

# ¿Por qué es oscura la noche?

## Segunda parte: la solución a la paradoja

por Christine Allen

**E**n el pasado número de *Ciencia y Desarrollo* tuvimos oportunidad de plantear la paradoja de la oscuridad del cielo nocturno, a la que llamamos paradoja de Kepler-Halley-Cheseaux-Olbers. Describimos el dilema al cual tiene que enfrentarse la astronomía por el hecho de que las noches sean oscuras: o bien el Universo es infinito, y entonces las noches son resplandecientes (la bóveda celeste se vería completamente tapizada de estrellas), o bien el Universo es finito, tiene un borde, y entonces las noches son oscuras (véase el recuadro 1, que repetimos del número pasado). También examinamos algunas de las soluciones propuestas en el pasado, en el contexto de un universo regido por las leyes de Newton. Mencionamos la sugerencia de Cheseaux y de Olbers de que el material del espacio interestelar absorbía ligeramente la luz de las estrellas lejanas, y vimos que esto llevaría al rápido calentamiento de ese material, el cual terminaría radiando tanta luz como recibe; esto invalida la sugerencia de Cheseaux y de Olbers como solución del problema de la bóveda celeste luminosa. Mencionamos también la idea de un universo infinito y jerárquico, propuesta a principios de nuestro siglo por Carl Charlier y Hugo Seeliger; estos investigadores demostraron que tal universo evita los problemas de fuerzas infinitas y cielos brillantes. Pero también dimos las razones por las cuales los universos jerárquicos no gozan de aceptación en la actualidad. En esta ocasión, examinaremos otras soluciones al problema de la oscuridad del cielo nocturno que se han propuesto en el contexto de nuevos modelos para el universo, basados ya no en las leyes de Newton, sino en ideas más modernas. Sin embargo, demostraremos que aun en un universo infinito y plano, como el imaginado por Newton, la paradoja de la oscuridad del cielo nocturno tiene una solución simple; no son necesarias las complicaciones de los modelos cosmológicos actuales para evitar que la bóveda celeste sea resplandeciente.

---

### El límite de visibilidad

---

Para ilustrar el concepto de límite de visibilidad, el cual resultará muy útil para comprender las soluciones que se han propuesto para la paradoja de la oscuridad de la noche, es conveniente regresar a la analogía con un bosque de árboles que habíamos planteado el bimestre pasado. Imaginemos que nos encontramos en medio de un bosque muy extenso. No es difícil darse cuenta de que, si estamos situados en un lugar arbitrario, no podremos ver *todos* los árboles del bosque. Los troncos de los árboles más cercanos nos obstruyen la vista y nos impiden ver los más lejanos. En cualquier dirección que miremos, nuestra visual se topará con un tronco. Nuestra visibilidad llega hasta una distancia límite, más allá de la cual no penetra, pues la intercepta el empalme de muchos troncos de árbol, algunos cercanos, otros lejanos. Veremos el "horizonte" densamente tapizado de troncos de árbol. Podemos definir nuestro límite de visibilidad en el bosque como la distancia hasta la cual podemos ver, en realidad es decir, como la distancia hasta la cual puede llegar nuestra línea visual (en promedio) antes de toparse con alguna obstrucción. (Véase el recuadro 2, en el cual se da una definición más cuantitativa del límite de visibilidad.)

Análogamente a lo que ocurre cuando nos situamos en el interior de un bosque, al encontrarnos entre las estrellas también tendremos un límite de visibilidad; en efecto, las estrellas al igual que los troncos de árbol tienen un tamaño finito, y también nos impiden ver las estrellas más lejanas. Incluso si el Universo fuera infinito en extensión y tuviera un número infinito de estrellas, nosotros (al igual que cualquier otro observador) sólo alcanzaríamos a ver un número finito de ellas: tantas como son necesarias para tapizar



