

LIMITES DEL CONOCIMIENTO COSMOLOGICO

Jesús Mosterín

Empecemos por distinguir cuatro sentidos distintos de "universo": el universo perceptible, el observable, el inteligible, y el total.

1. EL UNIVERSO PERCEPTIBLE

Quizás la palabra "universo" sea demasiado grandiosa para designar el ámbito de nuestras percepciones, vivencias y experiencias. Quizás sea preferible en este contexto usar la palabra "mundo", ligeramente más recoleta, y hablar así del mundo perceptible o experiencial.

Cada animal tiene su mundo. De la inmensa cantidad de información objetiva presente en su medio, cada animal detecta sólo una parte, aquella que está genéticamente programado para detectar, interpretar y experimentar. El zorro percibe la trayectoria que ha seguido el conejo, detectando con su fino olfato las moléculas que el conejo ha dejado a su paso prendidas en los matorrales. El murciélago se orienta sin dificultad alguna en la oscura caverna o en la penumbra del bosque, localizando sus presas o los obstáculos a su vuelo mediante la detección del eco rebotado de sus propios ultrasonidos. Las abejas ven los colores ultravioleta de las flores. Algunas serpientes detectan direccionalmente el infrarrojo. Algunos peces perciben las variaciones del campo magnético. Todas estas percepciones producen en los animales que las tienen experiencias y vivencias que los que no las tenemos no podemos imaginar

siquiera, pues caen fuera de nuestro mundo perceptible. Y menos aún, si cabe, podemos imaginar qué percepciones y vivencias puedan tener los desconocidos organismos que posiblemente pueblen otros rincones del universo alejados de nuestro sistema solar.

Los mundos perceptibles de los animales de la misma especie se solapan considerablemente, por lo cual podemos hablar del mundo de la especie. De todos modos, algunos individuos pueden no tener acceso a parcelas de dicho mundo, como ocurre con los ciegos de nacimiento respecto al mundo visible, o con los sordomudos natos respecto al mundo de los sonidos.

1.1. LÍMITES DE LA PERCEPCIÓN. HORIZONTES DEL MUNDO PERCEPTIBLE

El aparato neurosensorial de la especie determina el tipo de percepciones y experiencias de que los individuos de dicha especie son capaces. La frontera así trazada entre las percepciones posibles y las imposibles para dichos animales constituye el límite de su posibilidad de percibir, o, como también se dice, el horizonte de su mundo perceptible. No puedo tener cualesquiera sensaciones o experiencias, sino sólo aquellas que mi aparato neurosensorial, en contacto con los estímulos a los que responde, pueda generar. Las percepciones y experiencias de animales con aparatos neurosensoriales muy alejados de los nuestros están más allá de nuestro horizonte vivencial. Para el ciego, las experiencias visuales están también más allá de su horizonte vivencial. Mi horizonte vivencial marca los límites de mis experiencias posibles.

1.2. HORIZONTES DEL MUNDO PERCEPTIBLE HUMANO

Las principales limitaciones u horizontes de nuestro mundo perceptible se deben a nuestro aparato neurosensorial, que sólo responde a una cierta gama de estímulos, que sólo detecta cierto tipo de señales. Aunque nuestro sentido del oído es muy importante en nuestra vida social, su alcance cosmológico es nulo, pues las señales acústicas que detecta sólo se producen y transmiten en el interior de la atmósfera. De hecho, toda la información perceptiva que recibimos de fuera de nuestro planeta nos llega por el sentido de la vista, que es sensible a la radiación

electromagnética de longitud de onda entre 0,4 y 0,7 micrometros (un micrometro = 10^{-6} m), o, equivalentemente, de frecuencia entre $4,2 \cdot 10^{14}$ Hz y $7,5 \cdot 10^{14}$ Hz. Por esta ventana nuestro mundo perceptible se asoma al universo extraterrestre. Los humanos siempre han mirado al cielo con admiración y asombro, y los cuerpos celestes, divinizados en muchas culturas, han sido habitantes distinguidos de su mundo perceptible y objeto frecuente de su atención.

1.3. NO EXPLORACIÓN

Otras limitaciones del mundo perceptible se deben a nuestra posición en el espacio-tiempo. Estas limitaciones pueden ser parcialmente superadas mediante la exploración o el viaje, es decir, trasladándonos, acudiendo a otra posición espacial. Si carezco de la experiencia de la nieve, porque vivo en un país cálido, puedo obtenerla yendo a uno frío. Si no he tenido nunca la experiencia de bañarme en la mar salada, porque soy de tierra adentro, puedo conseguirla acudiendo a la costa. Pero en el caso del cosmos, la exploración está excluida. Podemos explorar el sistema solar, y ya lo estamos haciendo. No es imposible que un día podamos explorar la vecindad de otras estrellas próximas o incluso gran parte de nuestra galaxia. Pero está prácticamente excluido que nos traslademos a otras galaxias, sobre todo a las de allende nuestro grupo local. La inmensísima mayor parte del universo queda para siempre fuera del alcance de nuestra exploración.

1.4. NO EXPERIMENTACIÓN

La mejor manera de llegar a conocer bien los objetos, personas o sistemas de nuestro mundo perceptible consiste en probarlos, en hacer experimentos con ellos, en provocar su reacción a factores que nosotros podemos controlar. Según el número de parámetros que controlemos en el experimento, podemos hablar de su grado mayor o menor. En este sentido, la experimentación de grado cero sería aquella en que no controlamos parámetro alguno, es decir, la mera y pasiva observación.

Otra limitación de nuestra astronomía y cosmología consiste en que no podemos experimentar, en que tenemos que limitarnos a observar, a

recibir pasivamente y a procesar la información transmitida naturalmente por los objetos cósmicos observados.

Vedado el recurso a la experimentación y a la exploración, si queremos ir más allá del mero mundo perceptible en nuestro conocimiento del universo, todavía nos queda la posibilidad de diseñar y fabricar extensiones artificiales de nuestros sentidos, que nos permitan detectar señales inaccesibles a estos últimos.

