

La paradoja de Olbers

Juan Tomé



LA PARADOJA DE OLBERS

Juan Tomé

Publicaciones de ApEA

Asociación para la Enseñanza de la Astronomía

No. 6 (Secundaria) - Junio 2003

Publicaciones de ApEA

Asociación para la Enseñanza de la Astronomía

Dibujo de Portada:
LeBlanc

Comité de Redacción:
Manuel Membrado
Francesc Sánchez
Ederlinda Viñuales

Dirección:
Rosa M. Ros (Vocal Editora de Publicaciones de ApEA)
Dept. Matemática Aplicada IV
Universidad Politécnica de Catalunya
Jordi Girona 1-3, modulo C3, 08034 Barcelona
e-mail: ros@mat.upc.es

ISBN: 84-932062-5-3

D.L. B-18982-2003

Imprés a FLAIX ÒFSET

PRESENTACIÓN	7
LA CUESTIÓN HISTÓRICA	9
LA CUESTIÓN FÍSICA.....	15
UNA ANALOGÍA CLAVE	19
SALIENDO DE LA PARADOJA	23
DANDO VUELTAS A LA PARADOJA. ACTIVIDADES	25
1.- Los Cálculos de Cheseaux	26
2.- De por qué los árboles no dejan ver el bosque.....	28
3.- Derribando el muro de oro.....	30
4.- Dos enfoques antípodas.....	32
5.- Conversaciones de café, de noche, sobre la noche	35
6.- Noches oscuras, días claros y un poco de lógica.....	37
7.- Noches: ¿Horror o privilegio?	38
8.- Tres textos con elementos religiosos	39
CONCLUSIÓN.....	41
BIBLIOGRAFÍA	43

PRESENTACIÓN¹

A menudo el pensamiento general está ausente en el contexto de la enseñanza de las ciencias. Esta carencia de la formación científica puede ser una de las raíces de la percepción separada de las dos culturas (humanista y científica) por parte de los alumnos. De otra manera, desde las ciencias no se plantean casi nunca cuestiones que han sido siempre preocupación de los humanos. La Cosmología es un campo de reflexión sobre lo global en el que pudieran entrar tanto los estudiantes de ciencias como los de humanidades.

En el contexto de la Enseñanza de la Astronomía a nivel de secundaria, la Cosmología ha recibido poca atención. Sin embargo cuestiones relacionadas con ella, el big bang o la expansión por ejemplo, son mencionadas a menudo por los alumnos como temas de su interés, aunque solo sea porque también son temas que atraen a los redactores de los telediarios y de las revistas de divulgación científica y pseudocientífica.

Podría ser interesante entonces poner a disposición de los profesores de Secundaria algunos materiales que fueran útiles para trabajar con sus alumnos algunos contenidos de Cosmología. Y parece oportuno que tales materiales no se ciñan a un enfoque disciplinar sino que permitan el acceso a los contenidos propios de la Cosmología desde distintas áreas, desde distintos intereses, desde distintos planteamientos didácticos.

Tratar sobre la Paradoja de Olbers es reflexionar sobre la oscuridad de la noche, un hecho tan cotidiano que parece que no podría ser de otra manera, tan explicado que no parece susceptible de análisis, tan evidente que parece carecer de trasfondo. Sin embargo, la oscuridad de nuestras noches es un hecho que tiene implicaciones cosmológicas, que debe ser justificado por cualquier modelo cosmológico que quiera ser consistente con las observaciones.

La oscuridad de la noche es la observación de carácter cosmológico más elemental, más directa y más barata de todas las que dispone la cosmología científica. Como problema cosmológico ha llamado la atención de diversos astrónomos a lo largo de la historia. Puede enfocarse en términos de análisis lógico de principios cosmológicos. Tiene relaciones con leyes físicas fundamentales no especialmente complicadas. Ofrece la posibilidad de algunos cálculos matemáticos sencillos, y otros no tan sencillos, para quien guste de ellos. Y, además, la oscuridad de la noche puede interesar desde posiciones literarias, poéticas o desde sentimientos personales.

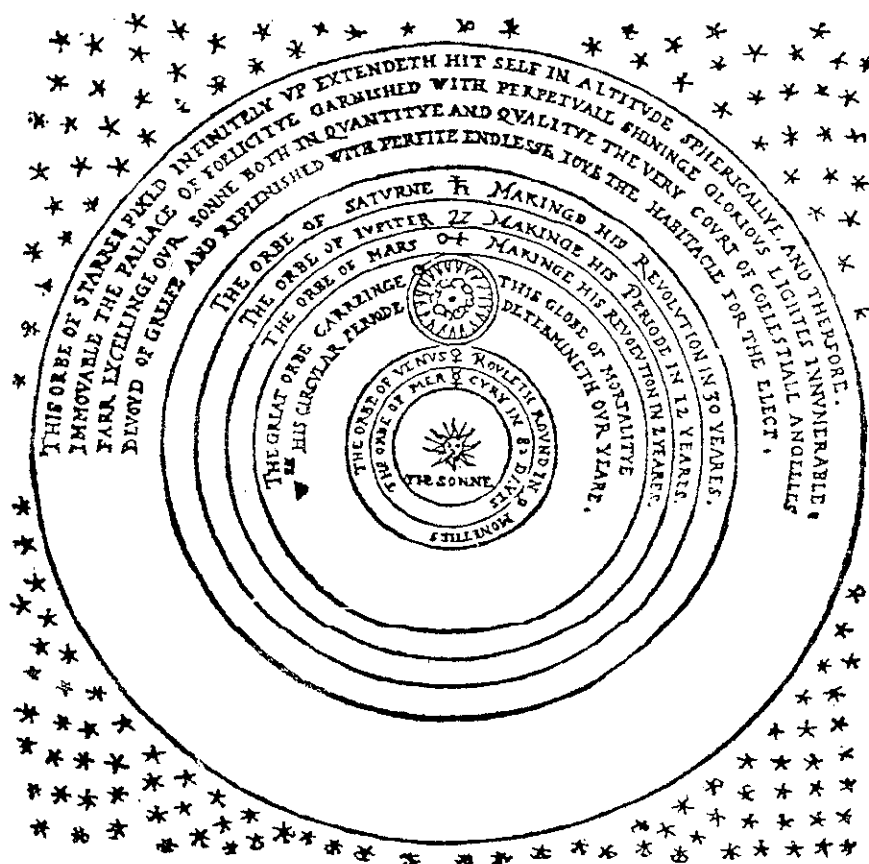
La oscuridad de la noche parece pues reunir ingredientes suficientes para ser un buen candidato a tema de Cosmología interesante para profesores y alumnos de Secundaria.

¹ "La Paradoja de Olbers" es una parte de un trabajo más amplio, titulado "Cosmología para Secundaria", que el autor está realizando con Licencia por Estudios concedida por la Junta de Extremadura, y que persigue el objetivo de poner al alcance de profesores y alumnos materiales útiles para el estudio de cuestiones cosmológicas.

LA CUESTIÓN HISTÓRICA

Cuando Digges¹, en 1576, presentando un cosmos copernicano, tras dibujar las esferas de los planetas centradas en el Sol, se atreve a romper la esfera de las estrellas fijas y salpica de estrellas todo el espacio, hasta los bordes del papel, sin límites, está iniciando la exploración de territorios desconocidos y tiene que enfrentar nuevos problemas. Se da cuenta, por ejemplo, que debe explicar por qué no se ven incontables estrellas, y lo hace escribiendo que *"de esas luces celestiales sólo contemplamos aquéllas que se encuentran en las partes inferiores [...] y que, a medida que se encuentran más altas, aparecen cada vez menores, hasta que nuestra vista, al no ser capaz de alcanzar ni concebir más lejos, hace que la mayoría de ellas nos sea invisible por causa de su asombrosa distancia"*.

A perfit description of the Caeftiall Orbes, according to the moft auncient doctrine of the Pythagoreans. &c.



¹ Thomas Digges, "Perfit description of the Caeftiall Orbes", Londres, 1576. (Texto e imagen tomados de Koyré, "Del mundo cerrado al universo infinito", pp 40 y 41)

En sentido opuesto, como parte de sus argumentos contra la infinitud del Universo Kepler², en 1610, razonó contra la posibilidad de un número enorme de estrellas porque *"si los pequeños discos de 10000 estrellas se juntaran en uno [...] ¿por qué colectivamente no superarían estos soles el brillo de nuestro Sol?"*.

Así, en el contexto de la crisis de paso del mundo cerrado copernicano al universo infinito newtoniano, nace la cuestión que nos ocupará en estas páginas, que se conoce como "Paradoja de Olbers" y que puede formularse así: ¿cómo es posible que en un universo con infinitas estrellas no se vean tantas que toda la bóveda celeste aparezca tachonada de ellas?; ¿qué pasa con la luz emitida por infinitas estrellas, por qué no ilumina la noche?; ¿basta tumbarse en el campo una noche, mirar al cielo y constatar que la mayor parte de la bóveda celeste aparece oscura, para sostener que el universo es finito?

William Olbers, siendo director del observatorio de Bremen, abordó esta cuestión en un artículo publicado en 1823³:

"Muy probablemente, no sólo la parte del espacio que nuestro ojo ha penetrado con ayuda de instrumentos, o la que pueda penetrar en el futuro, sino también el espacio infinito mismo está sembrado de soles con sus acompañamientos de planetas y cometas.

[....] Intentemos descubrir argumentos que puedan compelerlos a negar esta hipótesis. Inmediatamente, una importante objeción surge en la mente. Si realmente hay soles a través de todo el espacio infinito [...], su número debe ser infinito y la bóveda celeste completa debería aparecer tan brillante como el Sol; cada línea que se pueda imaginar trazada desde nuestros ojos debería conducir necesariamente a alguna estrella fija, y por tanto la luz de las estrellas, que es igual que la del Sol, nos alcanzaría desde cualquier punto del cielo. [...] No sólo la bóveda celeste debería estar cubierta de estrellas sino que las estrellas quedarían unas detrás de otras en líneas sin fin, ocultándose de nuestra vista⁴.

[....] ¡Qué fortuna para nosotros que la naturaleza haya ordenado las cosas de forma diferente! ¡Qué fortuna que la Tierra no reciba luz estelar desde cada punto de la bóveda celeste!. Aún con tal inimaginable cantidad de brillo y calor [...] el Todopoderoso podría haber diseñado fácilmente organismos capaces de adaptarse a tan extremas condiciones. Pero la Astronomía para los habitantes de la Tierra permanecería para siempre en un estado primitivo; nada podría conocerse acerca de las estrellas fijas; sólo con dificultad podría detectarse el Sol por sus manchas; y la Luna y los planetas podrían distinguirse sólo como discos oscuros sobre un fondo tan brillante como el disco del Sol.

² Johannes Kepler, 1610, "Dissertatio cum Nuntio Sidereo". (Traducido de un párrafo de la versión inglesa que aparece en Harrison, "Darkness at night", p 50).

³ Wilhem Olbers, "Ueber die Durchsichtigkeit des Weltraums", Berlín, 1823. (Traducido de la versión inglesa, "On the transparency of space", Edimburgo, 1826, que aparece en Harrison, "The darkness of night", Apéndice IV, pp 224 y 225).

⁴ En el capítulo "Dando vueltas a la paradoja", actividad "De por qué los árboles no dejan ver el bosque", se presenta un analogía clásica para entender este argumento de Olbers.

*¿Debe rechazarse la infinidad del sistema estelar porque la bóveda celeste no tiene el brillo del Sol en todos los puntos? ¿Debe restringirse el sistema de estrellas a una pequeña parte del espacio ilimitado?"*⁵

Jean-Philippe Loys de Cheseaux había contestado ya esta pregunta en 1744. Primero demostró que, en una distribución uniforme e ilimitada de estrellas similares al Sol, capas concéntricas a la Tierra de distinto radio, que contendrían distinto número de estrellas, nos harían llegar en conjunto cantidades iguales de luz⁶. Luego calculó que, con una distribución así, ni siquiera haría falta un espacio infinito y un número infinito de estrellas, sino un tamaño del universo menor del que se podía suponer conocido en la época, para que cualquier punto del cielo fuera tan luminoso como un punto del disco de nuestro Sol. Y responde a la cuestión de Olbers⁷:

"La diferencia enorme que se encuentra entre esta conclusión y la experiencia, hace ver que, o bien la Esfera de las Estrellas fijas no sólo no es infinita sino incomparablemente menor que la extensión finita que le he supuesto, o bien que la fuerza de la luz decrece en proporción mayor que la razón inversa del cuadrado de las distancias. Esta última suposición es bastante aceptable, requiere solamente que el espacio estrellado esté lleno de algún fluido capaz de interceptar, aunque sea poco, la luz. Con que este fluido fuera 330.000.000.000.000.000 veces más transparente o más enrarecido que el agua, bastaría para debilitar la fuerza de la luz en una treintaitresava parte a su paso por cada capa, y para absorber, poco a poco, toda la luz que nos es enviada por todas las estrellas que están más allá de las capas vecinas de nuestro torbellino, hasta el punto de reducir la de todo un hemisferio a la 430 millonésima parte de la cantidad de luz que recibimos del Sol, o a una cantidad de luz solamente 33 veces mayor que la que recibimos del globo oscuro de la Luna nueva iluminado por la Tierra."

Olbers contestó como Cheseaux a la cuestión planteada: *"Sin duda, el universo no es absolutamente transparente. Con sólo el más ligero grado de no-transparencia basta para refutar la conclusión -tan contraria a nuestra experiencia- de que si las estrellas fijas se extienden a distancias ilimitadas, el cielo entero resplandecería de luz."*

La elección de Cheseaux y de Olbers, entre un medio no absolutamente transparente o un universo finito, no podía ser otra: para ambos autores había pasado mucho tiempo desde que se podía pensar en un espacio finito, desde que Didges rompió el cascarón del mundo cerrado clásico⁸.

⁵ En todo momento, Olbers argumenta también para agrupaciones de estrellas como las de la Vía Láctea, conocedor de las ideas de William Herschel, publicadas en 1785. He suprimido las referencias a tales agrupaciones para dar mayor fluidez a la lectura del texto.

