerza mucho mayor que la que se observa, por ejemplo, en la aceleración del universo. Como había antes



Yakov Zeldovich



Steven Weinberg

9. ELIZALDE, E. “El efecto Casimir”. En *Investigación y Ciencia* 3/2009.

avanzado, los valores no cuadran y no hay una explicación, aceptada por todos, de tal hecho. Es tal vez el mayor de los retos de la física fundamental en la actualidad y, por ende, de la cosmología. Algunos grandes físicos, incluyendo insignes premios Nobel, como Steven Weinberg¹⁰, llevan muchos años trabajando en esta cuestión, habiendo involucrado incluso el principio antrópico para obtener una explicación satisfactoria al valor tan pequeño de la constante cosmológica y al hecho de que no se observan los efectos de las fluctuaciones cuánticas a escalas grandes.

7. Modificaciones de la teoría de la relatividad general

Pero si este camino se demostrase que no tiene salida nos queda aún otra posibilidad, cual es la de modificar las ecuaciones de Einstein, la propia Teoría de la Relatividad General (cuando menos a escalas grandes); con lo que se entra en las teorías denominadas $f(R)$ ¹¹ o de escalares-tensores. En nuestro grupo del Instituto de Ciencias del Espacio (CSIC) y del Institut d'Estudis Espacials de Catalunya (IEEC), liderado por el autor de este artículo y junto al Profesor ICREA Sergei D. Odintsov, estamos trabajando en este tipo de modelos, con colaboradores de diversos países europeos, americanos y de otros continentes. Los trabajos que



Alan Guth (izq.) y Andrei Linde (dcha.)

10. WEINBERG, S. "The cosmological constant problem". En *Rev. Mod. Phys.* 61, 1 (1989); *Dreams of a Final Theory: the search for the fundamental laws of nature* (Vintage Press, 1993).

11. SOTIRIOU, T.P. y FARAONI, V. "f(R) theories of gravity,". En *Rev. Mod. Phys.* 82, 451 (2010).

hemos publicado sobre este tema (como también los del grupo del Prof. Enrique Gaztañaga¹², que hizo la tesis doctoral bajo la dirección del autor del presente artículo) han tenido un considerable impacto internacional, siendo así que nuestro Instituto (cofundado por el que escribe) ha llegado a alcanzar la posición número ocho del mundo en número de citas del Science Citation Index por investigador (el denominado *Normalized Impact Factor* o factor de impacto normalizado)¹³.

Recapitulando lo dicho en apartados recientes, hemos visto con detalle como toda la Cosmología moderna surge de las ecuaciones de Einstein y, por ello, dar el arriesgado paso, que hemos apenas apuntado, de intentar modificarlas se traduce en entrar –como de hecho se está haciendo en la actualidad– en una nueva era del conocimiento teórico. En realidad, es bien sabido, desde que se empezó a trabajar en ello por parte de la escuela rusa a mediados de los años setenta del siglo pasado (Yakov Zeldovich (1914–1987), Alexei Starobinsky, Viatcheslav Mukhanov y otros), que las ecuaciones de Einstein no pueden ser en ningún caso la última palabra en nuestro conocimiento del cosmos, ya que no incorporan a la física cuántica. Por otra parte, el modelo original de Big Bang tuvo que ser modificado para corregir varias inconsistencias del mismo, lo que se logró por medio de los modelos inflacionarios, concepto introducido por Alan Guth.

8. Gravedad cuántica y el origen del universo

Pero se ha visto, por otro lado, que una teoría de la gravedad cuántica deviene siempre inconsistente, lo que constituye otro de los grandes retos de la ciencia de nuestro milenio. Lo único que se ha conseguido hasta el presente es corregir mínimamente las ecuaciones de Einstein añadiéndoles perturbaciones cuánticas, lo cual puede verse como un primer paso en la buena dirección y apunta, de nuevo, claramente hacia las ya mencionadas teorías $f(R)$ ¹⁴. En cualquier caso, desde un punto de vista más fundamental, estas teorías modificadas se consideran como teorías intermedias, o efectivas. El problema de encontrar una teoría fundamental definitiva persiste y todo son indicios, a mi entender, de que nos encontramos a las puertas de una nueva gran revolución científica.