2. EL UNIVERSO OBSERVABLE

El universo observable abarca no sólo lo perceptible con los sentidos naturales, sino también todo aquello de lo que recibimos noticia a través de las extensiones artificiales de nuestros sentidos que son los instrumentos científicos de observación, tales como telescopios y radiotelescopios, placas fotográficas y detectores de neutrinos. El universo observable es el universo accesible a la ciencia observacional, y en especial a la astronomía.

2.1. LÍMITES DE LA OBSERVACIÓN. HORIZONTES DEL UNIVERSO OBSERVABLE

Un horizonte observacional es un límite a la observación, una frontera que separa lo que puede ser observado de lo que no puede serlo. Obviamente, el horizonte observacional es relativo a los instrumentos de observación disponibles en un momento determinado, así como a la posición espaciotemporal del observador (de la comunidad científica, de la humanidad...). Los progresos tecnológicos de la instrumentación traen consigo ampliaciones del horizonte observacional y del universo observable. El mero paso del tiempo y los eventuales desplazamientos en el espacio traen también consigo desplazamientos del horizonte observacional.

La especificación o trazado de los horizontes del universo observable no es el resultado de la mera observación. En ese trazado intervienen esencialmente teorías físicas y modelos cosmológicos. Según qué teorías físicas aceptemos en un momento determinado, trazaremos de un

modo u otro los horizontes observacionales. Por ello en todo lo que digamos aquí acerca de dichos horizontes estaremos presuponiendo una gran cantidad de teoría física vigente, como no podría ser menos.

2.2. LÍMITES POR RELATIVIDAD ESPECIAL (CONO DE LUZ DEL PASADO)

Ninguna señal puede viajar a velocidad superior a la de la luz. Por tanto, aquí y ahora no podemos recibir señales de lo que pasó hace menos de un año en un lugar alejado de nosotros más de un año-luz, ni de lo que pasó hace menos de dos años en un lugar alejado de nosotros más de dos años luz, etc. Sólo pueden llegarnos señales de eventos ocurridos a distancias (medidas en tiempo-luz) menores que el tiempo transcurrido desde entonces. Tales eventos son los puntos (del espacio-tiempo 4-dimensional) situados en el interior del hipercono inferior con vértice en nuestra posición actual y superficie caracterizada por la ecuación $x^2 + y^2 + z^2 = t^2$. (Suponemos que la unidad de longitud es la recorrida por la luz en un segundo, con lo que la velocidad de la luz $c = 1$). Es el llamado cono de luz del pasado. Sólo de los eventos situados en el cono de luz de nuestro pasado podemos recibir señales. Del resto de los eventos (de los separados de nosotros por una distancia *space-like* o de los situados en el cono de luz del futuro) no podemos, por principio, recibir noticia alguna (de los primeros, nunca; de los segundos, por ahora).

Los cortes temporales del hipercono pueden visualizarse como esferas concéntricas (en cuyo centro estamos nosotros aquí y ahora) con radio (en tiempo-luz) igual al tiempo transcurrido. Si medimos los tiempos pasados en valores negativos de t , entonces la esfera correspondiente a $-t$ tiene de radio a t (en tiempo luz; en otras unidades, a ct , donde c es la velocidad de la luz en esas unidades). Todos los eventos ocurridos en ese tiempo $-t$ o posteriormente fuera de esa esfera son absolutamente inobservables (desde nuestra posición) por principio. Esa esfera (o, mejor dicho, la sucesión de esferas que constituye el hipercono de luz del pasado) constituye el horizonte especial-relativista del universo observable.

De hecho sólo podemos recibir señales de los objetos cósmicos en

determinados momentos de su trayectoria temporal. Así no podemos tener un mapa actual (un *world map*, en la terminología de Milne) del universo, sino sólo una cierta imagen (*world picture*) temporalmente heterogénea. Así vemos las galaxias cercanas como éstas son (o eran) en su madurez, después de varios miles de millones de años de evolución, mientras que las señales que recibimos de los remotos cuasares fueron emitidos en su ya lejana infancia. No observamos cuasares en las cercanías espaciotemporales de nuestra galaxia. Pero, conforme observamos más lejos en el tiempo y el espacio, hacia los confines del universo observable, las galaxias se hacen raras y observamos más y más cuasares. No es posible observar la juventud de las galaxias ni la madurez de los cuasares. Nuestra imagen del universo observable es un mosaico, cuyas piezas provienen de tiempos muy distintos; un peculiar corte espaciotemporal determinado por la peculiar perspectiva del observador.

Cuando en 1987 nos llegaron las primeras señales de la supernova 1987A, lo que estábamos observando era una explosión que tuvo lugar en la Gran Nube de Magallanes hace unos 170.000 años. Qué esté pasando allí ahora es imposible saberlo, al menos saberlo observacionalmente. La Gran Nube de Magallanes podría haber desaparecido por completo hace 100.000 años, sin que nadie se hubiera enterado. De hecho, nadie podría enterarse de ello en las próximas mil generaciones de humanas.

El universo observable es siempre un universo pasado, antiguo. El universo actual es inobservable. No podemos observar cómo es el universo hoy; sólo cómo era hace mucho tiempo (distintas partes en distintos tiempos). El universo entero (excepto nuestro grupo local) podría haber desaparecido hace un millón de años, mucho antes de que surgiese nuestra especie. Nosotros no nos habríamos enterado. No hay manera de enterarse. Sólo podemos observar que existían galaxias más allá de nuestro grupo local hace varios millones de años; pero no podemos observar si existen ahora. Esas posibles galaxias actuales están más allá del horizonte del universo observable.

2.3. LÍMITES POR LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO

El universo está en expansión. El espacio-tiempo se expande, haciendo que unas galaxias se alejen de otras a velocidades crecientes con la distancia, al menos en los casos de galaxias pertenecientes a supercúmulos distintos, pues en el interior del mismo supercúmulo la atracción gravitatoria puede ligar las galaxias con tal intensidad que más que contrapesa la expansión del espacio-tiempo. Es lo que ocurre por ejemplo en nuestro grupo local, cuando Andrómeda se acerca a nuestra galaxia (su espectro está corrido hacia el azul), o en nuestro supercúmulo local, donde el grupo local se acerca a los cúmulos Virgo e Hydra-Centaurus.