⁶ En el capítulo "Dando vueltas a la paradoja", actividad "Los cálculos de Cheseaux", se ofrece la traducción de la parte clave del artículo de Cheseaux.

⁷ Jean-Philippe Loys de Cheseaux, "Sur la force de la lumière et sa propagation dans l'éther, et sur la distance des étoiles fixes". Apéndice de su "Traité de la Comète", Lausanne, 1744. (Traducido del original, tal como aparece en Dickson, "La Bóveda de la noche").

⁸ En el Capítulo "Dando vueltas a la paradoja", actividad "Tres textos con elementos religiosos", hay un texto de Olbers al respecto.

La cuestión de Olbers perdió interés durante el siglo XIX y principios del XX, en paralelo con el aumento de aceptación del modelo de universo isla, un universo en el que la Vía Láctea sería toda la materia, una isla de materia en el vacío, en un mar de nada. En un universo así las zonas oscuras del cielo, corresponderían a zonas donde las líneas de visión alcanzarían el mar vacío sin topar con ninguna estrella de la isla.

Superado el debate entre el modelo de universo isla y el modelo de universo de islas (universo de galaxias) actual, y en el contexto del desarrollo de modelos de universos en expansión, la cuestión de Olbers se vuelve a plantear por Bondi⁹ en 1952. Bondi, que no conoció el trabajo de Cheseaux, (al contrario que Olbers, que lo tenía en su biblioteca) es el responsable del nombre "Paradoja de Olbers", y su trabajo es central en todos los tratamientos modernos de la cuestión.

La Cosmología de mediados del siglo XX, que se desarrolla en el marco teórico de la Teoría de la Relatividad Generalizada y todavía discutía el significado de la Ley de Hubble, es necesariamente rica en el análisis de principios. Bondi plantea la "Paradoja de Olbers" mostrando con claridad el conjunto de propiedades del universo infinito newtoniano que entran en contradicción con el hecho de la oscuridad de la noche:

"Olbers quedó anonadado por el absurdo resultado a que le condujo la lógica aplicada a su sencilla y natural suposición original. Intentó explicar su resultado admitiendo la existencia de un gas capaz de absorber la radiación que viajara a grandes distancias, pero demasiado tenue para ser detectado por las observaciones astronómicas realizables en su tiempo. Esta explicación no puede resistir un examen serio. ¿Qué le sucede a la energía absorbida por el gas?. Evidentemente, debiera ser utilizada para el calentamiento del gas hasta que éste alcanzara una temperatura en que irradiara tanta energía como recibe, lo que evidentemente no reduciría la densidad media de radiación.

Como no ha sido posible dar una explicación satisfactoria de este tipo y el rigor del proceso deductivo parece ser intachable, debemos sacar la conclusión de que alguno de los puntos de partida de Olbers son erróneos. Estos puntos pueden ser resumidos como sigue:

- 1. La densidad media de las estrellas y su luminosidad media no varían a través del espacio.*
- 2. Estas mismas cantidades no varían con el tiempo.*
- 3. No existen grandes movimientos sistemáticos de las estrellas.*
- 4. Las leyes conocidas de la Física son aplicables.*

El resultado es, por lo tanto, que esos postulados no concuerdan con la observación y no pueden ser válidos simultáneamente. ¿Cuál es el que debe ser eliminado?¹⁰

⁹ Hermann Bondi, *Cosmology*, Cambridge, 1952. (Texto tomado de la traducción en Ed Labor, "Cosmología", Barcelona, 1972)

¹⁰ Bondi incluye en la lista de suposiciones implícitas de Olbers el carácter euclidiano del espacio. Pero antes de iniciar la discusión sobre cuál debe ser eliminado muestra que esa suposición es irrelevante de cara a la paradoja.

Esta formulación de la paradoja es la que me parece más interesante, porque una investigación sobre qué postulado debe ser eliminado para que el conjunto resultante sea compatible con la existencia de noches oscuras estrelladas, es una investigación sobre qué propiedades generales puede tener nuestro universo que sean compatibles con una observación, con un hecho experimental. Se tiene así la oportunidad de ilustrar qué es una observación de carácter cosmológico, y mostrar con un ejemplo sencillo que la cosmología actual tiene soporte en evidencias experimentales. Esto es un rasgo distintivo de la Cosmología nacida en el siglo XX con el apoyo de la Astrofísica, algo que la distingue de todas las anteriores.

Existe pues relación entre una observación tan sencilla como la de que nuestras noches estrelladas son oscuras y propiedades del universo en conjunto; existe relación entre la oscuridad de la noche, a veces cargada de poesía, a veces de temor, y los postulados de la cosmología, siempre cercanos a la metafísica, a la reflexión sobre nuestras posibilidades y nuestros límites.

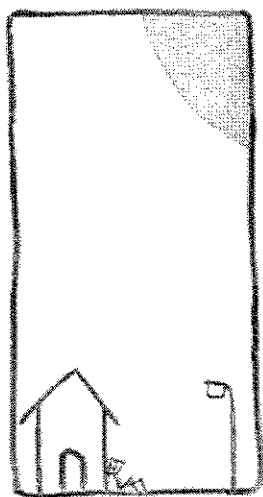
El interés por la "Paradoja de Olbers" ha persistido en la historia de la Astronomía y la Cosmología durante siglos. Probablemente su atractivo nazca de que ponerse a clarificar esa relación entre noches oscuras y Universo, es intentar desenmarañar un hilo que une cielo y tierra¹¹.

¹¹ Dice Bondi en "Cosmología", p 32: "La razón de la importancia cosmológica de un hecho tan simple como la oscuridad del cielo nocturno reside en que éste es un fenómeno que depende críticamente de circunstancias muy alejadas. En los experimentos de laboratorio tratamos continuamente con cantidades influibles, a fin de averiguar la interdependencia de las magnitudes. Por lo tanto, excluimos automáticamente los fenómenos que dependen exclusiva o casi exclusivamente de la materia remota (que se halla fuera de nuestro control). En Cosmología éstas son precisamente las observaciones de las que podemos extraer más información."

LA CUESTIÓN FÍSICA

La afirmación "la noche es oscura" tiene un significado claro para cualquier persona. Equivale a decir "de noche no se ve bien, no se ven bien las cosas, sus detalles", estableciéndose una comparación implícita con lo que sucede durante el día, porque "de día se ve bien, las cosas se ven con nitidez, con detalle".

La afirmación contrapuesta a "la noche es oscura" es "el día es luminoso". Si preguntáramos por el origen de esa diferencia entre noche y día, la respuesta inmediata sería que "durante el día hay Sol y por la noche no". El Sol es el foco, la luminaria cuya presencia hace distinto, a los ojos de los humanos, el día de la noche¹².

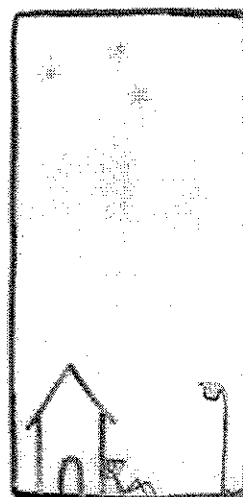


día

El Sol es un
superfoco

Vemos los focos
de luz y los objetos
iluminados

Distinguimos
día y noche
atendiendo a si
hay o no hay
iluminación solar



noche

Distinguir día y noche según la iluminación presente

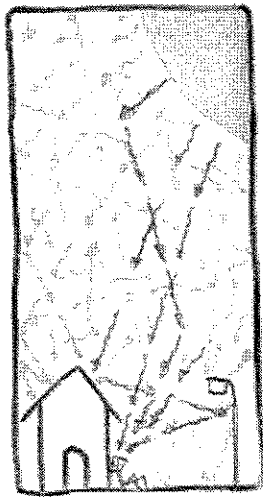
La diferencia entre noche y día se establece, pues, a partir de las distintas sensaciones de visión que se tienen en presencia o en ausencia del Sol. Es, por lo tanto, una diferenciación antropomórfica, está basada en las propiedades de los detectores de luz de los seres humanos, los ojos.

El ojo es un detector de luz, esto es, de radiación electromagnética de longitudes de onda comprendidas entre el infrarrojo y el ultravioleta, ambos excluidos. De hecho, se llama "visible" a la radiación electromagnética

¹² Quizás algunas respuestas, pensando en noches de Luna, distinguirían día y noche comparando la potencia luminosa del Sol con la de la Luna. Casi ninguna o ninguna aludiría a las estrellas fijas como luminarias ni consideraría la posibilidad de comparar su potencia luminosa con la del Sol, perdiéndose así la posibilidad de asombrarse con Cheseaux u Olbers.

comprendida entre esos límites. Por otra parte, el ojo también tiene limitado el rango de intensidades que puede percibir: no detecta luz si su intensidad es del orden de la que existe en noches cerradas sin Luna (los ojos de animales de visión nocturna sí pueden hacerlo) y tampoco es funcional para intensidades como la de la luz solar directa.

La luz que detecta el ojo, la que al ser recibida produce la sensación de ver, proviene directamente de focos emisores (Sol, estrellas, llamas, filamentos o gases incandescentes, etc.) o es luz emitida por esos focos y reflejada o difundida por cualquier materia (objetos que nos rodean, polvo y gases atmosféricos, planetas, etc.). La mayor parte de la luz que recibe el ojo es reflejada o difundida, porque casi nunca se miran directamente los focos emisores, salvo cuando se contemplan estrellas, luciérnagas o fuegos artificiales, por ejemplo.



día

La luz es un
conjunto de fotones

El ojo humano
es un detector
de fotones

Distinguimos día y
noche porque la
densidad de fotones
es bastante distinta
entre uno y otra



noche

Distinguir día y noche por el número de fotones

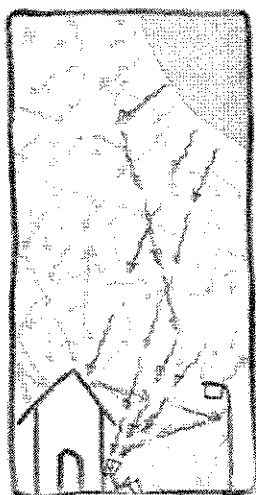
Prácticamente toda la luz que nos inunda de día es luz que llega del Sol, que se difunde en la atmósfera, que se refleja múltiples veces en distintos objetos, que ocasionalmente queda atrapada en un ojo. Distintos materiales reflejarán o difundirán más o menos luz, serán más o menos luminosos; hay objetos que, aún de noche, son más luminosos que otros durante el día. Pero es tan cierto como evidente que, en general, durante el día hay más luz "en el ambiente" que durante la noche. En el lenguaje de la Física se dice que "la densidad de radiación visible es mayor durante el día que durante la noche".

Así pues, desde el punto de vista físico, la diferencia entre día y noche se precisaría así: la densidad de radiación en el rango del visible es distinta

durante el día (cuando nada nos apantalla la emisión solar) y durante la noche (cuando la Tierra nos apantalla la emisión solar). Con más precisión, la diferencia entre la densidad de radiación "de día" y "de noche" es suficiente como para que el ojo humano discrimine entre ellas y nuestro cerebro las asocie a situaciones completamente distintas.

Esto es lo que sucede en nuestro entorno astronómico y sucede porque la cantidad de radiación que aporta el Sol es mucho mayor que la que aportan las estrellas lejanas que no quedan apantalladas por nuestro planeta durante la noche. Y supuesto que nuestro entorno es típico, lo mismo sucederá en el entorno de otras estrellas de nuestro universo¹³.

Pero podría no haber sido así. En otros universos concebibles, la contribución de una estrella cercana al total de radiación visible procedente de estrellas lejanas (o del total del universo) podría ser no significativa. En tales casos, un ojo humano, o de un ser imaginario que habitara un planeta cualquiera, no distinguiría entre "día" y "noche": la "noche" sería tan luminosa como el "día" o, si se quiere, el "día" tan oscuro como la "noche".

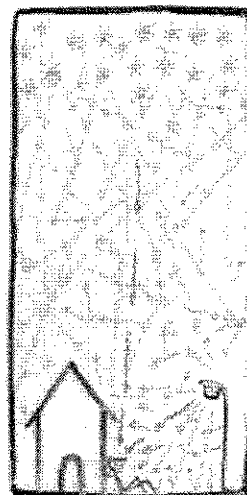


día

¿Y si los fotones que llegan de las estrellas fueran muchos?

¿Cuántas estrellas tiene que haber para que las noches sean tan luminosas como los días?

¿Es sólo cuestión de número de estrellas?



noche

¿Podría ser que las noches fueran oscuras?

Debe quedar claro que no se trata de pensar en el caso particular de un planeta que girara alrededor de una estrella muy poco luminosa sino en el caso de un planeta normal del entorno de una estrella normal. Entonces, ¿por qué iba a ser no significativa la aportación de la estrella cercana?. Tendría que ser porque ese universo estuviera tan lleno de luz que la aportación de la estrella cercana, aunque fuera en cantidad igual a la de nuestro Sol, fuera irrelevante. La densidad de radiación visible

¹³ Es cierto que la agrupación de estrellas en galaxias hace que los entornos de unas estrellas puedan ser distintos de los de otras pero eso no invalida el razonamiento general.

"en el ambiente", en cualquier punto de tal universo sería igual a la que existiera en la superficie emisora de sus estrellas.

En un universo así, los habitantes de cualquier planeta no podrían, escudriñando el cielo, localizar su estrella próxima porque el disco de ésta sería tan luminoso (o, si se quiere, tan oscuro) como el resto del cielo. Tampoco podrían distinguir estrellas lejanas sobre el fondo celeste¹⁴. La magia de nuestra noche sería algo desconocido en esos mundos posibles.

Pero el visible no es una banda especial del espectro electromagnético y parece normal suponer que en un universo como el que estamos imaginando, tampoco habría diferencias entre "día" y "noche" si se consideraran radiaciones electromagnéticas de otras frecuencias. Ese universo también estaría muy lleno de radiación infrarroja, ultravioleta o radio. Los planetas de ese universo no recibirían aportaciones significativas de su estrella cercana en ningún tipo de radiación. No recibirían por tanto aportación significativa de energía de su estrella cercana. En los planetas de ese universo no habría diferencias de temperatura entre día y noche, no habría estaciones: se trataría de mundos de temperatura constante y uniforme.