Dado que el Universo tuvo con gran probabilidad un origen, otro gran reto de la Cosmología, la Física Fundamental y la Matemática, para el milenio que acabamos de iniciar, consiste en encontrar una explicación coherente al instante mismo en que tuvo lugar dicho acontecimiento. Para Stephen Hawking y Roger Penrose este instante es una pura singularidad matemática del espacio-tiempo¹⁴, siempre en base a la Teoría de la Relatividad General.

12. CROCCE, M. et al., MICE simulations - a tool for cosmological surveys, astro.dur.ac.uk/ripples/Day2/MICE_castander_130723.pdf

13. http://www.ieec.cat/assets/sir_2011_world_report_ni.pdf

14. PENROSE, R. "Gravitational collapse and space-time singularities". En *Phys. Rev. Lett.* 14, 57 (1965); S. HAWKING, S. y ELLIS, G.F.R. *The Large Scale Structure of Space-Time* (Cambridge U P, 1973); WALD, R.M. *General Relativity* (U Chicago P, 1984); GEROCH, R. *Ann. Phys.* 48, 526 (1968); <http://www.hawking.org.uk/the-beginning-of-time.html>



Viatcheslav Mukhanov



Alexei Starobinsky

Sin embargo, sus teoremas quedaron en entredicho (como ellos mismos han reconocido en ocasiones) debido a que, como hemos visto ya, la Relatividad General no incorpora los efectos cuánticos. Ahora bien, nuevos modelos (de Borde, Guth y Vilenkin¹⁵) en que se combinan, convenientemente, tanto la inflación como las necesarias fluctuaciones cuánticas del estado vacío de un sistema primigenio (antes mencionadas), han llevado también a la misma conclusión de que el Universo tuvo, en efecto, un origen, de que hubo un inicio del espacio y del tiempo: que hubo un momento en que, de la más mínima “nada” que podemos alcanzar a comprender, surgió nuestro espacio-tiempo.

Pero, ¿qué es la “nada”? para empezar. En física clásica las ecuaciones de Einstein constituyen (aquí sí) la última palabra y en Relatividad General la solución de energía cero, correspondiente a un universo sin ningún contenido energético, es la solución de de Sitter, de 1917¹⁶. En un mundo cuántico (por el que forzosamente deberemos pasar para llegar al mismísimo origen), la solución de vacío es, a su vez, la de mínima energía del sistema cuántico en cuestión, en nuestro caso, el universo primigenio como tal.

Su origen pudo ocurrir así: en el seno del estado vacío del sistema cuántico primordial una chispa, un destello (campo escalar, instantón de Hawking y

15. BORDE, A., GUTH, A.H. y VILENKIN, A. “Inflationary spacetimes are incomplete in past directions”. En *Phys. Rev. Lett.* 90, 151301 (2003); BORDE, A. y VILENKIN, A., *Phys. Rev. Lett.* 72, 3305 (1994).

16. DE SITTER, W. “On the relativity of inertia: Remarks concerning Einstein's latest hypothesis”. En *Proc. Kon. Ned. Acad. Wet.*, 19, 1217–1225 (1917); DE SITTER, W. “On the curvature of space”. En *Proc. Kon. Ned. Acad. Wet.*, 20, 229–243 (1917).

Turok¹⁷) habría sido capaz –a coste energético cero– de iniciar un proceso de inflación que habría amplificado extraordinariamente las pequeñísimas fluctuaciones (escala de Planck) del vacío cuántico –que están siempre presentes, de acuerdo con el principio de incertidumbre de Heisenberg¹⁸ (uno de los pilares de la Física Cuántica)– para dar así origen a las fluctuaciones que observamos hoy, claramente, en el fondo de radiación cósmica (CMB)¹⁹.

