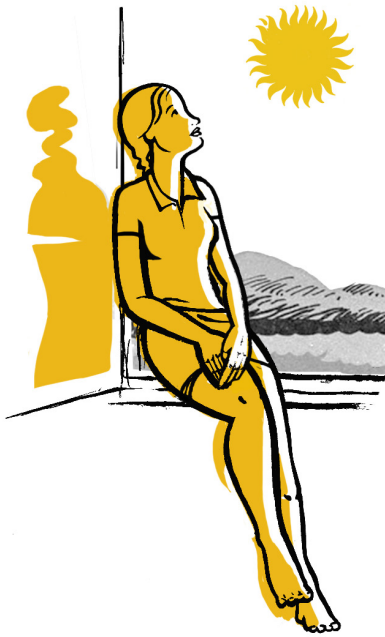


El viaje del fotón



01 TEXTO *Julien Milli* ILUSTRACIONES *Toro*



¿Te has preguntado por qué el cielo es brillante en el día? ¿Has notado que el azul del cielo no es uniforme? ¿Sabes qué es un arcoíris y por qué lo vemos así? Estos y otros fascinantes fenómenos están íntimamente ligados a la luz, más precisamente a las partículas que componen la luz: *los fotones*. Sigamos la trayectoria de algunos fotones emitidos desde distintos lugares del Universo hasta la delgada capa de atmósfera que rodea nuestro planeta, para entender sus comportamientos y algunos de los fenómenos que provocan. Pero antes, ocupémonos en entender algunas cosas de esta partícula.

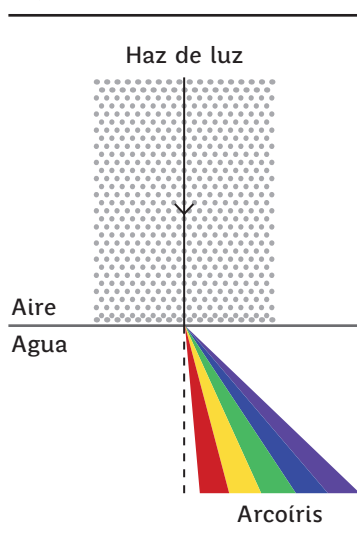
Un fotón es una partícula elemental que transporta energía. Está asociado a la *propagación de la luz* o cualquier onda electromagnética. Sus principales propiedades son las siguientes:

- ♦ Es una partícula de masa cero. Su símbolo en física es gamma: γ .
- ♦ En el espacio vacío se mueve a una velocidad constante llamada *velocidad de la luz* ($c = 300\,000\,000\text{ km/s}$). Esta es una constante de la física, no existen otras partículas que se muevan más rápido.
- ♦ Además de ser una partícula es una onda electromagnética, por lo que tiene longitud de onda (usualmente se escribe con la letra griega lambda: λ). Una onda es una oscilación que se propaga por el espacio. Por ejemplo, las ondas sonoras se propagan a través del movimiento oscilante de las moléculas de aire, por lo que no pueden propagarse en el espacio vacío. El oído humano es sensible a sonidos cuya longitud de onda se encuentra aproximadamente entre 20 mm y 20 m. La luz es otro tipo de onda, llamada onda electromagnética, porque consiste en oscilaciones del campo eléctrico y el magnético. El ojo humano es sensible sólo a un cierto rango de fotones, lo que llamamos *luz visible*, compuesta por fotones de longitud de onda entre 400 nm a 800 nm ($1\text{ nm} = 10^{-9}\text{ m} = 0,000\,001\text{ mm}$).

Existe un debate histórico sobre la naturaleza de la luz que data desde el siglo XVII. Newton pensó la luz como una partícula, mientras que

Christiaan Huygens propuso que la luz era una onda. Experimentos de refracción de la luz y, posteriormente, de interferencia de la luz, ejecutados por Thomas Young, apoyan la idea de que la luz es una onda electromagnética. Sin embargo, en 1905, Albert Einstein sólo logró explicar el efecto fotoeléctrico postulando que la luz está formada por partículas llamadas fotones, o quanta de luz, los cuales llevan discretas cargas de energía. Einstein mostró que la energía (E) de un fotón es inversamente proporcional a su longitud de onda (λ), con la siguiente fórmula: $E = hc/\lambda$. La constante proporcional h se denomina la constante de Planck.