La tasa de expansión del universo cambia con el tiempo, o, si se prefiere, determina el tiempo como su inversa. La constante de Hubble H_0 fija la expansión del universo o la velocidad de recesión de las galaxias lejanas respecto a la nuestra en la época presente. (El subíndice 0 en H_0 se refiere al momento actual o tiempo 0. En realidad la H es una función del tiempo; lo único constante es su valor para hoy, H_0). Se mide en kilómetros por segundo por megaparsec de distancia. (1 megaparsec = 10^6 parsecs ; 1 parsec = 3,2 años-luz = distancia de la Tierra de una estrella con un paralaje de un segundo de arco).

Todavía no se conoce con precisión cuál sea el valor de la constante de Hubble, dada la dificultad de medir exactamente la distancia de las galaxias lejanas. Las estimaciones varían entre 40 y 100. Un valor aceptado por muchos astrónomos es el de 50 km/s/megaparsec. Esto significa que una galaxia distante de nosotros 10 megaparsecs, por ejemplo, se aleja de nosotros a una velocidad de 500 km/s. Y una galaxia distante de nosotros 6.000 megaparsecs se aleja de nosotros a 300.000 km/s, es decir, a la velocidad de la luz. Una galaxia que diste más de 6.000 megaparsecs (es decir, más de unos 20.000 millones de años-luz) se aleja de nosotros a una velocidad superior a la de la luz. Ninguna señal ni objeto material alguno puede moverse a velocidad superior a la de la luz. Pero la expansión del universo es una expansión del espacio-tiempo, que no es una señal ni objeto material, por lo que la relatividad especial no le pone límites.

La distancia c/H_0 forma el radio de la llamada esfera de Hubble, una esfera en torno al observador más allá de la cual el observador no puede recibir señal alguna. En efecto, todo objeto situado más allá de esa esfera se aleja del observador a velocidad superior a la de la luz, por lo que ninguna señal suya puede nunca alcanzar al observador. Suponiendo que el valor asignado antes a la constante de Hubble (50) sea correcto, es imposible, por principio, que señales emitidas por galaxias u otros objetos distantes más de 20.000 millones de años-luz de nosotros, nos alcancen. La superficie de la esfera que tiene esa distancia como radio, es decir, la superficie de la esfera de Hubble, forma un horizonte infranqueable del universo observable.

2.4.1. FOTONES (RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA)

La radiación electromagnética que nos llega es fundamentalmente de dos tipos: (1) radiación galáctica, emitida por las galaxias desde que hay galaxias, es decir, desde aproximadamente 10^9 años después del Big Bang; y (2) radiación cósmica de fondo, que transmite información sobre la época pregaláctica y, más en concreto, sobre la época en la que, el universo se hizo transparente para los fotones, unos 500.000 años después del Big Bang.

Hasta unos 400.000 años después del Big Bang los fotones interaccionaban constantemente con los electrones libres energéticos; estaban acoplados con ellos. Hacia esa época, la temperatura había descendido suficientemente (hasta unos 3000 K) como para que los electrones libres fueran cazados por los protones, que se combinaban con ellos para formar átomos de hidrógeno. Al final de esa época de desacoplamiento de la materia y la energía, con los electrones combinados en átomos y la temperatura más baja, los fotones dejaron de interaccionar con los electrones y empezaron a poder moverse libremente por el universo, que se hizo transparente para ellos: 500.000 años después del Big Bang. La radiación cósmica de fondo, descubierta por Penzias y Wilson en 1965, es el resto fosilizado y enfriado (hasta 2,7 K) de aquella radiación entonces liberada.

El horizonte de fotones es la frontera temporal que separa las

porciones del espacio-tiempo anteriores y posteriores al momento en el que el universo se hizo transparente a los fotones. Sólo a partir de ese horizonte los fotones fueron capaces de transmitir información acerca del estado del universo en el momento en el que se habían originado. El horizonte de fotones representa una barrera fundamental que limita la información observacional directa que podemos obtener acerca del universo temprano mediante la detección de señales electromagnéticas. Por mucho que progrese nuestra tecnología de captación de señales, nunca podremos obtener mensajes electromagnéticos del universo anterior al horizonte de fotones.

2.4.1.1. RADIO

Hasta la Segunda Guerra Mundial sólo podíamos detectar la radiación electromagnética que nos llega del universo en la estrecha banda visible del espectro, correspondiente a longitudes de onda entre $4 \cdot 10^{-7}$ y $7 \cdot 10^{-7}$ m. Desde entonces hemos aprendido a abrir todas las ventanas del espectro electromagnético, ampliando considerablemente el horizonte del universo observable.

Ya en 1931 el ingeniero de la Bell, Karl Jansky logró detectar ondas de radio procedentes de fuera del sistema solar. Pero fue sólo después de la guerra cuando las técnicas desarrolladas durante la misma se emplearon en la exploración sistemática de las ondas de radio que nos llegan del espacio exterior. Así surgió la radioastronomía, que ha tenido un crecimiento espectacular en los últimos 40 años y que ha permitido el descubrimiento de tipos de objetos cósmicos hasta entonces insospechados, como las radiogalaxias, los pulsares y los cuasares. Algunas de las fuentes cósmicas de radio están también identificadas ópticamente; otras, no. También las microondas de la radiación cósmica de fondo pueden ser consideradas como un descubrimiento radioastronómico.

La detección de las señales de radio que nos envía el universo se realiza mediante instrumentos especiales, los radiotelescopios, que son enormes antenas, y los radiointerferómetros, sistemas coordinados de antenas situadas a grandes distancias unas de otras, pero que funcionan como un radiotelescopio único, obteniéndose así mejores resoluci-

ones angulares. Actualmente se están poniendo a punto radiointerferómetros que combinan antenas terrestres con otras colocadas en satélites artificiales.

