

Lección 8: La luz y la interacción con la materia

Resumen

Cuando la luz choca con la materia, puede dispersarse, reflejarse, refractarse, retardarse o absorberse, por citar sólo algunos fenómenos. A pesar de todas las diferencias de los efectos, algunas se originan en similitudes basadas en la variabilidad de la velocidad de propagación de la luz. Esta observación no se limita al campo de la óptica, sino que constituye en sí misma un aspecto fundamental de la cosmología.

Tabla de contenidos

- Folio 2: La luz y sus fenómenos
- Folio 3-4: Refracción (1-2)
- Folio 5-7: Principio de Fermat (1-3)
- Folio 8: Rayos de luz inclinados
- Folio 9: Desviación de la luz en el campo de gravedad
- Folio 10-12: Desviación de la luz en el campo de gravedad según Newton (1-3)
- Folio 13: Desviación de la luz en el campo de gravedad según Einstein
- Folio 14-15: Agujero negro (1-2)
- Folio 16: Trayectorias de la luz cerca de masas de densidad extrema

La luz y sus fenómenos

Polarización
Interferencia
Electroluminiscencia
Fluorescencia / Fosforescencia
Emisión estimulada y espontánea
Reflexión (superficies reflectantes)
Refracción (medios transparentes)
Absorción (superficie opaca o coloreada)
Actividad óptica (rotación del plano de polarización)
Difracción (desviación de las ondas por un obstáculo)
Birrefringencia (medios transparentes anisotrópicos, cristales)
Dispersión de Rayleigh (choque con partículas muy pequeñas, moléculas)
Dispersión de Mie (choque con partículas del tamaño de la longitud de onda)
Efecto fotoeléctrico (emisión de electrones cuando la luz incide sobre la materia)

De los numerosos fenómenos de la luz, se completan algunos y se presentan otros menos conocidos.

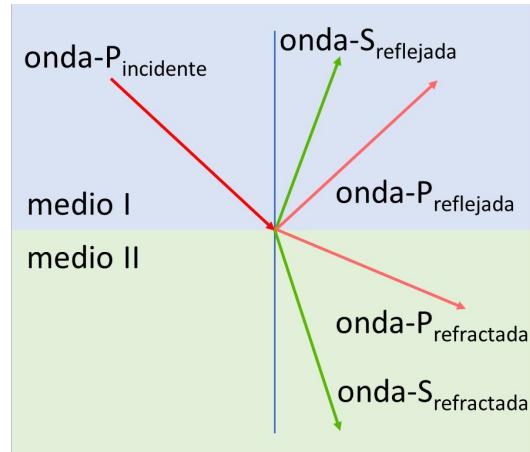
Refracción (1)

El fenómeno de la refracción describe el cambio en la dirección de propagación de una onda cuando pasa a otro medio. La causa del cambio de dirección llamado refracción es el cambio en la velocidad de propagación. Este depende del material y se caracteriza por un índice de refracción que se define como cociente de velocidad. La ley de la refracción no se limita a las ondas electromagnéticas y sus fenómenos ópticos, sino que es válida para cualquier onda, como las acústicas. En el caso de las ondas sísmicas, cuando una onda longitudinal incide en un medio diferente (onda de compresión, onda P), pueden producirse 2 tipos de ondas, por lo que se reflejan y refractan 2 tipos diferentes de ondas: ondas P y S (onda transversal).



Refracción (2)

Ambos tipos de ondas se propagan a velocidades diferentes en los dos medios, por lo que también se refractan en ángulos diferentes. Estos ángulos se pueden calcular con la ley de la refracción si se conocen las velocidades de propagación individuales y el ángulo de incidencia de la onda primaria. Si los medios son líquidos o gases, no se producen ondas transversales, por lo que la onda P incidente sólo puede generar una onda P reflejada y otra refractada.

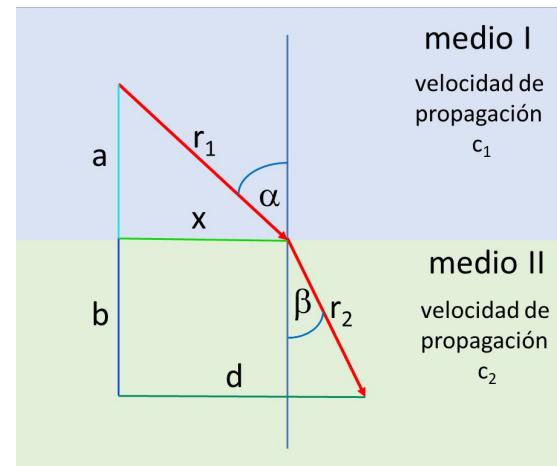


Si la ley de la refracción es válida para todas las ondas, ¿qué ley superior describe este comportamiento?

