

COSMOS AND COSMOLOGY

Héctor Rago

Grupo de Física Teórica and Centro de Astrofísica Teórica

Departamento de Física, Facultad de Ciencias.

Universidad de Los Andes. Mérida 5101. Venezuela

e-mail rago@ciens.ula.ve

June 18, 2003

0.1 Introducción

...ese objeto secreto y conjetural

cuyo nombre usurpan los hombres,
pero que ningún hombre ha mirado:
el inconcebible universo.

Jorge Luis Borges

Tal vez la ciencia no sea otra cosa que un intento (ineludible) de dilucidar nuestra propia relación con la naturaleza. Visto así, el tratamiento científico de nuestros orígenes es vital para entendernos a nosotros mismos. La cosmología, concebida como el esfuerzo de otorgarle coherencia al mundo físico en la mayor de sus escalas con los métodos y auxilios de la física y la astronomía, tiene mucho que decir acerca de cómo se fraguaron las condiciones cósmicas apropiadas para el surgimiento de la vida. En efecto, quizá el cambio más trascendente en nuestra concepción del universo desde el nacimiento de la ciencia moderna es el descubrimiento de la cosmología del siglo XX el gran descubrimiento de la cosmología de que el universo es una entidad dinámica, que evoluciona de acuerdo a leyes locales que podemos (y debemos) descubrir (¿o inventar?). La cosmología es la ciencia histórica final, que debe entender el universo actual como el resultado de condiciones iniciales que prevalecieron hace unos 15×10^9 años. El proceso evolutivo permitió pasar de un universo hostil, caliente y casi uniforme a uno altamente hos-

pitalario, frío, complejo, estructurado en las más diversas escalas, capaz de desarrollar variedad, estructuras cuasiestáticas fuera del equilibrio (gracias a la tendencia antientrópica de la gravitación) y otras condiciones absolutamente necesarias para la emergencia de cualquier forma de vida.

En el enfoque multidisciplinario que la astrobiología adopta, es importante presentar la perspectiva que ofrece la cosmología. En particular pretendemos en este trabajo mostrar de una manera no técnica por qué esta perspectiva es digna de ser considerada, es decir, por qué creemos que es de valor científico; luego abordaremos cuál es el paradigma vigente y sus evidencias. Finalmente especularemos brevemente acerca de cuáles son los retos que impone el paradigma, de cara al futuro.

0.2 La comprensión científica del universo

No pretendo entender el universo.

Es un poco más grande que yo.

Thomas Carlyle

Como el cine y el jazz, la cosmología es hija del siglo XX. El artículo que marca el inicio de la cosmología científica es de Einstein, y fue publicado en 1917. Antes no se disponía ni de las herramientas teóricas, ni la tecnología observacional necesaria, ni la comprensión mínima de los fenómenos astrofísicos locales como para establecer una visión de conjunto. A simple vista sólo distinguimos nuestra propia galaxia, la Vía Láctea, de las 10^{11} que hay en el universo observable. Hace apenas unos sesenta años que comprendimos el origen de la energía de las estrellas, que les permite brillar por miles de millones de años a la vez que fraguan en su interior los elementos pesados de la tabla periódica. En el transcurso del siglo XX la capacidad de detectar fotones en los telescopios se ha multiplicado por cien mil, y recientemente podemos observar no sólo en la parte óptica del espectro, sino en longitudes de onda correspondientes a ondas de radio, infrarrojo, microondas, ultravioleta, y hasta energías de 10^{12} e.v. Podemos eludir el efecto distorsionador de la atmósfera colocando telescopios en el espacio exterior. Los experimentos en los grandes aceleradores nos han permitido inventar (¿o descubrir?) las leyes del mundo subatómico. Una enorme variedad de aparatos, observatorios y aceleradores arrojan continuamente una formidable cantidad de datos acerca del mundo físico. Estos datos son manejados y analizados gracias al poder de cálculo de las modernas computadoras. El efecto en su

conjunto es que la cosmología ha sido catapultada de una fase conjetural y especulativa, sin mayores datos empíricos y donde el peso del prejuicio se hacía sentir, a otra fase de mucha mayor precisión, donde los datos observacionales, los test cruzados e independientes, validan o invalidan modelos y limitan la libertad de los teóricos en la construcción de sus teorías. En tiempos de la globalización, la cosmología es, sin duda, *big science*, ciencia madura capaz de contrastarse con el mundo real, de autocorregirse, de desechar modelos y de convencernos de que en la mayor de sus escalas el mundo físico es suficientemente simple como para ser susceptible de ser descrito en términos científicos.

