

# Ciencia e **CI** Investigación

ASOCIACIÓN ARGENTINA PARA EL PROGRESO DE LAS CIENCIAS

Primera revista argentina de información científica / Fundada en enero de 1945



**Simbiosis: su rol en la supervivencia y la evolución de los organismos.**

■ ROSA NAGEL

**Cosmología moderna: la huella de la formación de los mundos**

■ ALEJANDRO GANGUI

**Retinopatía diabética: mecanismos básicos y avances terapéuticos**

■ GABRIELA BRAVO, CAROLINA FLUMIAN, MARTÍN GÓMEZ, GABRIELA LEVY

**Los matemáticos, su oficio y su saber: entre la armonía de las esferas y el arrebató inspirador**

■ ENRIQUE SEGURA

**La fabricación de los elementos combustibles para reactores nucleares en la Argentina**

■ DOMINGO QUILICI  
SANTIAGO HARRIAGUE

TOMO 60 N°1 - 2010

**EDITOR RESPONSABLE**

Asociación Argentina para el  
Progreso de las Ciencias (AAPC)

**COMITÉ EDITORIAL**

**Directores**

Dr. Alberto Baldi  
Dr. Marcelo Vernengo

**Editores Asociados**

Dr. Guillermo Juvenal  
Dr. Claudio Parica  
Dra. Alicia L. Sarce  
Dr. Ángel M. Stoka  
Dra. Marta Toscano  
Dr. Norberto Zwirner  
Dr. Juan R. de Xammar Oro

**CIENCIA E  
INVESTIGACIÓN**

Primera Revista Argentina  
de información científica.  
Fundada en enero de 1945.  
Es el órgano oficial de difusión de  
la Asociación Argentina para el  
Progreso de las Ciencias.

Av. Alvear 1711, 4° piso,  
(C1014AAE) Ciudad Autónoma  
de Buenos Aires, Argentina.  
Teléfono: (+54) (11) 4811-2998  
Registro Nacional de la  
Propiedad Intelectual  
N° 82.657. ISSN-0009-6733.

Lo expresado por los autores o anun-  
ciantes, en los artículos o en los avisos  
publicados, es de exclusiva responsabi-  
lidad de los mismos. Ciencia e Investi-  
gación no se hace responsable por su  
contenido.

Ciencia e Investigación se  
edita *on line* en la página web  
de la Asociación Argentina  
para el Progreso de las  
Ciencias (AAPC)  
[www.argentinapciencias.org](http://www.argentinapciencias.org)

Centrales nucleares  
Atucha, la imagen  
izquierda construcción  
de CNA II, la imagen  
derecha CN Atucha I



## SUMARIO

### EDITORIAL

#### LA AAPC DE CARA AL BICENTENARIO

Alberto **Taquini** ..... 3

### ARTÍCULOS

#### La fabricación de los elementos combustibles para reactores nucleares en Argentina

Domingo **Quilici** y Santiago **Harriague**. ..... 4

#### Simbiosis: su rol en la supervivencia y la evolución de los organismos

Rosa **Nagel** ..... 23

#### Cosmología moderna: la huella de la formación de los mundos

Alejandro **Gangui** ..... 30

#### Retinopatía diabética: mecanismos básicos y avances terapéuticos

Gabriela **Bravo**, Carolina **Flumian**, Martín **Gómez** y  
Gabriela **Levy** ..... 41

#### Los matemáticos, su oficio y su saber.

#### Entre la armonía de las esferas y

#### el arrebató inspirador

Enrique **Segura** ..... 51

INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES..... 58

... La revista aspira a ser un vínculo de unión entre los trabajadores científicos que cultivan disciplinas diversas y órgano de expresión de todos aquellos que sientan la inquietud del progreso científico y de su aplicación para el bien.

**Bernardo A. Houssay**

# Cosmología moderna: la huella de la formación de los mundos

**Palabras clave:** radiación de fondo, geometría del universo, energía oscura.  
**Keywords:** background radiation, geometry of the universe, dark energy.

Alejandro Gangui ■

IAFE – Instituto de Astronomía y Física del Espacio,  
CONICET, y CEFIEC – Facultad de Ciencias Exactas  
y Naturales, Universidad de Buenos Aires  
<http://cms.iafe.uba.ar/gangui/>

**Desde tiempos inmemoriales, el cielo nocturno ha despertado en los seres humanos sentimientos de maravilla y reavivado interrogantes muy profundos. En este comienzo del siglo XXI, la maravilla y la fascinación no se han perdido, sólo han cambiado algunos interrogantes.**

## ■ INTRODUCCIÓN

Sabemos hoy que las grandes estructuras astrofísicas se originaron de pequeñas aglomeraciones de materia por la acción de la gravitación. Sin embargo, aunque esto nos parece simple, la situación no era tan clara tan sólo unos años atrás. En efecto, si queremos formar una galaxia, por ejemplo, no basta con tener los ingredientes necesarios (la masa de unos cien mil millones de soles); también precisamos las “condiciones iniciales” adecuadas. Un universo perfectamente homogéneo, es decir, idéntico en todas partes, no sirve para formar estructuras astrofísicas, pues no existe en él un lugar privilegiado donde comenzar a formar una galaxia. Así pues, es necesario que

existan pequeñas *inhomogeneidades* en la distribución inicial de la densidad de materia, de tal modo que allí donde hay un “grumo”, las partículas se vean atraídas y se aglutinen cada vez más hasta formar las estrellas y galaxias que nos rodean hoy.

El origen de estas pequeñas inhomogeneidades es todo un tema en sí mismo, y es centro de uno de los debates más fascinantes de la actualidad en la cosmología. Diremos aquí solamente que hasta tanto no se detectara prueba fehaciente de la existencia de estas pequeñas perturbaciones iniciales en la distribución de la materia, no hubiéramos estado seguros de que el mecanismo de la *inestabilidad gravitacional* era el responsable de la formación de los mundos.

Pero si en efecto existieron dichas inhomogeneidades, también debieron estar presentes durante la época llamada del *desacople de la radiación y la materia*: cuando el universo cuenta con apenas unos 400.000 años de vida aproximadamente (hoy cuenta con unos 14.000 millones de años), su energía ambiente decrece lo suficiente como para permitir la formación de la materia neutra. El universo, extraordinariamente caliente en sus primeros instantes de vida, se enfría a unos pocos miles de grados centígrados. Es entonces que los electrones, hasta entonces libres, logran aferrarse a los núcleos para formar la materia neutra. Los corpúsculos de radiación –los *fotones*–, principales indicadores de la temperatura del universo, y que

hasta entonces chocaban y echaban por tierra todo intento de construir átomos, no cuentan ya con la energía suficiente.

La materia neutra deja entonces de obstaculizar el camino de los fotones, y éstos comienzan su largo viaje por el universo, inundándolo con un fondo de radiación al que llamamos la *radiación cósmica de fondo*, un verdadero vestigio del universo primordial. Los grumos (o semillas) primordiales, a partir de los que crecerán las grandes estructuras astrofísicas del cielo debieron ya estar allí en la época de este desacople. Por ello, pensamos que la radiación de fondo fue un "testigo" de esas épocas remotas y que estudiando sus propiedades hoy, llegaremos a saber cómo fue el origen de los mundos más allá de nuestro sistema solar.

### ■ UN VESTIGIO DEL UNIVERSO PRIMORDIAL

Vemos el árbol, queremos saber cómo era la semilla que le dio la vida. Las estrellas y galaxias actuales nacieron de pequeñas "semillas gravitatorias"; hoy queremos saber cómo eran estas últimas. Nos hace falta un registro primordial, una fotografía del nacimiento. Pues bien, la radiación cósmica de fondo nos provee esa imagen

que buscamos. El único inconveniente es que, dado que las semillas eran tan pequeñas, su "huella" impresa en la radiación de fondo es diminuta.