La galaxia espiral NGC 7331, en la constelación de *Pegasus*. Al igual que entre las estrellas, también entre las galaxias se observan huecos oscuros. (Foto de los Observatorios Hale)

densamente la bóveda celeste aparente, sin dejar ningún hueco. Estas estrellas nos impedirían ver cualquier cosa que estuviera situada más allá de ellas; en particular, interceptarían la luz de las estrellas más lejanas; en otras palabras, de la infinidad de estrellas que supuestamente constituyen el Universo, sólo podríamos observar aquellas que se encuentren a distancias menores que el límite de visibilidad, y éstas representan un número finito, no infinito. De hecho, puede calcularse que el límite de visibilidad es de entre  $10^{22}$  y  $10^{23}$  años-luz (entre diez y cien trillones de años-luz), y que el número total de estrellas necesarias para tapizar densamente la bóveda celeste es aproximadamente igual a  $10^{60}$  (estos números pueden calcularse mediante las fórmulas que se proporcionan en el recuadro 2).

---

### El Universo finito

---

Desde luego, una solución obvia a la paradoja de la oscuridad del cielo nocturno la obtendremos si consideramos un universo finito, con un borde bien definido. Lo único que tenemos que hacer para evitar un cielo nocturno resplandeciente es situar ese borde o límite del Universo a una distancia

mucho menor que el límite de visibilidad. Según vimos en el número pasado de *Ciencia y Desarrollo*, ésta fue la solución que propuso Kepler. La visión del Universo como un sistema estelar aislado y finito, como una especie de isla flotando en medio del vacío, gozó de cierta aceptación hasta fechas relativamente recientes. Así, en 1917 el distinguido astrónomo Harlow Shapley escribía: "La disyuntiva es clara: o bien la extensión del espacio poblado por estrellas es finita, o bien el cielo nocturno se presentaría como un glorioso e incandescente resplandor continuo de estrellas. Como no observamos este glorioso resplandor, y como la absorción interestelar es despreciable para las distancias que estamos considerando, podemos concluir que nuestro sistema estelar es finito." Volviendo a nuestra analogía del bosque, esta visión equivale a imaginarnos que nos encontramos no en una selva, sino en un bosquecillo rodeado por un vasto desierto, de modo que en cualquier dirección que miremos podremos ver espacios vacíos entre los troncos de los árboles.

En fechas recientes, se ha tenido que abandonar la visión simplista de un universo finito y con borde. Por tanto, no puede considerarse que el modelo de un universo finito y limitado constituya en nuestros días una solución válida a la paradoja de la oscuridad del cielo nocturno.

## El universo esférico

Según hemos visto, un universo infinito presenta el problema de que el cielo nocturno en él es brillante. Podemos preguntarnos si el problema se resuelve postulando un universo ilimitado pero finito, por ejemplo, suponiendo que el universo es esférico; en realidad, lo que queremos decir es que el espacio en este universo tiene una geometría esférica. Para comprender intuitivamente este tipo de espacio, es útil una analogía. Si bien el espacio esférico de nuestro universo tendrá tres dimensiones, imaginemos un espacio de sólo dos dimensiones, que podemos visualizar como la superficie de una pelota. Esta superficie es finita (de hecho, podemos calcular su área), pero ilimitada: si emprendemos un viaje en "línea recta" en cualquier dirección, nunca encontraremos un borde ni una pared; nuestra trayectoria en realidad es curva, y a la larga regresaremos al punto del cual partimos. De igual manera, en un universo esférico la

trayectoria de la luz es curva; un rayo de luz, después de haber circunnavegado todo el espacio, regresa a su lugar de origen, y continúa dando vueltas hasta que sufre alguna absorción.

