

## Naturaleza de La Cosmología

Antes de dedicarnos a los detalles más técnicos conviene demorarnos en unas líneas que nos permitirán acaso vislumbrar de qué manera entiende la cosmología al universo, o por lo menos cómo entendemos nosotros a la cosmología.

### 2.1 ¿Qué es la Cosmología?

Una encuesta imaginaria a los cosmólogos acerca de su campo de trabajo daría como resultado promedio que la cosmología es una manera de otorgarle sentido a la naturaleza a gran escala del mundo material a nuestro alrededor, con el auxilio y el método de las ciencias físicas y no morir en el intento. En realidad subyacen a este intento venerables preguntas de siempre: ¿de qué está hecho el universo? ¿es infinito o no? ¿cuál es su origen y su destino? Es cierto que muchas de estas preguntas dependen de modelos teóricos como la cosmología cuántica aún no bien desarrollados, pero es cierto también que a estas preguntas nos ha llevado de manera natural la maduración de teorías como la astronomía y la física. Acaso el cambio más trascendente en la manera en que el siglo XX concibe el universo, a diferencia de la cosmovisión Aristotélica y Newtoniana, es el entendimiento de que el universo ha evolucionado de manera dramática en escalas de tiempo del orden de  $10^{10}$  años. Así la cosmología científica lo es en la medida en que reconoció que era una ciencia histórica, que el estado actual del universo es consecuencia y debe ser entendido como el resultado de procesos físicos que ocurrieron en el pasado. Este reconocimiento pretende sustituir prejuicios y especulaciones previas en nuestra visión del mundo.

De tal suerte podemos precisar que la cosmología intenta describir la estructura, la dinámica y la historia del universo considerado como una entidad única, en términos de los procesos físicos que en él tuvieron (y tienen y tendrán) lugar.

### 2.2 La Palabra Universo

La consideración del universo como una sola entidad supone algunas precisiones sobre la palabra. Para la cosmología, “universo” se refiere a universo observable, es decir la parte del mundo material a la cual a través de las observaciones tenemos o tendremos acceso. Otras zonas u otros universos, por siempre sin contacto causal con nuestro universo observable y por tanto sin posibilidad de verificación observacional no deben ser considerados.

El universo observado es aquel al cual ya hemos tenido acceso a través de los telescopios y es naturalmente tecnológico-dependiente. Finalmente es usual oír acerca de el universo de de-Sitter,

el universo de Einstein, el universo inflacionario. Ellos son por supuesto modelos teóricos que pretenden parodiar algunas de las características del universo observable y tal vez ofrecer alguna predicción verificable.

## 2.3 La Cosmología como Ciencia

El abordaje que la cosmología hace de su objeto de estudio no difiere esencialmente del usado por sus congéneres la física y la astronomía. Es cierto que tiene algunas particularidades: por ejemplo, veremos que como el universo es muy grande y muy viejo comparado con escalas del cosmólogo, se pretende describir toda la historia del universo desde el evento aquí y ahora; no podemos trasladarnos a otros puntos del universo para comparar observaciones. Además, la cosmología participa de la prescripción “vea pero no toque”: las observaciones están casi restringidas a nuestro cono de luz pasado, lo cual tiene la ventaja de que podemos obtener información de las características del universo en otras épocas. Por otra parte sabemos que el universo tiene estructura en un rango enorme de escalas: quarks, núcleos, átomos, moléculas, estrellas, galaxias, cúmulos y supercúmulos de galaxias donde pareciera terminar la jerarquía. Una rama de la física elige una rebanada de esta jerarquía, la aísla y la estudia en su interacción con el resto. La cosmología en cambio quiere entenderlas como una totalidad, sujetas a un origen y una evolución comunes.

Para ello veremos que el considerar la mayor de las escalas, supone un promedio que disuelve las complejidades de cada escala: el universo es en promedio, simple y por ello tratable con los métodos ordinarios de la física.

## 2.4 Teoría vs. Observación

La cosmología se apoya en una complicada red de observaciones-teorías-suposiciones que deben “calzar” adecuadamente y albergar la posibilidad de que nuevas observaciones puedan ser verificadas en el contexto de esta red.

Las observaciones que podemos hacer desde nuestro evento aquí y ahora son de diversa índole:

- Observaciones de naturaleza astrofísica acerca de la abundancia relativa de elementos, acerca de las edades de estrellas, meteoritos, cúmulos estelares, densidades locales.
- Observaciones de partículas de altas energías, cuyo origen no conocemos del todo, pero que probablemente sean portadoras de información valiosa acerca de procesos físicos importantes en el universo.
- Observación de objetos distantes, como galaxias y cuasares, a través de campos electromagnéticos en sus diversas frecuencias, X, óptico, radio, gamma... De allí obtenemos información sobre corrimientos al rojo de origen cosmológico, distribución y cantidad de materia en el universo observado, conteo de galaxias profundas...