La temperatura sería la misma en los planetas, en las estrellas y "en el ambiente" de ese universo. No cabría la distinción entre objetos celestes emisores y receptores. En el universo que estamos imaginando existiría un equilibrio dinámico entre emisión y absorción: todo objeto celeste vertería "al ambiente" la misma cantidad de radiación, de energía, que recibiría de él.¹⁵

En el lenguaje de la Física se diría que se trataría de un universo en equilibrio entre materia y radiación, es decir, un universo en el que todo objeto material estaría a la misma temperatura, un universo en equilibrio termodinámico.

Pero nuestras noches son oscuras y nuestros días luminosos. Por tanto, en nuestro entorno, no existe equilibrio entre materia y radiación, hay diferencias de temperatura entre objetos emisores, receptores y "ambiente"¹⁶. Este es el significado físico de "las noches son oscuras y los días luminosos".

Y admitiendo el principio cosmológico de homogeneidad, puede extenderse esa afirmación al resto del universo. Así, la reflexión sobre la oscuridad de nuestras noches nos lleva hasta el reconocimiento de que nuestro universo es un universo en desequilibrio termodinámico.

¹⁴ Ni siquiera los objetos no emisores (lunas, otros planetas, etc) podrían distinguirse del fondo porque estarían iluminados con la misma intensidad que el fondo en todo momento y situación. Tampoco el concepto de eclipse tendría sentido en tales circunstancias porque el apantallamiento de una fuente no variaría significativamente la densidad de radiación local.

¹⁵ Esto no quiere decir que en nuestro mundo no haya objetos que emitan tanta radiación como reciben (la Tierra es uno de éstos) pero en nuestro universo hay objetos (los emisores) que emiten más que reciben y otros (los receptores) que emiten lo mismo que reciben pero no todos a la misma temperatura

¹⁶ Davies señala al tratar de la paradoja de Olbers: "... el universo es muy frío (de hecho su temperatura es de 3° por encima del cero absoluto). En cambio las estrellas, como en el caso del Sol son muy calientes; sus superficies tienen temperaturas de miles de grados, en tanto que sus interiores pueden alcanzar cientos de millones de grados." (P.C.W. Davies, "El espacio y el tiempo en el universo contemporáneo", p 264)

UNA ANALOGÍA CLAVE

Pensemos en el universo como un recipiente¹⁷ cerrado en el que haya agua en su interior. El agua líquida del recipiente equivale a la energía que hay en el universo en forma de radiación. Pensemos que el nivel de agua en el recipiente equivale al nivel de energía "ambiente" en el universo, es decir, a la densidad de radiación en el universo¹⁸.

Pensemos que en el recipiente existen bolsas de agua atrapada (valdría pensar en las bolsas geológicas de petróleo) de las que, por la presión interior, se disparan surtidores de agua. En el universo, las estrellas, bolsas de energía atrapada en forma de materia, son surtidores de radiación.

La cantidad total de agua en el recipiente es constante. Podrá estar en las bolsas que alimentan los surtidores o repartida por el recipiente y, por tanto, el nivel de agua en el recipiente podrá cambiar, pero la cantidad total de agua es fija. Pensemos que exactamente lo mismo sucede con la energía en el universo¹⁹.

Para que el agua surja de las bolsas, la presión interior debe ser mayor que la externa debida al nivel del agua en el recipiente. Para que las estrellas viertan energía al universo su temperatura debe ser mayor que la del ambiente.

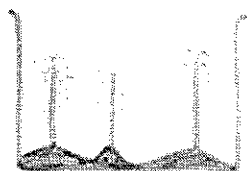
Si el nivel de agua en el recipiente llega a ser alto la presión en el recipiente podría igualar las de las bolsas de agua y podría entrar en ellas tanta agua como saliera. Dejaría de haber surtidores, se habría llegado a una situación de equilibrio. Si la temperatura ambiente en el universo llegara a igualar la de las estrellas, aunque éstas

¹⁷ El uso de esta analogía de forma más o menos explícita aparece en distintos autores. Por orden cronológico cito las que conozco: Bondi, en "Cosmología", p 27, se refiere al espacio como "si fuera en cierto modo un receptáculo infinito, el canal de desagüe perfecto [para la radiación]"; Harrison, en "Darkness at night", p 198, cita un artículo anterior suyo: "Imaginemos una estrella rodeada de una caja de paredes perfectamente reflectantes [....]. Las condiciones para llenar la caja con radiación de la estrella son las mismas que las condiciones para llenar el universo con radiación de todas las estrellas"; Reeves, en "Paciencia en el azul del cielo", p 68, dice: "Las estrellas emiten luz. Esta energía se expande en el espacio como el agua en una bañera" ¿Por qué la bañera no se desborda?". La idea no es, pues, original. Y admite variaciones. Recuerdo que en el fragor de una discusión apasionada y nocturna sobre la paradoja, uno de los asistentes recurrió a defender su posición sugiriendo que pensáramos "sobre la evolución del nivel de olor insoportable en un coche cerrado si los ocupantes emiten gases" aclarando que "gases, por antonomasia, son los que se producen en el aparato digestivo".

¹⁸ Razonar sobre la paradoja de Olbers usando esta analogía implica situarse fuera del universo y contemplar en conjunto sus propiedades y su evolución. Al hacerlo se gana en sencillez en el planteamiento del problema y en el análisis de soluciones pero se pierden posibilidades a la hora de estudiar detalles de las soluciones clásicas a la paradoja que corresponden a visiones del universo desde su interior.

¹⁹ La conservación de la energía en el universo (aplicación al universo en conjunto de un principio fundamental de la Física) es admitida por todos los modelos cosmológicos, excepto por el modelo del Estado Estacionario (SST) de Bondi y Gold. En éste, la violación del principio es de tan pequeño orden que la haría inobservable en la práctica (Bondi, Cosmología, p 162). Por otra parte, algunas soluciones de la paradoja, como las de Cheseaux y Olbers, dejan de ser tales al tener en cuenta ese principio.

continuaran su actividad interna, recibirían del entorno tanta energía como vertieran. En esa situación de equilibrio las estrellas dejarían de ser surtidores de radiación.



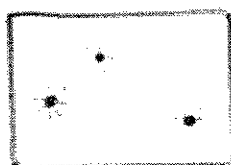
Los surtidores y las bolsas de agua a presión



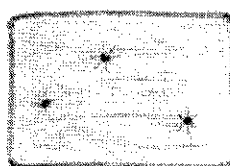
La presión en las bolsas es mayor que en el recipiente



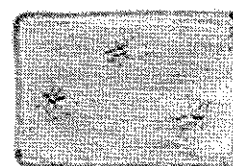
La presión en las bolsas es casi igual a la del recipiente



Surtidores muy contrastados respecto del fondo



Surtidores todavía distinguibles del fondo



Surtidores casi indistinguibles del fondo

La cantidad total de agua en el recipiente es constante

La analogía del recipiente y los surtidores

Mirando el recipiente desde arriba, hacia sus profundidades, los surtidores se verán como "estrellas de agua" y se distinguirán de su entorno tanto más cuanto menor sea el nivel de agua, cuanto mayor sea el desequilibrio entre la presión interna de las bolsas y la presión en el recipiente. Si la presión en el recipiente se aproxima a la de las bolsas, los surtidores se elevarán muy poco (nada si las presiones llegan a igualarse) y dejarían de verse como tales, confundidos con el nivel común, no contrastados con su entorno.

En nuestro universo, los objetos brillantes, las estrellas por ejemplo, emiten energía liberada en procesos internos porque la densidad de energía de la materia es mucho mayor que la densidad de energía de radiación en "el ambiente"²⁰. Se dice que nuestro universo está en desequilibrio termodinámico. Por eso, mirando hacia las profundidades de nuestro universo, los surtidores se distinguen del entorno, las estrellas son luminarias muy destacadas sobre un telón de fondo oscuro.

En un universo en que la densidad de energía de radiación llegara a ser igual a la densidad de energía de la materia, los objetos celestes recibirían tanta radiación como emitieran aunque en su interior se dieran procesos de liberación de energía. Se diría de él que está en equilibrio termodinámico. En un universo así, los surtidores de energía dejarían de verse como tales, no superarían el nivel de energía "ambiente", se

²⁰ Como señala Bondi, "Cosmología", p 27, la debilidad de la radiación "ambiente" es tan grande en nuestro universo, que "la energía radiada la consideramos en muchos aspectos como energía perdida [....]. El calentamiento de una estrella por la radiación que pueda alcanzarla en su viaje por el espacio es tan despreciable que ni siquiera se menciona."

confundirían con el fondo. El fondo sería tan brillante como los surtidores o, si se quiere, los surtidores tan oscuros como el fondo.

En los universos en desequilibrio termodinámico se puede diferenciar entre objetos brillantes, fuertes emisores de radiación y objetos oscuros. Los objetos oscuros²¹ podrían representarse, en la analogía del recipiente y los surtidores, por esponjas situadas en el fondo. La presión del agua en las esponjas siempre será la del recipiente y el agua entrará y saldrá agua de ellas por igual. La temperatura de los objetos oscuros será igual a la del "ambiente" y estarán en equilibrio con la radiación, emitiendo tanta energía como reciben²².

En los universos en equilibrio termodinámico no podría distinguirse entre objetos de uno y otro tipo salvo por razones de estructura interna. Todos los objetos estarían a la misma temperatura y recibirían y emitirían cantidades iguales de radiación.

En los universos en desequilibrio termodinámico los emisores son fuentes de energía que, a la larga, engrosará el fondo de energía ambiente. El camino de la energía desde las fuentes al fondo puede ser tan escalonado, tan tortuoso y ser caldo de cultivo de tanta complejidad como en la biosfera de nuestro planeta²³. Puede dar lugar a la existencia de sistemas que razonen sobre el significado de una bóveda celeste negra salpicada de puntos de luz.

²¹ Me refiero a objetos que no sufran ningún proceso interno que sea relevante de cara a la emisión de energía. Planetas pequeños como La Tierra podrían ser un tipo de esos objetos. La actividad de su núcleo, la actividad volcánica y la geotérmica, no podrían mantener en su superficie una temperatura muy distinta a la del medio espacial si estuvieran aislados, alejados de un emisor, de una estrella. Asteroides y cometas, cuando estén muy alejados de la estrella que orbiten, serían todavía mejores ejemplos de objetos oscuros que esos planetas. Los objetos como enanas marrones, planetas tipo Júpiter, objetos oscuros del halo galáctico, ofrecen una gama continua entre los objetos brillantes y los oscuros a los que me refiero.

²² Esto es cierto para los objetos completamente oscuros, los que no sufran absolutamente ningún proceso interno que libere energía y no estén próximos a un emisor. Para los que no sean "completamente oscuros" y estén alejados de un emisor, la energía emitida será algo mayor que la recibida y la temperatura algo mayor que la del ambiente.

²³ Los objetos del entorno próximo de un surtidor, como la Tierra, están en una situación especial. En la analogía del recipiente serían como cuencas, pilones en cascadas, remansos en rápidos, donde el agua esparcida por el surtidor cae antes de llegar al fondo del recipiente. Serían como pequeños embalses de energía, siempre repletos de ella porque nunca cesa la aportación de la estrella próxima, siempre la energía fluyendo a su través, rebosando siempre tanta como les llega. Su balance global de energía es nulo, emiten tanta como reciben, pero su temperatura es distinta de la del ambiente universal, no están en equilibrio con él. Los balances de energía locales, estacionales o diarios, por ejemplo en el caso de la Tierra, no tienen por qué ser nulos, reproduciéndose el desequilibrio termodinámico en el interior de esos objetos y, por lo tanto multiplicándose los caminos en el flujo de energía.

SALIENDO DE LA PARADOJA

Recordemos que el origen de la paradoja fue el sorprendente resultado que Cheseaux y Olbers obtuvieron al calcular la luz que debería llegarnos de las estrellas lejanas: el cielo nocturno debería ser tan brillante como la superficie de una estrella típica. Ambos autores recurrieron a una hipótesis "ad hoc" para salvar la evidencia de que el cielo nocturno es oscuro: que el espacio interestelar absorbe luz.

Recordemos que Bondi bautizó "Paradoja de Olbers" a ese resultado, que mostró que la solución de Cheseaux y Olbers no es tal, y que la reformuló como un conflicto entre una evidencia experimental (que las noches son oscuras) y el conjunto de principios implícitos que sostenían el modelo de universo de Cheseaux y Olbers, que, de cara al análisis que seguirá, se puede caracterizar así²⁴:

1. El universo es homogéneo e isótropo. Es decir que presenta el mismo aspecto por todas partes y mirando en cualquier dirección. En relación con la paradoja implica que la densidad media de las estrellas y su luminosidad media no varían a través del espacio. O sea, que las estrellas están uniformemente distribuidas por todo el universo y que todas son similares.
2. El universo es estacionario. Esto quiere decir que el aspecto del universo no cambia con el tiempo. La homogeneidad e isotropía se refieren a la uniformidad espacial. El carácter estacionario se refiere a la uniformidad temporal. En relación con la paradoja implica que la densidad media de las estrellas y su luminosidad media no varían a través del tiempo.
3. A gran escala el universo es estático. Significa que no hay movimientos del universo como un todo, movimientos del universo en conjunto. En relación con la paradoja implica que no existen grandes movimientos sistemáticos de las estrellas aunque pueda haber movimientos locales.
4. El universo es infinito en extensión. Esto es, que avanzando en una dirección dada el recorrido posible es infinitamente largo.
5. El universo está sujeto a las leyes de la Física.

Recordemos también que hemos traducido "en nuestro universo, las noches son oscuras y los días luminosos" por "nuestro universo está en desequilibrio termodinámico entre la materia y la radiación". Recordemos finalmente que disponemos de una analogía útil para razonar sobre equilibrio y desequilibrio entre materia y radiación: la del recipiente y los surtidores.