La radiación de fondo nos llega de todas las direcciones del cielo imaginables, como si estuviéramos en el centro de un inmenso horno de radiación. ¿Esperaríamos verla idéntica en todas las direcciones? Si así fuera, ¿qué clase de huella podríamos detectar?

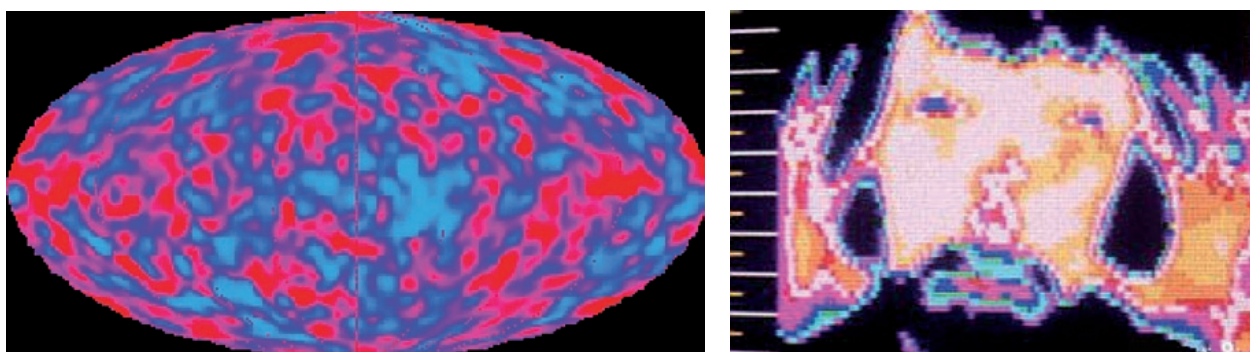
No, la radiación de fondo no puede tener las mismas características en cualquier dirección; no puede ser *isótropa*. La huella impresa que esperamos detectar debe venir "codificada" en forma de *anisotropías* en alguna de sus propiedades, por ejemplo, en su intensidad o temperatura efectiva. Y son estas anisotropías en la temperatura lo que los cosmólogos han tratado de detectar durante más de tres décadas. Sin embargo, y por muchos años, la radiación de fondo se mostró absolutamente isótropa e idéntica en cualquier dirección que se la observase.

Evidentemente, esto presentaba un serio problema para los modelos de formación de estructuras. La radiación de fondo, que en la época del desacople iniciaba su camino libre de interacciones, *no* debía ser completamente isótropa, ya que debido a las inhomogeneidades en la distribución de

la materia, la "tela" espacio-temporal por donde viajan los fotones se debería "deformar" de distinta manera en dos lugares vecinos cualesquiera.

Una sobredensidad en un dado lugar generaría así una subdensidad en su vecindad. Un fotón que iniciase su camino desde la base de una "depresión gravitatoria" (o sea, una sobredensidad de materia) sufriría una pérdida de energía al "escapar" de esa región, de igual manera que una flecha disparada verticalmente pierde velocidad con la altura debido al campo gravitatorio terrestre. Lo contrario sucedería con un fotón que partiese de una región con una subdensidad (una "colina" gravitatoria). En resumen, dos fotones que nos llegaran procedentes de distintas direcciones de la esfera celeste habrían perdido diferentes cantidades de energía en sus viajes y por ende las intensidades, o temperaturas efectivas, procedentes de esas dos direcciones serían distintas.

Con esto en mente y luego del descubrimiento fortuito de la radiación cósmica de fondo en 1964, varios grupos se dieron a la difícil tarea de "cartografiar" el fondo cósmico en detalle. Se sabía que debía existir una cierta "estructura" intrínseca en la distribución de su temperatura efectiva, quizás manchas más cálidas en ciertos lugares de la bóveda celeste acompañadas de



**Figura 1.** UN ECO DEL UNIVERSO PRIMITIVO. La imagen de la izquierda muestra las "anisotropías" en la "radiación cósmica de fondo" detectadas por el satélite COBE de la NASA. En este mapa, puede verse la totalidad del cielo en "coordenadas galácticas", donde la Vía Láctea está dispuesta en forma horizontal. Esta imagen representa a nuestro universo joven de apenas unos 400 mil años de vida. En ese entonces, los planetas y estrellas aún no existían. El fondo de radiación se desacopla de la materia y comienza a propagarse libremente llevando consigo la información del estado del universo primordial. A pesar de que el universo era una "sopa" de partículas y radiación sumamente homogénea, el mapa muestra diminutas variaciones de temperatura, codificadas por los distintos matices. Las diferencias son de apenas decenas de millonésimas de grado en la temperatura del fondo de radiación. Estas inhomogeneidades están ligadas a variaciones de densidad de la materia. Las zonas claras (más frías) son las más densas y, luego de miles de millones de años de evolución, darán origen a las estructuras astrofísicas que nos rodean hoy. A la derecha vemos una "imagen del calor", y nos muestra variaciones de temperatura del orden del grado; las anisotropías en la radiación de fondo reveladas por los detectores actuales son unas cien mil veces más pequeñas.

otras más frías en otras direcciones. Pero los años pasaban, las mediciones se multiplicaban y, luego de sustraer las señales espurias, nada aparecía.

Estos resultados hacían peligrar a virtualmente todos los modelos de formación de estructuras del momento. Muchos años pasarían antes de que el satélite americano COBE (acrónimo de COsmic Background Explorer, o explorador del fondo cósmico) revelara, en 1992, los tan ansiados "rizos" primordiales en la suave "cabellera" de la radiación de fondo. Y no exageramos en acotar que estas observaciones cerraron un largo período de angustias para la mayoría de los cosmólogos.

En efecto, observaciones previas a 1992 habían sólo provisto cotas superiores a las fluctuaciones en la temperatura de la radiación de fondo. De no haberse encontrado prueba suficiente de las anisotropías a un nivel de *una parte en 100.000* (como COBE las encontró) los modelos de formación de estructuras basados en la inestabilidad gravitacional hubieran pasado un mal momento (al igual que sus proponentes). Y esto debido a que las fluctuaciones en la densidad de materia (asociadas a las anisotropías en la radiación de fondo) hubiesen resultado demasiado pequeñas y a causa de esto "no habrían hecho a tiempo" a formar las conspicuas estructuras astrofísicas que conocemos hoy.

El satélite COBE comprobó además que la repartición en energías de la radiación de fondo (o equivalentemente, su *espectro*) es muy particular. Este espectro reproduce con increíble precisión la curva teórica de lo que en lenguaje algo más técnico se llama un espectro térmico de *cuerpo negro* a una temperatura de unos 3 grados Kelvin (unos 270 grados centígrados bajo cero). Bien, precisamente ésta es la predicción de los modelos que estudian la evolución del universo —conocidos comúnmente como modelos del Big Bang, ya que este espectro sólo puede resultar de un estado de equilibrio térmico entre todos los constituyentes del universo, como en efecto lo predicen los modelos con una fase temprana extremadamente densa, energética y caliente.

Con la radiación desacoplada de la materia neutra, no existe ya impedimento para que esta última comience a estructurarse, y así los primeros átomos, luego moléculas y más tarde sistemas cada vez más complejos se irán aglomerando, atraídos por la gravitación, para formar grandes cuerpos astrofísicos.

## ■ MATERIA OSCURA

Desde los pequeños grupos de galaxias con tan sólo algunas decenas de unidades, hasta los grandes cúmulos que cuentan con varios millares de galaxias, incluso masivas como la nuestra, estamos en presencia de una gran diversidad de estructuras astrofísicas. Es precisamente esa distribución de la materia que los cosmólogos tratan de modelar por medio de extensas simulaciones numéricas. Para que estas simulaciones den un resultado realista es vital conocer la cantidad de materia ordinaria presente en el universo. Pero desafortunadamente, ésta se desconoce pues hoy sabemos que la mayor parte de la materia que nos rodea a escalas cosmológicas no emite ningún tipo de radiación que podamos detectar.