0.3 La Cosmología estándar

Si las ecuaciones se niegan a decirlo

yo me niego a especular.

James Peebles

La cosmología se halla en el centro de un cuadrado cuyos lados son la teoría de gravitación de Einstein o relatividad general, el modelo estándar de partículas, la física estadística y algunas suposiciones simplificadoras.

El universo a gran escala está dominado por la gravitación. Debemos por tanto recurrir a la mejor descripción de los fenómenos gravitacionales, la relatividad general. La gran moraleja de la relatividad es que la gravedad es una manifestación de la curvatura del espacio-tiempo, quienes se convierten en protagonistas y no en mero escenario en el cual “viven” la materia y los campos físicos. El contenido de materia-energía determina la geometría del espacio, y su evolución en el tiempo, de acuerdo con las ecuaciones de Einstein, de modo que las observaciones deberán lograr un inventario del contenido de materia y energía de nuestro universo. Es importante señalar que la relatividad general ha superado con éxito todas las confrontaciones con la observación y el experimento, es una de las teorías de la física mejor corroboradas.

Por otra parte, el comportamiento de la materia y la energía obedece las leyes del modelo estándar de la física de partículas. El modelo estándar incluye la descripción mecánico-cuántica de la materia a diferentes escalas de energía, desde la física molecular, pasando por la física atómica, la nuclear y la física de altas energías. Es la física que logramos construir basados en experimentos en grandes aceleradores, y que nos provee información valiosísima en trance de entender la naturaleza de las interacciones fundamentales. Sus

éxitos en la descripción de la realidad van desde explicar la estructura y propiedades de la materia, la jerarquía de la tabla periódica, la naturaleza de la radiación electromagnética, la radioactividad, las reacciones nucleares que hacen que las estrellas brillen, hasta predecir el resultado de cualquier experimento en los grandes aceleradores de partículas elementales.

Con la relatividad general y el modelo estándar de partículas en la mano, los cosmólogos introducen algunas suposiciones que se cree que son válidas en nuestro universo real, por ejemplo, que a escalas muy grandes, alrededor de 200 millones de años-luz, la materia y la energía están repartidas uniformemente y por tanto la geometría del espacio debe reflejar esa homogeneidad y esa isotropía. Esta suposición está verificada por las observaciones de la radiación cósmica de fondo de la que hablaremos más abajo. La idea básica es por supuesto construir modelos que intentan reproducir los aspectos más resaltantes del universo real. Naturalmente, el número de modelos que provee la teoría es grande, y se debe entonces recurrir a la observación para suministrar el *input* en los valores de algunos parámetros. Es a través de este “interplay” entre la teoría y la observación como se ha logrado diseñar una imagen coherente, el modelo del big-bang o modelo cosmológico estándar, con suficientes éxitos empíricos (e igualmente importante, sin observaciones que lo contradigan) como para erigirse en el paradigma aceptado por la comunidad de cosmólogos. Es importante señalar que esto no significa que entendamos cada detalle de la actual estructura del universo, ni que podemos responder a todas las preguntas (algunas de gran importancia). El modelo del big-bang es el marco en donde deben ordenarse e interpretarse las observaciones y el contexto en el cual se deben ir afinando los detalles de los procesos cosmológicamente relevantes que han tenido lugar.

0.4 Historia de un universo caliente

En el principio está el final.

T. S. Elliot

El esquema general del modelo del big-bang supone que el universo que observamos proviene de una fase altamente densa y caliente que se expande desde hace unos trece millardos de años. La expansión está calibrada por el factor de escala que mide el tamaño relativo del universo. El modelo establece que la temperatura medida por la radiación cósmica) es inversamente proporcional al factor de escala. cuya dinámica está gobernada por el contenido de materia-energía que detectamos, incluyendo la energía del vacío y

por la curvatura del espacio, vía las ecuaciones de Einstein. Así, los procesos físicos que tienen lugar dependen de la escala de temperatura considerada, que a su vez depende del tiempo contado a partir del inicio de la expansión. La historia del universo es por tanto, la historia de los diversos procesos que ocurren a medida que el universo se expande y se enfría.