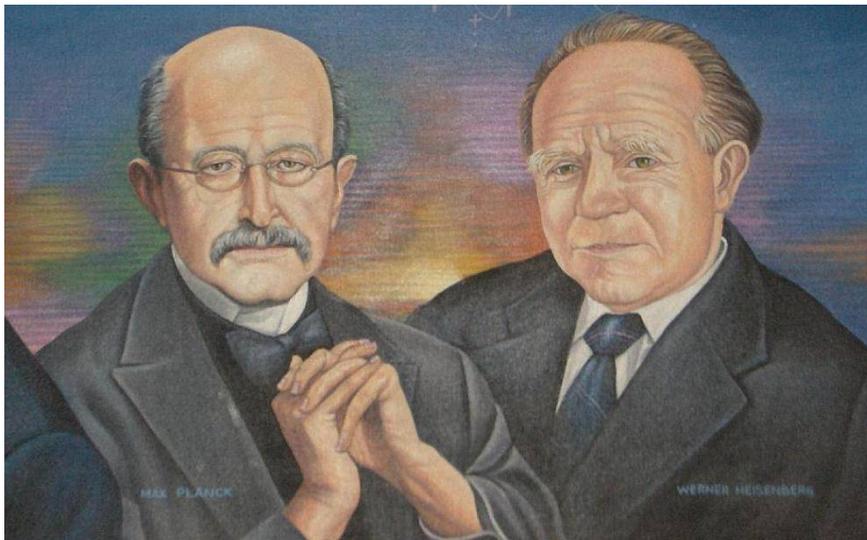


Stephen Hawking (izq.) y Roger Penrose (dcha.)

17. HAWKING, S. y TUROK, N. "Open inflation without false vacua". En *Phys. Lett.* B425, 25-32 (1998).

18. GALINDO, A. y PASCUAL, P. *Mecánica Cuántica* (Alhambra, Madrid, 1978); https://es.wikipedia.org/wiki/Relaci%C3%B3n_de_indeterminaci%C3%B3n_de_Heisenberg; <http://www.eis.uva.es/~qgintro/atom/tutorial-10.html>

19. PENZIAS, A.A. y WILSON, R.W. "A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s". En *The Astrophysical Journal*. 142, 419–421 (1965), doi:10.1086/148307; WILSON, R.W. "The Cosmic Microwave Background Radiation". En *Nobel Lecture*, 8-12-1978; http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1978/wilson-lecture.pdf; Smoot Group, The Cosmic Microwave Background Radiation, Lawrence Berkeley Lab. (1996); Planck reveals an almost perfect Universe, Max Planck Gesellschaft (2013); https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_microwave_background; WEINBERG, S. *The First Three Minutes* (Basic Books, 1977, updated 1993); GAMOW, G. "The Origin of Elements and the Separation of Galaxies". En *Physical Review* 74, 505 (1948); GAMOW, G. "The evolution of the universe". En *Nature* 162, 680 (1948).



Max Planck (izq.) y Werner Heisenberg (dcha.)

Estos son los mapas más antiguos del Universo que hemos logrado obtener hasta ahora: datan de cuando tenía tan solo unos 370.000 años de edad. Aunque la cosa cambiará mucho, sin duda, con la ayuda de las ondas gravitacionales que han sido recientemente observadas de manera directa²⁰, dentro de unos años. Antes de eso el cosmos, muy caliente, era una oscura sopa de quarks, gluones y partículas elementales, impenetrable a los fotones; hasta que la temperatura fue descendiendo y se situó por debajo del umbral de ionización del átomo más liviano, el del hidrógeno. Éste precipitó, de repente, a gran escala y de ese modo, por primera vez, la luz del alba cósmica invadió el Universo. Y aún hoy día sigue llegando hasta nosotros de todas las direcciones; y la podemos observar nítidamente con los ojos curiosos de satélites como COBE, WMAP y PLANCK²¹, que la han transformado en imágenes, cada vez con mayor definición, del mapa más antiguo del Cosmos, del que acabamos de hablar. Finalmente, ha quedado definido el que se denomina modelo cosmológico estándar o Λ CDM (modelo de *Cold Dark Matter*, o materia oscura fría, con constante cosmológica, Λ)²². No se trata, de nuevo, sin embargo, de un modelo definitivo.