Aunque los objetos cósmicos emiten ondas de radio de todas las frecuencias, a nosotros sólo nos llegan las de longitud de onda menor que 10^4 m. Los fotones de longitud de onda mayor que 10^4 m son absorbidos por los gases ionizados interestelares y no alcanzan nuestro sistema solar. La información contenida en tales fotones de baja frecuencia se pierde para siempre antes de llegar hasta nosotros. La ventana observacional abierta por la radioastronomía tiene un horizonte infranqueable, el del límite de 10^4 m de las longitudes de onda de las ondas de radio que nos llegan.

2.4.1.2. INFRARROJOS

Los rayos infrarrojos son las ondas electromagnéticas con longitud de onda entre $7 \cdot 10^{-7}$ y 10^{-3} m. La radiación infrarroja penetra hasta nuestro mundo perceptible en forma de sensación característica de calor producida en nuestra piel cuando estamos al sol. Además de esa radiación solar, también llega a nuestro planeta radiación infrarroja procedente de otros lugares de nuestra galaxia y de otras galaxias. El problema observacional consiste en que la mayor parte de esa radiación es absorbida por la atmósfera terrestre, que es opaca para el infrarrojo, excepto en ciertas pequeñas porciones de su espectro.

La astronomía infrarroja se ha desarrollado en los últimos treinta años utilizando detectores sensibles a base de semiconductores, colocados primero en aviones y luego en satélites artificiales, sobre todo en el famoso satélite IRAS, que en 1983 realizó un reconocimiento sistemático de todo el cielo en varias frecuencias infrarrojas durante 10 meses. Con ello se han obtenido valiosas informaciones acerca de zonas del espacio opacas al estudio óptico por la presencia de nubes de polvo intermedias.

2.4.1.3. LUZ VISIBLE

Todo nuestro mundo perceptible depende de nuestra capacidad para detectar naturalmente la luz visible e interpretar sus mensajes. El universo

observable superó los límites del perceptible con la introducción de extensiones artificiales de nuestros ojos a partir del siglo XVII, empezando por el catalejo de Galileo y siguiendo por una sucesión de telescopios cada vez más perfeccionados, pero basados siempre en la luz visible. La sustitución del ojo del observador por las placas fotográficas también representó un gran progreso, así como la de éstas últimas por los dispositivos fotoeléctricos de detección de fotones (CCDs, *charge-coupled devices*), que permiten recuperar casi toda la información que nos llega en la luz visible y someterla a tratamiento digital. Un decisivo paso adelante se esperaba de la puesta en órbita a 500 km. por encima de la superficie terrestre del telescopio Hubble, que debería permitir obtener resoluciones mucho mejores que las actuales, al situarse fuera de la atmósfera y evitar así las distorsiones que ésta ocasiona. Después de varios retrasos, su lanzamiento fue realizado por la NASA en abril de 1990, pero un error imprevisto en el pulido del espejo condujo al decepcionante fracaso inicial de la misión. Para finales de 1993 está prevista una misión espacial encargada de reparar el Hubble y colocarle unas "gafas" que permitan corregir su defecto óptico.

A través de la ventana visible del espectro electromagnético nos ha llegado toda la información sobre el universo de la que disponíamos hasta recientemente. Incluso hoy en día sigue siendo la principal puerta de acceso al universo observable, y fuente de descubrimientos como el de la supernova de 1987.

La teoría general de la relatividad predice que si dos estrellas lejanas están alineadas con el observador, entonces el efecto de la atracción gravitatoria de la estrella que está en primer plano sobre la luz que llega de la estrella que está detrás producirá una imagen luminosa ampliada de la estrella de detrás en forma de anillo con la estrella en primer plano como centro. Si el alineamiento no es perfecto, el fenómeno producirá dos imágenes ampliadas y distorsionadas en forma de medias lunas. Lo mismo ocurre con galaxias alineadas. Estas llamadas lentes gravitatorias pueden producir imágenes de estrellas y galaxias lejanas de una magnificación y nitidez inalcanzables con telescopio alguno. Si las previsiones de la teoría se cumplen, las lentes de gravitación pueden

contribuir en el futuro a una ampliación considerable del horizonte visible del universo observacional. Hasta 1993 se han descubierto unas doce lentes gravitatorias. Su estudio permite también inferir la masa de la materia (a veces oscura) que actúa como lente.

2.4.1.4. RAYOS ULTRAVIOLETA

Otras señales cósmicas llegan a la Tierra en forma de radiación ultravioleta. Sin embargo, la mayor parte de esa radiación es absorbida por la capa de ozono que rodea la atmósfera, por lo que su detección se realiza desde satélites artificiales.

La astronomía de rayos ultravioleta ha hecho importantes contribuciones a nuestro conocimiento del gas interestelar y de las coronas estelares, entre otros temas. Una importante limitación estriba en que la radiación ultravioleta extrema (con longitud de onda entre 10^{-8} y 10^{-7} m) emitida por objetos cósmicos lejanos no llega hasta nosotros, pues es absorbida en el camino por los átomos de hidrógeno interestelares, lo cual constituye el horizonte ultravioleta del universo observable.

2.4.1.5. RAYOS X

La astronomía de rayos X empezó hace 40 años con el descubrimiento por Burnight y sus colaboradores del Naval Research Laboratory de que el sol emite rayos X. Este descubrimiento sólo fue posible gracias a la utilización de cohetes como portadores de los detectores, pues la atmósfera es completamente opaca a los rayos X, que sólo pueden detectarse más allá de los 120 km. por encima de la superficie terrestre. El satélite Uhuru, lanzado por la NASA en 1970, permitió realizar un reconocimiento completo del cielo. Otros satélites siguieron, sobre todo el observatorio Einstein de la Nasa, lanzado en 1978 y dotado de un telescopio de rayos X de gran resolución angular. El satélite europeo de rayos X Roentgen (ROSAT) ha permitido recientemente importantes descubrimientos e inferencias sobre la materia oscura. En 1993 se ha lanzado el satélite americano-japonés ASCA, provisto de dispositivos fotoeléctricos de detección de fotones (CCDs) capaces de detectar y medir fotones individuales de rayos X. Para 1998

está previsto el lanzamiento del satélite americano de rayos X AXAF), todavía más avanzado.