El astrónomo suizo Fritz Zwicky fue el primero en ofrecer evidencia tangible de la presencia de materia no luminosa en otras galaxias. Allí por los años 1930, se conocían ya un número suficiente de velocidades de galaxias pertenecientes al cúmulo de Coma y esto permitía que los astrónomos pudieran embarcarse en un estudio de su dinámica. Coma es un gran grupo de galaxias que se halla a unos 300 millones de años-luz de la Vía Láctea y contiene al menos unas mil galaxias brillantes. En 1933, Zwicky notó que muchas de estas galaxias se movían tan rápido que su atracción gravitatoria mutua, calculada a partir de su masa luminosa, sería insuficiente para mantenerlas en grupo. Si los cúmulos estudiados no se desmembraban (y la evidencia sugería que no lo hacían) entonces cierta forma de *materia oscura* debía estar presente. Sería pues la atracción gravitacional de esta materia no visible la que mantendría unido al grupo.

Aunque en un principio los astrónomos pensaron que esa masa faltante era una propiedad exótica de los cúmulos, la acumulación de datos, sobre todo en los años 1970 y siguientes, rápidamente mostró que era una característica también de las galaxias, independientemente de su estancia en grupos. Aun así, éstos no son los únicos lugares en donde aparece la materia oscura... ¿Cuál es su identidad precisa? Por el momento es difícil de saber. Pero candidatos por supuesto que no faltan. Desde las estrellas frustradas llamadas *enanas marrones*, demasiado pequeñas como para iniciar las reacciones termonucleares y "encenderse", hasta los agujeros negros, objetos astrofísicos ultradensos de los cuales ni siquiera la luz puede escapar, existe toda una variedad "no exótica" de objetos posibles. Y decimos que no son candidatos exóticos ya que existen varias constataciones observacionales que nos indican que dichos objetos astrofísicos sí abundan en el universo.

Una buena cantidad de materia no luminosa podría también deberse a grandes planetas fríos, similares a nuestro Júpiter, que se distribuyen en el halo galáctico, llamados con el acrónimo "chillón" de MACHO (del inglés por Massive Astrophysical Compact Halo Object u objeto astrofísico compacto y masivo del halo). Por el lado de objetos exóticos, pues bien, la lista propuesta por los físicos de altas energías es virtualmente interminable. Muchos de los candidatos son partículas que casi no interactúan con la materia ordinaria y son por ello muy difíciles de detectar. Se los llama WIMPs, del inglés por Weakly Interacting Massive Particles, o sea partículas masivas débilmente interactuantes. Veremos más adelante que desde hace ya un par de años, otra forma de energía, relacionada con la famosa "constante cosmológica" de Einstein (bautizada con la letra griega Lambda) parece dominar en el universo actual. Y cuando decimos "dominar" nos referimos a la proporción que esta energía, conocida como "energía oscura", tiene en el balance total; ¡nada menos que más del 70% de la masa-energía del universo!

Sea cual fuere la verdadera identidad de la *materia oscura*, ésta, sin embargo, se traicionará a sí misma debido a la

atracción gravitatoria que ejerce sobre otros sistemas masivos de estrellas, e incluso sobre la misma luz emitida por objetos luminosos desde los confines del universo observable. A este último se lo llama *efecto de lente gravitatoria* y es una de las consecuencias más espectaculares de la relatividad general. Este efecto hace que la luz de ciertas galaxias muy lejanas, por ejemplo, nos llegue distorsionada y procedente de una dirección que no coincide con aquella en donde se ubicaría el objeto astrofísico detectado en ausencia del deflector.

Una lente gravitatoria, formada por un cúmulo masivo de galaxias y por la materia oscura presente pero no visible (que constituyen el deflector), puede crear varias imágenes de una única galaxia lejana, de forma similar a los varios puntos luminosos que uno vería al observar la llama de una vela a través de un vidrio rugoso. Una suerte de “astigmatismo cósmico gravitatorio” en donde las heterogeneidades de la repartición de materia a gran escala perturban, a la manera de lentes, la trayectoria de los rayos de luz.

Objetos lejanos que sufren este tipo de distorsión aparecerán ligeramente deformados, revelando las concentraciones de materia que se encuentran próximos a la línea de observación. El universo nos ofrece así un novedoso espectáculo de luces y formas, un maravilloso “espejismo gravitatorio”.

## ■ ¿QUÉ GEOMETRÍA PARA NUESTRO UNIVERSO?

La cosmología que hemos estado describiendo es una cosmología relativista y la relatividad de Einstein nos enseña que las propiedades locales del espacio se modifican de acuerdo a la cantidad de materia-energía que éste contiene (decimos materia-energía ya que ambas están relacionadas; recuerdan  $E=mc^2$ ). Esto también vale para el universo en su totalidad, y es por ello que, de acuerdo a su contenido energético, nuestro universo podrá estar caracterizado por diferentes *geometrías*.

Pero recordemos que no debemos imponer lugares privilegiados –el universo no tiene centro– ni tampoco

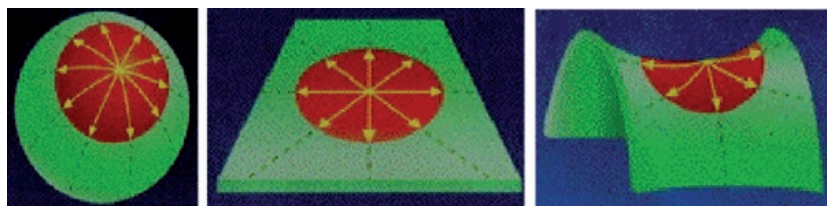
direcciones privilegiadas –no hay un arriba o un abajo en el universo–. Esto nos lleva a imaginar que el universo –cuando se lo mira a las mayores escalas astrofísicas posibles– es homogéneo e isótropo. Esta “imagen” que nos hacemos del universo es, claramente, una hipótesis natural de trabajo, ya que no tenemos forma de demostrar que es verdad y por ello se la ha bautizado como el *principio cosmológico*. Este principio nos indica que, de tener nuestro universo una cierta curvatura, dada por su geometría, esta curvatura debe ser la misma en todo el espacio. De no ser así, habría lugares privilegiados, contradiciendo el principio cosmológico. Ahora bien, ¿cuál es la geometría de nuestro universo?

Existen tres tipos posibles de geometrías: espacios con curvaturas positiva, nula o negativa. El primero corresponde a un pedazo de esfera, pero no es una esfera de las comunes que se describe con tan sólo dos coordenadas angulares, como la latitud y la longitud. La esfera a la que nos referimos es una generalización a tres dimensiones (las dimensiones del espacio físico en el que vivimos). El segundo caso corresponde a un espacio plano, desprovisto de curvatura, como lo imaginara ya Euclides en su tratado de geometría del año 300 a.C. Finalmente, existen espacios de tres dimensiones con curvatura negativa y la representación más simple tiene forma de “silla de montar” (ver Fig. 2).

Notemos ahora mismo algo importante de estas tres representaciones para la curvatura de nuestro espacio tridimensional. En el caso “esférico” las trayectorias de todo par de partículas materiales o corpúsculos de luz, aunque inicialmente tiendan a separarse, terminarán por convergir. Es

un caso análogo a lo que sucede con dos aviones que, partiendo del polo Norte, vuelven a encontrarse en el polo Sud. Si los pilotos desconocieran la esfericidad de la Tierra, podrían con todo derecho pensar que durante sus viajes existió una fuerza de atracción “desconocida” que los atrajo uno al otro. Hoy nosotros sabemos que sus trayectorias se volvieron a cruzar debido a que el espacio por donde se movían (la superficie bidimensional de la Tierra) es curvo; en otras palabras, la “curvatura” reemplaza a la “fuerza”. En el caso cosmológico, sabemos que las leyes que rigen la física son las leyes de la relatividad general, donde el concepto de fuerza gravitatoria de Newton fue mejorado y ampliado por Einstein, señalando que es la materia la que curva al espacio. Así, en el caso “esférico” en tres dimensiones, las trayectorias se cruzarán debido a la gran densidad de materia-energía presente en el universo que curva el espacio que contiene los objetos, y que hace aproximarse a sus trayectorias. Es por esto que los modelos del Big Bang con este tipo de curvatura corresponden a universos con alta densidad de energía. Alta densidad... ¿con respecto a qué? Alta, si se la compara con la llamada *densidad de energía crítica* que surge de los modelos cosmológicos y que vale aproximadamente la masa de un átomo de hidrógeno por metro cúbico.