Hasta aquí el intento de un planteamiento clarificador de la cuestión. Ya es hora pues de intentar responder la cuestión de Bondi: ¿cuál o cuáles de los principios implícitos

²⁴ Siguiendo a Bondi, "Comología", p 29, y a Dickson, "La bóveda de la noche", p 102. Donde Cheseaux y Olbers hablaban de estrellas habría que decir ahora galaxias. Se mantiene ese lenguaje por razones de contexto histórico. Todo lo que sigue seguiría siendo válido haciendo esa sustitución.

que caracterizan el universo de Cheseaux y Olbers deben abandonarse para salir de la paradoja?. O con más generalidad, ¿qué propiedades generales de un universo son compatibles con la de que la materia y la radiación no estén en equilibrio?. ¿Cuáles no lo son y deben ser excluidas? Exploremos con calma las distintas posibilidades.

1 Alguno de esos principios son irrenunciables, no se pueden abandonar

El principio cosmológico de homogeneidad es imprescindible. Se refiere a que nuestro entorno es típico, que las propiedades de nuestro entorno son similares a las de cualquier otra zona del universo. De hecho hemos aplicado el principio de homogeneidad para pasar de una evidencia local, que "las noches son oscuras y los días luminosos", a una afirmación sobre nuestro universo, "que está en desequilibrio termodinámico". El principio de homogeneidad es esencial en cosmología. Las observaciones parecen refrendarlo y sin él no tendría sentido extender al universo como un todo las observaciones realizadas desde una localización concreta.

También parece irrenunciable el principio de que las leyes de la Física se extiendan a todo el universo. Podrían imaginarse universos donde eso no ocurriera pero entonces no tendría sentido la cosmología científica.

2 ¿Se puede salir de la paradoja renunciando exclusivamente al carácter infinito del universo?

En universos finitos, cerrados, como el clásico aristotélico o el copernicano, con un número finito de estrellas fijas, la suma de la luz que llega a la Tierra directamente desde ellas (cálculo de Cheseaux) dependería de cuántas estrellas se considerasen pero no tenía por qué dar lugar a un cielo nocturno brillante.

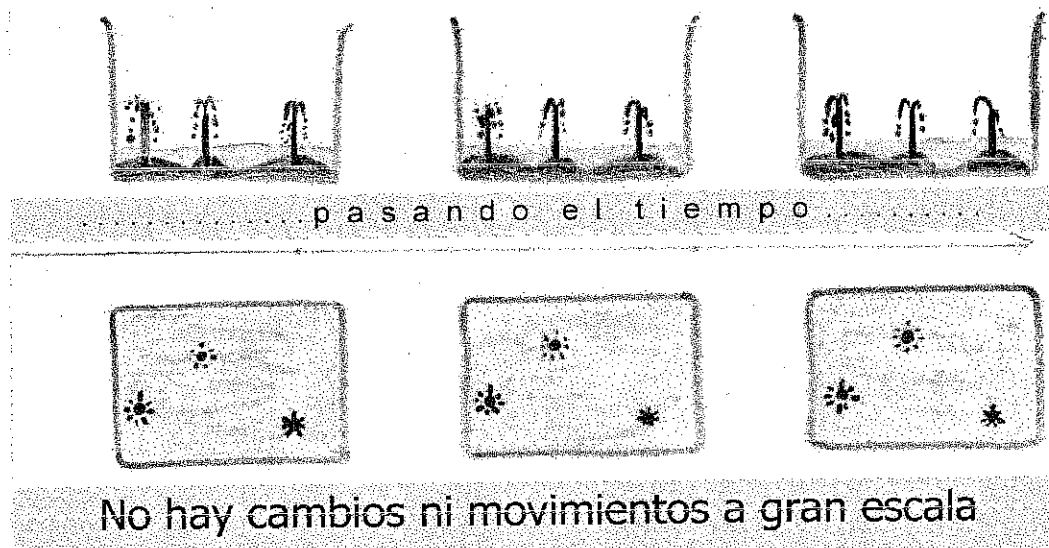
A la misma conclusión se llega siguiendo el argumento de Olbers: si el número de estrellas fuera finito, podría ser que no todas las líneas de visión dirigidas al cielo desde la Tierra encontraran una estrella en su camino. Mirando según ellas veríamos puntos luminosos en el cielo; mirando en cualquier otra dirección se vería oscuro²⁵. En un universo finito podría ser que el cielo de noche se viera como es.

²⁵ Esto debe precisarse: Como la sección de las estrellas es finita, bastaría un número finito de ellas para cubrir la totalidad del cielo. Podría ser entonces que, con un número finito de estrellas, todas las líneas de visión toparan con alguna de ellas. En el Capítulo "Dando vueltas con la paradoja", Actividad 2, "De por qué los árboles no dejan ver el bosque", se dan las indicaciones necesarias para calcular el mínimo número de estrellas que cubrirían el cielo en su totalidad.

Pero en estas formas de razonar, se piensa implícitamente que la luz que nos llega directamente se acaba en nosotros y que la que no hace blanco en la Tierra se pierde. Esas dos ideas subyacentes corresponden a estadios del pensamiento físico en los que la luz no había adquirido el estatus de forma de energía con todas sus propiedades, en particular la de conservación de la energía total en sistemas cerrados. Si esas dos ideas no hubieran estado arraigadas, la paradoja debería haber asaltado a los pensadores del mundo cerrado antiguo porque se habrían dado cuenta de que su universo iría, poco a poco, llenándose de luz.

Porque cuando se considera el futuro de la luz, de los fotones que impactan en la Tierra procedentes de estrellas, o el de los que "se pierden", la conclusión cambia radicalmente: los fotones serán reemitidos por la Tierra, alcanzarían otros objetos del universo o llegarían a sus límites sin poder escapar de él. El continuo flujo de energía vertida por las estrellas en un universo recipiente finito debe acabar llenándolo hasta el nivel de los surtidores, esto es hasta que la temperatura de la radiación "ambiente" sea igual a la de los emisores. Alcanzado ese nivel, el de equilibrio termodinámico, se mantendrá porque a partir de ese momento los emisores absorberán tanta energía como vierten.

Podría argüirse que nuestro universo está en una fase anterior a la de equilibrio termodinámico, que el nivel de energía "ambiente" todavía está subiendo, que por eso todavía las noches son oscuras. Pero, en tal caso, no se trataría de un universo estacionario, como supone el segundo de los principios implícitos de Cheseaux y Olbers. Se trataría de un universo en evolución, en el que el nivel de energía "ambiente", la luminosidad del fondo oscuro de la bóveda celeste iría aumentando. No habríamos salido de la paradoja por renunciar *exclusivamente* al carácter infinito del universo sino por renunciar *a la vez* al carácter infinito y al carácter estacionario.



El universo estacionario y estático es imposible

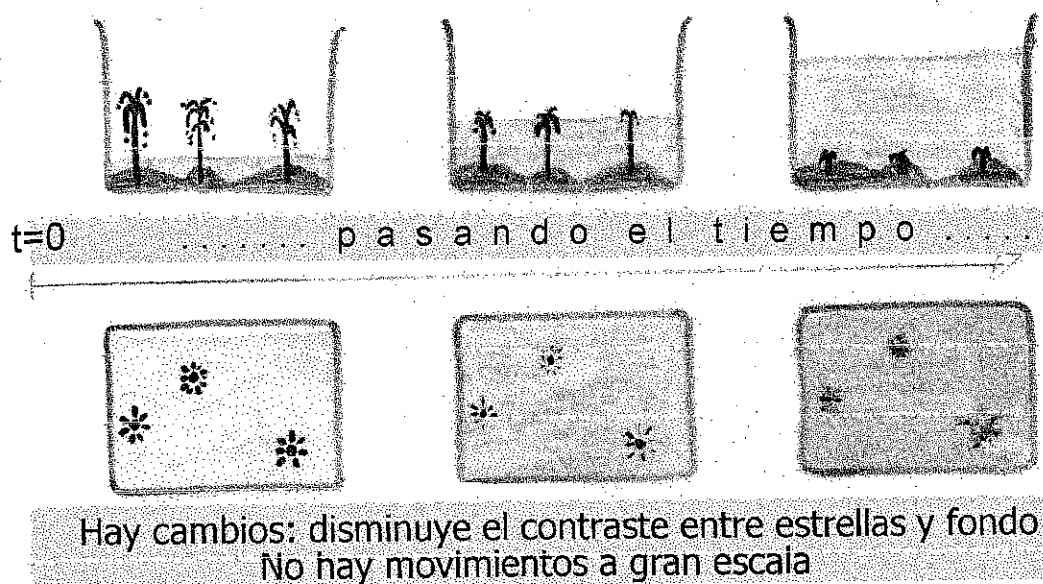
No es posible mantener el nivel de agua en un recipiente en el que los surtidores mantienen su número y caudal a lo largo del tiempo. Por tanto, los universos finitos,

estacionarios y estáticos no pueden estar en desequilibrio termodinámico. No se escapa de la "Paradoja de Olbers" renunciando, *exclusivamente*, al carácter infinito del universo. De otra forma, que el universo sea finito o infinito es irrelevante de cara a que produzca la paradoja y de cara a su resolución.

Recapitulemos. Los principios 1 y 5 son irrenunciables. El 4 es irrelevante. De ahora en adelante analizaremos universos homogéneos, que cumplan las leyes de la Física y que da igual que sean finitos o infinitos. La clave debe estar en los principios 2 y 3.

3 ¿Se puede salir de la paradoja renunciando exclusivamente al carácter estacionario del universo?

Los universos no estacionarios son universos cambiantes, en evolución, universos con historia. En ellos puede cambiar la densidad de estrellas (podrían morir o nacer estrellas por los procesos que describe la Astrofísica), podría a lo largo de sus vidas cambiar la luminosidad, podría cambiar la densidad de energía "ambiente".



En universos no estacionarios estáticos puede haber noches distintas de los días

Los universos no estacionarios estáticos, los que ahora analizamos, podrían, en algún momento de su evolución, encontrarse en fases de desequilibrio termodinámico que, independientemente de cuál fuese su historia, serían de densidad de energía "ambiente" creciente, anteriores a un posible estado de equilibrio termodinámico.

Debe quedar claro que en este momento estamos razonando sobre renunciar, únicamente, al carácter estacionario. Es decir, que estamos pensando en universos estáticos, en recipientes de forma y capacidad fija.

En fin, la respuesta a la cuestión que titula este epígrafe es sí. Pero es una respuesta temporal. Los universos no estacionarios (que no tienen la propiedad 2) y estáticos (que sí tienen la propiedad 3) estarán en desequilibrio termodinámico, tendrán "noches oscuras y días luminosos" un tiempo finito, mientras estén evolucionando, mientras sus desequilibrios los mantengan "vivos". Los universos no estacionarios estáticos en los que se observen "noches oscuras y días luminosos", no pueden ser eternos. Si lo fueran habrían tenido tiempo más que suficiente para haber llegado a la fase de equilibrio y siempre los observaríamos en esa fase. Tienen que tener un origen, un límite de carácter temporal.

4 **¿Se puede salir de la paradoja renunciando exclusivamente al carácter estático del universo?**

No hay reposo en el universo. Todos los objetos celestes están en movimiento relativo. No es al movimiento de cada objeto, a los movimientos locales, al que se refiere esta pregunta. Se refiere a movimientos globales, al movimiento del universo en conjunto. Estos posibles movimientos se reflejarán en movimientos de los objetos que responderán a un patrón universal, que podrán interpretarse como movimientos del universo como un todo.

En la historia de la cosmología se han propuesto, por distintas razones y en distintas circunstancias, dos movimientos globales distintos para el universo. Uno, la rotación de todo el universo; otro, la expansión uniforme del espacio.

Los movimientos universales aparecen en cosmología entre otras posibles soluciones a la inestabilidad gravitatoria de los universos estáticos. El problema es que ningún sistema estático de masas, sea finito o infinito, puede ser estable: el sistema terminaría colapsando en una sola masa.

Esta inestabilidad ya preocupó a Newton¹, en 1693, que no encontró solución satisfactoria. Kant la solventó en 1755 proponiendo rotación universal de su universo de galaxias: así como el equilibrio del Sistema Solar es dinámico y está basado en la rotación, un movimiento análogo de todo el universo permitiría un equilibrio del conjunto, el mantenimiento de las distancias relativas medias.

La inestabilidad gravitatoria también se apareció a Einstein al aplicar su teoría de la gravitación (la Teoría de la Relatividad Generalizada) al universo en conjunto. Einstein, en 1917² escapó de ella introduciendo una constante "ad hoc", que se llamó cosmológica, que introducía la repulsión necesaria para equilibrar el sistema³.

¹ Newton escribió refiriéndose al problema de la inestabilidad: "...no lo creo explicable por meras causas naturales sino que me veo obligado a atribuirlo al consejo y al plan de un Agente Voluntario". (Tomado de Dickson, "La bóveda de la noche", p 85.)

² Albert Einstein, 1917, "Consideraciones cosmológicas a propósito de la Teoría de la Relatividad General". (Tomado de una cita de Smith, "El universo en expansión", p 216)

³ Una vez que se mostró que las ecuaciones de la TRG para el universo admitían soluciones de expansión uniforme del espacio, dejando claro que la constante de Einstein era innecesaria; y cuando esas soluciones, además, vinieron a confluír con los resultados experimentales de Hubble, Einstein consideró haber cometido "el mayor error de su vida" al introducir la constante cosmológica (otras traducciones dicen "el mayor desatino de su vida"). Para poner en perspectiva ese "desatino" conviene tener presente

En 1922, Friedman mostró que universos en expansión uniforme, esto es, universos cuyo espacio se estira, cuya escala aumenta, son compatibles con las ecuaciones cosmológicas de la TRG y solventan el problema de la inestabilidad sin recurrir a la constante cosmológica repulsiva. En los universos en expansión uniforme, observaciones realizadas desde cualquier punto mostrarán que, a gran escala, los sistemas componentes (las galaxias en el universo moderno) se alejan entre sí.

El movimiento global de rotación no es compatible con el principio de homogeneidad e isotropía porque define puntos de propiedades privilegiadas: el punto o el eje alrededor del cual se produce la rotación. El movimiento de expansión uniforme sí es compatible con el de homogeneidad. Es más, se puede probar que es el único movimiento global compatible con él⁴. Por otra parte, el hecho observacional de Hubble, la proporcionalidad entre el corrimiento al rojo de la luz de galaxias lejanas y su distancia al observador, es compatible con la expansión uniforme.