20. ABBOTT, B.P. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration) et al. (2016). "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger". En *Physical Review Letters*. 116, 061102. arXiv:1602.03837; Gravitational waves detected 100 years after Einstein's prediction, National Science Foundation, www.nsf.gov; https://en.wikipedia.org/wiki/Gravitational_wave

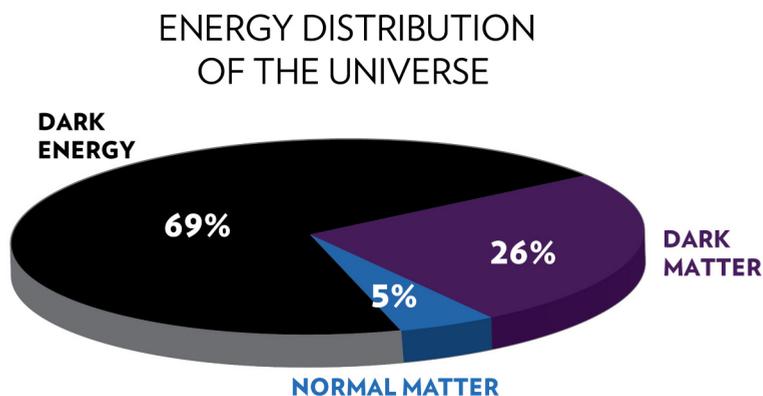
21. <https://science.nasa.gov/missions/cobe>;
<https://map.gsfc.nasa.gov/>; <http://www.cosmos.esa.int/web/planck>

22. https://lambda.gsfc.nasa.gov/education/graphic_history/univ_evol.cfm

9. ¿Cuánto sabemos del universo?

Al dar conferencias sobre este tema a menudo surge de entre la audiencia la pregunta de si los científicos, en lugar de aprender más, cada vez sabemos menos de nuestro cosmos. Retomando el discurso del principio de este artículo, los hay que afirman que nuestro conocimiento sobre el mismo se reduce actualmente, como mucho, a un mero 5% de él, En cierto modo ello no deja de ser cierto, pues hasta tal punto son importantes las zonas “oscuras” del mismo, como bien ha sido puesto de manifiesto en lo que antecede. Sin embargo, hay que tener muy presente que el conocimiento es una variable que siempre crece, nunca puede disminuir. Hoy sabemos mucho más que hace medio siglo, y muchísimo más aún que a finales del siglo XIX cuando se pensaba que ya se sabía (casi) todo²³. Pues, saber que no se sabe es una importante adquisición de conocimiento como no saber que no se sabe es una peligrosísima forma de ignorancia. De otra manera, en ocasiones un resultado negativo de un experimento ayuda mucho más a comprender, y aún más profundamente, que un resultado positivo que confirma simplemente nuestra actual teoría.

Por otro lado, es de destacar, como hacen de manera muy vehemente algunos cosmólogos, entre los que se cuenta Viatcheslav Mukhanov, que la parte del universo que conocemos mejor, aunque solo sea el 1% del mismo es de hecho la más interesante. Las componentes oscuras del mismo son por decirlo de algún modo, anodinas, de relleno, y su naturaleza se averiguará, tarde o temprano.