La astronomía de rayos X ha abierto otra importante ventana electromagnética y ha ampliado el horizonte observacional. La información contenida en los rayos X ha permitido descubrir múltiples fuentes de emisión, estrellas y galaxias de rayos X, así como estrellas binarias uno de cuyos miembros es una estrella de neutrones o un agujero negro, y tener noticias frescas de los misteriosos cuasares y de los movimientos de las grandes y lejanas nubes de gas, que permiten hacer inferencias sobre la masa de la materia oscura circundante.

2.4.1.6. RAYOS GAMA

Los fotones más energéticos del espectro electromagnético son los rayos gama. También ellos contienen valiosa información sobre el universo y también ellos son el objeto de una nueva y especializada rama de la astronomía observacional, que utiliza telescopios de rayos gama montados en satélites artificiales.

La detección e interpretación de los rayos gama amplía el universo observable, pero impone su propio horizonte, situado en la longitud de onda de 10^{-21} m. En efecto, los fotones con longitud de onda menor que 10^{-21} m son destruidos por colisiones con los fotones de la radiación cósmica de fondo, dando lugar a pares electrón-positrón.

En resumen, la radiación electromagnética que llega a la Tierra constituye nuestra principal y por ahora casi única fuente de información acerca del universo. Los progresos recientes en los instrumentos de detección, eventualmente montados en satélites artificiales, nos han abierto de par en par las puertas de esta radiación. Sin embargo, hay señales electromagnéticas del cosmos que nunca podremos detectar, por mucho que adelante nuestra tecnología, por la sencilla razón de que no llegan hasta aquí, pues se pierden antes por el camino que conduce de su fuente a la Tierra. A nuestro rincón del universo sólo llegan ondas electromagnéticas con longitud de onda entre 10^4 m y 10^{-7} m, y entre 10^{-8} m y 10^{-21} m. Esta banda de frecuencia es infranqueable y constituye el horizonte electromagnético del universo observable.

2.4.2. RAYOS CÓSMICOS

No todas las señales que nos llegan son electromagnéticas. Por ejemplo, una gran cantidad de rayos cósmicos bombardea constantemente la tierra desde todas las direcciones. Los rayos cósmicos son sobre todo protones, neutrones, electrones y positrones muy energéticos, procedentes de cualquier lugar del universo. El problema es que es imposible determinar el lugar del que proceden, o el tiempo de su origen, o su energía inicial, ya que la mayoría de ellos son partículas cargadas eléctricamente y, por tanto, han sido sometidos a todo tipo de distorsiones y han sido esparcidos por el espacio por los potentes campos magnéticos galácticos que han tenido que atravesar. A pesar de todo, alguna información contienen, por ejemplo de tipo químico, y es de esperar que ésta sea más atentamente estudiada en el futuro.

2.4.3. METEORITOS

Otra fuente potencial de información son los meteoritos que llegan a la Tierra. El problema aquí reside en que, al parecer, todos los meteoritos proceden del sistema solar, con lo cual su interés cosmológico estaría estrictamente limitado.

2.4.4. NEUTRINOS

Los neutrinos son partículas eléctricamente neutras (de ahí les viene el nombre de "neutrino", diminutivo italiano de "neuro", que les dio Enrico Fermi), con spin $1/2$, inasequibles a las interacciones fuertes y con una masa en reposo nula o muy pequeña.

Según las teorías físicas actuales, los neutrinos y los fotones son, con mucha diferencia, las partículas más abundantes en el universo. Hay más de 10^9 neutrinos (y el mismo número de fotones) por cada barión (es decir, por cada protón o neutrón). Todo está lleno de neutrinos y todo es transparente a los neutrinos. Nosotros mismos recibimos tantos neutrinos por arriba, por la cabeza, como por abajo, por las plantas de los pies, pues la Tierra entera es completamente transparente a estas elusivas partículas, que apenas interaccionan con los átomos.

Uno o dos segundos después del *big bang* la temperatura habría

bajado hasta unos 10^{10} grados K y la densidad habría disminuido suficientemente como para que los neutrinos y antineutrinos se desacoplaran de la materia ordinaria, con la que antes estaban en equilibrio, y se convirtieran en partículas libres. El universo se hizo así transparente a los neutrinos, como medio millón de años más tarde se haría transparente a los fotones. Esos neutrinos todavía están ahí, formando una especie de radiación cósmica de fondo que desde entonces se ha enfriado hasta unos 2 grados K. Esa radiación cósmica de neutrinos contiene información acerca de un estadio sumamente temprano del universo (uno o dos segundos después del *big bang*). Ninguna otra señal nos llega desde época tan temprana. El problema es que somos incapaces de detectar dichas señales. Por razones teóricas pensamos que esa radiación neutrónica existe, pero de momento no podemos detectarla y explotarla. Por tanto, el universo observacional sigue haciéndose opaco tras un horizonte temporal situado medio millón de años después del *big bang*. La detección de esa radiación de neutrinos abriría una ventana hacia el universo temprano y haría recular el horizonte temporal del universo observacional hasta dos segundos tras el *big bang*. Por desgracia, esa ventana permanece de momento cerrada.

Además de los neutrinos de origen cosmogónico que impregnan todo el espacio, estamos también sometidos a un continuo baño de neutrinos de origen galáctico y, sobre todo, solar. Creemos entender cómo se producen las reacciones nucleares en el centro de las estrellas y, en especial, del sol. Este entendimiento actual del proceso implica la producción de un flujo constante y determinado de neutrinos. Sin embargo, los diversos experimentos realizados por Ray Davis en una mina de South Dakota para detectar los neutrinos procedentes del sol no han dado los resultados previstos, situación que no deja de ser altamente insatisfactoria.