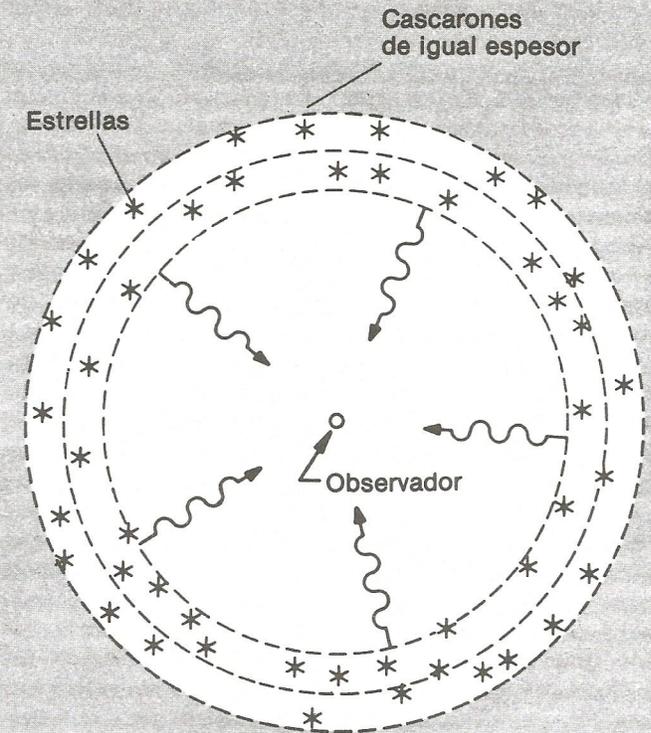
Desafortunadamente, un universo como el que estamos considerando, finito pero ilimitado, no resuelve el problema del cielo nocturno brillante. En efecto, supongamos que nos encontramos en la superficie de un pequeño planeta esférico cubierto de árboles. En este planeta, como en el universo esférico, los rayos de luz viajan en trayectorias curvas; en este caso, seguirán la curvatura de la superficie del planeta, de manera que un rayo de luz que sea emitido, digamos a la altura de nuestros ojos, seguirá una trayectoria curva y siempre se encontrará a la misma altura sobre la superficie del planeta. Al mirar hacia el horizonte siempre veremos un bosque de extensión ilimitada. Si nuestro límite de visibilidad es menor que la circunferencia del planeta, nuestro horizonte nos aparecerá tapizado de troncos, como ocurría en el caso del universo plano e infinito. Si, por el contrario, el límite de visibilidad es mayor

### Recuadro 1

#### La paradoja de Kepler-Halley-Cheseaux-Olbers o paradoja de la oscuridad de la noche

Para visualizar el problema de la oscuridad del cielo nocturno en su versión más simple, supondremos que nos encontramos en un universo infinito, estático y homogéneo, poblado de estrellas similares al Sol, tal como lo proponía Newton. Supongamos que nos situamos en un lugar arbitrario del espacio. La densidad estelar, es decir, el número de estrellas por unidad de volumen, es la misma en cualquier sitio. Dividamos imaginariamente el espacio en cascarones esféricos, del mismo espesor, y concéntricos al lugar donde nos encontramos; los cascarones más cercanos a nosotros contendrán pocas estrellas, en tanto que la luz de las estrellas situadas en cascarones lejanos nos llegará muy atenuada. Ahora bien, como la densidad estelar es constante, el número de estrellas en cada cascarón aumenta con el volumen del cascarón, es decir, con el *cuadrado de su radio*. Pero la intensidad de la luz que recibimos de una estrella es inversamente proporcional al *cuadrado de la distancia* que nos separa de ella. En consecuencia, la cantidad de luz que recibimos de cada cascarón es fija, constante y no depende de la distancia a la que se encuentre.

Todos los cascarones contribuyen con una cantidad igual de luz. Entonces, si el Universo es infinito, el número de cascarones que tendremos que sumar también lo es, y el cielo será infinitamente brillante. En realidad, como las estrellas no son puntos luminosos sin dimensión, sino pequeños discos, antes de que la intensidad luminosa se haga infinita, nos encontraremos con una bóveda celeste densamente tapizada de estrellas, las cuales impedirán que nos llegue la luz de las estrellas más lejanas. En otras palabras, no debemos sumar un número infinito de cascarones, sino sólo los suficientes



Dos cascarones del mismo espesor y concéntricos con el observador. La luz total proveniente de cada cascarón es la misma. (E.R. Harrison, 1980)

para cubrir densamente de estrellas la bóveda celeste; esto es, debemos sumar cascarones hasta llegar al límite de visibilidad (véase el recuadro 2), y no más allá de éste. Por esta razón, el cielo no será infinitamente brillante, sino que tendrá un brillo similar al que presenta el disco del Sol.