Directamente somos capaces de observar menos de un 5% de nuestro Universo

23. <http://www.dummies.com/education/science/physics/string-theory-creates-a-theory-of-everything/>;
<https://www.youtube.com/watch?v=we4AONjk1UI>



El satélite PLANCK de la Agencia Europea del Espacio (crédito PLANCK, ESA)

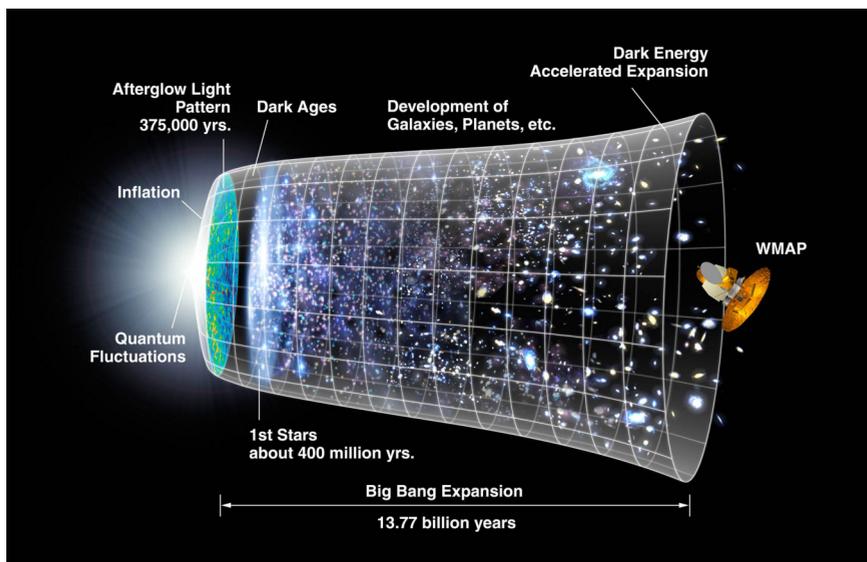
Son bastantes los expertos teóricos que opinan que la última respuesta a los grandes problemas aquí planteados llegará, en algún momento, de la mano de las teorías de cuerdas, en su versión de la tan misteriosa teoría M (maestra o madre), la también denominada “teoría del todo”²³. Pero un error que se ha ido repitiendo demasiado a menudo a lo largo de Historia de la Ciencia es el de haber creído, en varias ocasiones, que se estaba a punto de tener entre las manos la teoría final, la teoría del todo.²⁴ Eso es, que solo faltaba perfilar algunos aspectos, tapar algún agujero, para dejarla acabada, perfecta.

Nada más lejos de la realidad. El autor de este artículo opina, por el contrario, que surgirá una nueva teoría, muy distinta de las que tenemos ahora y, tal vez, tanto o más revolucionaria de lo que lo fueron la Relatividad General y la Física Cuántica hace ahora cien años.

A fin de adentrarnos más allá, eventualmente hasta el instante cero, necesitaremos aún otros ‘ojos’ más penetrantes, capaces de captar la información de las ondas gravitacionales que fueron detectadas directamente, hace menos de un año, en dos laboratorios de los EEUU²⁰. Seremos así capaces de obtener fotografías de un Universo aún mucho más joven y, previsiblemente, de confirmar la inflación cósmica²⁵. Pero lo que resulta muy difícil con la física actual, aun invo-

24. <https://www.quora.com/Which-19th-century-physicist-famously-said-that-all-that-remained-to-be-done-in-physics-was-compute-effects-to-another-decimal-place>;
<http://hsm.stackexchange.com/questions/199/did-physicists-around-1900-really-believe-they-were-close-to-figuring-it-all-out>

25. http://www.physicsoftheuniverse.com/topics_bigbang_inflation.html; http://www.ctc.cam.ac.uk/outreach/origins/inflation_zero.php; <http://www.ub.edu/geocrit/geo84.htm>; <http://discovermagazine.com/2006/oct/cover>; <http://www.physics.org/article-questions.asp?id=137>



La evolución del Universo, de acuerdo con los últimos datos de PLANCK (crédito PLANCK, ESA)