- Observación de la radiación de fondo de origen no local, que llena el universo. Estudiar su espectro, su temperatura, su grado de anisotropía, provee una valiosa información acerca del contenido material del universo.
- Eventualmente se contará con información obtenida a través de la astronomía de neutrinos y de ondas gravitacionales, hoy no disponibles tecnológicamente. La bajísima capacidad de interacción de los neutrinos y las ondas gravitacionales (su sección eficaz tan pequeña) nos lleva a suponer que ellos fueron testigos de excepción de épocas del universo anteriores a la que tenemos información a través de la radiación de fondo.

Las observaciones interpretadas adecuadamente por modelos teóricos producen valores sobre importantes parámetros cosmológicos como la constante de Hubble  $H_0$ , el parámetro de desaceleración  $q_0$ , el parámetro de densidad  $\Omega_0$ , la abundancia de elementos... que impondrán restricciones a la imaginación de los teóricos y limitarán los modelos. Para ello es por supuesto necesario recurrir a las leyes de la física terrestre, desde la física de Newton, cuando las circunstancias lo permitan, hasta las leyes fundamentales de la teoría cuántica de campos. Los experimentos en aceleradores y la física de partículas de altas energías pueden simular las condiciones reinantes en alguna fase de la evolución del universo.

## 2.5 Suposiciones

La cosmología está llena de suposiciones cuya verificación experimental u observacional es incierta. En realidad en esto la cosmología no difiere de sus parientes cercanos sino en que hay un mayor número de suposiciones: el programa de construir una descripción de la realidad sólo apoyada en certidumbres y datos empíricos es ajeno a la práctica ordinaria de la ciencia. Pensemos tan sólo en los operadores, funciones de onda o quarks de la teoría cuántica. Ciertamente que el flujo de datos en cosmología no es tan copioso como en la física subatómica, pero tampoco es despreciable. Así las cosas, no queda más remedio que utilizar la estrategia de validación por inferencia indirecta que tantos éxitos se ha apuntado en la física ordinaria.

Una de las suposiciones básicas es que las leyes de la física local que hemos descubierto desde nuestro evento “aquí y ahora” son válidas en todo otro evento. En otras palabras, suponemos que las leyes fundamentales de la física son válidas en cualquier otro lugar del universo, y en cualquier otro tiempo. La inescapable perspectiva unilateral, por estar restringido a un punto del espaciotiempo a adoptar esta suposición; sin embargo hay una serie de indicios que sugieren su plausibilidad. Por una parte, los severos límites impuestos a la variación de constantes fundamentales de la física corrobora la uniformidad de las leyes. Por otra parte, los datos obtenidos por espectros nos hablan de una física atómica y de gases, uniforme a varias escalas, al igual que la utilización de la física nuclear en el interior de estrellas y en el temprano universo para explicar la abundancia de elementos. Por supuesto, es de sospecharse que en el pasado, como veremos, las leyes fundamentales son las que existen en regímenes de temperatura o de energías muy altas, pero en principio, las mismas que descubriríamos hoy si tuviésemos acceso a esos regímenes.

Otra suposición fundamental de la cosmología es que la dinámica del universo está gobernada por la interacción gravitatoria. La cosmología estándar recurre así a la mejor teoría de gravitación

disponible: la relatividad general, para que sus ecuaciones nos sugieran cuál pudo y cuál será el comportamiento del universo. Aceptar a la relatividad general como una descripción global del universo supone aceptar los postulados en los que ella se apoya. Los más resaltantes son:

- El universo observable es modelable por una variedad cuadridimensional, Hausdorff, conexa, sin fronteras y con una métrica lorentziana en cada punto.
- Los cambios en la métrica del universo están regidos por el postulado dinámico: se cumplen las ecuaciones de Einstein,  $R_{ab} - \frac{1}{2}g_{ab}R = 8\pi GT_{ab}$ .
- Queremos que la variedad que describe el universo sea causal, es decir no admite curvas cerradas tipo tiempo, y además que tenga un problema de Cauchy bien planteado, de tal forma que los datos empíricos que obtenemos (corrimientos al rojo, conteo de fuentes...) determinen una solución de las ecuaciones de Einstein sobre el cono de luz pasado y que sea posible propagar la solución al interior del cono.