Principio de Fermat (1)

Según Pierre de Fermat, la luz no toma el camino geométricamente más corto para llegar de un punto del espacio a otro, sino el camino con el menor tiempo de tránsito. Con esta condición, se puede derivar la ley de la refracción y la ley de la reflexión. A continuación, se considera la ley de la refracción.

Para el tiempo de tránsito t como función de la longitud x del punto de incidencia del haz de luz r_1 sigue:



$$t(x) = t_1 + t_2 = \frac{r_1}{c_1} + \frac{r_2}{c_2} = \frac{\sqrt{a^2 + x^2}}{c_1} + \frac{\sqrt{b^2 + (d - x)^2}}{c_2}$$

Principio de Fermat (2)

El tiempo de tránsito t es un extremo (mínimo), es decir, el tiempo hay que derivar según la trayectoria x con el resultado cero (tangente horizontal).

$$\frac{dt}{dx} = \frac{1}{c_1} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{a^2 + x^2}} \cdot 2x + \frac{1}{c_2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{b^2 + (d-x)^2}} \cdot 2 \cdot (d-x) \cdot (-1) = 0$$

$$\frac{dt}{dx} = \frac{1}{c_1} \cdot \frac{x}{\sqrt{a^2 + x^2}} - \frac{1}{c_2} \cdot \frac{d-x}{\sqrt{b^2 + (d-x)^2}} = 0$$

$$\frac{dt}{dx} = \frac{1}{c_1} \cdot \frac{x}{r_1} - \frac{1}{c_2} \cdot \frac{d-x}{r_2} = 0$$

vale: $\sin \alpha = \frac{x}{r_1}$ $\sin \beta = \frac{d-x}{r_2}$

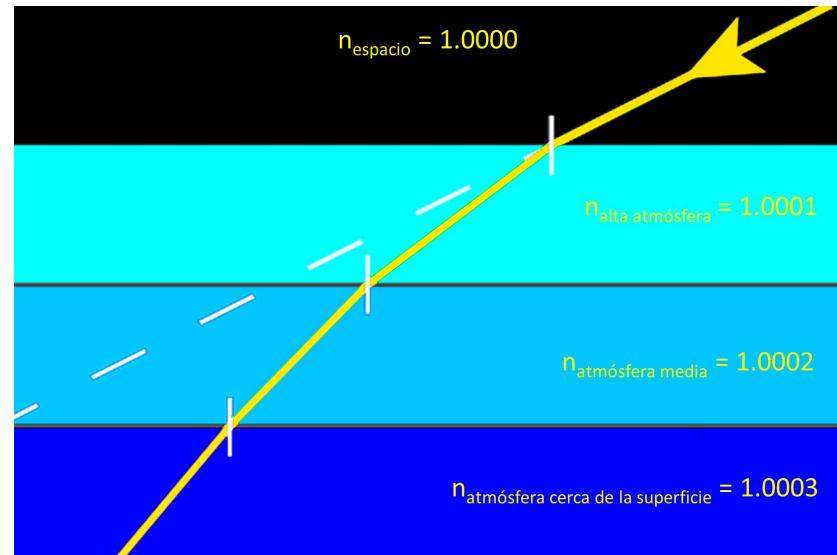
Ley de la refracción: $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} = n$ (n : índice de refracción)

Principio de Fermat (3)

La ley de la reflexión puede derivarse igualmente. En el caso de la reflexión, el tiempo de tránsito también puede ser máximo.

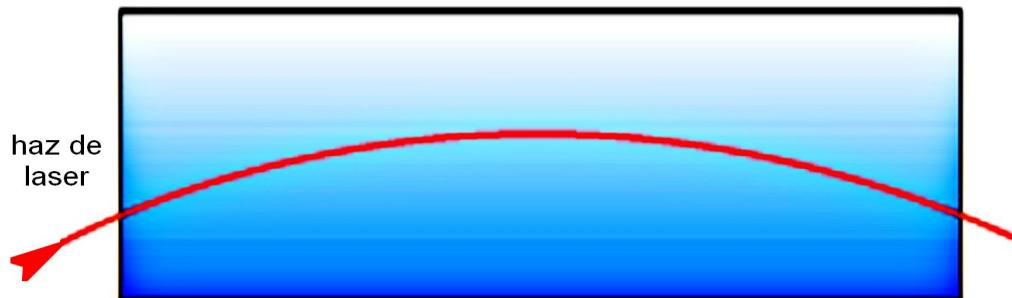
La causa de un tiempo de tránsito mínimo de un haz de luz o de cualquier tipo de onda reside en la propia naturaleza de la onda. Para tiempos no extremos, la longitud de la trayectoria cambia de forma relativamente fuerte, lo que resulta en una superposición, es decir, una interferencia destructiva.