### El límite de visibilidad

Sea  $A$  el área del bosque que en promedio contiene un árbol, y sea  $d$  el diámetro promedio de los troncos. La distancia hasta la cual podemos ver en el bosque, esto es, el límite de visibilidad  $L_v$ , está dado por

$$L_v = A/d$$

El número total  $N$  de árboles visibles hasta el límite de visibilidad es

$$N = 3.1416 A/d^2$$

Por ejemplo, si el área promedio ocupada por un árbol es de 100 metros cuadrados, y el diámetro promedio de un tronco es de 0.5 metros, entonces el límite de visibilidad en el bosque resulta ser 200 metros, y el número de troncos que podemos ver es 1 257.

Para calcular el límite de visibilidad en el Universo, supongamos que  $V$  es el volumen que contiene en promedio una estrella, y  $S$ , el área seccional de una estrella típica (nótese que  $S$  es igual a  $\pi$  veces el radio de la

estrella al cuadrado). El límite de visibilidad en el Universo es

$$L_v = V/S,$$

y el número total de estrellas visible desde cualquier punto es

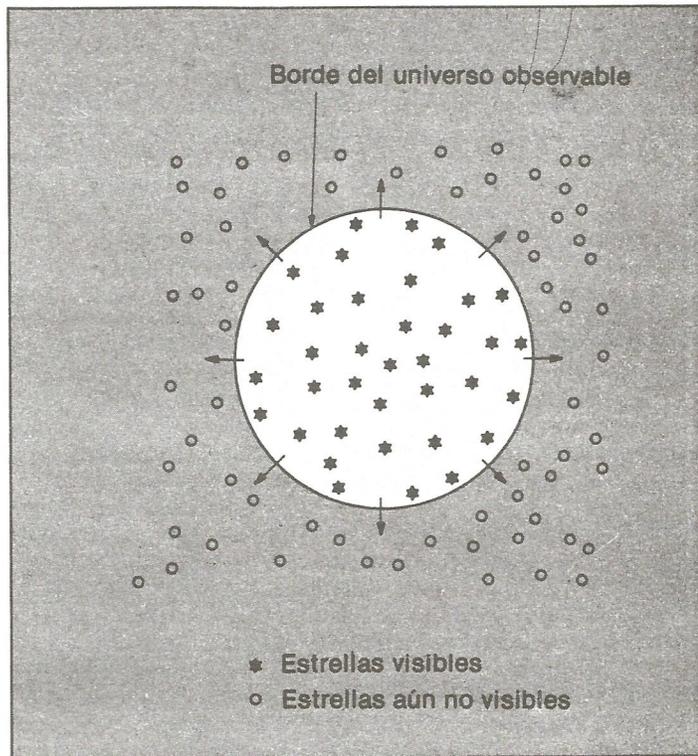
$$N = 4 \times 3.1416 V^2/(3 S^3)$$

Si ahora sustituimos el valor  $7 \times 10^{10}$  cm para el radio de una estrella como el Sol, obtenemos  $S = 1.54 \times 10^{22}$  cm<sup>2</sup>; suponiendo una densidad de materia en el Universo de  $1.7 \times 10^{-30}$  g · cm<sup>-3</sup>, y suponiendo que toda esta materia está en forma de estrellas como el Sol (cuya masa es  $2 \times 10^{33}$  g), obtenemos  $V = 1.18 \times 10^{63}$  cm<sup>3</sup>. Con estos valores, el límite de visibilidad resulta  $L_v = 8.3 \times 10^{22}$  años-luz, y el número de estrellas visibles hasta ese límite es  $N = 1.6 \times 10^{60}$ . Como hay alguna incertidumbre sobre el valor de la densidad de materia en el Universo, hemos usado en el texto valores redondeados.