Supondremos también que tiene sentido hablar de promedios espaciales del contenido material del universo. En este promedio las galaxias son puntos que describen curvas en el espaciotiempo. Difuminada así la materia en esta escala, podemos hablar del campo de velocidades  $u^a(x)$  que caracteriza a los observadores fundamentales. Las curvas integrales  $x^a = x^a(s)$  de ese campo vectorial, son las líneas de mundo de los observadores fundamentales. El contenido material (materia y radiación) del universo se describe a través de un tensor de energía-impulso, usualmente el de un fluido perfecto. Como este tensor es la fuente de las ecuaciones de Einstein, satisface las ecuaciones de balance  $T^a{}_{;b} = 0$ .

## 2.6 Lo que sabemos del Universo

La compleja trama de suposiciones y observaciones nos permiten conocer una serie de propiedades que deberán ser “explicadas” y/o utilizadas en la construcción de un modelo coherente del universo. Entre otras cosas, sabemos que:

- El universo es grande y viejo. En otras palabras la escala de distancias y tiempo características del universo son hoy incomparablemente mayor que las escalas características de la física de partículas y más todavía que los tiempos y distancias de la escala de Planck ( $t_{Planck} \sim 10^{-43} seg$ ,  $l_{Planck} \sim 10^{-33} cm$ ). Un lapso que pudiera interpretarse como la edad del universo es  $t_0 > 10^{10} años$ . La distancia de Hubble que corresponde gruesamente con el tamaño del universo observable es del orden de unos  $300 Mpc$  ( $1 Mpc \simeq 3 \cdot 10^6 años - luz$ ).
- El universo a gran escala está en una fase de expansión como lo atestigua el corrimiento sistemático de las galaxias.
- El contenido observado del universo, materia y radiación, conduce a un parámetro de densidad  $\Omega \sim 1$  actualmente está dominado por la materia aunque no siempre fue así. La densidad promedio observada es  $10^{-31} gr/cm^3 \leq \bar{\rho} \leq 10^{-29} gr/cm^3$ .

- La densidad promedio del universo, dada esencialmente por la relación entre el número de fotones y el número de bariones, es relativamente alta,  $n_\gamma/n_b \sim 10^{10}$ .
- Las inhomogeneidades locales evolucionan con diversas escalas de tiempo. El origen y la dinámica detallada de estas estructuras es uno de los retos actuales de la cosmología.
- A escalas mayores a 200 *Mpc* (600 millones de años luz) el universo luce similar desde cualquier punto. También en cualquier dirección que observemos en promedio obtendremos una imagen similar. En otras palabras estamos afirmando que a partir de cierta escala en adelante el universo es homogéneo e isótropo. Esta suposición es tan relevante para la cosmología que le dedicaremos una sección especial más adelante.
- El universo está compuesto esencialmente por materia en lugar de antimateria a pesar de que la teoría cuántica a energías moderadas supone una simetría entre ambas. ¿Se debe esta asimetría barión-antibarión a procesos físicos muy alejados en el tiempo o hay que postularla como una condición inicial a partir de la cual evolucionó nuestro universo?
- La constante cosmológica, tiene un límite observacional tremendamente bajo, posiblemente cero en modelos clásicos. Esta simplicidad requiere una explicación.
- A pesar de que las ecuaciones básicas de los modelos cosmológicos son simétricas en el tiempo, existe una flecha del tiempo, que fluye en una dirección. Asociamos esta dirección con la expansión del universo.

## 2.7 Imagen del Universo según la Cosmología Estándar

El conjunto de datos, suposiciones y teorías ha logrado producir un modelo coherente, con capacidad predictiva y que ha superado ya suficientes *tests* como para ganarse la credibilidad de los cosmólogos. Es el modelo del big-bang caliente o cosmología estándar. Los elementos principales de este modelo son:

- El universo está en una fase de expansión. La distancia media entre dos galaxias que participen del *flujo de Hubble*, aumenta con el tiempo a razón de  $dl/dt = H_0 l$ , donde  $H$  es una función del tiempo que hoy asume el valor  $H_0 = 100h \text{ km/seg Mpsc}$ . y  $0,4 < h < 1$ . Los últimos datos del telescopio espacial Hubble dan un valor para  $H_0$  de 75Km/seg Mpsc.
- El universo se expandió a partir de un estado caliente y denso cuya energía era dominada por la radiación electromagnética en equilibrio térmico con la materia. Cuando estuvo suficientemente frío ( $t \sim 100.000$  años) la radiación y la materia se desacoplaron. Hoy la radiación tiene un espectro de cuerpo negro perfecto y una temperatura de  $2.7^\circ K$ .
- La aplicación de las leyes convencionales de la física ya válidas cuando  $t \sim 1 \text{ seg}$  logra con algunas suposiciones explicar la abundancia relativa de elementos ligeros (hidrógeno, helio, litio, deuterio y berilio) que hoy observamos en el universo.

