

El Modelo Estándar de la Cosmología (primera parte)

Una entrevista exclusiva al PhD. en Ciencias Físicas **Gustavo Esteban Romero**. Entre los temas tratados se encuentran: una breve historia de la Cosmología Moderna, el Modelo Lambda-CDM, el espacio-tiempo de De Sitter, el Big Bang y las Fluctuaciones Cuánticas, la Constante Cosmológica, la Materia Oscura, la Energía Oscura, los Agujeros Negros, los Quasars, los Blazars, la Radiación Cómica de Fondo, la polarización de modo-B y modo-E, la radiación de Cherenkov, otras teorías Cosmológicas, la Teoría M, la divulgación de la Cosmología en medios, los aportes de la Filosofía y sobre sus trabajos de investigación en la actualidad.

[ver la segunda parte \(29 de febrero 22hs UTC\)](#)



* incluye subtulado por transcripción



Introducción

El Modelo Estándar de la Cosmología, más conocido como Lambda-CDM, es una teoría Astrofísica que describe la estructura y evolución a gran escala de todo el Universo. Es consistente con la Mecánica Cuántica, la Relatividad General, y actualmente es el más acorde con las observaciones astronómicas vigentes al incluir las hipotéticas materia oscura y energía oscura.

Para darnos una explicación más detallada de este modelo, su estado actual y limitaciones, Magazine de Ciencia se reúne con el Dr. Gustavo Esteban Romero, quien se licenció en Ciencias Físicas en el año 1991 en la Universidad Nacional de La Plata, y se doctoró en la misma institución en el año 1995. En 1997 y 1998 trabajó en el Instituto Astronómico y Geofísico de San Pablo en Brasil, desde 1991 en el Instituto Argentino de Radioastronomía; entre 1995 y 2000, y desde 2003 en la Universidad Nacional de La Plata.

Ha sido Presidente de la Asociación Argentina de Astronomía, dos veces Premio Bernardo Houssay del Ministerio de Ciencia y Tecnología, Premio Sésic de la Asociación Argentina de Astronomía, Premio Gaviola de la Academia Nacional de Ciencias; y en dos oportunidades Mención de Honor en la Gravity Research Foundation. Actualmente es Profesor Titular de Astrofísica Relativista en la Universidad Nacional de La Plata y es Investigador Superior del CONICET en el Instituto Argentino de Radioastronomía, donde dirige el grupo de Astrofísica Relativista y Radioastronomía GARRA.

Transcripción de la entrevista

Acontecimientos históricos en la Cosmología Moderna

La Cosmología Moderna se origina en el año 1917 con la primera aplicación que hace Albert Einstein de la Teoría General de la Relatividad al Universo como un todo. El problema que Einstein quería resolver al aplicar su teoría, que había sido descubierta apenas dos años antes en 1915, al Universo; era si el principio de Mach era compatible con su teoría de la gravitación. El principio de Mach esencialmente sostiene que el espacio y el tiempo, y los efectos gravitacionales e inerciales, se deben a la distribución de masas que hay en el Universo. Entonces Einstein estaba interesado en mostrar que un Universo con materia podía ser estable y su teoría podía dar un contexto general para entender la forma en la cual el Universo se comportaba.

Al hacer su aplicación Einstein se encuentra que si trata de describir con su teoría al Universo, no obtiene soluciones dinámicas a menos que modifique sus ecuaciones con un nuevo término que fue lo que se llamó el término de la Constante Cosmológica. Esto le permitió introducir en la gravitación, en su teoría de la gravitación, una acción repulsiva del campo gravitacional sobre ciertas escalas espaciales. Asumiendo una distribución homogénea e isotrópica de materia e introduciendo este término de la constante cosmológica, Einstein es capaz de reproducir un Universo estático que era el estado en el cual él pensaba se encontraba el Universo en su momento.

Al poco tiempo, Willem De Sitter, un astrónomo holandés, encuentra una solución de vacío de las ecuaciones de Einstein con Constante Cosmológica; lo que hoy llamamos el Universo de De Sitter. En este Universo no hay materia y Einstein quedó perplejo por la posibilidad de la existencia de este tipo de soluciones. Él pensaba que no era posible tener espacio y tiempo si no había materia. Empezó una larga disputa entre Einstein y De Sitter, la famosa controversia Einstein De Sitter, de la cual surgiría esencialmente la cosmología moderna.