que la circunferencia, entonces tampoco se resuelve el problema; lo que ocurre es que ahora vemos los mismos árboles "por delante y por atrás", por así decirlo, repetidos dos o más veces. El bosque nos parecerá infinito, y el horizonte se nos presentará de nuevo densamente tapizado de árboles. De manera análoga, en un universo tridimensional finito pero ilimitado (en el cual el espacio tenga geometría esférica, como hemos supuesto) la luz emitida por las estrellas puede haber dado ya varias vueltas, haber circunnavegado el espacio esférico una o más veces. En consecuencia, incluso si el límite de visibilidad es mayor que la circunferencia del universo, veremos la bóveda celeste densamente tapizada de estrellas. Muchas de éstas quizá sean repeticiones de sí mismas, estrellas vistas "por delante y por detrás", dos o más veces. Debido a lo anterior, un universo finito e ilimitado tampoco resuelve la paradoja de la oscuridad del cielo nocturno.

### La importancia de la evolución y la muerte de las estrellas: el límite del recuerdo

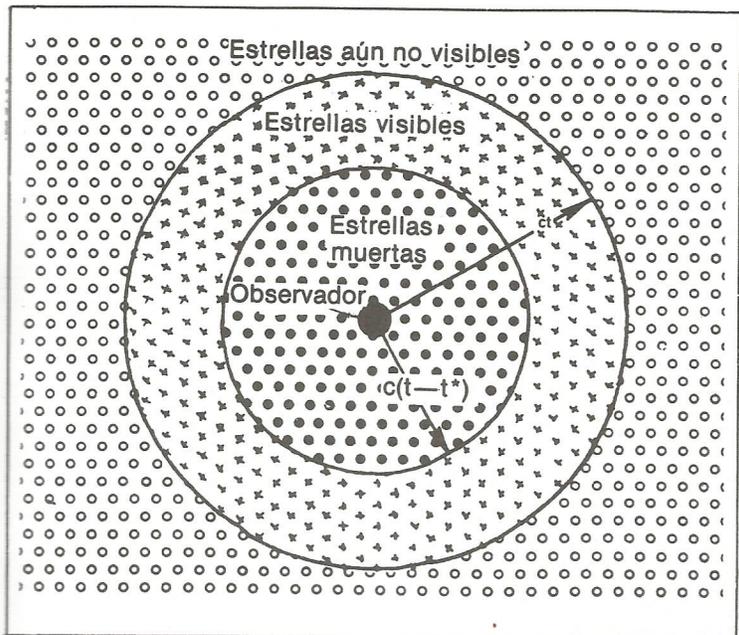
Por simplicidad, sigamos suponiendo que el Universo está poblado por estrellas como el Sol. Para comprender la visión moderna sobre la paradoja de la oscuridad de la noche es necesario recordar que la luz viaja a una velocidad finita en el espacio; no vemos a las estrellas lejanas tal y como son ahora, sino como eran cuando su luz emprendió su recorrido hacia nosotros; de acuerdo con esto, a medida que consideremos estrellas cada vez más alejadas, estaremos viendo estrellas cada vez más jóvenes, estaremos