Refracción



ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO Y ESPECTRO VISIBLE

El espectro electromagnético es un rango que contiene todas las longitudes de onda posibles de las ondas electromagnéticas. Comienza con los rayos gamma, que tienen la menor longitud de onda posible (del tamaño del núcleo de un átomo), hasta llegar a las ondas de radio que pueden medir varios kilómetros.

Nuestro Sol envía a la Tierra millones de millones de fotones por segundo. Sin embargo, los fotones que llegan a la superficie de la Tierra representan una porción limitada del espectro electromagnético. Entre éstos están los fotones que componen la luz visible que mencionamos antes, también llamado *espectro visible*; la parte del espectro captada por el ojo humano. Así, los fotones con una longitud de onda entre 400 nm, los vemos azules; los que están entre los 600 nm, los vemos verdes y entre 800 nm, los vemos rojos. Al final, todos los fotones del espectro visible se combinan en un haz de luz solar que parece blanca a nuestros ojos.

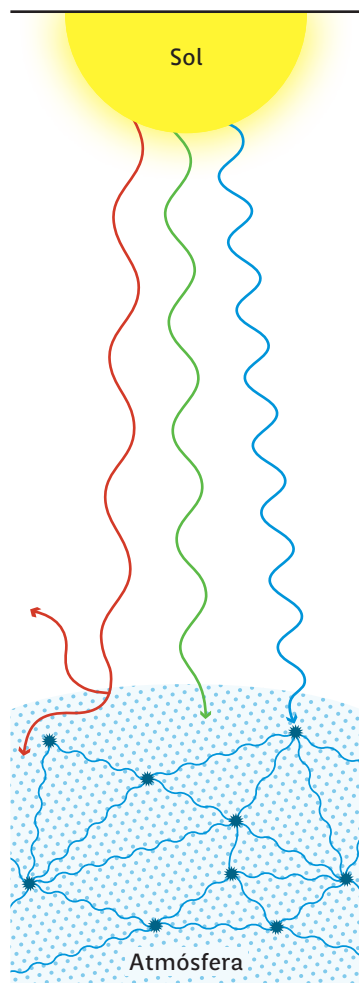
No obstante, en algunas condiciones es posible descomponer la luz solar según la longitud de onda de los fotones. Esto se produce por ejemplo cuando vemos un arcoíris, que ocurre cuando un rayo de luz solar, que contiene millones de fotones con diferentes longitudes de onda del espectro visible, atraviesa una gota de agua. Este fenómeno se llama *refracción* y sucede cuando los fotones, al pasar por la gota de agua, son desviados respecto de su trayectoria original. El ángulo de desviación depende de la longitud de onda: los fotones azules son más desviados que los fotones rojos. Es así que todos los colores se separan y podemos ver el arcoíris.

DISPERSIÓN DE FOTONES EN LA ATMÓSFERA

Si la luz visible contiene fotones con todos los colores del arcoíris, ¿por qué vemos el cielo azul? y ¿por qué no es uniforme este color en el cielo? Para entender esto, veamos qué pasa con los fotones provenientes del Sol al momento de ingresar a nuestra atmósfera.

Cuando el fotón arriba desde el Sol a la Tierra puede ser afectado por un fenómeno llamado *dispersión*, que se produce cuando un fotón se encuentra con una partícula de la atmósfera –como una molécula de

Dispersión



Oxígeno diatómico (O_2) o Nitrógeno diatómico (N_2), esto genera un cambio en la trayectoria original del fotón. La eficiencia de la dispersión depende principalmente de la longitud de onda: los fotones con menor longitud de onda, como los azules, son mucho más propensos a ser dispersados por las moléculas de nuestra atmósfera, que los fotones con mayor longitud de onda, como los rojos. Esto explica porque el cielo es brillante en cualquier dirección, no sólo en dirección al Sol.