Señalemos algunos episodios relevantes de esta historia.

- Comencemos cuando $t \simeq 10^{-5}$ seg, época en la cual la energía que dominaba la expansión del universo era la de la radiación y partículas ultrarelativistas. La temperatura ambiente era de 10^{12} K y en esta fase se constituyeron los protones y neutrones a partir de quarks, en un proceso conocido como bariogénesis.
- Cuando $t \simeq 1$ seg- 3 min, la temperatura baja de $T \simeq 10^{10}$ K hasta 10^9 K, que corresponde al rango de energías típicas de la física nuclear. La densidad es de unos 5×10^5 gr. cm^{-3} . La física es convencional y se pueden hacer predicciones. En este período se desacoplan los neutrinos de la materia y las reacciones nucleares forman núcleos ligeros como deuterio, helio, helio 3 y algo de litio (nucleogénesis primordial). Entre los 10 a 20 minutos, la temperatura ha caído a unos 3×10^5 K, demasiado baja para que ocurra nucleosíntesis.
- Para $t \simeq 300.000$ años ya la densidad de materia supera a la de la radiación, y aquella comenzará a controlar la evolución del factor de escala. La temperatura prevalente es de unos 4000 K, ya los fotones no tienen energía suficiente como para impedir la formación de átomos de hidrógeno y de helio. La física relevante es la física atómica. El universo deja de ser un plasma ionizado y opaco porque la radiación interactúa muy débilmente con la materia neutra y los fotones viajarán libres sintiendo únicamente el efecto de la expansión del universo.
- $t \simeq 10^9 - 10^{10}$ años, la dinámica del universo comienza a estar gobernada por la energía del vacío o constante cosmológica. Esta época es la de la física gravitacional de largo rango, en la cual pequeñas fluctuaciones (de apenas diez partes por millón) en la densidad media de la materia, comienzan a colapsar gravitacionalmente amplificando el contraste en la densidad por un factor de 10^7 . Es la época de la formación de las estructuras: galaxias, cúmulos de galaxias y supercúmulos. Aunque nadie duda de que la inestabilidad gravitacional es la causante última

de la formación de las estructuras, los mecanismos detallados de estos importantes procesos son un área activa de investigación en cosmología.

- Finalmente, cuando $t \simeq 13 \times 10^9$ años, y la temperatura es de $3K$, se forma el sistema solar y aparecen estructuras bioquímicas complejas, a partir de elementos pesados sintetizados en los centros de las estrellas y expulsados al espacio a través de supernovas.

En tiempos menores que $t \simeq 10^{-5}$ seg, la física se hace más incierta. Para $t \simeq 10^{-43}$ seg, la llamada era de Planck, los efectos cuánticos de la gravedad eran los relevantes, pero no disponemos de una teoría cuántica de la gravitación, de modo que poco podemos afirmar de esta época. Buena parte de los esfuerzos que actualmente se hacen en física teórica apuntan a construir tal teoría, pero hasta ahora los avances han sido escasos.

Se cree que entre $t \simeq 10^{-35} - 10^{-32}$ seg, ocurrió una inflación exponencial que le otorgó al universo algunas de sus características más resaltantes, que de otro modo no podríamos explicar sino recurriendo a excepcionales condiciones iniciales. Como producto de la fase inflacionaria, el universo se hizo uniforme, la curvatura del espacio se hizo cero y las fluctuaciones cuánticas del campo que produjo la inflación originaron las fluctuaciones que desembocaron en la formación de las estructuras cósmicas.

0.5 Los cuerpos del delito

Debemos creer en los hechos sólo

cuando sean explicados por la teoría.