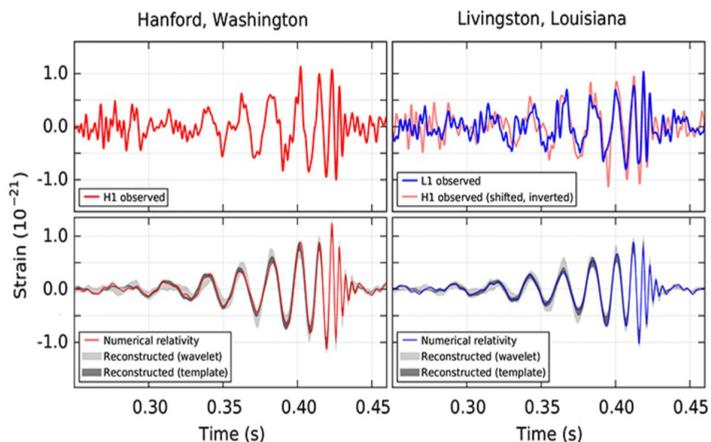
cando el controvertido principio antrópico, es construir un modelo de origen y evolución de un único Universo como el nuestro.

Las teorías más avanzadas, que ya hemos mencionado, producen genéricamente multiversos²⁶, es decir, innumerables colecciones de universos, de todas las dimensiones y propiedades imaginables, uno de los cuales, por puro azar, sería el nuestro, con sus propiedades precisas que permiten la existencia de un planeta como la Tierra y la vida en él, tal como la conocemos. Según muchos científicos, estas propuestas de multiversos desbordan las fronteras de la propia Física al escapar a todos los métodos de predicción contrastable²⁷. Aún no se ha dicho, sin embargo, la última palabra y hay algunos equipos que están buscando pruebas observacionales para apoyar la posible realidad de tales modelos. El tiempo nos dará la respuesta. Con ello hemos alcanzado aquí la frontera del conocimiento presente²⁸ y, a la vez, el final de este artículo.

26. <http://www.space.com/18811-multiple-universes-5-theories.html>;
<http://www.space.com/31465-is-our-universe-just-one-of-many-in-a-multiverse.html>;
<https://en.wikipedia.org/wiki/Multiverse>

27. ANNA IJJAS, Paut [et al.]: "A cosmic controversy". En *Scientific American*, 317, 5-7 (2017).

28. <http://discovermagazine.com/2006/oct/cover>;
<http://www.wsj.com/articles/SB10001424127887323646604578405073343715596>;
<http://www.kavlifoundation.org/frontiers-theoretical-physics>



Señales de ondas gravitacionales detectadas en los laboratorios de Hanford (Washington) y Livingston (Indiana) en los Estados Unidos (crédito LIGO, USNSF)

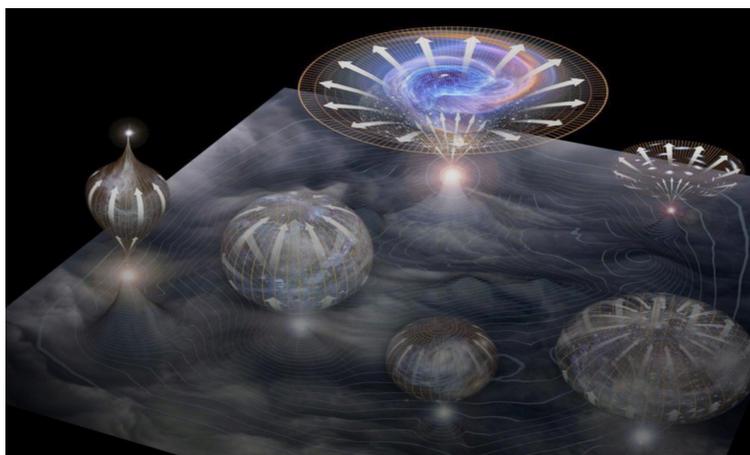


Ilustración del multiverso (crédito Moonrunner design, National Geographic)

Agradecimientos

El autor agradece la financiación recibida de MINECO, Proyectos FIS2013-44881-P y FIS2016-76363-P, del CSIC, Proyecto I-LINK1019, y del Proyecto Consolider Ingenio CPAN.