Sin la dispersión, los fotones llegarían a nuestros ojos directamente desde el Sol (sin que se altere su trayectoria), con lo cual el cielo aparecería oscuro como si fuera de noche. Esto es lo que ocurre en la Luna, por ejemplo, ya que nuestro satélite natural no posee atmósfera que disperse los fotones provenientes del Sol. Los astrónomos estarían encantados si esto pasara en la Tierra, ya que podrían estudiar las estrellas de día.

Entonces, el cielo es azul porque los fotones azules son los más dispersados por la atmósfera, sin embargo el color azul no es uniforme. Si miramos cuidadosamente al cenit en un día soleado, notaremos que este azul es más oscuro que el azul del horizonte, que parece deslavado o blancuzco. El brillo del cielo depende de la cantidad de dispersión que ocurre en la línea de visión, por lo tanto, del número de moléculas que dispersan la luz. A mayor número de moléculas en una dirección específica, mayor brillo de esa zona del cielo.

El espesor de la capa atmosférica también depende de la dirección de la línea de visión, cuando miramos hacia el cenit la capa atmosférica es delgada. Por otro lado, cuando la línea de visión se acerca al horizonte, la capa atmosférica llega a ser 38 veces más espesa, por ende hay más dispersión de fotones. La capa atmosférica se vuelve tan densa hacia el horizonte, que hay altas posibilidades que los fotones sean dispersados más de una vez en su propagación en la atmósfera, independiente de sus longitudes de onda, por lo tanto colores, lo que hace que el cielo parezca más neutral o blanco. Por lo mismo, el cielo aparece más oscuro si lo miramos desde la cima de una montaña (o desde un avión) que a nivel del mar, por que la capa de la atmósfera es más delgada a estas alturas.

ABSORCIÓN DE FOTONES EN LA ATMÓSFERA

Los fotones también pueden ser *absorbidos* por moléculas de la atmósfera. En este caso, la energía de los fotones es transferida a las moléculas, las que comienzan a vibrar y girar. La absorción es muy improbable para fotones con longitudes de onda entre los 400 y 800 nm, correspondientes a la luz visible dentro del espectro electromagnético, pero mucho más frecuente para fotones ultravioletas (UV). De hecho, la atmósfera es opaca a la luz UV, lo cual protege la vida en la Tierra de esta radiación altamente energética y nociva para las células vivas.