El problema consiste en que los neutrinos interactúan de un modo extremadamente débil. La probabilidad de detectar un neutrino es de uno entre 10^{18} . Por eso los métodos para detectarlos se basan hasta ahora en la acumulación de enormes cantidades de material, con la esperanza de que el elevado número de átomos compense la minúscula probabilidad

de interacción. En este sentido se ha sugerido utilizar el océano entero, convenientemente balizado, como detector de neutrinos de alta energía.

A pesar de las dificultades de detección, miles de millones de neutrinos atraviesan constantemente nuestros ojos y nuestro cuerpo entero. Pero nuestros ojos no los ven, pues los neutrinos no pertenecen a nuestro universo perceptible. Y nuestros aparatos apenas los detectan, por lo que apenas pertenecen a nuestro universo observable. El universo que llenan es el universo inteligible. De acuerdo con nuestras teorías, durante el *big bang* se formaron mil millones de neutrinos por cada protón, neutrón o electrón. Y cada reacción nuclear en cada estrella sigue produciendo nuevos neutrinos, así como también los producen los sucesos violentos asociados con colapsos gravitatorios. Los neutrinos fueron postulados teóricamente por Wolfgang Pauli en 1930, pero no fueron detectados experimentalmente hasta 1956, por Cowan y Reines. Los experimentos de Davis también han detectado neutrinos solares, aunque menos de los previstos. Y también algunos de los neutrinos producidos en la explosión de la supernova 1987A fueron al parecer detectados, aunque hay alguna polémica al respecto. En resumen, los neutrinos llenan nuestro universo inteligible, pero a duras penas se asoman a nuestro universo observable. Sin embargo, contienen valiosa información objetiva acerca del cosmos, que posiblemente nos sea permitido explotar en el futuro.

2.4.5. ONDAS GRAVITATORIAS

Según la teoría general de la relatividad, las rápidas aceleraciones de grandes masas producen ondas de gravitación, es decir, distorsiones en el espaciotiempo que se propagan a la velocidad de la luz a partir de su fuente. Los colapsos gravitatorios que se producen en el centro de las galaxias, los agujeros negros, los cuasares, las explosiones estelares y otros fenómenos violentos deberían ser fuentes abundantes de ondas gravitatorias, que contendrían valiosa información objetiva, tanto cualitativa como cuantitativa, acerca de dichos fenómenos. Además es posible que estemos también bañados por una radiación cósmica fósil de tipo gravitatorio, comparable a la de microondas y a la de neutrinos, y

que contendría señales procedentes del momento más temprano del universo, cuando la fuerza gravitatoria se desacopló de la fuerza unificada restante, quizás tan pronto como sólo 10^{-35} segundo después del *big bang*. La detección de tal radiación sería un serio golpe contra el modelo cosmológico inflacionario (pues la inflación, posterior, habría diluido las ondas), carente hasta ahora de toda contrastación observacional.

Por desgracia, las ondas gravitatorias son aún más difíciles de detectar que los neutrinos. La probabilidad de detectar un gravitón (el cuanto de la radiación gravitatoria) es sólo de 1 entre 10^{23} .

Joseph Weber, de la Universidad de Maryland, construyó un detector de ondas de gravitación en forma de un bloque cilíndrico de aluminio de 1,4 toneladas, que vibraría con las ondas de gravitación. Un problema era aislarlo de otras vibraciones e influencias. Weber instaló dos detectores, alejados entre sí, para eliminar efectos locales. En 1969 Weber anunció varios episodios de ondas de gravitación, pero los equipos que trataron de repetir sus observaciones a principios de los 70's no lo lograron. Además, los detectores no poseían la suficiente capacidad de discriminación para distinguir los debilísimos efectos de las ondas gravitatorias. De hecho las ondas gravitatorias siguen perteneciendo exclusivamente al universo inteligible, como consecuencias de la relatividad general, pero no puede considerarse que hayan sido detectadas hasta ahora. Todavía no han entrado en nuestro universo observable. De todos modos, actualmente está en preparación una nueva generación de detectores de ondas gravitatorias basados en la interferometría láser que posiblemente abra esta ventana en un futuro próximo, ampliando así considerablemente nuestro universo observable.

2.4.6. SEÑALES INSOSPECHADAS

Que nosotros sepamos, fotones, rayos cósmicos, neutrinos y gravitones constituyen todas las señales que nos llegan del cosmos. Las fuentes de estas señales constituyen el universo observable, al menos en la medida en que seamos capaces de detectarlas. Esta evaluación del universo observable es función del universo inteligible, es decir, depende

de la vigencia actual de ciertas teorías físicas y de modelos cosmológicos. Evidentemente, no hay ninguna seguridad de que esta situación teórica no cambie en el futuro, y por tanto, que no cambie la evaluación de los horizontes del universo observable.

Podría muy bien ser que existieran formas de radiación o campos o partículas correspondientes a entidades teóricas postuladas por teorías inmaduras, especulativas y (¿aún?) no vigentes, como los fotinos, gravitinos y selectrones postulados por ciertas teorías superunificadoras. También podría ser que llegasen a nuestro sistema solar señales totalmente ignoradas e imprevistas, partículas o perturbaciones insospechadas y ni siquiera postuladas por teoría actual alguna. Lo que pasa es que, de tales partículas o señales no podemos decir nada, aparte de reconocer su posibilidad. Así como no toda la energía existente es energía libre, utilizable para producir trabajo, no toda información existente es información detectable, utilizable para producir conocimiento.