Por el contrario, aquellos universos que posean una densidad menor a la crítica, tendrán una curvatura negativa y las trayectorias tenderán a separarse por siempre; en el ejemplo bidimensional de la Figura 2, dos bolitas que inicialmente comiencen a moverse en dos direcciones cualesquiera, aunque éstas sean paralelas, se alejarán cada vez más para nunca más juntarse.



**Figura 2.** Las tres curvaturas para el espacio físico en los modelos del Big Bang. Las imágenes muestran la geometría espacial local en cada uno de los casos para los correspondientes universos bidimensionales (donde por razones de visualización, se suprime una dimensión espacial).

Estos espacios tienen una geometría que los matemáticos bautizaron con el nombre de *hiperbólica*, y aunque la representemos en la figura como una silla de montar, debe quedar claro que es una silla de montar "en todo punto del espacio". Esto es, en cada punto arbitrario que nos ubiquemos, la curvatura "local" que veremos será la dibujada en la figura.

Finalmente, el caso intermedio o crítico corresponde a una geometría plana, Euclídea, como la que aprendemos en la escuela y donde los ángulos interiores de un triángulo suman siempre 180 grados (en el caso esférico suman más de 180 grados y en el hiperbólico, menos).

Repitamos una vez más que todo lo dicho sobre las trayectorias vale para cualquier partícula material o corpúsculo de radiación. Esto es así ya que si dejamos de lado los otros tipos de interacciones conocidas (como la electromagnética) y nos concentramos en la gravitación, el concepto de fuerza que Newton introdujera en su gran unificación de los *Principia* de 1687 es ahora ampliado al de la curvatura del espacio (y del tiempo). Una vez que el Sol, que contiene más del 99% de la

masa del sistema solar, modifica (curva) el espacio a su alrededor, todos los planetas tienen automáticamente sus posibles rutas ya trazadas. En primera aproximación, la trayectoria seguida por Neptuno y aquella que seguiría un sólo electrón en el lugar de Neptuno serían las mismas.

De igual manera entonces, las trayectorias que seguirán los fotones de la radiación de fondo, en su largo periplo a través del universo, dependerán de la geometría espacial en cada punto del viaje. Pero de acuerdo con el principio cosmológico, el universo a muy grandes escalas es homogéneo, esto es, no hay lugar privilegiado. Todo punto genérico del universo debería entonces poseer idénticas características físicas, y esto vale también para la curvatura del espacio. Deducimos que la curvatura del espacio es constante y que su valor determinará la geometría. A su vez, la geometría a gran escala del universo está relacionada con la densidad de materia-energía que éste contiene. En conclusión, el recorrido de los fotones de la radiación de fondo dependerá del valor de esta densidad de energía y estudiar la radiación de fondo nos permitirá "pesar el universo".

## ■ UN UNIVERSO "PLANO"

En este punto de la discusión quizás surja naturalmente una pregunta, y ésta es: ¿cómo hacer para conocer la geometría de nuestro universo? ¿Cómo saber si el espacio donde vivimos es la superficie de una pelota (en tres dimensiones) o plano o hiperbólico? Pues bien, de acuerdo a lo ya dicho, bastaría con medir su densidad de materia-energía...

Obra de tamaña envergadura no es fácil de realizar. Pese a ello, desde hace años se llevan a cabo grandes campañas de observación que nos permiten tener una idea somera de cómo es nuestro entorno astronómico. Pero existe otro método más simple y claro para responder este interrogante. Este se basa en la detección de las anisotropías en la radiación cósmica de fondo. Veámoslo en más detalle.

Hemos mencionado ya que el espacio alrededor de objetos muy densos y masivos está curvado. Los fotones de la radiación de fondo, como todo habitante del universo, deben tomar una de las rutas disponibles para viajar. Su camino entonces se "doblará" de acuerdo a la curvatura del espacio.



**Figura 3.** Fig. 3: El tamaño del horizonte acústico en la era del desacople de la radiación y la materia nos indica la talla de las perturbaciones cosmológicas características en esa época tan remota. Dichas perturbaciones se transmiten a los fotones de la radiación de fondo, generando fluctuaciones (anisotropías) en su temperatura efectiva. La detección de la distribución angular de estas fluctuaciones permite deducir el ángulo subtendido por el horizonte acústico. En la figura de la izquierda, el ángulo más grande corresponde a un universo con geometría euclídea (plano o sin curvatura espacial). Un universo de baja densidad de energía curva el camino de los fotones en su viaje hacia los detectores (el Observador). Este efecto hace que toda distancia característica en la época del desacople (el horizonte acústico en particular) subtienda un ángulo menor que en el caso plano (señalado como modelo "Abierto"). Observaciones recientes realizadas por varios grupos empleando distintas técnicas experimentales indican que el universo posee una geometría espacial plana. A la derecha, un universo "plano" ("flat" en Inglés) a partir de la radiación cósmica de fondo ("cosmic background radiation" en Inglés): tapa de la revista inglesa *Nature* del 27 de Abril de 2000 en donde, a partir del análisis de las anisotropías con datos recogidos en el polo Sur, se anunciaron los resultados sobre la curvatura espacial del universo.

Pero estos fotones viajan durante casi la totalidad de la vida del universo, unos 14 mil millones de años y luego, aunque la curvatura del universo a gran escala sea muy pequeña, casi imperceptible, la acumulación de la desviación durante tanto tiempo sí será detectable. Observaciones sofisticadas recientes en las anisotropías de la temperatura de la radiación de fondo indican con un alto grado de precisión que la geometría espacial es plana.

¿Cómo fue posible determinar este resultado tan increíble? Recordemos que el universo primordial era muy caliente y denso, y que por ello la densidad libre de electrones y demás partículas cargadas era tan grande que los fotones no podían propagarse en libertad sin chocar constantemente contra ellas.

Así, electrones, partículas ionizadas y radiación, tomados en conjunto se diferenciaban mal y formaban una suerte de “fluido” único con propiedades compartidas, en donde la tendencia a colapsar (la atracción gravitacional) estaba determinada por la masa de la materia—electrones y partículas cargadas—, mientras que la “fuerza de oposición al colapso” estaba dada por la presión de radiación de los fotones.

Con la tendencia de este fluido a aglutinarse, equilibrada dinámicamente por la presión restauradora de la radiación, no debe sorprendernos que aparecieran oscilaciones (llamadas *oscilaciones acústicas*) en la densidad de materia-energía del fluido. Y estas oscilaciones, como ondas de sonido, se propagaban con una velocidad finita característica. Así, cuando el universo contaba con unos 400.000 años de vida, estas perturbaciones acústicas habían logrado desplazarse hasta una distancia máxima, conocida en cosmología como el *horizonte acústico*. Esta es una distancia característica importantísima de nuestro universo primordial, una suerte de vara de referencia que nos permite conocer la geometría del espacio.

Recordemos que en esos instantes es precisamente cuando se produce el desacople entre materia y radiación, momentos en que el universo se vuelve “transparente” a los fotones de la radiación de fondo. Así, las características propias de la radiación de fondo en ese momento viajarán hacia nuestras antenas virtualmente inalteradas.

Los modelos teóricos actuales relacionan el tamaño del horizonte acústico con el ángulo que esta distancia máxima subtende en el cielo hoy. Y esta relación depende de varios parámetros cosmológicos desconocidos, principalmente de la densidad de energía total del universo. Pero vimos que esta densidad de energía determinaba las posibles curvaturas o geometrías (esférica, plana o hiperbólica). En conclusión, *la curvatura del universo afectará el ángulo bajo el cual el horizonte acústico es observado hoy*.