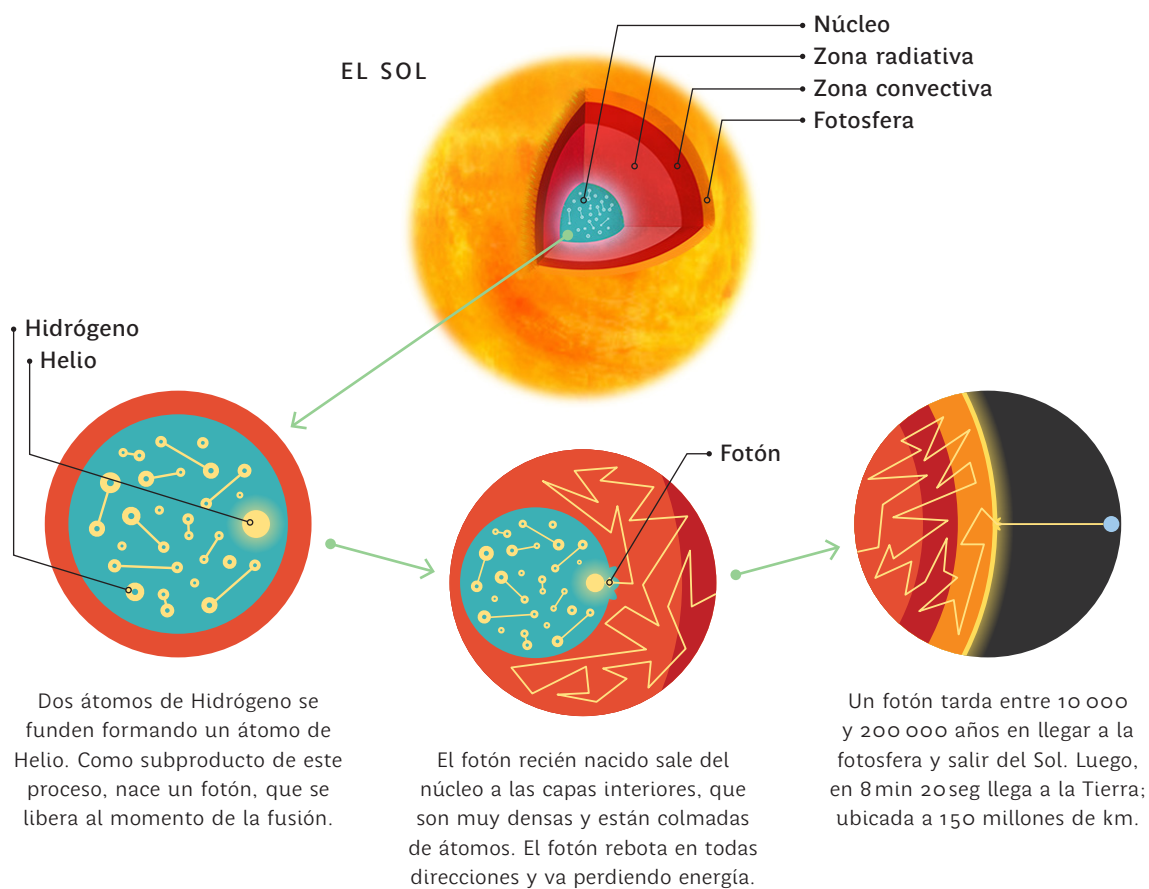
La Tierra es también opaca a gran parte de la luz infrarroja, debido a la presencia de vapor de agua y dióxido de carbono en las moléculas de la atmósfera. Como resultado, la emisión térmica de la Tierra, en el infrarrojo, es atrapada dentro de la atmósfera, no puede escapar de nuestro planeta y calienta la superficie: este es el *efecto invernadero*. El efecto invernadero es mucho mayor en Venus y mucho menor en Marte, lo que explica porque Venus es un «horno», mientras que Marte es mucho más frío que la Tierra.

La absorción en la atmósfera de la luz UV e infrarroja, es también la razón por la cual debemos salir al espacio a estudiar la luz de las estrellas en este rango de longitud de onda.

NACIMIENTO DE UN FOTÓN EN EL SOL

Ahora, volvamos atrás en el tiempo para comprender cómo, cuándo y dónde son creados los fotones que llegan –mayormente– a nuestra atmósfera; los que provienen del Sol, la estrella más cercana a la Tierra. El Sol está compuesto por varias capas, se denomina *núcleo* al centro –la parte más interior– de la estrella. En el núcleo las condiciones de

Fusión nuclear



temperatura y presión son extremas (varios millones de grados) y es aquí dónde ocurre la *fusión nuclear*.

La fusión es un proceso en el que dos átomos de Hidrógeno se funden para formar un átomo de Helio. Un subproducto de esta reacción es un fotón; que se libera al momento de la fusión de los dos átomos de Hidrógeno. Este fotón recién nacido no es visible aún –como aquel que llega a la Tierra–, ya que es un fotón de rayo gamma, muy energético y con una longitud de onda mucho más corta que un fotón visible. Una vez producido, el fotón se escapará del núcleo cruzando las capas radiativa y convectiva, luego la fotosfera, hasta que sea capaz de alcanzar finalmente la Tierra.

Pero cruzar la zona radiativa y convectiva no es tarea fácil, dado que esta región es súper densa y está colmada de átomos, por lo que el fotón rebotará en todas direcciones e irá perdiendo energía. Al final necesitará entre 10 000 a 200 000 años para llegar a la fotosfera, a pesar de su increíble velocidad de 300 000 km/s. Durante este viaje perderá mucha energía, la que será usada para calentar la materia solar. Finalmente el fotón emergerá de la fotosfera con una longitud de onda mayormente en el rango de la luz visible o UV. Luego, en 8 minutos y 20 segundos llegará a la Tierra, localizada a 150 millones de km del Sol.