Teniendo todo lo anterior en cuenta, intentaremos ahora responder la pregunta que encabeza este epígrafe traduciéndola por la siguiente:

¿Se puede salir de la paradoja considerando, exclusivamente, que el universo está en expansión uniforme?

En la analogía del recipiente, la expansión uniforme equivale al aumento de tamaño del recipiente al aumentar su escala. Y el efecto de ese aumento de tamaño es contrario al de vertido de agua en el recipiente por parte de los surtidores, disminuyendo el nivel de agua en él.

En el universo, la expansión produce el efecto de disminuir la densidad de energía "ambiente", contrarresta el trabajo de llenado que hacen los emisores. Reeves⁵ escribe: "La luz de las estrellas se expande en un espacio cada vez más vasto. [...] ¿Cómo rellenar una bañera que aumenta de volumen continuamente?". Y Bondi⁶ se refiere a la expansión como "canal de desagüe cósmico".

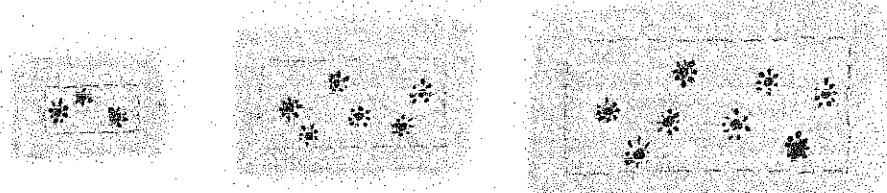
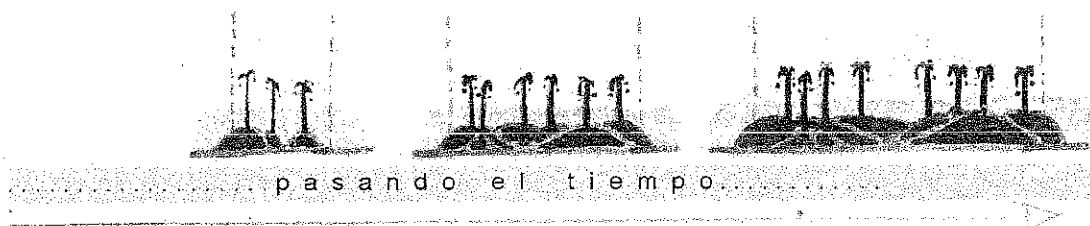
La relación entre la tasa de emisión y la de expansión estaría relacionada con el futuro del universo. El universo se estaría acercando al equilibrio si la tasa de expansión fuera menor que la de emisión; se estaría alejando del equilibrio si la expansión fuera dominante; y permanecería en desequilibrio si las dos tasas se compensaran.

que en su trabajo de 1917, al atreverse a "especular acerca del tamaño y naturaleza del universo físico, [...] fundó, efectivamente, la moderna cosmología matemática" (Smith, "El universo en expansión", p216). Por otra parte, resultados de recientes observaciones que parecen probar que la expansión del universo es acelerada, podrían justificar la introducción de la constante cosmológica de repulsión. (Barrow, "El libro de la nada", pp 195-199).

⁴ En rigor, hay otro movimiento compatible con la homogeneidad: la contracción uniforme. No la consideramos porque precipitaría el colapso gravitatorio. Desde el punto de vista de las soluciones a la "Paradoja de Olbers" la contracción no es una salida sino todo lo contrario: un universo que reduce su tamaño alcanzará altos niveles de "energía ambiente" aún sin aportaciones de los emisores.

⁵ Hubert Reeves, "Paciencia en el azul del cielo", p 69).

⁶ Bondi, "Cosmología", p 34.



No hay cambios: ni de contraste estrellas/fondo ni de "densidad de estrellas"
Hay movimientos a gran escala: se estira el espacio

En universos estacionarios en expansión puede haber noches distintas de los días

Esta última posibilidad es la que nos interesa porque muestra la posibilidad de existencia de universos en desequilibrio termodinámico, no estáticos y estacionarios. Muestra la posibilidad de que recipientes finitos o infinitos en expansión mantengan el nivel de agua. Para ello debe ir aumentando el número total de surtidores del universo, manteniéndose su densidad.

Así pues la respuesta a la cuestión que titula este epígrafe es sí⁷. Es posible salir de la "Paradoja de Olbers" abandonando únicamente el carácter estático del universo. Y como la respuesta se refiere a un universo estacionario es válida para siempre. Los universos no estáticos (que no tienen la propiedad 3) y estacionarios (que sí tienen la propiedad 2), que por las razones que fueren estén en desequilibrio termodinámico, lo estarán y lo habrán estado siempre.

Universos así tienen, tendrán y habrán tenido "noches oscuras y días luminosos" eternamente. Por ser estacionarios, su desequilibrio, su carácter "vivo", será eterno⁸.

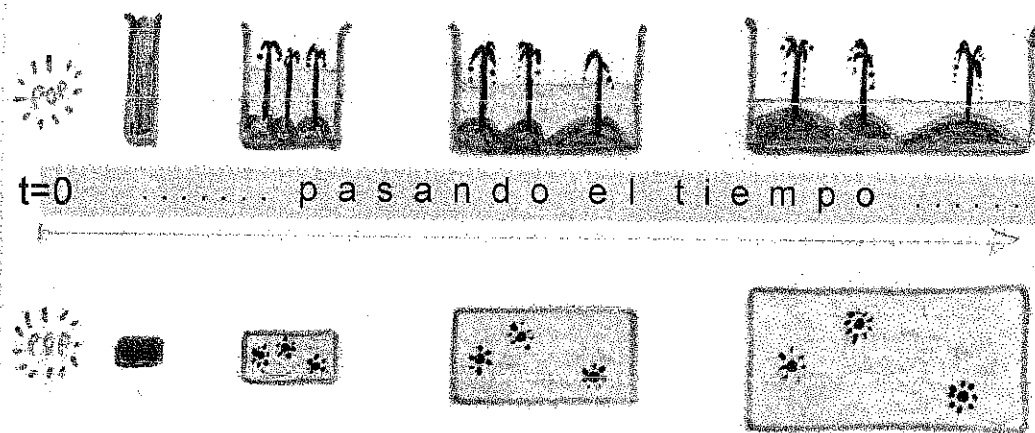
⁷ La cosa no es tan sencilla. Los modelos de universos estacionarios en expansión necesitan introducir mecanismos compensatorios para la variación de la densidad de materia (mecanismos para la aparición continua de nuevos surtidores). Así el modelo del Estado Estacionario (SST) propone generación continua de materia, átomos de hidrógeno al ritmo preciso (muy pequeño) y aleatoriamente por todo el espacio. Así pues, el modelo, al menos en alguna de sus versiones, viola el principio de conservación de la energía. El modelo no explica cómo se genera la materia pero, en ese aspecto, no se distingue de modelos eternos en los que toda la materia haya existido siempre o de aquellos universos con origen en los que toda la materia se genera de una sola vez.

⁸ El modelo SST de Bondi, Hoyle y Gold, de 1948, es de este tipo. El modelo BB, que también es compatible con la oscuridad de la noche, lo superó en la explicación de otras observaciones de carácter cosmológico, y por eso fue preferido.

5 También se puede salir de la paradoja renunciando al carácter estacionario y al estático conjuntamente

Es claro que, por doble razón, los universos no estacionarios y no estáticos son compatibles con la existencia de "noches oscuras y días luminosos".

Por ser no estacionarios en sentido global deben estar en desequilibrio termodinámico, deben estar en evolución, deben tener historia, origen temporal. Pero por estar en expansión su evolución puede ser de dos sentidos: aumentando o disminuyendo la densidad de energía "ambiente". El conocimiento de la historia del universo hasta su estado actual permitiría fundamentar predicciones sobre su evolución.



Hay cambios: de contraste estrellas/fondo y de "densidad de estrella"
Hay movimientos a gran escala: se estira el espacio

En universos no estacionarios en expansión puede haber noches distintas de los días

El modelo dominante que se propone para nuestro universo, el que más observaciones de carácter cosmológico ha explicado, el modelo Big Bang, es del tipo que estamos analizando. Según el modelo, nuestro universo ya pasó por un estado de equilibrio entre materia y radiación, el estado que se rompió cuando el universo se hizo transparente a la radiación, cuando los fotones pudieron viajar por el universo sin interaccionar prácticamente con la materia, sin ser reabsorbidos inmediatamente después de su emisión. La radiación de fondo de microondas es el resto de aquella última radiación en equilibrio con la materia².

² El ajuste entre las explicaciones teóricas del modelo Big Bang acerca de las propiedades de esa radiación (su temperatura y su espectro de cuerpo negro) y las medidas de esas propiedades es espectacular. Ese ajuste es uno de los activos más importantes del modelo Big Bang.

Reeves¹⁰ señala que "aquel cielo inicial es deslumbrante. Es la expansión del universo la que nos hace pasar de ese período de cielo brillante al período actual. Es estrictamente sobre esa base que la expansión es responsable de la noche".

Por lo tanto, según el modelo Big bang para nuestro universo, la expansión consiguió disminuir la densidad de energía "ambiente" en una situación de equilibrio, generando el desequilibrio actual. Es de esperar entonces, según el modelo, que la evolución de nuestro universo no estacionario y en expansión siga siendo en ese sentido, acentuándose el desnivel de densidad de radiación entre emisores y "ambiente". Mientras la expansión dure, claro.¹¹

6 Un resumen de las posibilidades analizadas

Los cuadros siguientes utilizan la analogía del recipiente para resumir este capítulo. El primer cuadro se refiere al universo de Cheseaux y Olbers, el que conduce a la paradoja. Los siguientes muestran universos donde la paradoja no se da.

Universos estacionarios estáticos (Conducen a la paradoja)

Tipo de recipiente	Causa del equilibrio en el recipiente	Causa del equilibrio en el universo	Universo correspondiente	Comentarios
Recipiente rígido, de tamaño finito o infinito.	El nivel de agua en el recipiente iguala el de los surtidores.	Los objetos emisores vierten al universo tanta energía como reciben.	Universo finito o infinito, en estado de equilibrio termodinámico permanente.	No evoluciona. Es un universo sin historia, eterno o no. Sus noches serán siempre tan luminosas (o tan oscuras) como sus días.

¹⁰ Reeves, Paciencia en el azul del cielo, p 69.

¹¹ Si nuestro universo continuará siempre en expansión, o, si por el contrario, llegará un tiempo de contracción del espacio, depende de quién venza en la disputa entre el "impulso" de expansión y la atracción gravitatoria. Un factor clave que, en análisis clásicos, inclina la balanza en uno u otro sentido es la densidad de materia del universo. En los universos cuya densidad mayor que la que se define como "densidad crítica", gana la gravitación, y en el futuro se llegará a una fase de contracción. En los universos de densidad menor o igual que esa, la gravitación no podrá detener la expansión nunca. Pero los recientes resultados del MAP, estudiando la radiación de fondo de microondas, son consistentes con la preponderancia de la materia o energía oscura sobre la materia típica (96% frente a 4%) y con el carácter acelerado de la expansión. Eso garantizaría la persistencia del desequilibrio termodinámico en nuestro universo y la seguridad de que, en el futuro, no nos espera un "horno de Olbers".

Universos no estacionarios estáticos (Escapan de la paradoja)

Tipo de recipiente	Causa del desequilibrio en el recipiente	Causa del desequilibrio en el universo	Universo correspondiente	Comentarios
Recipiente rígido, de tamaño finito o infinito.	El nivel de agua en el recipiente no alcanza el de los surtidores todavía. Lo alcanzará más tarde.	Los objetos emisores no han vertido suficiente energía al universo o no se han agotado todavía.	Universo finito o infinito, en desequilibrio termodinámico y evolucionando hacia el equilibrio.	Tiene origen temporal, son universos con historia. Tendrán noches oscuras y días luminosos mientras esté en desequilibrio termodinámico.

Universos no estáticos estacionarios en desequilibrio (Escapan de la paradoja)

Tipo de recipiente	Causa del desequilibrio en el recipiente	Causa del desequilibrio en el universo	Universo correspondiente	Comentarios
Recipiente que aumenta de tamaño por cambio de su escala, finito o infinito.	El aumento de tamaño absorbe el aumento de nivel de agua en el recipiente producido por los surtidores.	La expansión compensa el aumento de la densidad de energía "ambiente" producido por los emisores.	Universo finito o infinito, en expansión, que no cambia su estado de desequilibrio termodinámico permanente.	Este universo no evoluciona. Es un universo sin historia, eterno o no. Sus noches serán oscuras y sus días luminosos siempre.

Universos no estáticos y no estacionarios (Escapan de la paradoja)

Tipo de recipiente	Causa del desequilibrio en el recipiente	Causa del desequilibrio en el universo	Universo correspondiente	Comentarios
Recipiente que aumenta de tamaño por cambio de su escala, finito o infinito.	El caudal vertido por los surtidores y el ritmo de expansión del recipiente determinan si el nivel del agua crecerá o disminuirá.	La expansión disminuye la densidad de energía "ambiente". Los emisores la aumentan. Ambos efectos no se compensan.	Universo finito o infinito, en expansión, en estado de desequilibrio termodinámico que, según su historia, evolucionará acentuándose o atenuándose.	Tiene origen temporal e historia. En el modelo Big bang la expansión es de tal tipo que parece garantizar un futuro con noches oscuras y días luminosos.

DANDO VUELTAS A LA PARADOJA

A lo largo de la historia de la cosmología se han ofrecido varios planteamientos y muchas soluciones para la "Paradoja de Olbers". Este capítulo propone reflexionar sobre alguno de tales planteamientos y soluciones.

El capítulo es un conjunto ordenado de actividades que pueden ser útiles para trabajar con alumnos sobre la paradoja, bien sea para explotar un planteamiento como el que se ha ofrecido en capítulos anteriores, bien para introducirlo, bien para elaborar presentaciones alternativas de la paradoja.

De acuerdo con eso, la siguiente colección de actividades se concibe como una carta a partir de la que los profesores puedan confeccionar el menú adecuado para sus alumnos. Y no se piensa sólo en alumnos de Astronomía sino también de Matemáticas, Física o Filosofía para los que la paradoja pueda tener un interés puntual en el contexto de esas asignaturas.