La razón por la cual el cielo es oscuro en un universo newtoniano plano e infinito. Vemos únicamente las estrellas marcadas de negro, que están situadas dentro del límite del recuerdo: una esfera con un radio de  $1.5 \times 10^{10}$  años. La luz de las estrellas situadas fuera del límite no ha tenido tiempo de llegar a nosotros. (E.R. Harrison, 1980)

recordando, por así decirlo, cómo eran cuando emitieron la luz que ahora nos llega. Así, si nos fijáramos en estrellas cercanas al límite de visibilidad que antes calculamos, estaríamos viéndolas no como son ahora, sino como eran hace  $10^{22}$  o  $10^{23}$  años. Estos son números enormes, incluso para un astrónomo o cosmólogo. Para ilustrar su magnitud, basta compararlos con la edad de nuestra galaxia, o de las estrellas más viejas conocidas (edades que son de apenas  $1.5 \times 10^{10}$  años, es decir, entre 1 y 10 billones de veces menores). Esto inmediatamente nos lleva a sospechar que algo anda mal en nuestro modelo para el Universo, que hasta ahora había sido estático, y en el cual no se habían tomado en cuenta las consecuencias del envejecimiento y la muerte de las estrellas. En efecto, el cielo de este universo estaría totalmente tapizado de estrellas, pero éstas tendrían que haber brillado en forma continua durante tiempos del orden de  $10^{23}$  años, lo cual es manifiestamente absurdo.

Hoy sabemos que una estrella como el Sol puede brillar cuando mucho durante unos  $10^{10}$  años de vida total. Las



Si dejamos pasar un tiempo muy largo, del orden de  $1.5 \times 10^{10}$  años, las estrellas cercanas a nosotros empezarán a apagarse, y solamente veremos aquéllas situadas en el cascarón esférico. El límite del recuerdo se expande a la velocidad de la luz. (E.R. Harrison, 1974)

estrellas de masa menor pueden durar un poco más, del orden de  $2 \times 10^{10}$  años, pero también terminan apagándose. Una vez transcurrido un tiempo del orden de  $1$  o  $2 \times 10^{10}$  años los recursos energéticos incluso de las estrellas más duraderas se habrán agotado; independientemente de la forma como ocurra la muerte de la estrella, de cómo se apague, lo cierto es que ésta dejará de brillar. Esto supone que podremos observar estrellas como el Sol cuando mucho hasta distancias de  $1$  o  $2 \times 10^{10}$  años-luz; a estas distancias, observaremos la luz emitida por la estrella en el

momento mismo de su nacimiento. En otras palabras, la luz emitida por las estrellas situadas a distancias mayores que  $1$  o  $2 \times 10^{10}$  años-luz aún no ha tenido tiempo para llegar a nosotros. Aunque hubiera un número muy grande de ellas, o incluso un número infinito, no podríamos verlas, y estas estrellas no contribuirían a la luminosidad del cielo. Nos referiremos a esta distancia como el "límite del recuerdo", habida cuenta de que el recuerdo puede extenderse, cuando mucho, hasta el primer instante de la vida, es decir, hasta el momento en el que nace una estrella dada.

Si comparamos el número que caracteriza el límite del recuerdo (o sea, del orden de  $1.5 \times 10^{10}$  años) con los  $10^{23}$  años que corresponden al límite de visibilidad, nos damos cuenta de que el límite del recuerdo es muchísimo menor. Podemos ahora definir una distancia límite hasta la cual podemos realmente observar una estrella; esta distancia límite, o "distancia del recuerdo", estará dada por el tiempo que la estrella lleva brillando multiplicado por la velocidad de la luz. Para una estrella que tenga la edad del Sol (unos 5000 millones de años) la distancia correspondiente al límite del recuerdo sería 5000 millones de años-luz; para las estrellas más viejas que conocemos la distancia del recuerdo será de unos diez o quince mil millones de años-luz.