DETECTAR FOTONES DESDE UN EXOPLANETA

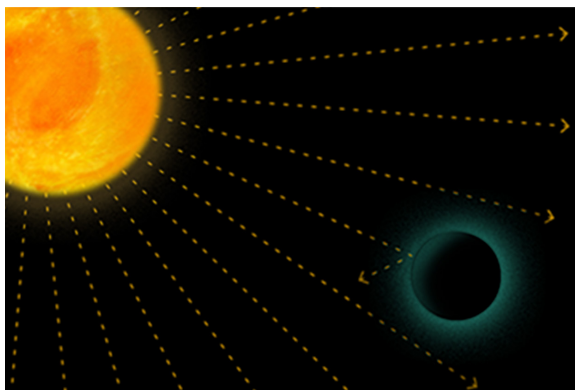
¿Qué pasa ahora si los fotones no provienen de nuestro Sol, sino de otra estrella? La principal diferencia concierne al tiempo de viaje a través del espacio. Por ejemplo, para la estrella más cercana al Sol, *Proxima Centauri*, los fotones necesitan más de 4 años para llegar a la Tierra. Mientras que para estrellas más lejanas, pueden llegar a tardar miles de años.

Uno de los grandes desafíos de la astronomía en la última década, es la detección de fotones provenientes de *exoplanetas*, es decir un planeta orbitando a una estrella diferente al Sol. ¿Cómo hacemos para captar esos fotones y cuál es su trayectoria? Estos lejanos fotones pueden tener dos orígenes distintos:

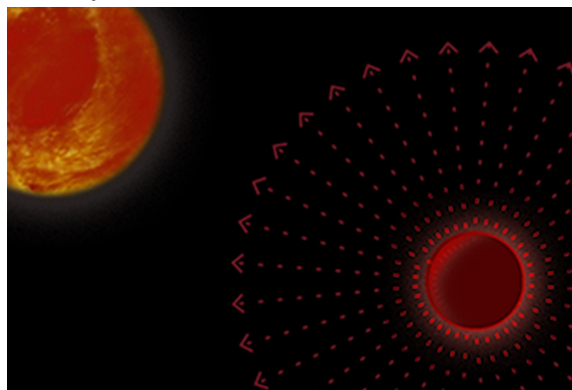
- ◆ Fotones emitidos por la estrella a la cual el exoplaneta orbita y que rebotan en él (por dispersión en la atmósfera, como vimos antes).
- ◆ Fotones emitidos por el exoplaneta.

En el primer caso, los fotones abandonan la fotosfera de la estrella llegando al exoplaneta en unos cuantos minutos. Rebotan en la atmósfera o en la superficie del planeta y –con suerte– se dirigen hacia la Tierra; este viaje les puede tomar entre unos cuantos años, hasta cientos de años, dependiendo de la distancia entre ambos planetas. Detectar este tipo de fotones es muy difícil, debido a que entre todos los fotones emitidos por la estrella, son pocos los que alcanzan el exoplaneta y

Visible



Infrarrojo



Proxima Centauri

Interpretación de fotones emitidos por la estrella Proxima Centauri en el espectro visible y fotones emitidos en el infrarrojo por el exoplaneta.

Créditos: V. Vergara.

de estos, muy pocos los que rebotan en dirección a la Tierra. Así que tenemos un montón de fotones provenientes de la estrella y sólo una minúscula fracción proveniente del exoplaneta. Esta fracción puede ser tan pequeña como 10^{-10} para un planeta del tamaño de la Tierra. Este es un problema de contraste entre una estrella y un exoplaneta.

Pero hay una manera más fácil de detectar fotones desde un exoplaneta. En vez de tratar de captar fotones emitidos por la estrella y que reboten en el exoplaneta en nuestra dirección; podemos buscar los fotones emitidos directamente por el exoplaneta. Pese a que un planeta no emite luz visible, si emite luz infrarroja, la cual nuestros ojos no pueden ver, ¡pero nuestros telescopios si pueden captar! En este caso los fotones que observamos, son producidos directamente en la superficie del planeta, por lo que el contraste con la luz infrarroja emitida por la estrella, se vuelve menor que en el primer caso.