Como es bien sabido, es posible calcular la masa de los sistemas galácticos mediante cálculos mecánicos. Así, podemos calcular la masa de nuestra galaxia a partir de los datos derivados de la observación de sus movimientos y estructura aparentes. Podemos computar la masa de un cúmulo de galaxias mediante la aplicación del teorema virial a sus movimientos y tamaño. Y podemos calcular el parámetro de desaceleración (q_0) del modelo cosmológico estándar a partir de la determinación de las distancias y de las velocidades de recesión de las galaxias más lejanas observadas. Todos estos cálculos nos conducen a estimaciones de masas diez veces superiores a las masas de las estrellas, galaxias y otros objetos visibles. De aquí se infiere que, si nuestras teorías mecánicas son correctas, nueve décimos de la masa inferible de nuestras observaciones están constituidos por materia oscura (*dark matter*), es decir, por materia no luminosa, no visible, no irradiante, por materia situada más allá de nuestro horizonte observacional.

No sabemos en qué consista la materia oscura. Quizás se trate de estrellas enanas apagadas, o de grandes cantidades de astros parecidos al planeta Júpiter. Quizás los neutrinos tengan alguna pequeña masa, que, multiplicada por el enorme número de neutrinos, dé una gran masa

total. Quizás una enorme profusión de agujeros negros contenga la masa invisible. O quizás haya partículas masivas tales como los axiones, los monopolos magnéticos o los WIMPS (*weakly interacting massive particles*), previstas por ciertas teorías aún no contrastadas y que constituirían la llamada materia oscura fría. Si esto fuera así, y si algún día fuera posible detectarlas (lo que no es probable), sería concebible que estas partículas fueran portadoras de información sobre objetos y procesos cósmicos de los que aún no tenemos noticia.

2.5. LÍMITES POR NUESTRA CAPACIDAD DE DETECTAR, DISCRIMINAR Y RECONOCER SEÑALES

Hemos hablado de los horizontes observacionales determinados por el tipo de señales que llegan a la Tierra. También habría que subrayar los límites del propio observador y de sus instrumentos. Aquí habría que mencionar nuestra limitada capacidad de detección de señales, nuestra limitada capacidad de discriminación entre señales distintas, nuestra limitada capacidad de reconocimiento de las señales detectadas y el ruido producido por nuestros propios instrumentos de detección y medida. Estos límites dependen a veces de la proporción entre la longitud de onda de la señal y el tamaño del aparato, y tienen su fundamento en el principio cuántico de incertidumbre.

3. EL UNIVERSO INTELIGIBLE

El universo inteligible es nuestra construcción teórico-conceptual máximamente comprensiva acerca de la realidad en su conjunto, en la medida que ésta nos sea accesible científicamente. El universo inteligible incorpora y da cuenta del universo observable, pero va más allá de él, lo extrapola y lo trasciende. Incorpora también todas las leyes y teorías científicas relevantes y vigentes, así como las entidades por ellas postuladas. Abarca tanto los métodos de representación como las matemáticas subyacentes, tanto la física como los presupuestos básicos y cualesquiera otros recursos conceptuales empleados en la construcción.

Algunos aspectos del universo observable son despreciados en la

construcción del universo inteligible. Y no todas las teorías son tenidas igualmente en cuenta a la hora de elaborarlo. El resultado de este proceso de conceptualización integrada es una imagen científica más o menos idealizada del universo en su conjunto. Esta imagen se plasma en la forma de un modelo cosmológico. Cada modelo cosmológico distinto es una imagen distinta del universo inteligible, o, si se prefiere, un universo inteligible distinto.

3.1. LÍMITES DE LA INTELECCIÓN O CONCEPTUALIZACIÓN. HORIZONTES DEL UNIVERSO INTELIGIBLE

Un horizonte conceptual o de inteligibilidad o teórico es un límite a aquello que puede saberse, conjeturarse o pensarse con base en cierto modelo cosmológico o esquema conceptual, es decir, utilizando los conceptos, hipótesis e intuiciones característicos del modelo o esquema, así como las teorías matemáticas y físicas subyacentes.

En el universo inteligible newtoniano no puede plantearse siquiera la cuestión de la posible curvatura del espacio, pues la geometría euclídea es uno de sus horizontes de inteligibilidad. La singularidad en la que consiste el origen del universo en el modelo cosmológico del *big bang* es un horizonte de inteligibilidad de dicho modelo. Al llegar a ese punto las ecuaciones dejan de tener soluciones finitas, los conceptos dejan de tener sentido, el modelo deja de funcionar. Ya no se puede ir más allá. Dentro de ese esquema conceptual incluso deja de tener sentido la idea misma de "ir más allá".

La uniformidad de las leyes de la física en todos los puntos del espacio-tiempo es un horizonte de inteligibilidad de todo universo inteligible. Esto no implica que la realidad tenga que ser así. La realidad podría ser muy distinta. Las leyes que conocemos podrían tener sólo validez local. La velocidad de la luz podría ser una constante sólo en nuestro rincón del universo. El corrimiento del espectro de las galaxias lejanas hacia el rojo podría no deberse al efecto Doppler, a la velocidad de recesión, sino a otros factores desconocidos. Las masas podrían repelerse y la energía podría no conservarse. Desde luego, un universo así contradiría a nuestras leyes científicas y no nos resultaría

inteligible. Pero es que el universo real podría no ser inteligible, en cuyo caso no habría ninguna posibilidad de entenderlo. De todos modos, no hay razón ninguna para proseguir en esta línea de escepticismo especulativo y estéril. En la medida en que queramos pensar acerca del universo, en la medida en que queramos conceptualizarlo, necesitamos concebirlo como un universo inteligible, como un modelo cosmológico, al menos provisionalmente. Nuestra única posibilidad de traspasar los límites de un modelo cosmológico insatisfactorio consiste en construir un nuevo modelo cosmológico de mayor alcance, con lo cual no habremos abandonado el universo inteligible; simplemente lo habremos ampliado.

El mundo perceptible tiene cierta estabilidad, pues está anclado en nuestra constitución genética. El universo observable es una extensión del perceptible, y entre ambos hay una obvia interrelación. Los resultados observacionales no perceptibles (por ejemplo, los correspondientes a las ondas de radio) se traducen a imágenes perceptibles, aunque no sea más que en forma de diagramas o imágenes sintetizadas por computador, a fin de poder ser intuitivamente asimilados. Y las intuiciones perceptibles son corregidas por los datos observacionales. Aunque es perceptivamente evidente que el sol sale cada mañana por el oriente, se mueve sobre nuestras cabezas y se pone cada tarde por el oeste, acabamos rechazando esa evidencia en función de otros datos observacionales menos inmediatos.