En un medio no homogéneo con un índice de refracción que depende de la ubicación, la luz pasa por trayectorias inclinadas. Esto es notable con el sol al atardecer o al amanecer, o incluso con objetos lejanos cerca del horizonte.



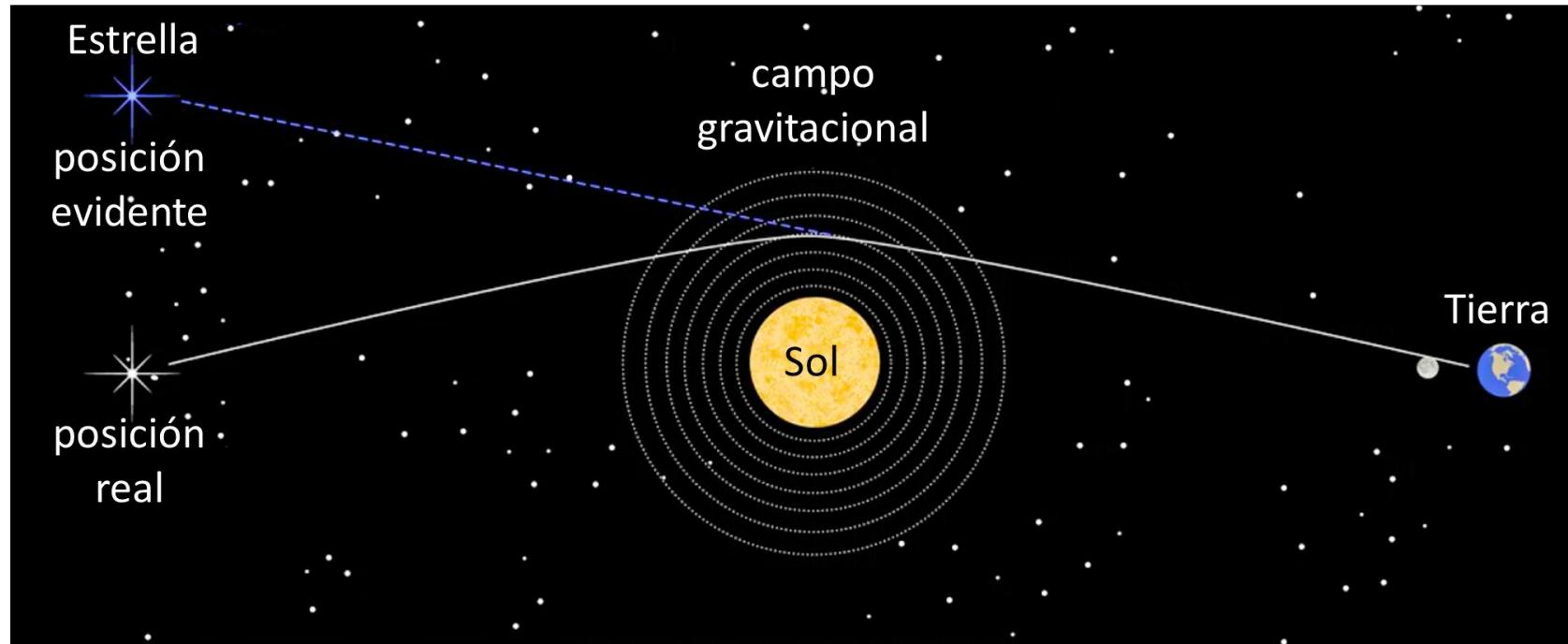
Rayos de luz inclinados

Este comportamiento también puede observarse con ondas acústicas (por ejemplo, ondas de ultrasonido). El haz de sonido se inclina en la dirección de la disminución de la velocidad del sonido. Aspecto similar con las ondas electromagnéticas: Como la densidad de la atmósfera aumenta al disminuir la altura sobre la superficie de la Tierra, la luz se desvía hacia la dirección vertical al acercarse a la superficie con el resultado que el alcance del radar, por ejemplo, está por debajo del horizonte. Se pueden producir cambios continuos del índice de refracción mediante soluciones salinas estratificadas. Cuando un recipiente de vidrio lleno de esta solución se irradia con un haz de luz (por ejemplo, un láser como fuente de luz), la inclinación continua se hace directamente visible.