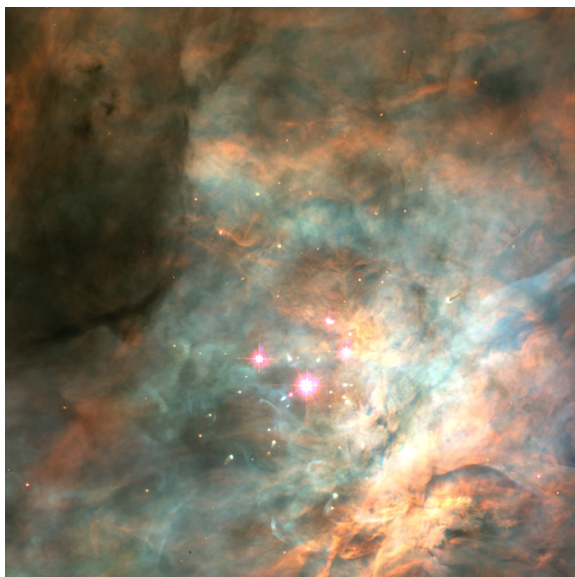
ABSORCIÓN DE FOTONES EN UN MEDIO INTERESTELAR

Vamos ahora más lejos en el espacio y busquemos fotones provenientes de estrellas muy lejanas, ubicadas en el centro de nuestra galaxia. Estos fotones necesitan alrededor de 27 000 años de viaje, desde la fotosfera de la estrella lejana hasta llegar a la Tierra. Esto significa que vemos esa estrella tal cual era hace 27 000 años atrás; por esto decimos que mirar lejos en el espacio, es mirar atrás en el tiempo, mirar el pasado.

Veamos ahora qué pasa cuando, en este largo camino, los fotones se encuentran con enormes nubes de gas, formadas principalmente de Hidrógeno. Nuestra galaxia aún contiene muchas de estas nubes, que son el lugar de nacimiento de nuevas estrellas. La maravillosa nebulosa de Orión es un ejemplo de este tipo de nubes.

Si los fotones que intentan traspasar la nube gaseosa, tienen longitudes de onda del espectro visible, los cambios serán muy grandes y la mayoría serán absorbidos por la nube. La energía de estos fotones será transferida a la nube, con lo cual aumenta su temperatura; estos fotones finalizan su viaje aquí. Esto explica porque las nebulosas aparecen como un velo y ocultan la luz visible de las estrellas que se encuentran detrás.

Visible



Infrarrojo



Nebulosa de Orión

El cúmulo trapecio en la Nebulosa de Orión, imágenes captadas en el visible y el infrarrojo por el Telescopio Espacial Hubble.

Créditos: NASA / ESA, C.R. O'Dell, S.K. Wong / K. Luhman *et al.*

Ahora, si los fotones son infrarrojos, es decir, tienen una mayor longitud de onda, será más difícil que sean absorbidos y cruzarán la nebulosa. Por lo tanto, mirar la luz infrarroja con telescopios especialmente diseñados para este propósito, permite mirar a través del polvo y el gas interestelar, hacia las estrellas que se encuentran detrás de las nebulosas.

Los fotones no tienen una vida tranquila, son muchos los procesos que pueden afectar su propagación en el espacio, hasta ser finalmente captados por el ojo humano o los telescopios. Comprender estos procesos para describir en detalle el ambiente con que interactúan los fotones durante su propagación, es un objetivo de los astrónomos. Como nunca lograremos enviar satélites a tomar mediciones *in situ*, el fotón es sin duda, la única fuente de información para que los astrónomos estudien las estrellas, los exoplanetas, una nebulosa distante o el centro de la Vía Láctea. Para optimizar la comprensión de estos particulares ambientes, los astrónomos necesitan captar más y más fotones. Es por esta razón que se construyen telescopios cada vez más grandes en países de cielos oscuros y despejados, como es el caso de Chile.

www.galacticmagazine.org

Material bajo licencia *Creative Commons: Attribution 3.0 Unported* (CC BY 3.0). Producido durante el segundo semestre de 2013. Si gustas imprimir para una lectura más confortable, nota que este documento está compuesto en formato A4 (21×29,7 cm).