Para facilitar a los profesores la confección del menú, las actividades se siguen de algunas sugerencias para su explotación didáctica.

ACTIVIDADES

1.-LOS CÁLCULOS DE CHESEAU

El texto que se presenta en esta actividad es una traducción del texto original en francés de Jean Philippe Loys de Cheseaux "Sur la force de la lumiere y su propagación en el éter, y sobre la distancia a las estrellas fijas", publicado en Lausanne en 1744, tal como aparece en "La bóveda de la noche", de F.P. Dickson, edición de Fondo de Cultura Económica de 1975.

Es el primer texto conocido dedicado expresamente a tratar el problema que, recientemente, se ha dado en llamar "Paradoja de Olbers".

Trabajo que se propone

Leer el texto cuidadosamente, tomando las notas necesarias para:

1. Hacer un dibujo representativo del universo de Cheseaux, dibujando las capas a las que se refiere y colocando en ellas un número de estrellas proporcional a sus radios.
2. Reproducir los cálculos de Cheseaux pero utilizando expresiones matemáticas. Llamar L a la luz emitida por cualquier estrella; R_i al radio de la capa i ; E_i a la luz emitida por la capa i ; T_i a la luz recibida en la Tierra desde la capa i .
3. Escribir una síntesis de 10 a 15 líneas que no contenga expresiones matemáticas.
4. Criticar la solución de Cheseaux, señalando por qué no puede ser tal.

"Es una proposición demostrada en Óptica que si todas las estrellas fijas fueran soles iguales y parecidos al nuestro, así como colocadas a la misma distancia, aparecerían bajo un mismo diámetro y con luminosidad igual a la suya, esto es, que nos enviarían la misma cantidad de luz; está demostrado, digo, que la cantidad de luz que cada uno de ellos nos enviaría, situado a la distancia de la Tierra que fuera, estaría, en relación con la del Sol, en la proporción directa del cuadrado de su diámetro aparente al cuadrado del del Sol, o en la proporción inversa del cuadrado de su distancia al cuadrado de la del Sol.

Concibiendo ahora todo el espacio estrellado dividido en capas esféricas, concéntricas, y de un grosor aproximadamente constante, igual al torbellino del Sistema Planetario de cada estrella; y suponiendo que el número de estrellas contenido en cada capa es aproximadamente proporcional a la superficie de la capa, o sea, al cuadrado de la distancia al Sol, tomado como centro de todo el espacio estrellado; y suponiendo, en fin, los diámetros verdaderos de cada estrella aproximadamente iguales al del Sol, como he supuesto al principio, se encontrará que la cantidad de luz que nos envían las estrellas de cada capa es proporcional a la suma de los cuadrados de sus diámetros aparentes, esto es, proporcional al número de estrellas de cada capa multiplicado por el cuadrado del diámetro aparente de cada una o, por lo que acabo de decir,

proporcional al cuadrado de la distancia de cada capa al Sol dividido por ese mismo cuadrado; y, en consecuencia, esta cantidad de luz es la misma para todas las capas.

De aquí se sigue que si el espacio estrellado es infinito [...], cada punto del cielo nos aparecería tan luminoso como un punto del Sol [...]. La enorme diferencia que se encuentra entre esta conclusión y la experiencia hace ver que, o la esfera de las estrellas fijas no es infinita [...] o que la fuerza de la luz decrece en mayor proporción que la razón inversa del cuadrado de la distancia. Esta última suposición es bastante aceptable?, requiere solamente que el espacio estrellado esté lleno de algún fluido capaz de interceptar, aunque sea poco, la luz. Con que este fluido fuera 330.000.000.000.000.000 veces más transparente o más enrarecido que el agua, bastaría para debilitar la fuerza de la luz en una treintatresava parte a su paso por cada capa, y para absorber, poco a poco, toda la luz que nos es enviada por todas las estrellas que están más allá de las capas vecinas de nuestro torbellino, hasta el punto de reducir la de todo un hemisferio a la 430 millonésima parte de la cantidad de luz que recibimos del Sol, o a una cantidad de luz solamente 33 veces mayor que la que recibimos del globo oscuro de la Luna nueva iluminado por la Tierra."

Sugerencias didácticas

- La clave del cálculo es que N_i (número de estrellas por capa) y E_i (luz total emitida por una capa) son proporcionales a R_i^2 , concretamente:

$$N_i = K4\pi R_i^2 \quad \text{y} \quad E_i = LN_i = LK4\pi R_i^2$$

Y en cambio la luz recibida en la Tierra procedente de una estrella es inversamente proporcional a su distancia a nosotros, es decir, inversamente proporcional a R_i^2 . Entonces:

$$T_i = N_i L / R_i^2 = 4\pi LK$$

Que es independiente de R_i , esto es, la misma para todas las capas que se consideren.

- El párrafo final de la lectura es interesante para ver en qué términos propone Cheseaux su solución de absorción de luz por el medio interestelar pero los cálculos que se plantean en ese párrafo no tienen interés en relación con la cuestión central de la paradoja.

ACTIVIDADES

2.-DE POR QUÉ LOS ÁRBOLES NO DEJAN VER EL BOSQUE

"Imaginemos que estamos en un bosque [...] de árboles grandes y espaciados. Los árboles visibles que nos rodean, quizás unos cientos, se solapan entre sí y se confunden en un fondo continuo. Este fondo nos rodea como un muro circular; dentro están los árboles visibles del bosque, y fuera, árboles no visibles.

[...] ¿Cuán lejos podemos ver en el bosque? En algunas direcciones la distancia es pequeña y los árboles más próximos interceptan nuestra línea de visión. En otras direcciones horizontales la distancia es mayor y nuestra línea de visión penetra profunda hacia el fondo del bosque. Contemplando todo alrededor veremos una distancia media que llamaremos "límite de fondo". Este "límite de fondo", conocido en otros contextos como "camino libre", es la distancia media que recorrería una flecha en vuelo antes de golpear un árbol."

Así plantea Harrison²⁶ la "analogía del bosque", que es útil para pensar sobre la "Paradoja de Olbers" sustituyendo bosque por universo y árboles por estrellas.

Calculemos el "límite de fondo" en el bosque llamando n al número de árboles por unidad de área (la "densidad de árboles", supuesta igual para cualquier zona del bosque); r a una distancia cualquiera desde el observador hacia los confines del bosque; g al grosor del tronco (su diámetro, suponiendo todos los árboles similares); L al "límite de fondo"²⁷:

Consideremos capas (coronas circulares) de 1 m de ancho alrededor del observador. En una capa situada a distancia r , de área $2\pi r \cdot 1$, habrá $2\pi r \cdot 1 \cdot n$ árboles que cubrirán $2\pi r \cdot 1 \cdot n \cdot g$ metros de la circunferencia total de esa capa, es decir una fracción $n \cdot g$ de la circunferencia total. Y considerando todas las capas que hay hasta la de radio r (habrá r capas, pues las hemos considerado de 1 m de ancho), los troncos de todas esas capas cubrirán entre todos una fracción $n \cdot g \cdot r$ del total del campo de visión del observador.

Para una distancia $r=L$, la fracción cubierta debe ser 1, por definición de L . Así pues, de que $n \cdot g \cdot L$ debe ser igual a 1 se sigue que L debe ser igual a $1/n \cdot g$.

Por lo tanto $L=1/n \cdot g$ es la distancia a la que se sitúa el "límite de fondo", la distancia tal que los árboles situados más allá no se ven, ocultos por los troncos de los que están más acá de esa distancia. Es la distancia a partir de la cual los árboles no dejan ver el bosque.

Y el número de árboles que no dejan ver el bosque será: $N=\pi L^2 \cdot n=\pi/n \cdot g^2$

²⁶ Edward Harrison, "Darkness at night", p 86. El párrafo es una traducción del original en inglés. Harrison atribuye a Giordano Bruno la primicia en el uso de la analogía aunque no le sirviera para llegar a conclusiones correctas.

²⁷ En el cálculo que sigue se considera una anchura finita de 1 m para cada capa, con el fin de simplificar los cálculos. Un procedimiento riguroso considerando un espesor diferencial para cada capa e integrando para la distancia r conduce al mismo resultado. También se supone que no hay solapamiento entre los árboles, que ninguno tapa a otro ni siquiera parcialmente.

1. Calcular, procediendo por analogía, una expresión similar para el "límite de fondo" en el universo estático infinito de Cheseaux y Olbers (podría llamarse "universo bosque"), llamando ahora n al número de estrellas por unidad de volumen (la "densidad de estrellas", supuesta igual para cualquier zona del universo); r a una distancia cualquiera desde el observador hacia los confines del universo; g a la sección de las estrellas, suponiendo todas ellas similares); L al "límite de fondo".
2. Tomando los que se dan a continuación, calcular la distancia a la que estaría ese "límite de fondo" en nuestro universo si fuera infinito y estático. Calcular también cuántas estrellas habría más acá del muro, las que llenarían el cielo de luz y no nos dejarían ver más allá.
 - Considerar 10 estrellas en cada cubo de 10 años-luz de lado. 10 es, precisamente, el número de estrellas que hay en una vecindad de 10 años-luz del Sol. Tomar entonces $n=1/10^2$ estrellas/año-luz³.
 - La sección del Sol es aproximadamente $1.5 \cdot 10^{12}$ km² pues su radio es de unos $7 \cdot 10^5$ km. Dado que el Sol es una estrella mediana, se puede tomar esa sección como media para todas las estrellas.

El cálculo es estimulante: el resultado es la distancia a la que las estrellas situadas más cerca no dejan ver estrellas situadas más allá. En el bosque era la distancia a la que se situaba el muro, mejor la empalizada, que ocultaba el resto. En el universo el muro es un muro de luz, el que Edgar Allan Poe llamó "muro de oro".
3. El resultado del cálculo es $L=5.9 \cdot 10^{15}$ años-luz. Esa es la distancia a la que se encuentra el muro de luz. Pero es evidente que el "muro de oro" de Poe no existe. Si existiera todo el cielo sería tan brillante como el Sol, de día y de noche. Y nuestras noches son oscuras. Discutir el significado del resultado del cálculo a la luz del siguiente dato: en el modelo de universo más aceptado en la actualidad, el modelo no estacionario y en expansión del Big Bang, la edad del universo se estima en torno a $14 \cdot 10^9$ años²⁸. ¿Explica eso la oscuridad de la noche, la no existencia de muro de luz? ¿O es que existe y eso explica que no se ve?

Sugerencias didácticas

- En el modelo Big Bang, la edad del universo impone un límite superior para las distancias desde las cuales se puede recibir luz o radiaciones o señales de la clase que sean. Una estimación simple de esa distancia es multiplicar la edad del universo por la velocidad de la luz. En el contexto del modelo, se dice que no ha habido tiempo suficiente para que nos llegue luz de más allá de esa distancia²⁹.

²⁸ Recientes resultados de análisis de inhomogeneidades del fondo cósmico de microondas (Proyecto MAP) dan para la edad del universo $13.7 \cdot 10^9$ años.

²⁹ En modelos de universos estacionarios en expansión tampoco llega luz más allá de esa distancia pero no es por falta de tiempo sino porque la velocidad de alejamiento de las estrellas situadas a esa distancia es tan grande que las sume en la invisibilidad. Y esto, no porque no pueda llegarnos sino porque el corrimiento al rojo cosmológico, la continua expansión de los fotones durante un tiempo de camino tan largo, los torna oscuros hasta el límite de hacerlos no observables.

ACTIVIDADES

3.-DERRIBANDO EL MURO DE ORO

Edgar Allan Poe, en "Eureka: A prose poem", publicado en Nueva York en 1848, escribía³⁰:

Siendo la sucesión de estrella sin fin, el fondo de la bóveda celeste nos presentaría una luminosidad uniforme, [...] puesto que no habría absolutamente ningún punto, en todo ese fondo, en el cuál no existiera una estrella. El único modo, por tanto, [...] en que podríamos explicar los vacíos que nuestros telescopios encuentran en innumerables direcciones, sería suponiendo que la distancia al invisible fondo luminoso es tan inmensa que ningún rayo procedente de él ha podido alcanzarnos todavía.

En él apunta que se puede solucionar la "Paradoja de Olbers" si se considera que la velocidad de la luz es finita, que aunque el número de estrellas existentes fuera infinito, no podemos recibir luz de estrellas situadas a una distancia tal que su luz tarde en llegar a nosotros más que el tiempo que lleven existiendo. Así, la solución de Poe aparece al introducir aspectos evolutivos del universo. La solución de Poe es cualitativa. La primera solución cuantitativa basada en la idea de Poe es de Lord Kelvin en 1904³¹.

Trabajo que se propone

La edad media de las estrellas del tipo del Sol puede tomarse como $10 \cdot 10^9$ años y el límite de fondo (la distancia al "muro de oro") definido y calculado en la Actividad 3 es $5'9 \cdot 10^{15}$ años-luz. El número de estrellas que habría más acá del muro también calculado en la Actividad 3, resultaba ser del orden de 10^{46} . Ese número se calculó considerando una densidad de estrellas de 1 estrella por cada 10^2 años-luz³. La energía que emite el Sol cada segundo es $4 \cdot 10^{26}$ Julios, y puede tomarse como típica.

1. A partir de esos datos, y suponiendo que todas las estrellas del universo empezaron a brillar a la vez, hace $14 \cdot 10^9$ años³², calcular:
 - El rango de distancias entre las que se encuentran las estrellas de las que estamos recibiendo luz ahora.
 - El número de estrellas que hay en esa capa.
 - La energía recibida en la Tierra de las estrellas de esa capa.
2. Ahora se trata de ver si los resultados anteriores derriban "el muro de oro":

³⁰ El texto que sigue es una traducción del texto de Poe, tal como figura en Harrison, "Darkness of night", p 148.

³¹ El artículo de Lord Kelvin, "On ether and gravitational matter through infinite space", Londres, 1904. se puede encontrar reproducido en Harrison, "Darkness at night", Apéndice 5, pp 227-228.