Dado que el horizonte acústico es una distancia característica en el pasado, ésta poseerá un ángulo característico correspondiente en los mapas actuales de la radiación de fondo. Para un universo desprovisto de curvatura espacial (un espacio “plano”) los modelos predicen un ángulo de aproximadamente 1 grado. Ángulos mayores indicarían que las trayectorias de dos fotones son curvadas excesivamente de modo de hacerlas converger, como sería el caso en un universo de alta densidad; por el contrario, un ángulo menor que 1 grado nos indicaría que la cantidad de energía está por debajo de la crítica (modelo llamado “abierto”) y que las mismas trayectorias tenderían a divergir.

Como lo adelantamos más arriba, los últimos análisis de las anisotropías de la radiación cósmica de fondo mostraron evidencias contundentes de que existía un exceso notable de intensidad en los mapas a precisamente una escala angular de 1 grado (¡la escala característica buscada!). La interpretación más simple de este hecho es, entonces, que los fotones del fondo cósmico se desplazaron a lo largo de un espacio plano. Pero como ya lo mencionamos, su viaje abarcó la casi totalidad de la vida de nuestro universo...

La conclusión tan esperada fue publicada en las revistas científicas de mayor prestigio (ver Fig. 3), y fue más tarde confirmada por varias otras observaciones independientes: nuestro universo es plano.

## ■ UN PALIMPSESTO CÓSMICO

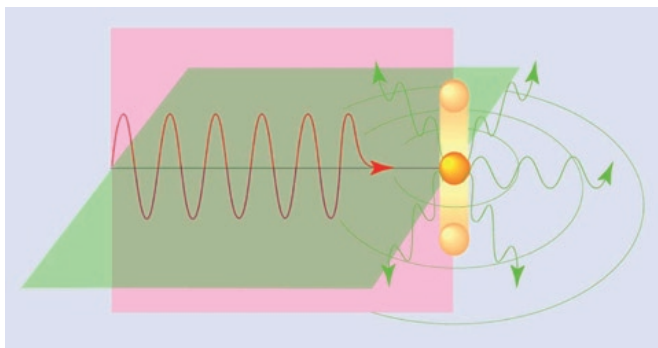
La radiación cósmica de fondo nos llega como un vestigio del universo primordial. Descubierta por azar en 1964,

es hoy considerada una de las evidencias más sólidas de los modelos del Big Bang. En 1992, el hallazgo de las anisotropías en su temperatura efectiva, nos mostró las tan ansiadas pequeñas perturbaciones cosmológicas germinales en el plasma primordial, que luego de eones de evolución vendrían las grandes estructuras astrofísicas que vemos hoy. Más tarde, otras observaciones con mayor resolución angular nos permitieron deducir la geometría a gran escala de nuestro universo, concluyendo que los fotones de la radiación de fondo habían viajado por un espacio físico euclídeo, esto es, exento de curvatura espacial. A fines del año 2002, miembros de la colaboración DASI (por Degree Angular Scale Interferometer, o Interferómetro de escala angular de un grado) anunciaron un nuevo descubrimiento mayor: la radiación de fondo posee una pequeña “orientación” o polarización. Este es un efecto de suma importancia y que se venía buscando desde 1968, año en el que el astrofísico inglés Martin Rees predijo su existencia.

La radiación de fondo se polariza sólo si existe una “dinámica” particular en esas diminutas semillas primordiales de las que hablamos antes. Es por ello que su importancia mayor radica en que no sólo es una muestra de las pequeñas inhomogeneidades presentes cuando el universo contaba con unos cien mil años de vida, sino que, además, nos informa sobre la forma en que dichos grumos primordiales “se movían” durante esas épocas remotas. Como vimos con los otros grandes descubrimientos mencionados más arriba, este nuevo hallazgo reafirma el marco teórico que sustenta el edificio de la cosmología actual.

La mayoría de la luz que nos rodea es *no polarizada*. Este tipo de radiación está constituido por trenes de ondas electromagnéticas independientes y que oscilan cada uno en un plano diferente durante su propagación. Sin embargo, la luz no polarizada puede adquirir una orientación de oscilación privilegiada cuando es difundida o reflejada, como sucede comúnmente a través de los anteojos de sol o en la superficie de un lago. En estos casos, la mayor parte de la radiación incidente es reemitida en forma de ondas que





**Figura 4.** Una onda electromagnética (incidente desde la izquierda) polarizada linealmente oscila en un dado plano (el plano vertical). Cuando alcanza a un electrón (representado como una esferita) la onda le imprime un movimiento oscilatorio que provoca la emisión de la onda difundida. Esta onda resultante se concentra esencialmente en el plano perpendicular al movimiento del electrón (plano horizontal) y está polarizada como la onda incidente.

oscilan todas en un mismo plano. Llamamos a este tipo de radiación con el nombre de *luz linealmente polarizada*.

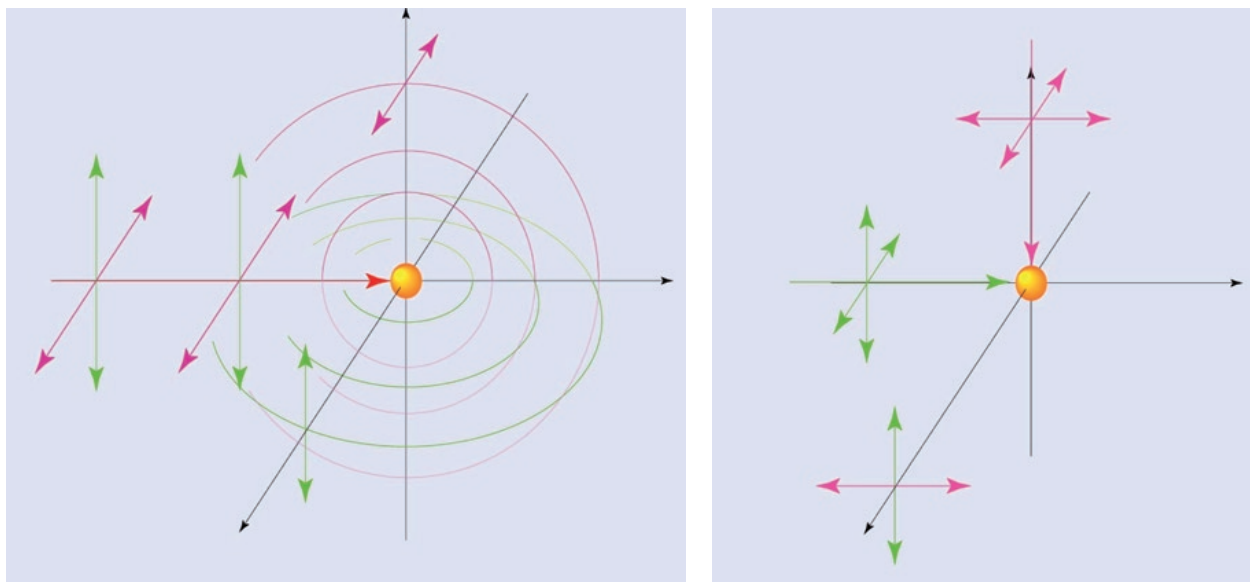
¿Cuáles son los mecanismos responsables de la polarización? Primero de todo, debemos saber que cuando una onda electromagnética incide sobre una partícula cargada eléctricamente, un electrón libre en el caso que nos interesa ahora, por ejemplo, el campo eléctrico de la onda oscilante en una

dada dirección imprime a la partícula un movimiento oscilante en la misma dirección. Esta carga en movimiento emite entonces un tipo de radiación llamada *radiación dipolar*. Y esta radiación dipolar se concentra esencialmente en el plano ortogonal a la dirección de oscilación. Segundo punto importante, el campo de radiación resultante de la interacción con el electrón estará polarizado de la misma manera que la onda electromagnética incidente. Bien,

estas dos reglas simples nos permitirán comprender el origen de la polarización impresa en la radiación de fondo al momento de la última difusión.