A los pocos años un astrónomo, meteorólogo y matemático ruso, Fridman, descubre soluciones de las ecuaciones de Einstein que son dinámicas, las famosas soluciones de Fridman que describen Universo ya sea en expansión o en contracción. Fridman comunicó a Einstein sus resultados y Einstein consideró que estos modelos del Universo eran algo así como una especie de juego matemático que era posible dentro del contexto de sus ecuaciones pero no pensó que esas soluciones describiesen el Universo real.

Años después las soluciones de Fridman fueron redescubiertas por Lemaitre, un astrónomo y sacerdote belga, que empezó a tratar de impulsar la idea de que el Universo está en un estado dinámico de expansión. Aproximadamente por esas mismas épocas observaciones del Universo, en particular las hechas por Edwin Hubble, mostraron que efectivamente las galaxias estaban alejándose unas de otras en una especie de movimiento de recesión y el estado real del Universo no era un estado estático como el que había postulado Einstein en 1917 sino un estado dinámico; fue el descubrimiento de la expansión del Universo hacia 1928, fue uno grandes acontecimientos de la cosmología observacional.

Pocos años después el astrónomo británico Arthur Eddington el que había originalmente contrastado las primeras predicciones de la Relatividad General en el famoso eclipse de 1919, muestra que el modelo original de Einstein con Constante Cosmológica era inestable. A partir de entonces Einstein comprende que un estado estacionario para el Universo no es posible y en 1934 junto con Willem De Sitter publican un artículo en el cual Einstein retira la constante cosmológica de sus ecuaciones y declara que el haberlas introducido fue el error más grande de su carrera científica.

En los años siguientes la teoría de un Universo en evolución adquiere cada vez más ímpetu, en 1946 George Gamow postula la existencia de una posible radiación de fondo generada cuando el Universo estaba en un estado extremadamente compacto, por ahí podemos discutir un poquito más en detalle de qué se trata esta radiación. Por la misma época se propone una idea alternativa del Universo en expansión que es la idea del llamado estado estacionario con creación continua de materia, propugnada Fred Hoyle, Hermann Bondi y Thomas Gold hacia 1946 y estas dos ideas del Universo en expansión que tiene un origen en el tiempo y un Universo en el estado estacionario pero que también está en expansión con una creación continua de materia, durante unos 20 años son los dos modelos alternativos cosmológicos que compiten entre sí. Esa competencia históricamente se decidió hacia mediados de los años 60 cuando se puede establecer en forma fehaciente la existencia de una radiación de fondo cósmica que habría sido generada en una época temprana del Universo, esa radiación sólo puede ser explicada en el marco de una teoría evolutiva como es la teoría llamada del Big Bang.

A partir de entonces, de mediados de los años 60 esta teoría se va asentando cada vez más, los grandes desafíos son explicar cómo se formó la estructura que hoy observamos en el Universo y las grandes modificaciones que se le fueron introduciendo fueron la idea de que pudo haber un periodo de expansión acelerado, un periodo de expansión inflacionario en el Universo temprano, introducida por Starobinsky y también por Alan Guth en 1980, la llamada inflación cósmica; y después algunos cambios muy importantes sucedieron debido a observaciones que establecieron que el estado del Universo parece ser no solo de una

expansión que va decelerando por la fuerza atractiva de la gravedad sino una expansión que se va acelerando. Explicar cómo esta aceleración es posible llevo a la introducción de nuevo, o la reintroducción, de la constante cosmológica que había sido retirada por Einstein y De Sitter en 1934 y a la formulación de la versión final del llamado Modelo Lambda-CDM (Cold Dark Matter), que es el Modelo Estándar de la Cosmología actual.

El modelo Lambda-CDM

El modelo Lambda-CDM que es el modelo que surge a partir del descubrimiento de la expansión acelerada del Universo en 1997, es un modelo cosmológico para el Universo en evolución, esto es para un Universo dinámico que pasa por una fase de expansión primero desacelerada y después pasa a una fase de expansión acelerada.