Ahora nos damos cuenta de que el hecho de que las estrellas no puedan permanecer brillando durante tiempos infinitos es de radical importancia para el aspecto del cielo nocturno. En efecto, no es difícil convencerse de que el cielo nocturno será brillante si nuestro límite de visibilidad es menor que la distancia del recuerdo (esto es, la distancia límite hasta la cual podemos observar las estrellas más viejas); por el contrario, el cielo nocturno será oscuro si el límite de visibilidad es mayor que la distancia del recuerdo. Hemos estimado que el límite del recuerdo nos permite ver hasta una distancia de aproximadamente  $1.5 \times 10^{10}$  años. ¿Cuántas estrellas podemos ver hasta una distancia correspondiente al límite del recuerdo? No es difícil calcular que este número es aproximadamente igual a  $10^{21}$  estrellas, un número muy inferior a las  $10^{60}$  estrellas necesarias para tapizar densamente la bóveda celeste (es decir, a las pertenecientes al límite de visibilidad). También puede calcularse que la luz total emitida por las estrellas situadas hasta la distancia máxima del recuerdo es unas  $10^{13}$  veces menor que la luz total emitida por las estrellas hasta el límite de visibilidad, esto es, las que corresponden a una bóveda celeste resplandeciente.

Si volvemos a nuestra analogía del bosque, la vida luminosa finita de las estrellas equivale a suponer que nos encontramos en un bosque que ha sido sembrado en anillos concéntricos sucesivos, digamos, un anillo por año, y que mientras más nos alejamos del centro, más jóvenes son los árboles que encontramos. El anillo más externo aún no tiene árboles, sino sólo semillas. Al dirigir nuestra mirada desde el centro hacia afuera, observaremos árboles sucesivamente más jóvenes, hasta llegar a meros brotes; en el límite del recuerdo veríamos semillas recién germinadas. Nuevamente, si el límite del recuerdo es menor que el límite de visibilidad, advertiremos huecos entre los troncos —es decir, noches oscuras—; en caso contrario, nuestro horizonte estará densamente tapizado de troncos de árbol —es decir, las noches serán resplandecientes.

## El Universo en expansión

Hasta el momento hemos considerado universos más o menos estables (es decir, que no se contraen ni se expanden), estacionarios (es decir, que permanecen iguales a sí mismos eternamente, o por lo menos durante larguísimos periodos de tiempo) y uniformemente poblados por estrellas similares al Sol. Sin embargo, hoy sabemos que las galaxias se alejan unas de las otras, y que, por consiguiente, todo el Universo está en expansión.

La expansión del Universo se menciona con frecuencia como la solución moderna a la paradoja de la oscuridad del cielo nocturno. Se ha dicho incluso que tan sólo con observar la oscuridad del cielo podríamos concluir —si fuéramos suficientemente listos— que el Universo está en expansión. Pero hemos visto ya cómo incluso un universo plano, infinito y sin expansión puede tener noches oscuras; para que el cielo nocturno sea oscuro basta con que el límite de visibilidad sea mayor que la distancia que ha podido recorrer la luz procedente de las estrellas más viejas desde que éstas se formaron hasta el momento actual. La paradoja se resuelve si el límite de visibilidad es mayor que el límite del recuerdo. En otras palabras, no es necesaria la expansión para evitar las noches resplandecientes. Tampoco es suficiente que haya expansión para garantizar la oscuridad de la noche. De hecho, pueden diseñarse universos con expansión y con cielos brillantes. En el caso de nuestro universo, puede demostrarse que el efecto de la expansión, si bien contribuye a hacer ligeramente más negro el cielo nocturno, sería por sí solo insuficiente para asegurar la oscuridad de la noche. El efecto que domina es el hecho de que la vida luminosa de las estrellas es finita.

Por otra parte, en nuestros días han perdido vigencia los modelos planos, infinitos y newtonianos para el Universo; ahora contamos con una amplia variedad de modelos modernos, que parten generalmente de la teoría de la relatividad de Einstein (o de variantes recientes) e incorporan el fenómeno de la expansión universal, así como fenómenos evolutivos. Pero incluso en estos modelos recientes, no ha perdido vigencia la cuestión de la oscuridad del cielo nocturno; de hecho, para que un modelo se considere realista, la oscuridad de la noche es una condición que debe satisfacerse.