Sólo será observable la componente resultante de la radiación inducida por la otra componente de la onda incidente (flechas verticales), puesto que éstas imprimen al electrón un movimiento perpendicular a la línea de visión, y por ello la radiación difundida en el plano perpendicular sí nos llegará. Así, para el observador, todo sucede *como si* éste recibiese de parte del electrón una luz difundida inducida *sólo* por la componente polarizada perpendicularmente a la línea de visión (las flechas verticales). En virtud de la segunda regla que mencionamos más arriba, la radiación resultante debe poseer la misma dirección de polarización. En conclusión, el observador sólo recibe una parte de la radiación incidente sobre la partícula cargada y esta fracción está linealmente polarizada.

Hasta ahora nuestro razonamiento deja de lado el hecho de que un electrón recibirá radiación procedente de todas las direcciones imaginables, y en forma independiente (ver Fig. 5, panel derecho). Cada una de estas ondas,



**Figura 5.** Panel izquierdo: si la onda electromagnética incidente es no polarizada, puede de todas maneras ser representada como la suma de dos ondas linealmente polarizadas, una a lo largo de la línea de visión (la incidente horizontal), la otra a lo largo de la dirección perpendicular (la incidente vertical). La radiación difundida inducida por la primera componente está contenida en el plano perpendicular a la línea de visión (hacia delante de la imagen) y no puede ser detectada. Sólo llegará al observador la segunda componente (vertical) de la radiación incidente, y polarizada como ésta. Panel derecho: cuando la partícula cargada recibe ondas no polarizadas procedentes de distintas direcciones (desde la izquierda y desde arriba), ella misma reemite hacia el observador ondas polarizadas en diferentes direcciones. Si la radiación incidente no es isotrópica, una de estas emisiones polarizadas será ligeramente más intensa que las otras y podremos observar un ligero excedente de polarización resultante.

como la que consideramos más arriba, será difundida hacia el observador en forma de radiación polarizada, pero cada una en una dirección independiente. Por ello, si el campo de radiación incidente sobre el electrón fuera exactamente isótropo, la radiación difundida estaría compuesta de trenes de ondas polarizadas con idéntica intensidad en todas las direcciones, y la suma de todas estas contribuciones terminaría por no dejar aparecer ninguna dirección privilegiada... Pero la radiación cósmica de fondo ¡no es perfectamente isótropa!

Nos queda un último punto a enfatizar. Vimos antes que las oscilaciones acústicas en el plasma primordial eran clave para comprender las características de las anisotropías en la temperatura de la radiación de fondo. Estas características nos permitieron incluso dar un veredicto sobre el difícil ejercicio de calcular la curvatura a gran escala de nuestro universo. ¿Qué nueva información nos proporciona el conocer la polarización de la radiación de fondo?

Pues bien, si las anisotropías nos indicaban el tamaño de las semillas primordiales a la base de las galaxias actuales, la polarización nos indica las variaciones de intensidad intrínsecas en la radiación en el momento preciso del desacople. Y estas variaciones de intensidad no son producidas sólo por la talla de las semillas, sino sobre todo por la dinámica de éstas. En suma, si las anisotropías nos proporcionaban una clara imagen de nuestro universo, joven de 400.000 años de vida, el campo de la polarización le "agrega movimiento" a dicha imagen y nos permite observar la forma en que los grumos primordiales de la formación de estructuras "se movían" en aquella época tan remota.

El descubrimiento de la polarización nos brinda una nueva ventana para observar el cosmos primordial. Como una imagen perdida de nuestro universo, ocultada por procesos físicos posteriores durante miles de millones de años, la radiación de fondo nos revela ahora este palimpsesto cósmico. Su estudio permitirá a los cosmólogos descifrar la información que temíamos se hubiese perdido para siempre: el mecanismo dinámico de la formación de los mundos.

## ■ ¿EL FUTURO DE NUESTRO UNIVERSO?

Ya hemos visto las diferentes posibilidades que brindan los modelos del Big Bang para la curvatura espacial. Pero ¿qué hay de la parte *temporal*? Esto es, ¿cómo evoluciona nuestro universo en el tiempo?

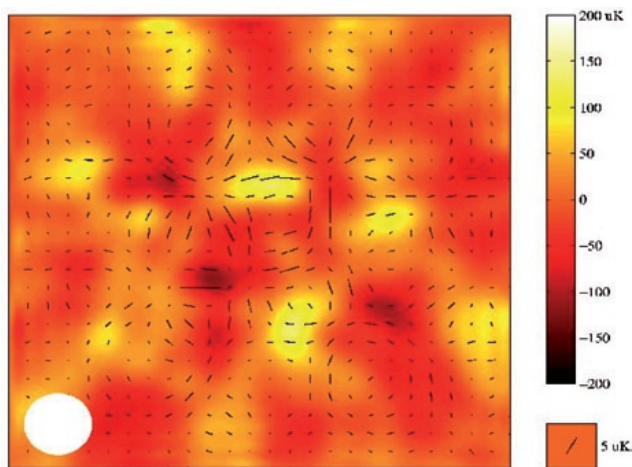
Aquí también existen casos diferentes: el primero, se trata de un universo actualmente en expansión y que continuará expandiéndose por siempre. Corresponde a modelos con curvatura espacial negativa o nula, y en éstos la separación cosmológica entre objetos astrofísicos suficientemente lejanos crece monótonamente con el tiempo. Así, la densidad de materia se hará cada vez menor y la temperatura del universo disminuirá sin cesar, convirtiéndolo en un lugar desoladoramente vacío y frío en donde vivir.

Pero también existe la posibilidad de que, debido a la mutua atracción gravitatoria de toda la materia que contiene nuestro universo, llegue un momento en el que su expansión "se frene" y comience entonces una fase de contracción (para curvatura espacial positiva). En este caso, el universo colapsaría sobre sí mismo y a este (trágico) fin de la evolución cosmológica se lo conoce con el nombre de *Big*

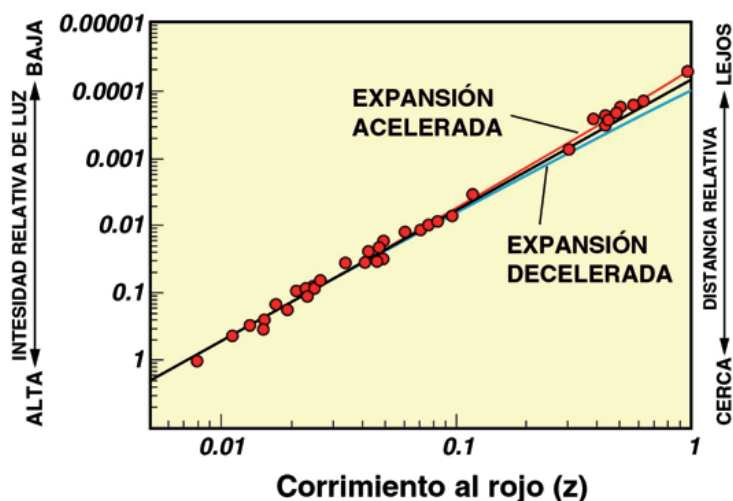
*Crunch* (gran colapso o "crujido").

Las observaciones actuales indican sin embargo que, lejos de contraerse sobre sí mismo, el universo continuará su expansión eternamente, y hasta se piensa que su tasa de expansión *aumenta*. Estas conclusiones son el resultado de los últimos diez años de detección y estudio de un tipo particular de estrellas lejanas colapsadas, eventos conocidos como *supernovas de tipo Ia*. Se piensa que son estrellas del tipo de las enanas blancas, que al incorporar demasiada masa de otra estrella compañera cercana, colapsan gravitacionalmente, terminando su vida en una gigantesca explosión termonuclear.