Ese modelo se logra introduciendo las modificaciones mínimas a las teorías vigentes tanto para la gravitación como para la física de partículas; es un modelo que incorpora la Relatividad General como teoría de la gravitación, la Teoría Cuántica de Campos como teoría de la materia, con las modificaciones mínimas necesarias para dar cuenta del estado observacional que se descubrió a partir de 1997. ¿Cuáles son esas modificaciones? En la relatividad general modificarla en la misma manera que la había modificado Einstein en 1917 introduciendo en las ecuaciones de campo un término con Constante Cosmológica.

El efecto de introducir este término en las ecuaciones de Einstein es dotar a la gravitación de la posibilidad de actuar en forma repulsiva sobre ciertas escalas espaciales, escalas espaciales muy grandes. Entonces, cuando el Universo es pequeño en etapas tempranas de su evolución domina la fuerza atractiva de la gravedad y en etapas posteriores cuando la densidad de energía del Universo cae significativamente domina la acción repulsiva de la gravitación lo cual da lugar a una aceleración del Universo.

La otra modificación que introduce el modelo Lambda-CDM es en el contenido de materia del Universo; para poder dar cuenta de esa dinámica observada del Universo se debe agregar una componente nueva en la fuente del campo gravitacional que es una componente de materia oscura. La materia oscura es materia que no radía electromagnéticamente, no la podemos ver, no la podemos detectar por medio de los fotones que emite, no está formada por partículas bariónicas ni por partículas cargadas, es una materia cuyo origen no se especifica en el modelo Lambda-CDM, pero esa materia si ejerce un efecto gravitacional o sea es materia que interacciona solamente en forma gravitacional.

Es una hipótesis muy fuerte que postula una nueva componente en la ontología del mundo, hay una cierta componente del Universo cuya naturaleza no conocemos; y el precio que pagamos por aceptar esa componente es alto desde el punto de vista ontológico, pero nos permite dar cuenta de la fenomenología observada con muy buena precisión.

Entonces, esas son las dos modificaciones básicas que hace este modelo, el modelo Lambda-CDM en las teorías fundamentales de la física; por un lado modifica las ecuaciones de Einstein para admitir repulsión gravitacional a través de la constante cosmológica, y por otro modifica el contenido de materia que se supone existe en el Universo aceptado la existencia de una clase de materia que no conocemos en la tierra, que no interactúa con el resto de la materia de la misma forma que la materia normal, no interactúa electromagnéticamente pero si interactúa por medio del campo gravitacional que genera.

Geometría y Topología del Universo

La topología del Universo depende básicamente de la geometría local del Universo y de las características de la forma del Universo a gran escala. Localmente la geometría del Universo viene determinada por el contenido de materia del Universo a través de las ecuaciones de Einstein. Las observaciones parecen apuntar a que la geometría del espacio-tiempo es plana, si nosotros cortamos el espacio-tiempo que tiene 4 dimensiones, 3 espaciales y una temporal, en superficies de 3 dimensiones puramente espaciales, si medimos distancias sobre las superficies espaciales cortadas a tiempo igual constante del espacio-tiempo obtenemos que aproximadamente sobre cada superficie vale una geometría euclídea; o sea, si dibujamos un triangulo la suma de los ángulos vale 180° ; se dice que el Universo es plano en ese caso.

En cuanto a la topología que es la forma a gran escala del Universo, hay distintas posibilidades: el Universo puede ser finito o infinito, puede ser plano, cerrado o abierto; y puede ser simplemente conexo, como por ejemplo lo es una esfera, o múltiplemente conexo como puede ser un anillo o cualquier superficie que tenga agujeros en el medio. Respecto a si es finito o infinito, la respuesta es que no sabemos cuál es la situación; hay razones para pensar que el Universo es finito pero que carece de bordes, pero la situación no es clara y es una situación que debe definirse observacionalmente.

En cuanto a cuál es la forma local del Universo ya dijimos que esta forma es plana, o sea el Universo es euclídeo localmente las distancias se miden como se miden en un plano euclídeo y respecto a si es simplemente conexo o múltiplemente conexo la respuesta a eso es que tampoco lo sabemos, no sabemos si la topología del Universo acepta agujeros o no, la existencia de agujeros serían los que se suele llamar agujeros de gusanos, Wormholes en ingles, serían conexiones topológicas entre distintos puntos del espacio-tiempo. Si estas conexiones existen o no, es un tema abierto y de investigación.