Sir Arthur Eddington

¿Qué razones se pueden aducir a favor del big bang? ¿Por qué los cosmólogos piensan que el modelo del big bang es una buena representación de nuestro universo real? Aparte de estar apoyado en teorías locales de reconocida solvencia, el modelo del big bang está sólidamente sustentado en algunas observaciones que en los últimos años se han realizado con creciente precisión. Estas observaciones son las siguientes. La expansión del universo, atestiguada por el corrimiento al rojo de las líneas espectrales de cientos de miles de galaxias distantes. Las observaciones indican que la expansión es tanto mayor cuanto más alejado esté la galaxia: $v = H_0 d$. El valor del parámetro de Hubble actualmente, es $H = 65 \text{Km. seg}^{-1} \text{Pc}^{-1}$, con un 10% de error.

El segundo pilar observacional del big bang se refiere a la nucleosíntesis. El modelo permite calcular los valores teóricos para la abundancia de elementos ligeros (helio 4, deuterio, helio 3, y litio 7) relativa al hidrógeno obteniendo que la proporción es $(1 : 0.25 : 3 \times 10^{-5} : 2 \times 10^{-5} : 2 \times 10^{-10})$. Este patrón de abundancias es consistente con lo que se observa en muestras más primitivas del universo. En particular la observación de la abundancia de deuterio medida con mucha precisión usando líneas de absorción de cuasares, permite obtener la densidad actual de protones y neutrones (bariones) como $\sim 3 \times 10^{-31} \text{gr cm}^{-3}$.

El tercer pilar observacional del big bang es la detección de la radiación cósmica de microondas (CMBR) predicha en los cuarenta por Gamow y colaboradores y conseguida por Penzias y Wilson en 1964. Su propia existencia nos habla de una fase caliente del universo, pero el análisis a que ha sido sometida por sofisticados detectores sobre todo en los 90's, nos provee a la vez de constataciones del big bang y de información valiosa del universo cuando apenas tenía el 0.02% de su edad actual. La CMBR es un remanente del último instante en el que materia y radiación estuvieron en equilibrio termodinámico, lo que dejó de ocurrir cuando la materia se hizo neutra. Su temperatura actual es $T_0 = (2.725 \pm 0.002) K$ con una longitud de onda típica de unos 2 mm, y con el espectro de cuerpo negro más perfecto encontrado en la naturaleza (las desviaciones son de 3 partes en 10000). Además la CMBR tiene la misma temperatura en cualquier dirección del cielo que miremos, con una precisión de unas 10ppm. Esta isotropía es reflejo de la uniformidad de la expansión y de lo homogéneo y featureless del universo a sus 300,000 años de edad cuando su temperatura era de 3000 K, reivindicando espectacularmente los fundamentos del big bang. Pero más interesante aún, en 1992 medidas más precisas detectaron los cambios en la temperatura de $20 \mu K$ (1 parte en 100,000) en diferentes direcciones, reflejo de las no uniformidades que habrían de generar las grandes estructuras. Desde entonces la radiación cósmica ha sido escrutada en gran detalle, porque la forma precisa de las anisotropías o técnicamente, el espectro de potencias, guarda información acerca de importantes parámetros cósmicos como la densidad de materia, la constante cosmológica y la curvatura del espacio.

0.6 Armando el rompecabezas

El tipo de universo en el que vivimos, su geometría y su manera particular de expandirse dependen en cada época de su contenido de materia-energía. Es-

tos valores a su vez constriñen los modelos de formación de estructuras. Por otra parte la inflación en los primerísimos instantes tiene predicciones acerca de algunas características de nuestro universo. Las observaciones de la radiación cósmica, de abundancia de elementos ligeros y de la tasa de expansión de objetos muy lejanos brinda nuevos datos acerca del universo. ¿Qué nos están diciendo este conjunto de datos acerca de los parámetros cosmológicos que definen nuestro universo? ¿Cómo se entrelazan para proveernos una imagen fiable de la evolución cósmica? En los últimos años se ha logrado un inventario de la materia-energía del universo. En unidades de la densidad crítica ρ_{crit} necesaria para que la geometría del espacio sea euclídeana, la materia ordinaria (bariones) contribuye con un 5%, los fotones de la radiación cósmica, con un 0.01%, los neutrinos liberados en las primeras fracciones de segundo, con un 3%, la materia oscura detectada a través de lentes gravitacionales, dinámica de galaxias o flujos a gran escala, y modelos viables de formación de las estructuras observadas, contribuye con un 35%, la sustancia de la que estamos hechos no es la más común en el universo !). Por otra parte, el análisis de las fluctuaciones de la radiación cósmica sugiere que la densidad total debe ser igual a la unidad, resultado avalado por la predicción de inflación, de acuerdo con la cual la curvatura del espacio es nula y por tanto la densidad total debe ser la crítica. El paradigma que comienza a afianzarse es que el 65% faltante lo provee la energía del vacío o constante cosmológica. El efecto de la energía del vacío es producir una repulsión gravitacional y esto es lo que parecieran indicar recientes observaciones de supernovas distantes: la expansión del universo en lugar de irse frenando, se va acelerando debido a la existencia de una constante cosmológica diferente de cero. Además, los modelos de formación de estructuras más convincentes son los que incorporan en su descripción a la materia oscura no relativista, junto con una constante cosmológica.