La luz que se detecta de estas fuentes lejanas nos da un indicio del estado de expansión del universo. En forma similar (¡aunque no idéntica!) a cómo se modifica la frecuencia del sonido de una fuente en movimiento, la frecuencia de la luz de las galaxias también se alterará: el sonido de un avión que se aleja es más grave que cuando pasa por encima de nuestras cabezas (¿recuerdan el efecto Doppler?); la luz de una galaxia que se aleja "arrastrada" por la expansión del universo se hace también "más grave", o mejor, disminuye su frecuencia. Esto es, la longitud de onda de la luz se hace más larga, lo que



**Figura 6.** Imagen de la intensidad y polarización de la radiación de fondo obtenida por DASI en una zona del cielo de unos pocos grados de lado. Las diminutas variaciones de la temperatura de la radiación de fondo se muestran en diferentes matices, donde las zonas claras corresponden a zonas más calientes y las oscuras a zonas más frías que la temperatura media. La polarización detectada, a un nivel del 10% de las anisotropías, se evidencia con líneas negras. La longitud de cada una de éstas muestra su amplitud, mientras que la orientación indica la dirección en la cual la radiación está linealmente polarizada. El círculo blanco indica la resolución angular del experimento.



**Figura 7.** La ley de Hubble para las supernovas de tipo Ia. Este diagrama es análogo al que el célebre astrónomo Edwin Hubble presentara en 1929 para las galaxias más lejanas de la época y que constituyó la primera indicación de la expansión del universo, pilar de la cosmología actual. Muestra que existe una relación aproximadamente lineal en el plano "distancia relativa versus velocidad de recesión". Esto indica que aquellas supernovas de luminosidad más débil (más distantes) poseen un corrimiento al rojo  $z$  (o equivalentemente, una velocidad de alejamiento) mayor. Las observaciones han mejorado notablemente en las últimas décadas: las galaxias estudiadas por Hubble ocuparían apenas un pequeño espacio hacia el rincón inferior izquierdo del presente diagrama. Los potentes telescopios actuales permiten alcanzar distancias cada vez mayores y detectar el sutil apartamiento de las tres curvas teóricas para la evolución de nuestro universo: la superior (aceleración), la inferior (desaceleración) y la central (la simple relación lineal de Hubble). Observaciones actuales a alto  $z$  (del orden de  $z=1$ ) muestran una preferencia de los datos observacionales a coincidir con la curva correspondiente a una expansión acelerada. La conclusión es que el universo se estaría acelerando suavemente en nuestra época actual.

en cosmología expresamos diciendo que la luz "se corre hacia el rojo".

En la actualidad existe el proyecto de enviar un satélite dedicado a la exclusiva detección de supernovas lejanas con el fin de aumentar en forma sustancial la estadística y verificar fehacientemente las observaciones actuales. Esta misión satelital, llamada SNAP (acrónimo por SuperNova/Acceleration Probe o sonda para el estudio de la aceleración a partir de supernovas), prevé detectar más de 2000 supernovas por año durante tres años de misión, con un corrimiento al rojo de hasta casi  $z=2$ . De llevarse a cabo proyectos como este, en unos años quizás podríamos conocer con una exquisita precisión el estado exacto de expansión de nuestro universo.

## ■ LA ACELERACIÓN CÓSMICA

Aceleración cósmica..., ¿por qué? y ¿cómo explicarlo? Mediciones precisas revelaron que las supernovas la son

más pálidas, y que se hallan en promedio entre un 10 y un 15% más alejadas, de lo que uno esperaría en un universo en desaceleración. Luego, la expansión cósmica se estaría acelerando a las mayores escalas visibles del universo en lugar de desacelerarse debido al frenado gravitatorio.

Esta aceleración cosmológica es difícil de explicar por la sola acción de los constituyentes materiales o de radiación conocidos. Para dar cuenta de estos hallazgos se deben invocar formas de energía no convencionales. La constante cosmológica  $\Lambda$ , introducida por Einstein en 1917, actúa como un componente de energía "repulsiva" (según muchos, ¡en el sentido completo del término!) y es uno de los candidatos para contrarrestar la atracción gravitatoria de la materia ordinaria.

Recordemos que Einstein, muy a su pesar, modificó su teoría original de la relatividad general para lograr obtener un universo estático (conforme a las observaciones de la época y también

a su postura filosófica); la repulsión generada por el "término de constante cosmológica" cumplía la misión.

Pero si lo pensamos fríamente, este tipo de energía es verdaderamente asombroso. Para usar una analogía simple, es como si yo midiese el peso de mi hija Lucila y ¡la balanza me indicara valores negativos! Lo primero que me vendría en mente es ver si no cometí un error. Pero luego de revisar una y otra vez, y no descubrir nada obvio, yo comenzaría a lucubrar sobre soluciones alternativas: ¿no estaría Lucila pesándose con un gran globo de helio en la mano?

Pues bien, en el caso de los resultados de las supernovas, el peso de Lucila es el análogo de la masa cósmica ordinaria, y su globo es el análogo de la constante cosmológica de Einstein. Sin globo, ella siente la aceleración hacia el centro de la Tierra, pero con un globo del tamaño adecuado, su peso sería exactamente compensado y ella se hallaría en ingravidez. Hagamos el globo apenas un poco más grande y Lucila comenzaría a acelerarse hacia arriba.

La constante cosmológica actúa entonces como un término efectivo de energía repulsiva, contrarrestando la tendencia de la materia ordinaria a atraerse gravitacionalmente y hacer colapsar el universo. Pero la incertidumbre teórica es tal, que no existe aún una teoría fundamental que pueda predecir sin ambigüedad su valor actual. Es más, en principio tanto valores negativos como positivos estarían permitidos. Y esto no hace sino complicar aún más las cosas, pues un valor de  $\Lambda$  negativo "ayudaría" a la desaceleración (en la analogía del globo, empujaría a Lucila hacia abajo). En cambio, un valor levemente positivo se "opondría" a la desaceleración (un globo pequeño). Un valor positivo mayor eliminaría completamente todo tipo de aceleración (Lucila comenzaría a despegarse de la balanza) resultando en la solución estática elegida por Einstein en 1917. Finalmente, un valor positivo aún mayor, y el universo y Lucila, comenzarían a acelerarse...

Las observaciones actuales empeoran este rompecabezas pues, como ya lo mencionamos, los datos de las supernovas indican que la contribución de  $\Lambda$  (u otra forma de energía

oscura) debe ser nada menos que del 70% de la densidad crítica. Esto indicaría que la energía oscura es la forma de materia-energía que más abunda en el universo.

Pero esto también nos lleva a otra de las preguntas que más intrigan a los cosmólogos: ¿por qué esta forma de energía domina el universo *justo ahora*? Recordemos que tanto la densidad de la materia no relativista como la de la radiación decrecen con la expansión de universo. Por ejemplo, durante la era de la nucleosíntesis primordial, cuando se formaron los núcleos más livianos, era la radiación la que dominaba. Y tanto la densidad de radiación como la densidad de materia decrecieron muchos órdenes de magnitud desde esos instantes primordiales hasta hoy. Por el contrario, la densidad de energía de la constante cosmológica se mantiene (precisamente) constante en el tiempo. En consecuencia, existe sólo un momento en toda la historia de nuestro universo en el que la contribución de la energía oscura se iguala (aproximadamente) con la contribución de la radiación o con la de la materia. ¿Cómo entonces se da la casualidad de que energía oscura y materia-energía ordinaria posean "casi" la misma

densidad en la actualidad? ¿Es que a la especie humana le ha tocado vivir en una época especial?