O sea, que en este momento es poco lo que puede decirse sobre la topología del Universo; podemos decir mucho más sobre su geometría y en particular sobre su geometría local ya que las mediciones cosmológicas que hacemos nos permiten sacar conclusiones bastantes contundentes al respecto y podemos afirmar que el Universo es plano localmente con una alta seguridad.

El espacio-tiempo de De Sitter

Este es un modelo de la Relatividad General del Universo en el cual en las ecuaciones de Einstein el miembro de la derecha de las ecuaciones que es el que representa al contenido de materia del Universo se toma como cero, básicamente se supone que no hay materia en el Universo; pero si se modifican las ecuaciones de Einstein en el miembro de la izquierda, que es el que determina la geometría del espacio-tiempo, para incluir una constante cosmológica.

Entonces, esencialmente el espacio-tiempo de De Sitter es un espacio-tiempo que está desprovisto de materia pero que tiene una estructura dinámica debido a la presencia de esa constante cosmológica, esencialmente es un Universo que está en expansión donde el espacio-tiempo se expande pero que carece de materia.

El Big Bang y las Fluctuaciones Cuánticas

El modelo Lambda-CDM es un modelo que no puede deshacerse de la presencia de un Big Bang. Por Big Bang entiendo una singularidad una incapacidad de la teoría para predecir qué es lo que sucedió en el comienzo de la expansión del Universo. La razón por la cual la teoría no puede decir nada acerca del comienzo del Universo es porque el espacio-tiempo mismo deja de estar definido en el Big Bang. El Big Bang no es una cosa, no es un momento del tiempo, no es un lugar, el Big Bang es simplemente una expresión que utilizamos para decir que las ecuaciones de Einstein no son válidas más en un cierto rango de aplicación de la teoría. La teoría en cierta forma predice su propia falla al intentar ser extrapolada a densidades extremadamente grandes, la teoría da infinito. Cuando uno obtiene infinitos en una teoría física el significado de esos infinitos no es que existen objetos con propiedades físicas infinitas sino que la teoría deja de ser aplicable.

En el modelo Lambda-CDM con ciertas hipótesis respecto a la densidad del Universo y las condiciones de expansión actuales del Universo uno obtiene necesariamente un infinito al comienzo de la expansión. Entonces, eso lo que quiere decir es que el modelo Lambda-CDM no puede hablar, no le es posible obtener proposiciones a partir de ese modelo sobre cómo se originó el Universo. Ahora, lo que sí se puede obtener es información sobre cómo se formó la estructura del Universo una vez que comenzó la expansión y ahí es donde entra el tema de las fluctuaciones cuánticas. Si poco tiempo después de que comenzó la expansión existía un campo con fluctuaciones cuánticas entonces esas fluctuaciones habrían sido magnificadas, habrían sido aumentadas por las expansión acelerada inicial del Universo, se llama el periodo inflacionario y en esa magnificación es donde se habrían formado las primeras semillas de lo que sería después la estructura del Universo.

Entonces, el modelo Lambda-CDM no puede deshacerse de los problemas que tienen todas las teorías con singularidad en su comienzo, pero sí puede incorporar fluctuaciones en las primeras etapas de la evolución del Universo, cuánticas, para poder explicar luego la formación de estructura del Universo conocido. Lo que quiero enfatizar que el modelo Lambda-CDM, como la totalidad de los modelos cosmológicos, no son modelos sobre el origen del Universo sino son modelos sobre la evolución y la formación de estructura del Universo, no nos dicen nada sobre cómo se originó el Universo, sino cómo evolucionó a partir de unas ciertas condiciones iniciales que el modelo debe fijar.

Quasars y Agujeros Negros

La Teoría General de la Relatividad después de los grandes avances que hubo en los años 20 entró en una especie de aletargamiento, un periodo en el cual no era posible hacer nuevas predicciones con la teoría y esta se transformó en el refugio de físicos matemáticos que trataban de hallar soluciones exactas.