## La solución a la paradoja

Vemos pues, que la respuesta moderna a la pregunta que ha inquietado a las mentes curiosas desde hace ya varios siglos, “¿por qué es oscuro el cielo nocturno?”, no está dada por un universo jerárquico, ni por un universo en expansión, ni por la absorción interestelar o intergaláctica de la luz. Ya hemos apuntado que la clave está en el hecho de que las estrellas no pueden brillar eternamente: su vida luminosa es finita, y no hay un número suficiente de ellas como para crear una bóveda celeste resplandeciente; en otras palabras, el contenido de energía del Universo no es suficiente para hacer brillantes las noches. Curiosamente, fue

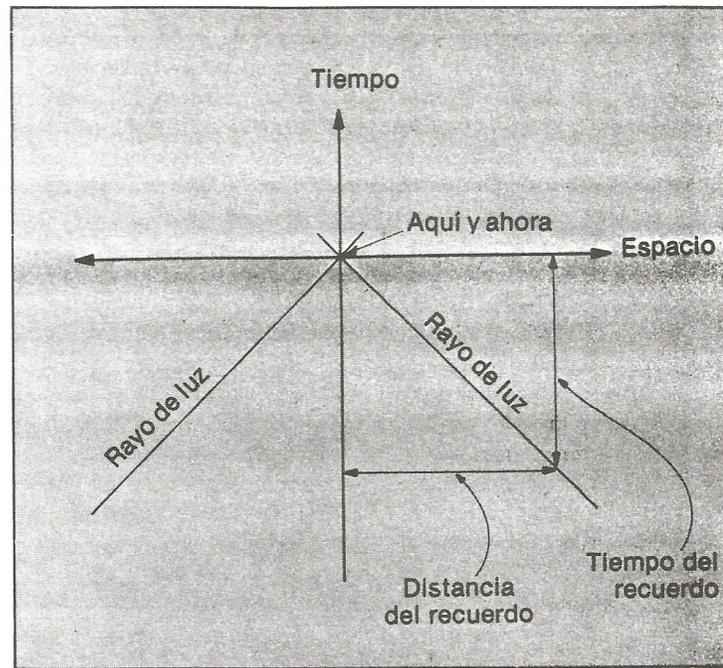


Diagrama espacio-tiempo, en el que se muestra el tiempo y la distancia correspondientes al límite del recuerdo. En este diagrama, las líneas inclinadas a 45° representan rayos de luz. (E.R. Harrison, 1980)

un poeta, no un científico, el primero en atisbar esta solución. Con asombro leemos en el ensayo *Eureka*, escrito por Edgar Allan Poe en 1848, lo siguiente: “Si la sucesión de estrellas fuera infinita, entonces el fondo del cielo se nos presentaría uniformemente brillante, como la Galaxia, puesto que no habría ningún punto en él que no estuviera ocupado por una estrella. La única manera de entender los huecos que nuestros telescopios encuentran en todas direcciones es pensar que la distancia al fondo brillante es tan grande que ningún rayo de luz procedente de él ha podido llegar a nosotros.”

Actualmente pensamos que en el pasado remoto, cuando el Universo era aún muy joven, las noches eran brillantes; esta época corresponde a la llamada “era de la radiación” y abarca aproximadamente el periodo que comienza unos 10 segundos después del momento en que se inició la expansión (la Gran Explosión) y dura casi un millón de años. En esta era, el Universo estaba lleno de radiación de una temperatura parecida a la de la superficie del Sol; si bien no había estrellas, la bóveda celeste era resplandeciente, tan brillante como el disco del Sol. Después de transcurrido este tiempo, entramos a la llamada “era de la materia”; la continua expansión causa que el volumen del Universo sea cada vez mayor, y su densidad cada vez menor. A partir de entonces, el contenido de energía del Universo no es suficiente para llenar de luz la bóveda celeste; a partir de entonces, los cielos son oscuros. Así, la solución a la paradoja de la oscuridad del cielo nocturno puede expresarse en términos sumamente sencillos: la noche es oscura porque la radiación de las estrellas no basta para llenar el cielo de luz. O bien: la noche es oscura porque el Universo está casi vacío. ●