Notemos que esta coincidencia podría haber sucedido en cualquier otro momento de la larga historia de nuestro universo. En una analogía de Carl Sagan, nuestro cosmos tiene unos 14 mil millones de años, y si reemplazáramos ese lapso de tiempo por un año ficticio, es decir donde el Big Bang "sucedió" el 1ro de Enero a las 0 horas, los dinosaurios aparecerían recién el 24 de Diciembre, mientras que los primeros humanoides habrían descendido de los árboles tan sólo el 31 de Diciembre a las 19h 20m. ¿Cómo entonces, teniendo casi todo un "año" a su disposición, la energía oscura viene a dominar sobre la energía ordinaria en el "último par de horas" de nuestro año cósmico? De haber sucedido mucho tiempo antes, ¿la imagen de nuestro universo que ahora tenemos sería distinta? ¿Existiría el hombre? Como en efecto existimos, el cosmos no puede ser muy distinto. Pero, ¿qué mecanismo habría podido conducir a semejante coincidencia *antrópica*?

Bien, este tipo de frases es lo que incomoda a la mayoría de los cosmó-

logos de la actualidad. Invocar que ciertos fenómenos observacionales "son como son" sólo por el hecho de que debe existir un observador (como el hombre) para presenciarlos, se aleja de las prácticas usuales de las ciencias predictivas. Obviamente, el tema puede definirse más rigurosamente que como lo hemos hecho aquí, y la discusión de un tal *principio antrópico* lleva ya varios años y muchos más harán falta para determinar su verdadera relevancia en cosmología.

La bautizaron *quintaesencia*, y aquí vemos cómo más de dos mil años no han logrado borrar la influencia de Aristóteles (al menos en lo que hace a su terminología). Los campos de quintaesencia, a diferencia de Lambda, serían variables en el tiempo y tendrían un comportamiento que los haría ajustarse adecuadamente a todas las observaciones de los modelos del Big Bang. En particular, su densidad de energía se ajustaría "naturalmente" a valores comparables con los que indican las observaciones de supernovas, evitando de esta manera el "problema de la coincidencia" mencionado más arriba. Los campos de quintaesencia son hoy en día una atractiva posibilidad, aunque muchos estén aún incómodos también con esta proposición, ya que no existe por el momento una explicación teórica satisfactoria del porqué de su existencia y valor. Esta es una línea de trabajo muy activa en el presente y quizás un poco especulativa; dejaremos los detalles para otra ocasión.

■ FINALE

Apoyándose en los hombros de antiguos pensadores, los cosmólogos comienzan paulatinamente a correr el velo que oculta las semillas primordiales de los mundos y la dinámica del cosmos. Se nos ofrece así una nueva imagen del universo, que sin dudas deberá perfeccionarse en el futuro, pero que nos permite hoy y nos alentará siempre a buscar una visión cada vez más ajustada de la realidad. ¿Cuántas teorías actuales deberemos en el futuro remendar, o directamente desechar? Mucho camino queda por delante, y sólo un estudio científico serio del cosmos nos lo podrá revelar.

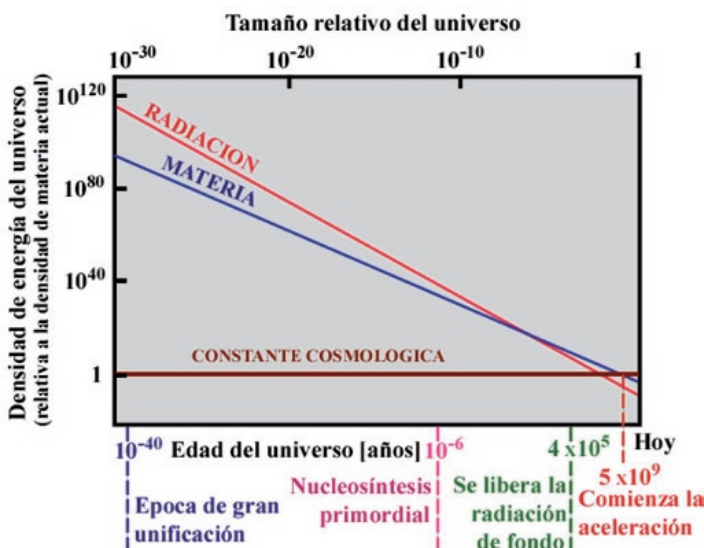


Figura 8. Una "coincidencia cósmica". La figura muestra esquemáticamente la evolución de las densidades de energía correspondientes a la radiación, a la materia no relativista y a la constante cosmológica. Las dos primeras varían por unos 120 órdenes de magnitud durante la casi totalidad de la vida de nuestro universo; la última densidad de energía, sin embargo, se mantiene constante. Uno de los grandes problemas de la cosmología actual es comprender por qué la línea correspondiente a la constante cosmológica cruza a las otras dos sólo en épocas recientes de la vida de nuestro universo.

## ■ GLOSARIO

**Neutrino:** (Fino, liviano, del Griego "leptos"). Partícula elemental eléctricamente neutra de la familia de los leptones muy liviana (hasta hace poco tiempo se pensaba que no tenía masa) y muy débilmente interactuante (sujeta solo a la interacción nuclear débil).

**Año-luz:** Es una medida astronómica de distancia, equivalente al recorrido de la luz en el vacío en un año (estrictamente, un año juliano de 365,25 días). Equivale a unas 63.241 unidades astronómicas y unos 9,5 billones de kilómetros ( $9,46 \times 10^{12}$  km).

**Enana blanca:** Es una estrella pequeña, de débil luminosidad, densa y

"moribunda" (en las etapas finales de su evolución) que ha consumido la totalidad de su combustible nuclear y lentamente se va perdiendo de vista. Las estrellas cuya masa está por debajo de 1,4 veces la masa del Sol, se convierten normalmente en enanas blancas hacia el final de sus vidas. Una enana blanca típica es fría y densa, y cuenta con el 60% de la masa solar, pero es de tamaño apenas mayor que la Tierra. Son estrellas muy comunes: un 10% de las estrellas de nuestra galaxia serían de este tipo. La más cercana es Sirio B, a unos 8,7 años-luz de distancia. Ninguna es visible sin telescopio.

## ■ BIBLIOGRAFÍA

- Barrow, J. y Tipler, F. (1986). *The anthropic cosmological principle*, Oxford University Press.
- Gangui, A. (2005). *El Big Bang: la génesis de nuestra cosmología actual*, Editorial EUDEBA, Buenos Aires.
- Gangui, A. (2010). *No "explosion" in Big Bang cosmology*, in Proceedings of the Symposium 260, Valls-Gabaud, D. y Boksenberg, A. (eds), Cambridge University Press, IAU Symposia series (in press).
- Levinas, M. (1996). *Las imágenes del universo*, Fondo de Cultura Económica, Buenos Aires.
- Núñez, C. (1997). *Notas celestes: un viaje por la Vía Láctea*, Fondo de Cultura Económica, Buenos Aires.
- Weinberg, S. (1997) *Los tres primeros minutos del universo*, Alianza, Madrid.



**CON TU AYUDA PODEMOS RESOLVERLO**


Colaborá desde tu lugar con la Fundación Instituto Leloir para que investiguemos el cáncer, el Alzheimer, el dengue y el infarto, entre otras enfermedades. Sumate ahora con tu donación mensual de \$12 o más con tu tarjeta de crédito, para que juntos lleguemos a resolver problemas que nos afectan a todos. Ayudanos a que la ciencia argentina siga avanzando.

**DONÁ DESDE \$12 X MES**

[www.leloir.org.ar](http://www.leloir.org.ar)  
o al (011) 5238-7505



INSTITUTO LELOIR  
FUNDACIÓN



INSTITUTO LELOIR  
FUNDACIÓN

60 años produciendo conocimiento de excelencia

- 22 laboratorios en los que trabajan 170 investigadores, becarios y estudiantes.
- Repatriación de científicos argentinos.
- Evaluación trienal externa del desempeño de los investigadores.
- Biblioteca Nacional de Referencia en Bioquímica.
- Primera Agencia de Noticias Científicas y Tecnológicas Argentina.
- Convenios de vinculación tecnológica.

Av. Patricias Argentinas 435, Buenos Aires. (54-11) 5238-7500, [www.leloir.org.ar](http://www.leloir.org.ar)