Esta situación cambió dramáticamente con el descubrimiento de los Quásares y el comienzo de las primeras ideas acerca de la posible existencia de agujeros negros en el Universo. Eso sucedió a principios de los años 60

cuando Marteen Schmidt se percató de que las líneas espectrales que había logrado medir para el objeto 3C273, un objeto que emitía ondas de radio en el cielo y para el cual él había obtenido un espectro en el óptico; esas líneas que parecían no corresponder a ningún elemento conocido en realidad eran líneas típicas del hidrógeno pero que estaban enormemente corridas hacia el rojo por la velocidad de recesión de la fuente. La velocidad de recesión era tal que hacía que esta fuente fuese en esa época, 1963, la fuente más distante del Universo conocido y por lo tanto la velocidad de recesión tenía que ser una velocidad de origen cosmológico, no podía ser algo que se estuviese moviendo dentro de la galaxia o en el medio intergaláctico con un movimiento peculiar, era demasiada alta la velocidad.

Entonces, eso planteó un serio problema que era el problema de la energética de estas fuentes de radio, entonces no identificadas, ya que la fuente era muy lejana, la fuente era variable por lo cual era muy compacta, se podía inferir que era muy compacta; cambiaba su brillo sobre escalas de tiempo muy cortas y por tanto la luminosidad intrínseca de esas fuentes tenía que ser enorme, mucho más de la que permitía obtener, que es posible obtener, por medio de reacciones termonucleares que son las que dan su energía a las estrellas.

¿Cuál es la fuente última de energía en un objeto como un Quásar? esa pregunta es la que se plantearon los científicos, en particular los astrofísicos hacia principios de 1964 y la respuesta vino de la mano de Salpeter y Novikov, ellos junto con Zel'dovich propusieron que agujeros negros de muy alta masa podían estar acretando materia en el centro de ciertas galaxias y ese proceso de acreción puede liberar mucha más energía que las reacciones termonucleares. Entonces, los agujeros negros postulados para explicar la energética de estos objetos exóticos hicieron su irrupción en la astrofísica como una hipótesis de trabajo.

Al poco tiempo Novikov y Zel'dovich proponen que la acreción sobre agujeros negros de masas estelares dentro de nuestra propia galaxia podía dar lugar a fuentes de rayos X. Con el desarrollo por parte de Giacconi y de otros de la astronomía de rayos X, utilizando cohetes y satélites fue posible descubrir los primeros candidatos de agujeros negros en nuestra galaxia, objetos como Cygnus X-1 y otros. Desde entonces los agujeros negros son una parte fundamental de nuestra representación de los procesos astrofísicos que ocurren en el Universo, objetos como los Micro Quásares, los Quásares, núcleos de galaxias activas, los Jets tanto galáctico como extragalácticos; se cree que están generados por agujeros negros que acretan materia de su entorno.

También hoy pensamos que los agujeros negros han jugado un papel fundamental en la formación de estructura del Universo; las galaxias parecen haberse formado alrededor de agujeros negros o simultáneamente con los agujeros negros que parecen albergar la mayoría de ellas en su centro. Por ejemplo, nuestra propia galaxia parece tener un agujero negro de unas 2 millones de masas solares en el centro; este agujero negro afecta las órbitas de todas las estrellas que están en la región central de la galaxia y produce una serie de fenómenos que son hoy en día observables, están muy bien caracterizados.

Entonces, los agujeros negros que en el algún momento eran objetos extraordinariamente exóticos hoy son parte de las herramientas que utilizan los astrofísicos para poder representar los fenómenos más extremos que ocurren en el Universo. Todo esto ha llevado a un renacimiento de la Relatividad que juega ahora un papel importante en una rama de la investigación que es la astrofísica, hasta entonces, hasta 1963, la Relatividad General básicamente solo se aplicaba en la cosmología, hoy se aplica tanto en la cosmología como en la astrofísica y fundamentalmente en la astrofísica a través del rol que juegan los agujeros negros en el funcionamiento de nuestro Universo.

Los Blazars

Los Blazars son una especie de núcleos galácticos activos, o sea el centro de galaxias donde agujeros negros que están comiendo a la galaxia, acretando materia de su entorno, producen chorros de plasma, eyecciones de plasma relativista muy bien colimados, esas eyecciones se llaman Jets y un Blazar en realidad es lo que se llama un Quasar, pero donde el Jet está apuntando en la dirección del observador.