0.7 Los retos

La física es muy complicada

para dejársela a los físicos.

David Hilbert

No hay duda de que la sana relación entre física fundamental y observaciones valiosas ha jugado un papel relevante en el avance espectacular de la cosmología en los últimos años. Gracias a ella disponemos de una imagen coherente de la evolución del universo desde fracciones de segundo después

del big bang hasta nuestros días. Sin embargo quedan aún muchos cabos sueltos y muchas aspiraciones no satisfechas. Algunas de ellas se aclararán en el futuro cercano con más y mejores observaciones muchas de las cuales ya están realizándose, y que harán más realista el modelo del big bang. Sin embargo, otras tendrán que esperar por nuevas leyes físicas en sus niveles más profundos.

En particular, las nuevas mediciones permitirán determinar con más precisión los parámetros cosmológicos (densidades de masa-energía, constante de Hubble, anisotropías de la radiación, constante cosmológica o su equivalente...) lo que permitirá ajustar los modelos de inflación y de formación de estructuras. Pero es necesario identificar la composición de la materia oscura no bariónica (¿neutralinos? ¿axiones?), sin duda vestigio de una época cuya física no conocemos suficientemente bien.

No comprendemos por qué la materia ordinaria que forma al universo prevalece sobre la antimateria. La física que conocemos es simétrica respecto de partículas y antipartículas. Afortunadamente para nosotros en instantes anteriores a la bariogénesis una pequeña asimetría de una parte en 10^9 dejó un leve exceso de partículas, que son las que hoy evidenciamos.

Igualmente la constante cosmológica plantea enigmas que tocan a la física más fundamental. Debemos identificar con precisión la causa de la aceleración de la expansión del universo en caso de que las observaciones la confirmen. ¿Por qué los cálculos teóricos difieren en 120 órdenes de magnitud respecto de la que observan los astrónomos? La constante cosmológica es un término de origen cuántico (energía de pares virtuales del vacío) insertado en una ecuación clásica. El violento desacuerdo ilustra que no estamos usando la descripción adecuada. Es posible que la tan solicitada teoría cuántica de la gravedad o alguna “teoría final” pueda brindar una mejor comprensión del problema de la constante cosmológica. Esa presunta teoría será necesaria también para responder algunas preguntas fundamentales como por ejemplo

- ¿Qué signos del universo son fósiles de la época de la gravedad cuántica? ¿el número de dimensiones del espacio y el tiempo?
- ¿Cuál es la dinamita que propulsó la expansión? ¿Cuál es la naturaleza del big bang?
- ¿Por qué las constantes fundamentales y los parámetros cosmológicos tienen valores que no sólo permiten sino que propician la emergencia de la complejidad? ¿Están estos valores determinados por principios

básicos o se colaron por la puerta trasera del azar a través de rupturas de simetría, por ejemplo?

La historia de la ciencia enseña lo insensato que es aventurarse a pronosticar el camino que transitará nuestra comprensión del mundo. Nadie hubiese podido prever hace tan solo unas décadas, el vertiginoso desarrollo entendiendo al cosmos. A veces una observación inesperada, una nueva teoría, puede desviar la ruta prevista. Por los momentos sólo podemos afirmar que la efervescencia en que se encuentra la cosmología, nos promete avances dilucidando nuestra propia relación con la naturaleza. ¿No es esa la intención de la ciencia?