- Para instantes anteriores hay cantidad de sugerencias interesantes que revelan cómo la física en esa época pudo haber estructurado el universo de hoy.

## 2.8 Lo que no sabemos del Universo

La cosmología tal como hoy la entendemos es una ciencia mucho más joven que el resto de las ciencias físicas y por lo tanto más llena de incógnitas, preguntas por responder, dilemas e incertidumbres. Veamos algunos de ellos.

- Las mediciones en cosmología son difíciles de realizar y poco precisas. El desconocimiento de los parámetros observacionales  $q_0$ ,  $H_0$  y  $\Omega_0$  con buena precisión nos imposibilita saber si las secciones espaciales del universo son abiertas o cerradas y concomitantemente si la expansión es indefinida o por el contrario se detendrá y comenzará una fase de contracción. El valor actual de  $\Omega_0$  está seductoramente cerca de 1, el valor crítico que separa los modelos abiertos de los cerrados. El universo inflacionario predice que  $\Omega_0 \simeq 1$ , pero por una parte el modelo inflacionario fue construido para, entre otras cosas, “explicar” el por qué de esta coincidencia. Por otra parte, no tenemos certeza aún de que haya habido una fase inflacionaria aunque ella contribuya a explicar problemas reales del modelo estándar y que en quince años no hayan modelos alternativos, por lo que el programa inflacionario seguirá guiando las investigaciones teóricas y tratando de afianzarse.
- No se tienen ideas claras acerca del problema de la materia oscura, que constituiría de acuerdo con algunas estimaciones el 90% de la materia del universo. Ni siquiera se sabe si es materia ordinaria, bariónica, o formas no bariónicas, más exóticas como han sugerido los teóricos de altas energías.
- No se conoce bien los detalles de la formación de galaxias y otras estructuras.
- La relatividad general predice bajo condiciones muy generales la existencia de singularidades. El big-bang es el nombre que asociamos con esta singularidad en un tiempo pasado finito. Por definición, en la singularidad la teoría pierde todo poder predictivo y deja por tanto de ser válida. En realidad se cree que aún antes de ese instante, cuando  $t \sim t_{Planck} \sim 10^{-43} \text{seg}$  se impone una descripción cuántica de la gravedad, teoría no disponible aún. Pero aún antes de la época de Planck la física es demasiado incierta. No se conoce mucho acerca de los sugeridos defectos topológicos asociados con transiciones de fase durante esa época ni cuál podría ser su papel futuro.
- La existencia de horizontes previstos por la relatividad general introduce factores de incertidumbre que pueden minar la capacidad predictiva del modelo. Asimismo la topología del universo no queda fijada por la geometría.
- No sólo cerca de la singularidad la física puede ser distinta a la que hoy nos imaginamos, sino que la física “más local” pudiera ser distinta. En los años 50 Bondi y Hoyle imaginaron

una física que violaba principios consagrados para explicar su cosmología del estado estacionario. El intento fracasó pero la idea de una física no convencional siempre está en el aire. Para muchos el problema de la materia oscura está indicando la inaplicabilidad de las leyes conocidas de la física.

Resumiendo, los cosmólogos han simplificado el problema de la descripción a gran escala del universo hasta hacerlo tratable. La pregunta es si no se han inventado un problema resoluble pero artificial, esto es, ¿conserva el modelo a pesar de las simplificaciones los aspectos esenciales del universo? Si es así, se trata de hacerlo cada vez más realista para entender los dilemas y enigmas que nos propone. La presencia de interrogantes es normal en un campo activo y caliente cuya frontera es por definición confusa. Estas interrogantes podrán tener respuestas de consecuencias insospechadas y pueden estar sugiriendo una dificultad estructural y fundamental del modelo, por ejemplo, que hemos eludido algún principio fundamental (pensemos en los dilemas de la física a finales del siglo pasado). Pero puede tratarse de acertijos solubles dentro de los propios paradigmas aceptados.

Por los momentos, confesión de optimismo aparte, no nos queda más remedio que aceptar que la urdimbre de resultados interconectados implícitos en la física local, más algunas suposiciones cosmológicas más la fuerza motriz de la relatividad general, conducen a una muy buena aproximación en la descripción de nuestro universo.