Entonces, nosotros estamos recibiendo esa radiación en la dirección que se emite por lo cual está muy potenciada en nuestro sistema de referencia y el objeto parece particularmente brillante. Parece ser que las distintas clases de objetos: Quasars, Blazars, otros núcleos activos de galaxias, radiogalaxias, forman un continuo, una misma clase de objetos, donde los cambios son respecto a la línea de la visual de la orientación del Jet, o sea parece ser una misma fenomenología altamente isotrópica que presenta un diferente aspecto de acuerdo a cómo es nuestra orientación con respecto al sistema, entonces los Blazars serían la manifestación más extrema del fenómeno de los núcleos galácticos activos, galaxias que están siendo devoradas por los agujeros negros.

El CMB (Radiación de Fondo de Microondas)

El CMB, el Fondo Cósmico de Radiación, es la radiación que se produce cuando el Universo recombina por primera vez. ¿Qué significa que recombina por primera vez? Significa que el Universo a medida que se va expandiendo se va enfriando, en un momento la temperatura era suficientemente alta como para que la materia que formaba el Universo estuviese ionizada, esto es para que los electrones estuviesen separados de los núcleos, eso forma un estado de la materia que se conoce como plasma; entonces, en ese estado de la materia los fotones quedan auto-absorvidos por el plasma y no pueden escapar, cuando el sistema se expande la temperatura cae y por debajo de una cierta temperatura, que es la llamada temperatura de recombinación, los electrones pueden ser capturados por los núcleos de los átomos y se forman átomos estables.

Esos átomos tienen una opacidad, una capacidad de absorber fotones distinta que el plasma, entonces se produce un cambio abrupto en la opacidad, el medio se vuelve transparente y la radiación que hasta entonces estaba absorbida por el plasma ahora escapa a través de los átomos ya formados. Entonces, al escapar esa radiación forma un fondo de radiación que aun hoy puede ser detectado, la temperatura de esa radiación ha ido decreciendo con el paso del tiempo debido a la expansión del Universo y actualmente está en el orden de los 2.72 grados Kelvin.

Es como cuando uno prende un horno muy caliente, luego lo apaga y acerca la mano al horno y detecta algún tipo de radiación por ejemplo en el infrarrojo debido al calor que todavía sale del horno; en cierta forma el calor que detectamos del horno es el indicio de que el horno en algún momento estuvo prendido; lo mismo sucede con la radiación de fondo cósmico, la radiación que nos muestra que el Universo en algún momento estuvo en un estado mucho más denso y pasó por lo que podemos llamar un estado de plasma. Actualmente el Universo está esencialmente formado por materia no ionizada, hidrógeno neutro y otros elementos más pesados. Es resultado de la recombinación que se produjo unos 300.000 años después del comienzo de la fase de expansión.

Esa radiación puede ser detectada en la tierra por medio de radiotelescopios, por ejemplo BICEP2 un radiotelescopio que ha funcionado en la Antártida; experimentos futuros también planean detección desde la Tierra, por ejemplo QUBIC (Q&U Bolometric Interferometer for Cosmology), que se espera emplazar ya sea en la Antártida o en la Argentina en un futuro cercano; y también satélites desde el espacio como el satélite COBE que en los años 90s fue el primero en hacer un mapa detallado de la radiación de fondo cósmico, determinó con gran precisión que el espectro de esa radiación es una ley de cuerpo negro casi perfecta, permitió determinar también la presencia de inhomogeneidades en la Radiación de Fondo Cósmico; y después misiones más nuevas, más avanzadas, permitieron descubrir detalles ya más finos de este campo de radiación que tiene guardados en su impronta las características del estado del Universo cuando se produjo el desacople de la materia y la radiación, unos 300.000 años después del Big Bang. Estas misiones más nuevas son las sondas Wilkinson de la NASA: WMAP, y la sonda de la ESA: Planck, que es la más reciente y cuyos datos son los que actualmente todavía se están analizando.

[ver la segunda parte \(29 de febrero 22hs UTC\)](#)



El Modelo Estándar de la Cosmología (primera parte) por [Magazine de Ciencia](#)

Licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional License](#). Licencia completa.

Creado a partir de la obra en <http://www.magazinedeciencia.com.ar/el-modelo-estandar-de-la-cosmologia-1>.