El universo inteligible marca los límites del universo observable y corrige sus datos. Por ejemplo, creemos que hay más masa de la que se ve, basados en argumentos teóricos. Esto crea a veces polémicas y tensiones. El astrónomo Halton Arp cree tener buenos motivos y observaciones para pensar que los cuasares, presuntamente lejanos, son excrecencias de galaxias mucho más cercanas. Y si ambos presentan espectros con corrimientos hacia el rojo distintos, tanto peor para la ley de Hubble. Arp piensa que lo que hay que cambiar es la ley de Hubble. Pero la gran mayoría de la comunidad científica, comprometida con un modelo cosmológico en que la ley de Hubble juega un papel esencial, se niega a aceptar tal conclusión, al menos mientras no se le ofrezca

un modelo global más convincente, cosa que Arp no ha hecho.

El universo observable, por otro lado, sirve de piedra de toque al universo inteligible, cuya primera función es dar cuenta de los datos de observación. Por eso, nuevos datos observacionales pueden conducir al abandono de ciertos modelos cosmológicos, como ocurrió con el modelo del estado estable tras el descubrimiento observacional de la radiación cósmica de fondo. Lo mismo podría ocurrir en el futuro con el modelo inflacionario (variedad del modelo del *big bang* en boga en los últimos diez años) si se llegara a descubrir una radiación de fondo de ondas gravitatorias o si se confirmara (como parece) que ω --la densidad media-- está más próxima de 0,1 que de 1. En efecto, el modelo del universo inflacionario postula que la densidad del universo es $\omega = 1$, cien veces mayor que la visible e incluso diez veces mayor que la inferible a partir de los movimientos de la visible.

4. LA REALIDAD TOTAL

Los límites del universo inteligible son los límites de nuestros recursos intelectuales y conceptuales, y no tienen por qué ser límites de la realidad. La realidad es precisamente todo lo que hay, sin limitación alguna, y con independencia de que sea pensable o cognoscible o no. Por eso la realidad es lo ilimitado, el *ápeiron*, que diría Anaxímandros.

Ahora bien, en la medida en que podamos pensar o decir algo inteligible acerca del universo, por definición estaremos en el ámbito del universo inteligible, que es también el ámbito de lo simbólicamente articulable, el ámbito del lenguaje y de la matemática. En la medida en que la realidad vaya más allá del universo inteligible, se trata de una realidad inefable, con la que se puede tener una relación mística, pero de la que no se puede hablar.

Karl Jaspers [1935, 2. Vorlesung] ha llamado lo envolvente (*das Umgreifende*) a “aquello dentro de lo cual se halla encerrado todo horizonte particular... y que no es ya visible como horizonte”. Benjamin Gal-Or [1987, p. 349 ss.] lo ha llamado *Havaya o hwehya* (“el todo”, en hebreo). Milton Munitz [1986, capítulo 6] lo ha llamado *the Bound-*

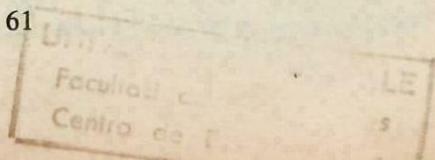
less o *Boundless Existence*. Este todo ilimitado y envolvente, esta realidad última y total, a la vez abarca y trasciende todos los horizontes perceptibles, observables e inteligibles.

Nuestra percepción no llega más allá del horizonte perceptible, ni podemos hacer observaciones fuera del universo observable, ni podemos representar, pensar o entender la realidad fuera del universo inteligible. Pero, hasta donde llegan, nuestra percepción percibe la realidad, nuestras observaciones son reales y el universo que tratamos de entender es el universo real, la realidad misma. Pero sólo en parte conseguimos lo que pretendemos. A pesar de ello, es asombroso cuánto conseguimos. La realidad total es como el límite inalcanzable de una sucesión de universos observables e inteligibles, variables en el tiempo. Sólo un dios podría alcanzar ese límite y lograr que su universo inteligible coincidiera con la realidad misma. Por desgracia, todo parece indicar que los dioses no existen.

Con estas últimas consideraciones sobre la realidad total e inefable nos encontramos hablando de lo que no se puede hablar, lo cual es señal inequívoca de que ya nos hemos extralimitado, y de que es hora de acabar.

BIBLIOGRAFÍA

- ARP, H., 1987. *Quasars, Redshifts and Controversies*. Interstellar Media. Berkeley.
- BÖRNER, G., 1988. *The Early Universe*. Springer-Verlag. Berlin-Heidelberg.
- GAL-OR, B., 1987. *Cosmology, Physics and Philosophy* (2nd edition). Springer Verlag New York Inc.
- HARWIT, M., 1981. *Cosmic Discovery*. The Harvester Press. Brighton.
- JASPERS, K., 1935. *Vernunft und Existenz*. Groningen.
- LAYZER, D., 1988. Growth of order in the universe. In *Entropy, Information and Evolution*, B. Weber...(ed.), The MIT Press, Cambridge, Mass.
- MOLES, M., 1981. Cosmología y observaciones. *Investigación y Ciencia*, Julio.
- MOSTERÍN, J., 1989. A round-trip ticket from philosophy to cosmology. In *Foundations of Big Bang Cosmology*, W. Meyerstein (ed.), World Scientific Publishing, London and Singapore.
- MOSTERÍN, J., 1991. What can we know about the universe? In *Philosophy and the*



Origin and Evolution of the Universe, E. Agazzi & A. Cordero (ed.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht and Boston.

MUNITZ, M., 1986. *Cosmic Understanding*. Princeton University Press.

THORNE, K., 1987. Gravitational radiation. In *300 Years of Gravitation*, S. Hawking & W. Israel (ed.), Cambridge University Press.