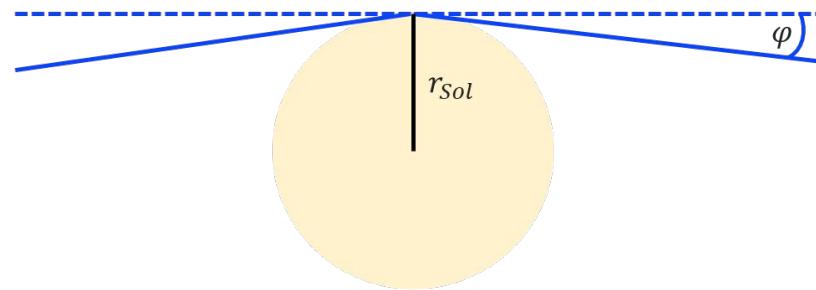
Desviación de la luz en el campo de gravedad

Una imagen análoga se conoce a partir de las observaciones estelares cuando, por ejemplo, se compara la posición de una estrella cuya luz pasa cerca del Sol con su verdadera posición (lejos de la influencia gravitacional del Sol).



Desviación de la luz en el campo de gravedad según Newton (1)

Ya con las leyes de Newton se puede calcular la desviación de la luz debida al efecto gravitatorio de una masa. Aunque estas leyes han sido superadas por las consideraciones de Albert Einstein, sigue siendo muy instructivo comprenderlas. La mayor masa cercana a la Tierra es el Sol, donde la trayectoria de un haz de luz se estudia con más detalle. Para ello, como muestra el diagrama, se hace pasar un haz de luz exactamente por la superficie. La línea recta discontinua ilustra el camino del haz sin desviación por el sol. El ángulo φ indica el tamaño de la desviación.

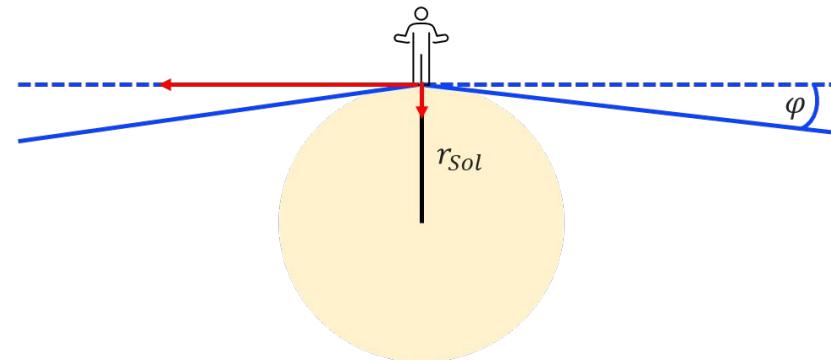


La ley de la gravitación de Newton se utiliza para calcular la aceleración a en la superficie del Sol.

$$a_{superficie Sol} = G \cdot \frac{m_{Sol}}{r_{Sol}^2} \quad ; \quad G: constante de gravedad$$

Desviación de la luz en el campo de gravedad según Newton (2)

El cálculo es sencillo con la introducción de un observador en el mismo sistema en el que se mueve el haz de luz. Un observador en caída libre percibe la propagación de la luz como una línea recta. Como el observador en caída libre se desplaza hacia el centro de gravedad, el haz de luz tiene que cambiar continuamente su dirección para que el observador perciba la propagación sin perturbaciones como una trayectoria recta. Supongamos que el observador se encuentra en reposo sobre la superficie del Sol y que en el momento en que el haz de luz pasa junto a él comienza su caída libre hacia el centro. La luz tiene la máxima desviación en las inmediaciones del Sol (en el momento del contacto tangencial con la superficie) en el tiempo $t \approx r_{Sol}/c$ hasta que se aleja de nuevo del sol.