³² El análisis de resultados del Proyecto MAP, ya mencionado, da $0'2 \cdot 10^9$ años para la edad del universo cuando se formaron las primeras estrellas.

- Calcular la fracción de estrellas de la que se recibe luz ahora respecto a las que eran necesarias para formar el "muro de oro". Esa fracción será también la relación entre la parte iluminada (allí donde se ven estrellas) y el total de la esfera celeste (la parte donde no se ven estrellas es la que se ve oscura).
 - Calcular la misma fracción pero respecto a la energía.
3. A la vista de los cálculos realizados, escribir unas pocas líneas que sinteticen los resultados y las claves de la solución de Poe a la "Paradoja de Olbers".
4. Los diagramas espacio-tiempo o de Minkowski se construyen con dos ejes cartesianos, uno horizontal que representa el espacio tridimensional en unidades ct (c es la velocidad de la luz) y otro vertical que representa el tiempo. El cruce de los dos ejes representa el "aquí-ahora". Puntos situados bajo el eje espacial son del pasado y sobre el eje son del futuro. Líneas verticales (para objetos en reposo respecto al observador) o inclinadas (para objetos en movimiento respecto al observador) representarán las historias de los objetos y se llaman "líneas de universo". Las estrellas, consideradas en reposo respecto al observador, tienen líneas de universo verticales. Los rayos de luz, cuya velocidad es c para cualquier observador, tienen líneas de universo inclinadas 45° respecto de la vertical y no las habrá más inclinadas porque la velocidad de la luz es un límite superior de velocidades. Entre las verticales y las de la luz se encontrarán todas las líneas de universo posibles. Las líneas horizontales representan estados del universo en el momento que marca su corte con el eje de tiempos.
- En un diagrama espacio-tiempo, trazar las líneas de universo de la luz que nos llega de las estrellas aquí y ahora.
 - Marcar en el eje espacial el rango de distancias a las que se encuentran las estrellas de las que recibimos luz aquí-ahora.
 - Utilizar el diagrama para darse cuenta de que la luz que recibimos "aquí-ahora", procedente de distintas estrellas, se emitió en distintos momentos de la historia del universo.
 - A la vista del diagrama resultante, escribir unas líneas que desarrollen la idea "luz que llega de lejos llega del pasado" o "mirar lejos es mirar atrás"

Sugerencias didácticas

- El rango de distancias entre las que se encuentran las estrellas de las que estamos recibiendo luz ahora se estima de una manera simple (el cálculo correcto debería hacerse en el contexto de la Teoría de la Relatividad Generalizada) multiplicando edades de estrellas por la velocidad de la luz. Los cálculos realizados en esta actividad son estimativos.
- El diagrama de Minkowski que se propone tampoco tiene en cuenta la TRG ni la expansión del universo. Conviene hacer notar que no se ajusta a la idea de Big Bang señalando que en modelos de universos en expansión las líneas de universo de las estrellas no serían verticales y paralelas entre sí sino divergentes, aumentando las distancias entre ellas con el tiempo.

ACTIVIDADES

4.-DOS ENFOQUES ANTÍPODAS

Edward Harrison, en "Darkness at night", de 1987, la obra más exhaustiva sobre la "Paradoja de Olbers", al hilo de los resultados de los cálculos de Kelvin, equivalentes a los obtenidos en la Actividad 3, resalta que con los datos manejados, los que son reales en nuestro universo, se está muy lejos de caer en la situación de cielo brillante a la que conducían los cálculos de Cheseaux y Olbers.

*"Debemos notar que su solución [de Kelvin] es suficiente, pues si se puede demostrar que el cielo de noche es necesariamente oscuro en un universo transparente, uniformemente poblado de estrellas y estático, entonces todas las variantes de este primitivo modelo estándar que recurren a la absorción, [...] o expansión, simplemente consiguen un estado de mayor oscuridad en un universo ya oscuro"*³³.

Se lamenta de que *"la historia del misterio de la oscuridad de la noche ofrece muchas discusiones y soluciones propuestas, pero pocos cálculos"*³⁴, y ofrece el siguiente, que llama "solución de la energía":

"Aniquilemos toda la materia del universo y convirtámosla en radiación térmica. [...] Para nuestro asombro, encontramos que la radiación resultante tiene una temperatura de solamente unos 20 K. [...] Esta temperatura es mucho menor que los 6000 K de la superficie del Sol. Así, cuando toda la energía del universo que se encuentra en forma de materia se transforma en radiación térmica, falta todavía mucho para crear el intensamente brillante cielo estrellado temido por Halley, Cheseaux, Olbers y muchos otros astrónomos. Independientemente de que el universo se expanda, se contraiga o permanezca estático, un brillante cielo estrellado requiere mil millones de veces más energía que la que se puede obtener por el drástico procedimiento de convertir toda la materia en radiación."

*"La solución de la energía muestra que no hay suficiente energía en el universo para crear un cielo brillante. Esta solución supera todas las soluciones propuestas. Si el universo carece de la energía necesaria para crear el muro de oro de Poe, entonces, obviamente todos los argumentos que implican otras consideraciones tienen una importancia secundaria. En ninguna circunstancia puede el cielo ser brillante por la luz de las estrellas en un universo como el nuestro. Las estrellas están demasiado separadas unas de otras para llenar el espacio con radiación térmica hasta la temperatura de sus superficies"*³⁵.

"La absorción, [...] la expansión y cualquier otra modificación de un universo estático y uniforme como aquel en el que fue concebido el enigma no pueden ser la respuesta. Un universo estático de estrellas ampliamente separadas de edad finita es ya oscuro a causa de la velocidad finita de la luz. Podemos mostrar con argumentos modernos que estas consideraciones conducen a la conclusión que el universo, tal como está constituido en el presente, carece de la energía suficiente para crear un cielo brillante."

³³ Edward Harrison, "Darkness at night", p 163

³⁴ Edward Harrison, "Darkness at night", p 252

³⁵ Edward Harrison, "Darkness at night", p 196 y 197

La mayoría de las versiones de la solución de la absorción violan de forma patente la conservación de la energía. [...] La expansión tampoco puede ser la respuesta excepto en un universo, el del estado estacionario [en expansión], que viola la conservación de la energía”³⁶

De la rotundidad y sencillez de la solución que Harrison propone parece nacer la sensación de que todas las reflexiones anteriores sobre la “Paradoja de Olbers” son improductivas, inútiles. Por eso, para contrastarla, se propone leer también el texto que sigue, en las antípodas del de Harrison, del que es autor Jayant Narlikar, un cosmólogo interesado en las posibilidades explicativas del Modelo del Estado Estacionario (SST) de Bondi y Gold:

“La paradoja de Olbers se puede considerar también desde un punto de vista termodinámico. [...] En la jerga termodinámica las estrellas constituyen las “fuentes” [de energía] y el resto del universo los “sumideros”. La radiación de las estrellas traslada constantemente calor desde la fuente al sumidero, hasta que reina en todos los lugares la misma temperatura. Esto es posible en un universo estático infinitamente viejo.

En un universo en expansión, por otro lado, el proceso de traslado de calor, desde la fuente al sumidero, no alcanza a completarse tan fácilmente, puesto que la continua expansión aumenta el volumen del sumidero.

Esta es la misma idea que condujo a Bondi y Gold a deducir la expansión del Universo a partir del principio cosmológico perfecto (PCP) [³⁷]. El PCP exige que el Universo tenga el mismo aspecto en todas las épocas, lo que permite tres posibilidades. 1) que el Universo sea estático, 2) que se contraiga siempre, o 3) que el universo esté siempre en expansión. En los casos 1) y 2) se alcanza la situación discutida por Olbers³⁸. [...] Bondi y Gold se dieron cuenta de que podemos eliminar los casos 1) y 2) a partir, únicamente, de las observaciones del brillo del cielo, quedando tan sólo el caso 3). Dado que el caso tres es consistente con la oscuridad del cielo observada y siendo la única posibilidad, tiene que ser la correcta. Nótese que este argumento deduce la expansión del Universo sin realizar observaciones del tipo de las de Hubble para galaxias distantes y sin teoría matemática de la gravitación. Emplea únicamente el PCP y el hecho de que el cielo sea negro de noche, lo que ilustra el poder deductivo del PCP.”³⁹

³⁶ Edward Harrison, “Darkness at night”, p 203.

³⁷ El Principio Cosmológico es el de homogeneidad e isotropía: el universo debe presentar el mismo aspecto en todos sus puntos y en todas direcciones en un tiempo dado. El Principio Cosmológico Perfecto extiende la homogeneidad e isotropía a todos los momentos: un estado del universo no se distinguirá de otros anteriores o posteriores.

³⁸ Ver el capítulo “Saliendo de la paradoja” si se quiere ver una explicación de esta afirmación.

³⁹ Jayant Narlikar, “La estructura del universo”, pp 202 y 203.

Se proponen dos alternativas:

1. Comentar los párrafos seleccionados del texto de Harrison. La lectura del texto de Narlikar debería servir para provocar el comentario.
2. Pedir voluntarios para defender cada uno de los enfoques en un debate: el empírico de Harrison o el enfoque de principios de Narlikar. Tanto unos como otros deben leer los dos textos antes de adherirse a uno de ellos y recoger argumentos para defenderlos.

Sugerencias didácticas

La clave del debate posible entre los dos enfoques es que el de Narlikar considera posibilidades que son puramente lógicas, se hace en el contexto de un modelo, el SST, con escasos apoyos en las observaciones y atiende exclusivamente al hecho de la oscuridad de las noches para seleccionar posibilidades.

Ese planteamiento es útil porque permite mostrar la importancia que, en Cosmología, tienen los principios a la hora de establecer conclusiones a partir de hechos observados.

El enfoque de Harrison, en cambio se refiere a nuestro universo, no a posibilidades lógicas, utiliza los conocimientos empíricos que se tienen sobre él y llama la atención sobre que éstos son los que tienen importancia primordial.

Sentirse más próximo a uno u otro enfoque puede depender del gusto o estilo personal a la hora de enfocar la solución de problemas o de la forma de entender qué es lo importante a la hora de construir conocimiento.

ACTIVIDADES

5.-CONVERSACIONES DE CAFÉ, DE NOCHE, SOBRE LA NOCHE

El siguiente texto es una adaptación que mezcla dos pasajes del libro de Eduardo Battaner, "Física de las noches estrelladas"⁴⁰.

El libro de Battaner está estructurado en conversaciones que se producen entre "un grupo de amigos con un excepcional interés por la Astrofísica" y un astrónomo profesional que los visita y pasa con ellos un verano. El texto que sigue mezcla partes de dos de esas conversaciones, que tratan sobre la "Paradoja de Olbers". En ellas se citan las soluciones propuestas por Cheseaux/Olbers y por Poe/Kelvin, y se plantea un análisis sobre propiedades del universo al estilo de Bondi en su libro "Cosmología".

- *Pero no hay infinitas estrellas...- se defendía Francisco.*
- *¿Y como lo sabes? – reeplicó Jesús, mientras me miraba a mí.*
- *Porque –comenzó a responder tímidamente Francisco- [...] resultaría que la luz en la Tierra debida a todas infinitas estrellas sería infinita, o al menos muy grande. [...]*
- *¿Y si hubiera materia absorbente entre las estrellas, de forma que no se pudieran ver las estrellas lejanas?*
- *¿Y si la luz de las estrellas más lejanas no ha llegado aún a nosotros?*

Francisco fue respondiendo y sorteando estas preguntas con comentarios agudos y tímidos. La conversación fue interesante y amena y la habitual hora de regreso a casa se retrasó.

Cedí la puerta a mis amigos y cuando llegó mi turno unos hermosos ojos me cogieron del brazo invitándome a detenerme. De pronto, Julia. Abrí un poco la boca, no sé bien para qué, y por fin, no sé bien por dónde, por algún sitio próximo a mi boca, emití un susurro ...

- *Dime, Julia ...*
- *Quería hablar con usted. ¿Podría ser dentro de media hora, aquí?*
- *Claro, claro, claro, claro, claro.*

Por la calle seguimos hablando [...]

- *El que exista materia absorbente entre las estrellas y nosotros no aclara la paradoja. Al absorber energía esta materia se calentaría. [...] un cuerpo caliente emite luz. Si el Universo ha sido eterno esta materia acabaría emitiendo tanta luz como una estrella. Así pues, o el Universo no contiene un número infinito de estrellas, como decía Francisco, o es que no ha durado eternamente. Si no ha durado eternamente, no vemos la luz de las estrellas más lejanas sencillamente porque desde que se formó el Universo la luz no ha tenido tiempo de llegar hasta nosotros. También pueden ocurrir las dos cosas, que el Universo no haya sido eterno y que no tenga un número infinito de estrellas. [...]*

⁴⁰ Eduardo Battaner, "Física de las noches estrelladas", pp 55-56 y 163-164.

Serían las dos de la noche [...] sacó un mantel, unos vasos y una vela.

- *[...] hay cuatro posibilidades para el Universo.*

Sacó una servilleta en la que estaba escrito:

<i>ESPACIO</i>	<i>TIEMPO</i>
<i>Infinito</i>	<i>Eterno</i>
<i>Infinito</i>	<i>Limitado</i>
<i>Finito</i>	<i>Eterno</i>
<i>Finito</i>	<i>limitado</i>

[...] La vela animaba tenebrosamente la conversación.

Trabajo que se propone

1. ¿Qué posibilidades tachamos?
2. Hacer un cuadro similar al escrito en la servilleta que tenga estas dos columnas: una que se refiera a la disyuntiva estacionario/evolutivo para el universo; otra para la disyuntiva estático/en expansión .
3. Intentar un cuadro más complejo que recoja las tres disyuntivas relevantes (ver el capítulo "Saliendo de la paradoja" para ver por qué la alternativa finito/infinito relativa al espacio , es irrelevante): estacionario/evolutivo , estático/en expansión , eterno/de edad finita .

Sugerencias didácticas

- Volver en este momento a los cuadros que, en el capítulo "Dando vueltas a la paradoja", resumen las posibilidades de escapar de ella.