Desviación de la luz en el campo de gravedad según Newton (3)

Durante este tiempo, el observador ha alcanzado una velocidad perpendicular al haz de luz.

$$v = a \cdot t \approx G \cdot \frac{m_{Sol}}{r_{Sol}^2} \cdot \frac{r_{Sol}}{c} = G \cdot \frac{m_{Sol}}{c \cdot r_{Sol}}$$

Debido al principio de equivalencia (la masa inercial es equivalente a la masa en el campo gravitacional), la luz ha obtenido la misma velocidad perpendicular a su dirección original. La relación de velocidades para ángulos pequeños es la pendiente, es decir, la función tangente.

$$\tan(\varphi) \approx \varphi \approx \frac{v}{c}$$

La desviación total es el doble porque la curvatura afecta tanto a la luz incidente como a la saliente.

$$\varphi_{Newton} = G \cdot \frac{2 \cdot m_{Sol}}{c^2 \cdot r_{Sol}} = 0.875 \text{ arcosegundos} = 0.875''$$

Desviación de la luz en el campo de gravedad según Einstein

Albert Einstein había utilizado el mismo valor en sus consideraciones originales. No fue hasta el desarrollo de su teoría general de la relatividad cuando dedujo exactamente el doble del valor para la desviación de la luz que pasa junto al Sol.

$$\varphi_{Einstein} = G \cdot \frac{4 \cdot m_{Sol}}{c^2 \cdot r_{Sol}} = 1.75 \text{arcsec} = 1.75''$$

Este valor se ha verificado y confirmado experimentalmente en varias ocasiones. La consecuencia es que la teoría de la gravedad de Newton debe ampliarse para objetos que se mueven a grandes velocidades (hasta cerca de la velocidad de la luz) o masas muy grandes, como las de las estrellas.

Los próximos cursos se dedicarán a esta particularidad y otros fenómenos. Como introducción, se utilizará la teoría especial de la relatividad de Albert Einstein, es decir, el estudio de los sistemas sin aceleración, seguida de la relatividad general, que describe los sistemas acelerados. Para facilitar la tarea de entenderla, se utilizarán modelos sencillos y también interpretaciones alternativas.

Agujero negro (1)

El ángulo de desviación es una función de la masa y de la distancia de su superficie. A partir de esto, se puede deducir que, si la masa es suficientemente grande y el diámetro es pequeño, es decir, la densidad es muy alta, un haz de luz puede girar alrededor de esta masa o, en el caso extremo, no puede escapar de la masa. Los objetos con esta propiedad se denominan, por tanto, agujeros negros. Esta situación extrema puede calcularse mediante la igualdad de la energía cinética con la energía potencial de una masa de prueba m según la teoría de la gravitación de Newton.

$$F_{\text{gravitación Newton}} = G \cdot \frac{M \cdot m}{r_{\text{superficie}}^2}$$

G : constante de gravitación

r : distancia desde el centro

$$\text{Energía} = E = \int_{\text{superficie}}^{\infty} G \cdot \frac{M \cdot m}{r_{\text{superficie}}^2} dr = G \cdot \frac{M \cdot m}{r_{\text{superficie}}}$$

Agujero negro (2)

Igualando esto con la energía cinética se obtiene la velocidad de escape v .

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = G \cdot \frac{M \cdot m}{r_{superficie}}$$
$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot G \cdot M}{r_{superficie}}}$$

La mayor velocidad posible es la velocidad de la luz c .

Si la luz ya no puede escapar de una masa, resulta para su radio:

$$r_{agujero\ negro} = \frac{2 \cdot G \cdot M}{c^2}$$

En el caso del Sol, esto se traduciría en que toda la masa tendría que contraerse a una esfera con un radio de 2.95 km.

En lugar de aplicar la teoría de Newton, hay que realizar consideraciones más precisas utilizando la teoría general de la relatividad de Einstein.

Este tema se profundizará en un curso posterior.

Trayectorias de la luz cerca de masas de densidad extrema

La inclinación de los rayos de luz al pasar cerca de una masa depende de su tamaño y de la distancia de su centro. En el caso de los llamados agujeros negros (independientemente de que existan o no), la inclinación de los rayos de luz es tan fuerte que, además de la superficie frontal, también se hace visible parte de la superficie trasera en una cierta distancia de la superficie real del agujero negro.

Albert Einstein utilizó una relación geométrico-gravitatoria para describir la propagación de la luz en el universo.

También examinó una teoría alternativa de la desviación de la luz con una relación óptico-gravitatoria. La base es el principio de Fermat, que es aplicable a las ondas en general. Esto evitaría una inimaginable curvatura cuatridimensional del espacio con otras numerosas consecuencias.