ACTIVIDADES

6. NOCHES OSCURAS, DÍAS CLAROS Y UN POCO DE LÓGICA**Trabajo que se propone**

Se presentan a continuación una serie de afirmaciones. Se pide, para cada una de ellas, decidir si son correctas o incorrectas. En los casos en que parezcan incorrectas (por contener errores o por ser incompletas), proponer como mejorarlas.

- *Todo universo evolutivo tiene que estar en desequilibrio termodinámico.*
- *Todo universo de carácter estacionario debe ser de edad infinita.*
- *Son concebibles universos estacionarios de edad finita pero tienen que ser creados, y creados ya en estado estacionario.*
- *Todo universo de edad finita estará en desequilibrio termodinámico.*
- *En los universos finitos con un número finito de estrellas no se da la paradoja de Olbers.*
- *Se puede salir de la paradoja de Olbers recurriendo exclusivamente a la expansión.*
- *Es posible la existencia de universos en desequilibrio termodinámico, no estáticos y no estacionarios en los que noches y días sean distintos entre sí.*
- *Es posible la existencia de universos en desequilibrio termodinámico, no estáticos y estacionarios en los que noches y días sean distintos entre sí.*
- *Considerando exclusivamente el hecho de que días y noches son distinguibles en nuestro universo, y respetando los principios cosmológicos de homogeneidad y validez de las leyes físicas, se puede asegurar que nuestro universo es finito.*
- *Considerando exclusivamente el hecho de que días y noches son distinguibles en nuestro universo, y respetando los principios cosmológicos de homogeneidad y validez de las leyes físicas, se puede asegurar que nuestro universo es de edad finita.*
- *Considerando exclusivamente el hecho de que días y noches son distinguibles en nuestro universo, y respetando los principios cosmológicos de homogeneidad y validez de las leyes físicas, lo único que se puede asegurar es que nuestro universo no puede ser estacionario y estático a la vez.*

ACTIVIDADES

7.-NOCHES: ¿HORROR O PRIVILEGIO?

En 1686, el cartesiano Bernard Bouvier de Fontenelle publicó en París una obra de divulgación "Conversaciones sobre la pluralidad de los mundos"⁴¹, en un formato de diálogos entre un especialista y una persona interesada pero lega (la marquesa de ¿....? en este caso) que recogía la moda de conversar sobre ciencia en salones y cenáculos.:

Trabajo que se propone

Debatir el siguiente texto de Fontenelle, buscando no sus aspectos científicos sino más bien los relacionados con las sensaciones personales sobre la noche:

- *"¿Qué sería, pues -repliqué-, si os dijera que hay muchas más estrellas fijas de las que vos veis? ¿Que con el telescopio se ha descubierto un número infinito que no se ven a simple vista [...]?"*
- *Os pido clemencia -dijo ella-, me rindo. Me agobiáis con los mundos y los torbellinos.*
- *[...] Veis esa blancura que se llama Vía Láctea, ¿os imagináis lo que es?. Una infinidad de pequeñas estrellas, invisibles a los ojos a causa de su pequeñez y puestas unas tan cerca de otras que parecen formar un fulgor continuo. Si estuvierais en uno [de ellos] [...] vuestro sol apenas estaría más cerca de vos ni tendría mayor fuerza sensible sobre vuestros ojos, que los cien mil soles [...] vecinos. [...] Veríais brillar vuestro cielo con un número infinito de fuegos [...] tan próximos unos a otros y tan poco alejados de vos. Cuando perdierais la vista a vuestro propio sol, todavía os quedaría bastante [luz], y vuestra noche no sería menos clara que el día [...]. Para hablar con más exactitud, no tendríais noche nunca. Mucho se asombrarían las gentes de esos mundos, acostumbrados como están a una claridad perpetua, si se les dijera que los hay desdichados que tienen verdaderas noches, que caen en profundas tinieblas y que, incluso cuando disfrutan de la luz, no ven más que un sol. Nos mirarían como a seres dejados de la naturaleza, y nuestra condición les haría estremecerse de horror".*

Sugerencias didácticas

Los seres vivos son sistemas que aprovechan los flujos de energía que se producen en un entorno en desequilibrio para mantenerse. Es difícil imaginar vida en los mundos de claridad perpetua que imagina Fontenelle, mundos que estarían en equilibrio termodinámico. En forma más literaria, más acorde al tipo de comentario que se sugiere para esta lectura, podría decirse "es preciso vivir en el desequilibrio" o que "la existencia de noches es condición de vida".

⁴¹ Bernard Le Bouvier de Fontenelle, "Conversaciones sobre la pluralidad de los mundos", pp 149 y 150.

ACTIVIDADES

8.-TRES TEXTOS CON ELEMENTOS RELIGIOSOS

Trabajo que se propone

Leer los tres textos siguientes, que tienen relación con la "Paradoja de Olbers" y que incluyen argumentos relacionados con la omnipotencia divina, muy presentes en el debate de paso del mundo cerrado al universo infinito de finales del siglo XVI y comienzos del XVII. Luego, debatir sobre sus argumentos.

Texto 1: Giordano Bruno, "Del infinito: el universo y los mundos", Venecia, 1584. (De la edición de Alianza Ed., Madrid, 1993)⁴²

"Elpino: Quisiera, no obstante, oír lo que queda del argumento sobre el principio y causa eficiente eterna: si le conviene ese efecto de tal forma infinito y si, por tanto, tal efecto existe de hecho.

Filoteo: [...] Entonces, para comenzar: ¿por qué queremos o podemos pensar que la divina eficacia esté ociosa?, ¿por qué queremos decir que la divina bondad, que puede comunicarse a infinitas cosas y puede difundirse infinitamente, quiera ser escasa y constreñirse en nada, dado que cualquier cosa finita es nada en comparación con el infinito; [...] ¿por qué debe quedar frustrada la capacidad infinita, defraudada la posibilidad de infinitos mundos que pueden existir, perjudicada la excelencia de la imagen divina, que debería resplandecer más en un espejo no contraído y según su modo de ser infinito, inmenso? ¿Por qué debemos afirmar eso, que una vez puesto trae consigo tantos inconvenientes y destruye tantos principios de filosofía sin favorecer las leyes, religiones, fe o moralidad en modo alguno? ¿Cómo quieres tú que Dios en cuanto a la potencia, en cuanto a la operación y en cuanto al efecto (que en él son la misma cosa) sea limitado [...]?

[....]

Elpino: ... "si se dijera que el infinito es discreto y discontinuo, por lo que deben existir infinitos fuegos individuales y particulares, cada uno de ellos finito, a pesar de todo ocurrirá que el fuego que resulta de todos los fuegos individuales deberá ser infinito".

Filoteo: ... No hay [...] inconveniente en que haya infinitos graves discretos, los cuales no constituyen un único grave, ni tampoco infinitas aguas, las cuales no constituyen un agua infinita, o infinitas partes de tierra, las cuales no forman una tierra infinita; de suerte que hay una multitud de cuerpos [celestes], los cuales no forman físicamente un único cuerpo de magnitud infinita."

⁴² Giordano Bruno, "Del infinito: el universo y los mundos", pp 113-116 y 145-146

Texto 2: Thomas Digges, "A perfit description of the caellestial orbes", Londres, 1576. (Párrafo que aparece traducido en Koyré, 1957, "Del mundo cerrado al universo infinito", Ed Siglo XXI, Madrid, 1984, pp 39 y 40)⁴³

"Podremos considerar fácilmente la pequeña porción de la trama divina que constituye nuestro mundo corruptible y elemental, pero nunca podremos admirar lo bastante la inmensidad del resto. Especialmente, la inmensidad del Orbe fijo guarnecido de innumerables luces que se extienden hacia arriba sin fin en altitud Esférica. Se ha de considerar que de esas luces celestiales sólo contemplamos aquellas que se encuentran en la parte inferior del mismo Orbe y que, a medida que se encuentran más altas, aparecen cada vez menores, hasta que nuestra vista, al no ser capaz de alcanzar ni concebir más lejos, hace que la mayoría de ellos nos sea invisible por causa de su asombrosa distancia. Y podemos perfectamente pensar que es ésta la gloriosa corte del gran Dios, cuyas obras invisibles e inescrutables podemos conjeturar en parte por esto que vemos, y para su majestad y poder infinito el único conveniente es este lugar infinito que supera a todos los demás tanto en cualidad como en cantidad."

Texto 3: Wilhem Olbers, "Ueber die Durchsichtigkeit des Weltraums", Berlin, 1826. (Traducido de la version inglesa, "On the transparency of space", Edimburgo, 1826, que aparece en Harrison, "The darkness of night", Apéndice IV)⁴⁴

"Pero la mirada penetrante del inmortal Herschel, ¿ha llegado cerca, o solo un poco más cerca de los límites del universo? ¿Quién puede creer eso? ¿No es infinito el espacio? ¿Puede pensarse en unos límites para él? Y ¿es concebible que el Creador Todopoderoso hubiese dejado vacío el espacio infinito?"

⁴³ Koyré, "Del mundo cerrado al universo infinito", pp 39 y 40

⁴⁴ Harrison, "The darkness of night", Apéndice IV

CONCLUSIÓN

Es un hecho que en nuestro entorno astronómico las noches son oscuras. En términos físicos eso significa que la densidad de radiación durante el día es distinta a la densidad de radiación durante la noche. Lo bastante distinta como para que el ojo humano discrimine entre ellas y perciba día y noche como situaciones diferentes.

Los principios cosmológicos de homogeneidad y validez general de las leyes físicas permiten pasar de ese hecho a una afirmación referida al universo en conjunto: nuestro universo está en desequilibrio termodinámico.

No todos los tipos de universo son compatibles con el hecho de la oscuridad de la noche y con los principios de homogeneidad y validez general de las leyes físicas. Sólo los universos no estacionarios (en evolución), o los no estáticos (en expansión), o los no estacionarios y no estáticos (en evolución y en expansión) a la vez, sólo esos pueden estar (al menos en alguna fase de su historia) en un estado de desequilibrio termodinámico similar al de nuestro universo en la actualidad.



Basta tumbarse, mirar el cielo y pensar

Lo fascinante de todo esto es que es posible que una persona se disponga a disfrutar del atardecer al aire libre, se dé cuenta del cambio que se produce al llegar la noche, piense en ello conociendo principios básicos de Cosmología y algunas leyes de la Física, y afirme con fundamento: "este universo está en una fase no terminal de su evolución, o está en expansión, o ambas cosas a la vez".

BIBLIOGRAFIA

Bibliografía citada

- Battaner, E., 1988, "Física de las noches estrelladas", Tusquets, Barcelona, 1988
- Barrow, J.D., 2000, "El libro de la nada", Ed Crítica, Barcelona, 2001
- Bondi, H., 1952, "Cosmología", Barcelona, 1972
- Bruno, G., 1584, "Del infinito: el universo y los mundos", Alianza Ed, Madrid, 1993
- Cheseaux, J.P., "Sur la force de la lumiere et sa propagation dans l'éther, et sur la distance des étoiles fixes". Apéndice de su "Traité de la Comète", Lausanne, 1744. (Reproducido en Dickson, "La bóveda de la noche", Apéndice II)
- Davies, P.C.W. , 1977, "El espacio y el tiempo en el universo contemporáneo", Ed Fondo de Cultura Económica, México, 1982
- Dickson, F. P. 1968, "La bóveda de la noche", Ed Fondo de Cultura Económica, México, 1975
- Fontenelle, B., 1686, "Conversaciones sobre la pluralidad de los mundos", Ed Nacional, Madrid, 1982
- Harrison, E., 1987, "Darkness at night", Harvard University Press, Cambridge (Massachusetts)
- Lord Kelvin, "On ether and gravitational matter through infinite space", Londres, 1904. (Reproducido en Harrison, "Darkness at night", Apéndice V)
- Koyré, A., 1957, "Del mundo cerrado al universo infinito", Ed Siglo XXI, Madrid, 1984
- Jayant Narlikar, 1977, "La estructura del universo", Alianza Ed, Madrid, 1987
- Wilhem Olbers, "Ueber die Durchsichtigkeit des Weltraums", Berlin, 1823. (Version inglesa, "On the transparency of space", Edimburgo, 1826, que aparece en Harrison, "The darkness of night", Apéndice IV).
- Hubert Reeves, 1981, "Paciencia en el azul del cielo", Ed Granica, Barcelona, 1982
- Smith, R.W., 1982 "El universo en expansión", p 216, Alianza Ed, Madrid, 1993

Textos que tratan (aunque sea de pasada) la paradoja de Olbers

- Asimov, I., 1966, *El universo*, pp 66-69 y 272-276, Alianza Ed, Madrid, 1981
- Einstein, A., 1945, "El significado de la relatividad", p 154, Ed Espasa Calpe, Madrid, 1971
- Gurshtein, A., 1984, *Enigmas seculares del cielo*, pp 52 y 53, Ed Mir, Moscú, 1987
- Hawking, S., 1998, "Historia del tiempo", p 24, Ed Crítica, Barcelona, 1998
- Hernández, A., 1991, "Principio y fin del universo", pp 36-37, Ed Espacio y tiempo, Madrid
- Longair, M S., 1996, "La evolución de nuestro universo", p 144, Cambridge University Press, Madrid, 1998
- López, C., 1999, "Universo sin fin", pp 117-119 y 154, Ed Santillana, Madrid
- Moreno, R., 1998, *Historia breve del universo*, pp 195 y 196, Ed Rialp, Madrid
- Ronan, C. A., 1991, "Historia natural del universo", p 37, Eds del Prado, Madrid, 1992
- Smoot G. y Davidson, K., 1993, "Arrugas en el tiempo", pp 42-45, Ed Plaza y Janés, Barcelona, 1994
- Vives, T., 1994, *El tamaño del universo*, pp 115-122, Ed Equipo Sirius, Madrid



ApEA, la Asociación para la Enseñanza de la Astronomía, nació en 1995 para acoger a todas las personas que se dedican a la enseñanza de la Astronomía en centros educativos, planetarios, museos de la ciencia, agrupaciones de aficionados y clubes de estudiantes.

ApEA engloba a todos los interesados en la enseñanza de todos los niveles educativos reglados -desde la enseñanza primaria hasta la universitaria- así como los no reglados. También organiza reuniones de formación para sus socios y publica materiales de interés didáctico, como la presente colección.

Más información en www.a pea.es

